



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA, EN
TELECOMUNICACIONES

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

TEMA: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE ALGORITMOS
ADAPTATIVOS EN UN ARREGLO SEMIESFÉRICO DE
MICRÓFONOS UTILIZANDO LA METODOLOGÍA DE
BEAMFORMING PARA UN MEDIO NO ESTACIONARIO

AUTOR: TORRES VÁSQUEZ, ANDRÉS FERNANDO

DIRECTOR: ING. BERNAL, PAUL

SANGOLQUÍ

2016

CERTIFICACIÓN



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE ALGORITMOS ADAPTATIVOS EN UN ARREGLO SEMIESFÉRICO DE MICRÓFONOS UTILIZANDO LA METODOLOGÍA DE BEAMFORMING PARA UN MEDIO NO ESTACIONARIO” realizado por el señor **ANDRÉS FERNANDO TORRES VÁSQUEZ**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor **ANDRÉS FERNANDO TORRES VÁSQUEZ** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 26 de Septiembre del 2016

Ing. Paúl Bernal

DIRECTOR (S)

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **ANDRÉS FERNANDO TORRES VÁSQUEZ**, con cédula de identidad N° 1719928838 declaro que este trabajo de titulación **“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE ALGORITMOS ADAPTATIVOS EN UN ARREGLO SEMIESFÉRICO DE MICRÓFONOS UTILIZANDO LA METODOLOGÍA DE BEAMFORMING PARA UN MEDIO NO ESTACIONARIO”** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 26 de Septiembre del 2016



ANDRÉS FERNANDO TORRES VÁSQUEZ

C.C.: 1719928838

AUTORIZACIÓN

AUTORIZACIÓN



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, **ANDRÉS FERNANDO TORRES VÁSQUEZ**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación **“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE ALGORITMOS ADAPTATIVOS EN UN ARREGLO SEMIESFÉRICO DE MICRÓFONOS UTILIZANDO LA METODOLOGÍA DE BEAMFORMING PARA UN MEDIO NO ESTACIONARIO”** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 26 de Septiembre del 2016

ANDRÉS FERNANDO TORRES VÁSQUEZ

C.C.: 1719928838

DEDICATORIA

A Dios y a la Madre Dolorosa.

Por darme la sabiduría y fuerza para culminar esta etapa académica.

A mi familia que siempre me ha apoyado, en especial a mis padres quienes con su amor, paciencia y apoyo incondicional han sido el pilar de mi vida.

A mi Carito quien supo ser mi soporte y guía en cada momento.

Andrés Fernando Torres Vásquez

AGRADECIMIENTO

A Dios, a quien debo lo que soy y lo que tengo. A mis padres, por haberme entregado cada día su apoyo incondicional el cual me ha servido en el cumplimiento de todas mis metas personales y profesionales...

A mis hermanas por su apoyo y preocupación constante, inspirándome cada día a estudiar más y ser mejor en lo que hago. A mis sobrinos Antonella, Camila y Sebastián por ser quienes alegran mi vida en todo momento.

A mi Carito por ser la persona que siempre estuvo en todo momento, por haberme apoyado cuando más lo necesitaba y principalmente por siempre impulsarme a ser mejor cada día.

A mi Director, colaboradores e Instructores; el Ing. Paul Bernal y al Ing. Fabián Sáenz por su apoyo incondicional y enseñanzas para la realización y culminación de este trabajo.

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN.....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
CAPÍTULO I.....	15
1. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1. Justificación e Importancia.....	15
1.2. Alcance.....	17
1.3. Objetivos.....	18
1.3.1. General.....	18
1.3.2. Específicos.....	18
CAPÍTULO II.....	19
2. FUNDAMENTO TEÓRICA Y CONCEPTUAL.....	19
2.1. La Voz.....	19
2.2. Propiedades de las señales de voz.....	20
2.3. Sensibilidad del oído.....	24
2.4. Campo de audibilidad (esquema).....	24
2.5. Intensidad Sonora.....	25
2.6. Conformación del Lóbulo de Irradiación.....	25

2.7. Beamforming	27
2.7.1. Clasificación de <i>Beamformers</i>	27
2.7.2. Tipos de <i>Beamforming</i>	28
2.7.3. Puntos más destacados de <i>Beamforming</i>	31
2.7.4. Arreglo de sensores	31
2.7.5. Modo de Mando	33
2.7.6. Consideración de campo lejano y campo cercano	33
2.7.7. Desfase de los Cursores	35
2.8. Algoritmos adaptativos LCMV	35
2.8.1. La Estructura Householder.....	37
2.8.2. <i>Householder</i> NCLMS	38
2.8.3. <i>Householder</i> CCG.....	39
CAPÍTULO III	40
3. PRUEBAS CON UN TONO PURO	40
3.1. Introducción	40
3.2. Tono Puro	42
3.2.1. Sonidos Periódicos y Tonos Puros.....	42
3.3. Descripción de Geometría	43
3.4. Amplificación	45
3.4.1. Construcción del Circuito interfaz de los micrófonos Mems.....	45
3.5. Respuesta de los Micrófonos en Frecuencia.....	46
3.6. Compensación de retardos en los micrófonos	47
3.7. Análisis de datos según la geometría.....	48
3.7.1. CCG.....	48
3.7.2. Análisis MSE vs Distancia.....	49
3.7.3. Análisis MSE vs Forgetting Factor	54
3.8. HNLMS	59

3.8.1. Análisis MSE vs STEP SIZE	65
3.9. Generación de Fórmula.....	70
3.10. Pasos de adaptación para los algoritmos CCG y HNLMS	73
CAPÍTULO IV.....	75
4. PRUEBAS DE RECORRIDO EN LA GEOMETRÍA.....	75
4.1. Pruebas con todo puro.....	75
4.1.1. Pruebas con el algoritmo CCG con un tono puro	75
4.1.2. Pruebas con el algoritmo HNLMS para tono puro.....	76
4.1.3. Pruebas de recorrido en la geom. con tono puro.....	77
4.2. Pruebas con tonos de voz.....	79
4.2.1. Pruebas con el algoritmo CCG para tono de voz	79
4.2.2. Pruebas con el algoritmo HNLMS para tono de voz	79
4.2.3. Pruebas de recorrido en la geom. con tono de voz.....	80
CAPÍTULO V	84
5. CONCLUSIONES & RECOMENDACIONES.....	84
5.1. Conclusiones.....	84
5.2. Recomendaciones	86
REFERENCIAS	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Algoritmo HNCLMS.....	38
Tabla 2. Algoritmo HCCG.	39
Tabla 3. Algoritmo CCG - Mejores resultados.	73
Tabla 4. Algoritmo HNLMS - Mejores resultados.....	73
Tabla 5. Resultados pruebas tono puro – Algoritmo CCG para $\lambda=0.99937$	75
Tabla 6. Resultados pruebas tono puro - Algoritmo HNLMS para $\mu=0.348$	76
Tabla 7. MSE – Recorrido en geometría con tono puro.....	77
Tabla 8. Resultados pruebas tono de voz - Algoritmo CCG para $\lambda=0.99937$	79
Tabla 9. Resultados pruebas tono de voz - Algoritmo HNLMS para $\mu=0.348$...	80
Tabla 10. Recorrido en geometría con tono de voz.....	81
Tabla 11. Valores promedio de MSE.	82
Tabla 12. Datos Tono Puro P6 yP8.	80
Tabla 13. Datos Tono de Voz P6 yP8.	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tramo de señal de voz sonoro en el tiempo y en la frecuencia.	21
Figura 2. Envolvente de una señal de voz con sus 3 primeros formantes.....	21
Figura 3. Tramo de señal de voz no sonoro en el tiempo y en la frecuencia.	22
Figura 4. Diagrama de bloques simplificado del modelo de producción de voz.	23
Figura 5. Campo de audibilidad.	24
Figura 6. Narrowband Beamforming.	29
Figura 7. Broadband Beamforming.....	30
Figura 8. Arreglo Lineal Uniforme ULA.....	33
Figura 9. Frente de onda esférica para una bocina.	34
Figura 10. Arreglo Semiesférico.	35
Figura 11. Estructura de Beamforming Adaptativo Broadband.....	36
Figura 12. Ruido Blanco o Gaussiano.	41
Figura 13. Dos sonidos periódicos	43
Figura 14. Un tono puro (onda senoidal). Se muestran tres ciclos.	43
Figura 15. Geometría.	44
Figura 16. Etapa de amplificación por micrófono.	46
Figura 17. Respuesta de los Micrófonos en Frecuencia para un Arreglo ULA.	46
Figura 18. Respuesta Compensada de los Mic. en Frec. para un Arreglo ULA.	48
Figura 19. MSE del algoritmo CCG vs la distancia a un ángulo de 0°	49
Figura 20. MSE del algoritmo CCG vs la distancia a un ángulo de 45°	50
Figura 21. MSE del algoritmo CCG vs la distancia a un ángulo de 90°	51
Figura 22. MSE del algoritmo CCG vs la distancia a un ángulo de 135°	53
Figura 23. MSE del algoritmo CCG vs la distancia a un ángulo de 180°	54
Figura 24. MSE del algoritmo CCG vs Forgetting factor a un ángulo de 0°	55
Figura 25. MSE del algoritmo CCG vs Forgetting factor a un ángulo de 0°	56
Figura 26. MSE del algoritmo CCG vs Forgetting factor a un ángulo de 90°	57
Figura 27. MSE del algoritmo CCG vs Forgetting factor a un ángulo de 135°	58
Figura 28. MSE del algoritmo CCG vs Forgetting factor a un ángulo de 180°	59
Figura 29. MSE del algoritmo HNLMS vs la distancia a un ángulo de 0°	61
Figura 30. MSE del algoritmo HNLMS vs la distancia a un ángulo de 45°	62
Figura 31. MSE del algoritmo HNLMS vs la distancia a un ángulo de 90°	63

Figura 32. MSE del algoritmo HNLMS vs la distancia a un ángulo de 135°	64
Figura 33. MSE del algoritmo HNLMS vs la distancia a un ángulo de 180°	65
Figura 34. MSE del algoritmo HNLMS vs Step size a un ángulo de 0°	66
Figura 35. MSE del algoritmo HNLMS vs Step size a un ángulo de 45°	67
Figura 36. MSE del algoritmo HNLMS vs Step size a un ángulo de 90°	68
Figura 37. MSE del algoritmo HNLMS vs Step size a un ángulo de 135°	69
Figura 38. MSE del algoritmo HNLMS vs Step size a un ángulo de 180°	70
Figura 39. CCG - Aproximación MSE vs λ – Polinomio 5to grado.....	71
Figura 40. HNLMS - Aproximación MSE vs λ – Polinomio 5to grado.....	71
Figura 41. Recorrido de pruebas en la geometría.	77
Figura 42. CCG vs HNLMS – Tono puro.....	78
Figura 43. CCG vs HNLMS – Tono de Voz.....	82

RESUMEN

La investigación de las señales de voz es un tópico relevante, al ser la principal forma de comunicación e interacción entre los seres humanos. A partir de este principio y el hecho de que una parte significativa de la sociedad muestra algún tipo de discapacidad auditiva, se busca a través del presente análisis de comportamiento de algoritmos adaptativos ayudar y permitir la inclusión de individuos con conflictos de audición, mediante el realzado de voz; haciendo uso de un arreglo semiesférico de micrófonos con la metodología de *beamforming* de banda ancha y la Dirección de ángulo de Arribo de una señal (DOA), en donde se podrá distinguir señales que arriban de diferentes direcciones, permitiendo captar con mejor condición el campo del sonido. El presente análisis dio continuidad a los estudios previos aportando mediciones y resultados en los que se muestre el comportamiento de un canal no estacionario en un ambiente indoor, donde será de primordial importancia para una persona con discapacidad auditiva receptor adecuadamente la información del expositor para una correcto entendimiento. Se analizó el desempeño de los mismos mediante la precisión finita, puesto que la implementación práctica en procesadores digitales de señales está limitada por el número de bits utilizados en los cálculos matemáticos internos de la tarjeta NI myRIO. Con los algoritmos ya implementados en la tarjeta se continuó con un análisis profundo para a través de pruebas y resultados determinar cuál algoritmo es el más óptimo y finalmente obtener las conclusiones y recomendaciones generadas en la presente investigación.

PALABRAS CLAVE:

- **BEAMFORMING**
- **DIRECTION OF ARRIVAL**
- **ALOGARITMOS ADAPTATIVOS**
- **PRESICION FINITA**
- **MAT VIEW**

ABSTRACT

The study of voice signals is an important issue, being the main form of communication and interaction between humans. From this factor and the fact that a significant part of society has some kind of auditory impairment is sought through this behavioral analysis of adaptive algorithms help and allow the inclusion of individuals with hearing problems, through enhanced voice; using a hemispherical array microphones methodology beamforming broadband and direction of arrival of a signal (DOA), where you can distinguish signals arriving from different directions, and present a better adaptation to the human anatomy, allowing capture better sound field condition. The present analysis will give continuity to the previous studies contributing measurements and results in which the behavior of a non-stationary channel is shown in an indoor environment, where it will perform basic importance for a person with auditory disability receiving adequately the information of the exhibitor for one correct understanding. Performance thereof will be analyzed by finite precision since practical implementation in digital signal processors is limited by the number of bits that can be used in mathematical calculations internal card NI Myrio programming device. With the card already implemented based on previous studies will continue with a thorough analysis through testing and results determine which algorithm is the most optimal and finally get the conclusions and recommendations generated in this investigation.

KEYWORDS:

- **BEAMFORMING**
- **FINITE PRECISION**
- **DIRECTION OF ARRIVAL**
- **ADAPTATIVE ALGORITHMS**
- **MAT VIEW**

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación e Importancia

La Constitución de la República (2008), el Plan Nacional para el Buen Vivir 2013-2017, la Convención Interamericana para la Eliminación de todas las Formas de Discriminación Contra las Personas con Discapacidad, y la Convención sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad (Equipo Técnico del Consejo Nacional de Discapacidades, 2013), plantean estrategias de respuesta amplias e integrales, tanto para el corto como para el mediano plazo, desarrollar aplicaciones tecnológicas que ayuden a contribuir en la construcción de una sociedad inclusiva, mejorando así la calidad de vida de personas con discapacidad. Por lo que se impulsa en universidades a nivel nacional la generación de proyectos de investigación con un enfoque de ayuda social.

En el Ecuador, de las personas que presentan cierto tipo de discapacidad, el 15% son de tipo auditivas (Ministerio de Salud Pública, 2015). Por lo que resulta imperativo enfocar el desarrollo de estudios que mejoren la calidad de vida de personas con este tipo de discapacidad, permitiendo así minimizar la dificultad de entender conversaciones en ambientes ruidosos, seguir instrucciones que pueden afectar en su desarrollo personal y entablar una comunicación efectiva.

Dado que la tecnología digital brinda una gran apertura para diseñar e implementar sencillamente nuevos algoritmos de procesamiento de la señal, algunas estrategias sofisticadas como micrófonos digitales direccionales adaptativos y los sofisticados esquemas de supresión de ruido están siendo desarrolladas (Kühnel, 2008).

El análisis y estudio de las señales de voz es un tema de valor, ya que un fragmento de la sociedad exterioriza cierto tipo de discapacidad auditiva. Por lo que se realizó una indagación que permita ayudar a personas con dificultades auditivas, mediante el

realizado de la voz; haciendo uso de un arreglo semiesférico de micrófonos con la metodología de *beamforming* de banda ancha, los cuales pueden diferenciar señales que arriban de distintas direcciones. Se utilizó un arreglo semiesférico de micrófonos que se adecúa mejor a la anatomía humana, lo cual permitió atraer de mejor manera el campo del sonido, como se estudió en el proyecto de titulación (Caisapanta T. , 2015).

El *beamforming* es una técnica de DSP en la que se origina una mejora de la señal principal, mediante combinaciones lineales de las diferentes salidas de cada uno de los sensores del arreglo semiesférico de micrófonos, de tal manera que las perturbaciones indeseadas se disminuyen por el fenómeno de la directividad o selectividad espacial del arreglo (Martínez, Técnicas de procesado en array para realizado de voz, 2008).

Si bien por sí solo los arreglos de sensores son simples elementos pasivos sin ningún elemento activo; a la salida del arreglo se conectó un procesador digital de señales para procesar, discriminar y mejorar la señal de llegada, para lo cual se utiliza algoritmos que se encargan de realizar tales tareas (Yang W. Y., 2012).

Todos los algoritmos tienen cualidades y defectos como es el caso del costo computacional, velocidad de convergencia, inmunidad al ruido, tipo de implementación para el hardware, etc. (Caisapanta A. , 2015).

Los algoritmos adaptativos LCMV se dividen en tres familias: *Linearly Constrained* como es el caso de los CLMS (*Constrained Least Mean Square*), entre otros. Además los algoritmos de estructura GSC (*Generalized Side lobe Canceler*) que permite que cualquier algoritmo *unconstrained* pueda ser empleado como *constrained*. Por último se tiene los de estructura *Householder* que mediante la matriz \mathbf{Q} y sus reflectores de *Householder* cumple como el GSC pero computacionalmente son más eficiente (JR, 2009).

En el proyecto de titulación (Caisapanta A. , 2015) se realizó un estudio donde se utilizó los algoritmos adaptativos de la familia *Householder* con los algoritmos *unconstrained* NLMS (*Normalized Least Mean Squares*) y CG (*Conjugate Gradient*).

Además se observó que el algoritmo HNCLMS (*Householder Normalized Constrained Least Mean Squares*) posee una lenta velocidad de convergencia versus al algoritmo HCCG (*Householder Constrained Conjugate Gradient*) que es de rápida convergencia. El costo computacional del algoritmo HNCLMS es menor en comparación al algoritmo HCCG.

Existe un segundo proyecto de titulación (Caisapanta T. , 2015), el cual toma en cuenta el costo computacional. En este proyecto se implementó los algoritmos adaptativos de la familia *Householder* con los algoritmos *unconstrained* NLMS (*Normalized Least Mean Squares*) y CG (*Conjugate Gradient*). Se analizó el desempeño de los mismos mediante la precisión finita puesto que la implementación práctica en procesadores digitales de señales, está limitada por el número de bits que pueden ser utilizados en los cálculos matemáticos internos de la tarjeta NI myRIO dispositivo de programación. Una vez implementado y desarrollado el programa en la tarjeta se analizaron los algoritmos en un medio estacionario.

De esta manera resulta de suma importancia dar continuidad a los proyectos de titulación previos, aportando con la realización de mediciones que permitan obtener resultados en los que se muestre el comportamiento de un canal no estacionario en un ambiente *indoor*, donde es de primordial importancia para una persona con discapacidad auditiva receptor adecuadamente la información del expositor para una correcto entendimiento.

1.2. Alcance

Teniendo como base los estudios ya realizados en proyectos de titulación previos (Caisapanta A. , 2015) (Caisapanta T. , 2015), se propone continuar con el análisis del desempeño y limitaciones de los algoritmos adaptativos en un arreglo semiesférico de micrófonos, pasando de un modelo estacionario a uno no estacionario.

Para la toma de datos en el lugar de reproducción se pretende ir variando la distancia y el ángulo de la fuente de interés con respecto al arreglo de sensores. Comprobando así el desempeño real de los algoritmos adaptativos implementados. Finalmente se realizará un análisis de los datos obtenidos en este proyecto.

Para el arreglo semiesférico de sensores se utilizará cuatro micrófonos MEMS ADMP504 conectados a una tarjeta FPGA (*Field Programmable Gate Array*) de la marca NI myRIO 1900 en la que se procesa la respuesta de los algoritmos adaptativos LCMV de la familia *Householder* utilizando los algoritmos *unconstrained* NLMS y CG.

Se utilizará la herramienta de simulación Matlab® para poder analizar el desempeño de los algoritmos HCNLMS y HCCG, variando sus respectivos parámetros de adaptación, tratando de optimizar sus desempeños a fin de obtener una rápida convergencia sin comprometer el *Mean Square* (MSE).

1.3. Objetivos

1.3.1. General

- Determinar el desempeño de los algoritmos adaptativos más eficientes variando la posición de la fuente emisora mediante un dispositivo NI myRIO-1990 para un arreglo semiesférico de micrófonos en un ambiente no estacionario.

1.3.2. Específicos

- Verificar el desempeño de los algoritmos adaptativos LCMV.
- Calibrar los parámetros necesarios mediante pruebas para una adecuada convergencia de los algoritmos.
- Analizar los parámetros y valores obtenidos al realizar mediciones variando la posición entre el arreglo de micrófonos y la fuente.
- Documentar la investigación realizada.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTO TEÓRICA Y CONCEPTUAL

2.1. La Voz

La voz es una expresión que proviene del latín *vox* y que reconoce al sonido que se origina con la vibración de las cuerdas vocales mediante el aire que es expulsado por los pulmones y que sale por la laringe. Este término acreditado como voz es la forma vital de expresión y comunicación del ser humano, pues la función de la voz como medio de comunicación origina importantes efectos, ya que las vibraciones de la voz son capaces de conmover y de emocionar a toda una audiencia (Miyara, 2000).

La voz humana es la representación en la que se plasma los pensamientos y se permite transmitir las emociones, siendo este el proceso por el cual la voz comienza con el pensamiento de un mensaje simbolizado de forma abstracta en el cerebro del locutor y a través del complejo proceso de producción de la voz, la información se convierte en última instancia en una señal acústica (Lawrence Rabiner, 2011).

La voz se distingue por ser la emulsión o combinación de varias frecuencias con sus correspondientes armónicos. No obstante, a comparación del rango completo de la audición humana que va a partir de los 20 Hz a los 20 KHz, la voz cubre un rango relativamente estrecho de frecuencias entre 100 Hz hasta 6 KHz (Nadeu, 2004).

A partir de lo establecido cabe señalar que la voz es una señal no estacionaria, pero se la puede asumir mediante ventanas como localmente estacionaria. Sin embargo es importante enfatizar que las ventanas deben ser entre 20 ms a 30 ms puestos que son las más adecuadas para la mayoría de las aplicaciones (Miyara, 2000).

El procesamiento de las señales de voz, para diversas aplicaciones, está relacionado al análisis de sus características significativas, como por ejemplo podemos citar al *pitch* (tono fundamental o frecuencia de vibración de las cuerdas vocales) y los formantes (picos del espectro de un sonido sonoro). La voz masculina posee un *pitch*

entre 100 *Hz* y 200 *Hz* y la voz femenina típicamente se encuentra entre 150 *Hz* y 600 *Hz* (Hernández, 2005).

Según lo mencionado es relevante enfatizar el hecho que el procesamiento digital de señales de voz, es un tema de índole interdisciplinario que involucra la fonética, fisiología, acústica, entre otras disciplinas, además de la teoría del procesamiento digital de señales (Caisapanta T. , 2015); siendo este último el que mayor avance ha tenido debido al desarrollo de la tecnología de los procesadores de señales digitales, encontrándose innumerables aplicaciones en la vida moderna ya sea en la codificación, reconocimiento o síntesis de la voz.

2.2. Propiedades de las señales de voz

Analizando a profundidad lo mencionado en línea previas se enfatiza que las señales de voz se identifican por ser no estacionarias y con variaciones pausadas y en ocasiones bastante lentas en el dominio del tiempo y se procesan normalmente en segmentos de tiempo cortos, entre 5 *ms* y 30 *ms* (Hernández, 2005). “En estos segmentos la señal puede aproximarse a una señal cuasiperiódica, es decir, cada segmento o trama puede ser clasificado como sonoro, no sonoro o silencio” (Hernández, 2005):

1. Los sonidos sonoros poseen una propiedad cuasiperiódica en el dominio del tiempo y una estructura armónica fina en el dominio de la frecuencia, generada por la vibración de las cuerdas vocales. Asimismo, su espectro desciende hacia altas frecuencias y su energía es alta debido a que el aire encuentra poca dificultad al pasar por el tracto vocal. Estas características pueden identificarse en la Figura 1 (Hernández, 2005).

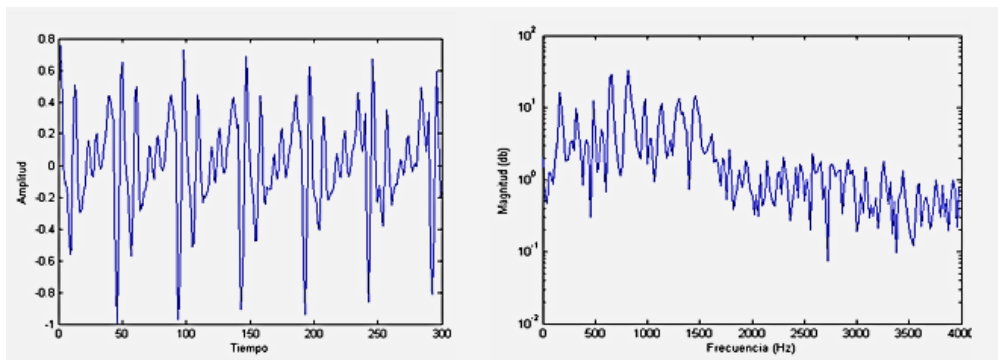


Figura 1. Tramo de señal de voz sonoro en el tiempo y en la frecuencia.

“Estos sonidos radican en una frecuencia fundamental (frecuencia de *pitch*) y en una serie de elementos armónicos de la misma, producidos por las cuerdas vocales. El tracto vocal modifica la señal de excitación provocando frecuencias formantes (ceros). Los formantes son las frecuencias de resonancia del espectro, es decir, los picos de la envolvente del espectro de la señal de voz que constituyen las frecuencias de resonancia del tracto vocal. Cada formante tiene una amplitud y un ancho de banda” (Hernández, 2005).

La frecuencia elemental y las frecuencias de los formantes son probablemente los conceptos más importantes para la síntesis y procesamiento de la voz (Urabayen Cerviño, 2012).

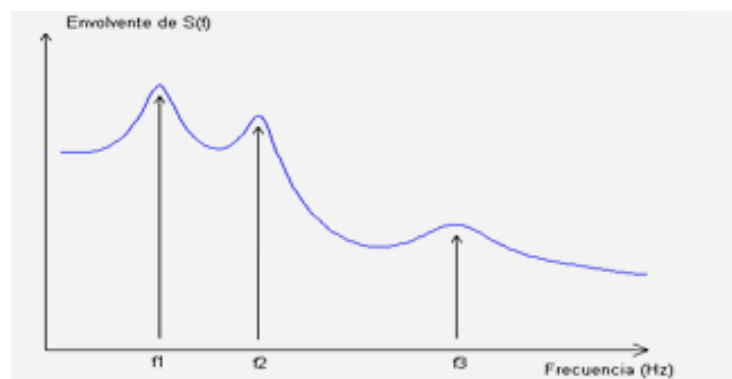


Figura 2. Envolvente de una señal de voz con sus 3 primeros formantes.

Las frecuencias a las que se originan los iniciales formantes son relevantes para registrar o sintetizar la voz. En la Figura 2 se pueden distinguir representados los 3 primeros formantes de una señal de voz (Hernández, 2005).

2. Los sonidos no sonoros poseen una distribución típica aleatoria, sin periodicidades manifiestas en el dominio del tiempo y un espectro cuantioso compensado en frecuencia (tiene un espectro de banda ancha). En cuanto a su energía es posible evidenciar que es considerablemente inferior debido a la presencia de obstrucciones en el tracto vocal (Hernández, 2005).

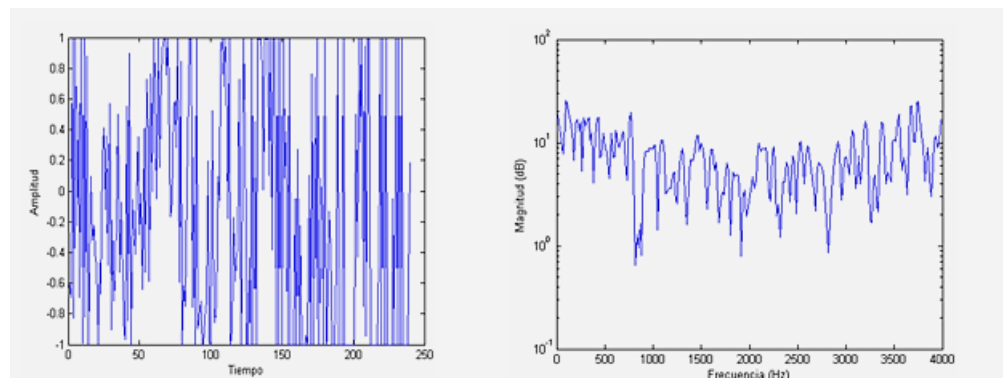


Figura 3. Tramo de señal de voz no sonoro en el tiempo y en la frecuencia.

Un segmento que no es resultado de la acción vocal se denomina como silencio. “En telefonía, aproximadamente el 50 % del tiempo de conversación es silencio. Este hecho se utiliza en algunos sistemas celulares para aumentar la eficiencia del ancho de banda del canal usando detectores de actividad vocal” (Hernández, 2005).

En concreto, se establece que un sistema de fabricación de voz como se muestra en la Figura 4, donde se consigue ajustar con un modelo de sistema-fuente, que es un sistema lineal alimentado por una fuente de excitación. En un acercamiento de segundo orden, la excitación es un tren de pulsos para los segmentos sonoros y ruido blanco para los no sonoros (Urabayen Cerviño, 2012).

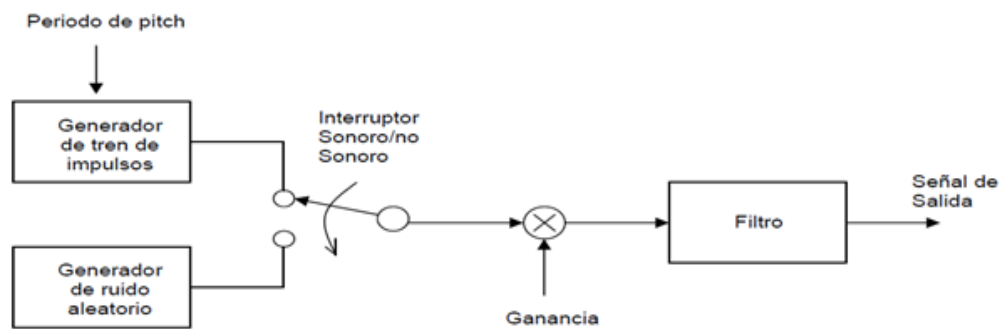


Figura 4. Diagrama de bloques simplificado del modelo de producción de voz.

“El periodo de cuasi periodicidad de los segmentos sonoros se determinan por un ciclo de *pitch* en el dominio del tiempo, o *pitch*, o frecuencia fundamental en el dominio de la frecuencia. Este *pitch* es un parámetro fundamental y relevante para algunos algoritmos de codificación de voz” (Hernández, 2005).

“Se puede identificar como la periodicidad de los picos de la amplitud en la forma de onda y la estructura fina del espectro. Las frecuencias de *pitch* de hombres y mujeres normalmente se encuentran en el rango $50 - 250 \text{ Hz}$ ($4 - 20 \text{ ms}$) y $120 - 500 \text{ Hz}$ ($2 - 8,3 \text{ ms}$), respectivamente como ya se lo había mencionado previamente” (Hernández, 2005).

El ancho de banda de la señal de voz inusualmente sobre pasa de los 8 kHz . Siendo en la codificación de voz para banda ancha, este limitado a 7 kHz , y la voz es muestreada a 16 kHz . No obstante cabe señalar que en telefonía, “el ancho de banda está limitado a 4 kHz ($0.2 - 3.4 \text{ kHz}$, normalmente) y la voz es muestreada, generalmente, a 8 kHz ” (Hernández, 2005). Es factible evidenciar lo señalado al observar como ejemplo las Figuras 2 (en el dominio de la frecuencia) y 3, donde se puede distinguir cómo los 3 iniciales formantes están dentro del ancho del canal telefónico; a no ser que la frecuencia fundamental quede externamente al canal telefónico, siendo el sistema de audición humano capaz de restaurarlo a partir de sus elementos integrales (Richard Cox, 1996).

La eficacia de la señal de voz codificada logra catalogarse en 4 clases: BROADCAST calidad para comunicaciones en banda ancha, calidad TOLL o de red para señales analógicas (telefonía), de comunicación (señales degradadas pero naturales e inteligibles) y calidad sintética (señales poco naturales pero inteligibles, constituidas por los codificadores lineales predictivos (LPC) o vocoders) (Hernández, 2005).

2.3. Sensibilidad del oído

A partir de lo expuesto previamente se hace referencia a un oído estándar, “el cual sólo puede apreciar una onda sinusoidal si la frecuencia de la misma se halla comprendida entre 15 y 20.000 Hz aproximadamente” (Matras, 2003).

Por su parte cabe señalar que se conoce como “umbral de audibilidad a la curva que para cada frecuencia, da la energía expresada en watts, a partir de la cual el sonido se vuelve audible” (Matras, 2003), lo cual se muestra en la Figura 5.

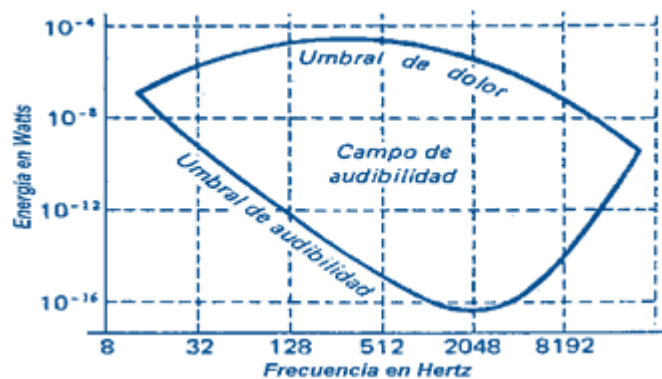


Figura 5. Campo de audibilidad.

2.4. Campo de audibilidad (esquema)

El termino umbral del dolor revela la energía a partir de la cual el oído ya no experimenta una sensibilidad sonora, por el contrario hace referencia a una alteración dolorosa. “Estos dos umbrales limitan una zona del plano energía-frecuencia, llamado

campo de audibilidad del oído. El valor absoluto de los umbrales, como su separación entre sí, varían considerablemente según la frecuencia: es con relación a las frecuencias medias, 500 Hz a 5000 Hz, cuando el oído es más sensible (umbral de audibilidad muy bajo) y muestra a la vez una zona de audibilidad (distancia entre los umbrales) máxima” (Matras, 2003).

2.5. Intensidad Sonora

La intensidad sonora es un vector que refiere la cantidad, orientación y trayectoria del flujo de energía acústica en una posición específica, siendo su unidad W/m. En un medio sin un flujo considerable, la intensidad sonora es equivalente al promedio en el tiempo del producto de la velocidad de partículas instantánea y la presión instantánea en la misma posición (Henríquez, 2016).

$$I = \overline{p \cdot u} \quad (1)$$

Dónde:

I : Intensidad sonora.

p : Presión sonora.

u : Velocidad de partículas..

2.6. Conformación del Lóbulo de Irradiación

Las técnicas de conformación del haz, *beamforming*, permiten la combinación de diferentes formas de acceso múltiple dentro de una misma área de cobertura, desempeñando un papel de gran importancia para la optimización del uso de recursos disponibles del canal de comunicaciones (Zwicker, 1999).

El término conformación del haz viene de un hecho de la antigüedad; los filtros espaciales eran diseñados para formar diagramas de irradiación con alta directividad, de este modo anulan las señales provenientes de direcciones que no corresponden a la fuente deseada (Marcos H. Maruo, 2015).

Los filtros temporales no son capaces de efectuar la distinción completa de la información deseada cuando la señal de interés y sus interferencias ocupan la misma banda de frecuencia, este es el caso de sistemas trazados para señales de diferentes localidades que generalmente se encuentren con la presencia de señales que son consideradas indeseadas.

Sin embargo, el hecho que las señales están siendo generadas en diferentes posiciones espaciales puede ser usado para privilegiar una dirección de interés y minimizar el efecto de las interferencias (Zwicker, 1999).

La técnica del *beamforming* utiliza a los filtros espaciales, los cuales combinan linealmente las muestras que ingresan por cada sensor y producen una salida escalar en el tiempo. Existen algunas ventajas del filtraje espacial con arreglo de sensores, que se detallan a continuación:

- Con el propósito de conservar la validez de la supresión de las señales de interferencia, el cambio de los parámetros del filtro en tiempo real se vuelve indispensable, por eso la versatilidad, es una característica indispensable. Esta característica es fácilmente alcanzada con la implementación de un arreglo de sensores y un DSP que sea idóneo para el cambio del vector de pesos (Henríquez, 2016).
- El desempeño de los sistemas que emplean múltiples receptores puede ser optimizado si toda la información que incide sobre el arreglo está disponible para el procesamiento.
- Se puede asegurar que todos los enlaces establecidos operen con ganancia máxima debido a que el direccionamiento del haz es hecho completamente vía software; diferentes los lóbulos pueden ser atribuidos para los usuarios en tiempo real (JR, 2009).
- Uno de los objetivos de los *beamformers* es obtener un sensor fijo cuyo diagrama de irradiación sea controlado electrónicamente. Esta solución puede ser usada tanto en la transmisión como en la recepción.

- En un *beamformer* estadísticamente óptimo, los patrones son controlados para minimizar la función de costo.

2.7. Beamforming

La palabra *beamforming* proviene de los primeros filtros espaciales, ya que estos fueron diseñados para formar “rayos” (o en inglés: *beams*) en forma de lápices con el fin de recibir una señal de una dirección determinada y disminuir señales de otras direcciones. “El “formar rayos” parece indicar radiación de energía, sin embargo, las técnicas de *beamforming* son aplicables tanto a radiación como a recepción de energía” (Pepe, 2004).

Beamforming, también llamado Filtraje espacial es un procesamiento de señal, el cual se caracteriza por la técnica utilizada en redes de sensores para la transmisión de señal direccional o recepción. Esta técnica utiliza un arreglo de sensores; donde se estima la señal vital a través de combinaciones lineales de las distintas salidas de cada uno de los sensores del arreglo, de tal modo que las perturbaciones indeseadas que vienen de diferentes direcciones disminuyan por el fenómeno de la directividad o selectividad espacial del arreglo (Tolomeo, 2009).

Esto se consigue mediante la combinación de elementos en una matriz en fase de tal manera que las señales en ángulos particulares experimentan constructiva interferencia mientras que otras experimentan interferencia destructiva. *Beamforming* se puede utilizar tanto en la transmisión y recepción de extremos con el fin de lograr la selectividad espacial (Giovanetti, 2008). La mejora en comparación con omnidireccional de recepción / transmisión se conoce como la directividad del elemento (Van Veen, Abril 1988).

2.7.1. Clasificación de *Beamformers*

Los *beamformers* merecen ser catalogados en independientes de los datos o estadísticamente óptimos, obedeciendo al factor de cómo son elegidos los “pesos”. “Los pesos en un *beamformer* independiente de los datos no dependen de las tipologías de los datos adquiridos por el arreglo y pueden ser elegidos para presentar una respuesta específica para todos los escenarios señal/interferencia” (Pepe, 2004).

“Los pesos, en un *beamformer* estadísticamente óptimo, se eligen basándose en las estadísticas de los datos del arreglo para optimizar la respuesta del *beamformer*. En general el *beamformer* estadísticamente óptimo pone ceros en las direcciones de fuentes de interferencia para maximizar la relación señal-ruido (SNR) a la salida del *beamformers*” (Pepe, 2004).

Por su parte de igual manera existen técnicas adaptivas y parcialmente adaptivas de *beamforming*. Las Técnicas de diseño de *beamformers* independientes de los datos son prácticamente utilizadas en *beamformers* estadísticamente recomendables. Por otro lado las estadísticas de los datos del arreglo comúnmente no son conocidas y pueden modificar en el tiempo, por esta razón es que los algoritmos adaptivos son constantemente usados para establecer los pesos en estos casos (Hernández, 2005).

El algoritmo adaptivo es creado de manera que la respuesta del *beamformer* confluya a una medida estadísticamente óptima. “Los *beamformers* parcialmente adaptivos reducen la carga computacional del algoritmo adaptivo a expensas de una pérdida de optimización estadística” (Pepe, 2004).

2.7.2. Tipos de *Beamforming*

El *beamforming* se caracteriza por su división en dos tipologías: La primera conocida como “de banda angosta” (*Narrowband Beamforming*) y la segunda conocida como “de banda ancha” (*Broadband Beamforming*) (Madisetti, 2010).

- *Narrowband Beamforming*.- En la Figura 6 se observa este tipo de *Beamforming*, en donde las señales se muestrean únicamente en el espacio.

Este filtro es usado cuando las señales de interés son de banda angosta (*narrowband signals*). La salida del *narrowband beamforming* está representado por la ecuación 1 (William Andrés Cadavid, 2009) .

$$y[k] = \sum_{m=1}^M w_m x_m[k] \quad (2)$$

“Donde la salida $y[k]$ se encuentra en el tiempo discreto k y es dada por la combinación lineal de los datos de los M sensores en el tiempo k , w_m son los pesos (coeficientes del filtro) y $x_m[k]$ la señal a la salida de cada uno de los sensores” (William Andrés Cadavid, 2009).

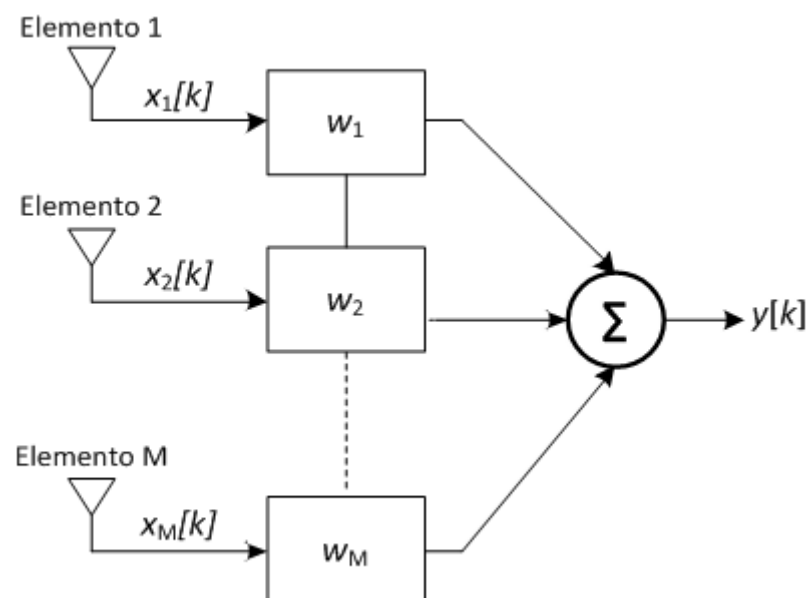


Figura 6. Narrowband Beamforming.

- *Broadband Beamforming.*- En este tipo de *beamforming* se puede evidenciar las señales en tiempo y espacio. Este mismo se maneja cuando la señal de interés tienen una amplia frecuencia (*broadband signals*). La salida está proporcionada por la ecuación señalada:

$$y[k] = \sum_{m=1}^M \sum_{i=0}^{N-1} w_{m,i} x_m[k - i] \quad (3)$$

“Donde $N - 1$ es el número de retardos que llegan en diferentes instantes a los M sensores” (Madisetti, 2010). En la Figura 7 se muestra este tipo de *beamforming*.

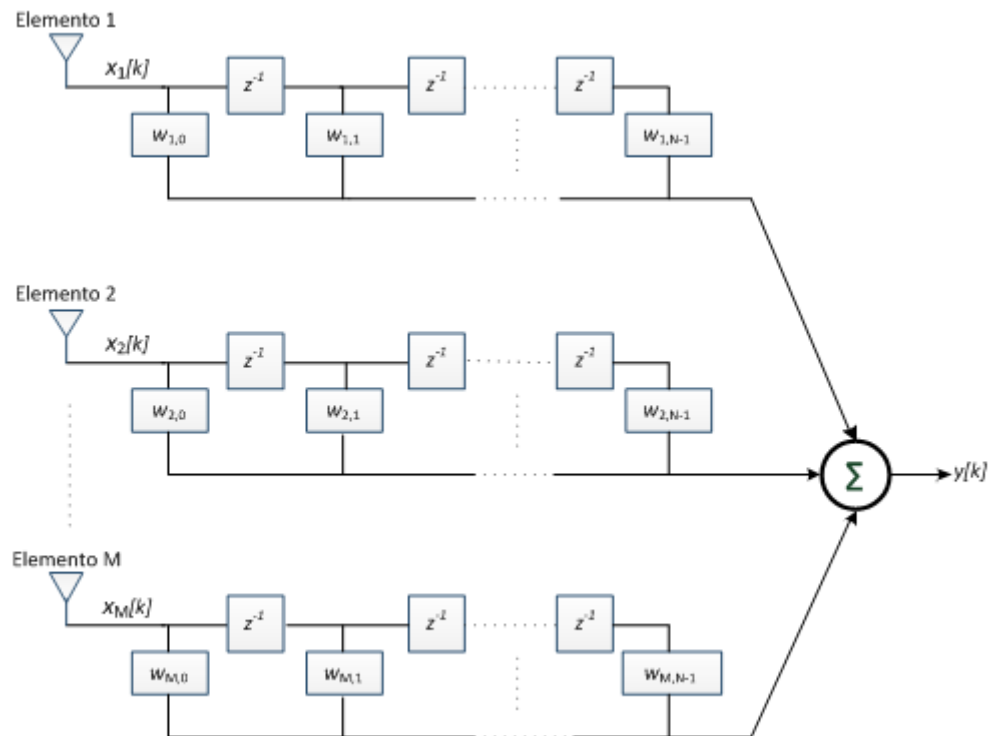


Figura 7. Broadband Beamforming.

“La salida del *Narrowband* y *Broadband Beamforming* se puede expresar en forma vectorial, como se puede observar en la siguiente ecuación” (Madisetti, 2010).

$$y[k] = \mathbf{w}^H \mathbf{x}[k] \quad (4)$$

Es importante concluir señalando que depende de la forma en que se estimen los pesos (coeficientes del filtro) se pueden tener dos categorías: *beamforming* fijo, en el cual los pesos que están asociados a cada sensor son fijos y el *beamforming* adaptativo, en donde los pesos son ajustados dinámicamente dependiendo de los datos recibidos. Es importante resaltar que este último surge cuando no se conoce las propiedades estadísticas de las señales y se emplea para el diseño las estadísticas recogidas en línea (Henríquez, 2016).

2.7.3. Puntos más destacados de *Beamforming*

Los puntos más destacados de *Beamforming* son los siguientes (Scalerandi, 2013):

- Sistematiza la señal enviada de cada antena, por lo cual los dispositivos finales ven mejorada de manera significativa la señal del enlace.
- Se opera cuando el receptor sólo tiene una antena.
- Muy aconsejable su uso en ambientes complejos y oficinas/residencias de más de dos pisos.
- Utiliza *Directional Sensing* y *Multi-Path* para alcanzar caminos más eficientes y mejor enfocados, disminuyendo los tiempos de envío/recepción de la señal y ofreciendo al mismo tiempo estabilidad en el enlace.
- Accede a un mayor ancho de banda.
- Mientras otros dispositivos sufren los efectos del rebote de señal, *Beamforming* los enriquece y combina adecuadamente hacia el cliente.

2.7.4. Arreglo de sensores

Un arreglo de sensores, es un conjunto de elementos isotrópicos distribuidos en una geometría establecida y son operados para alcanzar información a partir de los campos de ondas en algún medio sobre el cual se propagan. Los arreglos de sensores permiten que cada sensor tenga una mayor directividad y sensibilidad (Monzingo, 2011).

Los campos de ondas más comunes son (Tolomeo, 2009):

- Ondas acústicas que incluyen las ondas de sonido
- Ondas mecánicas en los sólidos y
- Ondas electromagnéticas

Con los arreglos de sensores se pueden realizar algunas aplicaciones como (Tolomeo, 2009):

- Localizar una fuente o fuentes de ondas, distancia y dirección
- Recibir un mensaje desde una fuente distante
- Mapear una imagen del medio a través del cual el campo de ondas se propaga.

No obstante, cabe señalar que los arreglos de sensores más utilizados son: el arreglo lineal uniforme (*Uniform Linear Array ULA*) y el arreglo circular uniforme (*Uniform Circular Array UCA*) (Martínez, Técnicas de procesado en array para realzado de voz en situaciones adversas, 2008).

Si se asume una onda plana que llega al punto \vec{r} en un tiempo t se consigue la Ecuación 4. Una onda plana se identifica porque posee una misma amplitud y fase.

$$s(\mathbf{r}, t) = Ae^{j(\boldsymbol{\beta} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} \quad \text{con} \quad \left\{ \beta = \|\boldsymbol{\beta}\| = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{\vartheta/f} \right. \quad (5)$$

Donde A es la amplitud de onda, $\boldsymbol{\beta}$ el vector de onda (propagación), β factor de onda (número de ondas), λ es la longitud de onda, ϑ velocidad de propagación de la onda, f es la frecuencia (Yang W. Y., 2012).

Se considera que la señal de onda plana de la Ecuación 4 llega a un arreglo ULA, como se muestra en la Figura 3, en la posición (r_x, r_y, r_z) y arriba al origen $(0, 0, 0)$ se tiene: (Pepe, 2004)

$$s(\mathbf{r}, t) = s(\mathbf{0}, t)e^{j\beta(r_x \cos \varphi \sin \theta + r_y \cos \varphi \sin \theta + r_z \cos \varphi)} \quad (6)$$

Donde φ y θ representan el ángulos azimut y el ángulo de elevación respectivamente (Yang W. Y., 2012).

2.7.5. Modo de Mando

Un Arreglo Lineal Uniforme considera M sensores situados sobre una línea recta, igualmente espaciados a una distancia d , como se muestra en la Figura 3. Siendo que en el arreglo incide un frente de onda plana, el frente de onda es perpendicular a la dirección de propagación de la onda plana. La señal $s(t)$ arriba al m -enésimo sensor según la Ecuación (6) (Tolomeo, 2009).

$$s_m(t) = s\{(md, 0, 0), t\} = s(\mathbf{0}, t)a_m(\varphi, \theta) \quad (7)$$

Donde el factor de dirección (*steering factor*) del m -enésimo elemento es:

$$a_m(\varphi, \theta) = e^{j\beta md \cos \varphi \sin \theta} \quad (8)$$

$$a_m(\varphi, \theta) = e^{j2\pi m \frac{d}{\lambda} \cos \varphi \sin \theta} \quad (9)$$

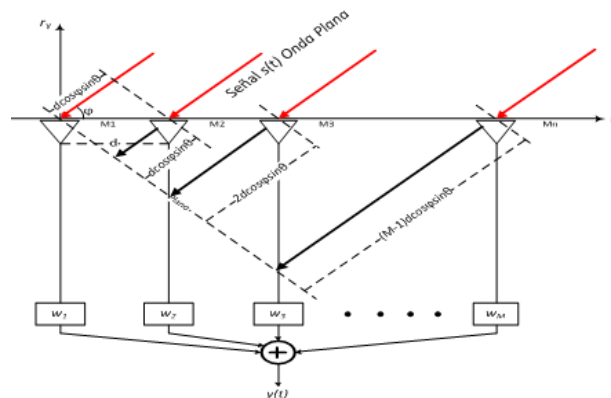


Figura 8. Arreglo Lineal Uniforme ULA.

2.7.6. Consideración de campo lejano y campo cercano

Una fuente emisora de ondas; habitualmente emite ondas con un frente de onda esférico, siendo estos observados a una gran distancia desde la fuente, asimismo

también se puede diferenciar su forma esférica. No obstante al ver sobre un área finita, como es el caso para cada uno de los sensores del arreglo en cuestión, el frente de onda puede considerarse localmente como un frente de onda plano, tal como se evidencia en la Figura 9. Las fuentes de señales audibles o de ruido son capaces de estar localizadas junto al arreglo de sensores o alejados de él. Sin embargo cabe resaltar que en caso de estar cerca del arreglo se le llama región de campo cercano, y en el caso de hallarse alejados se le llama región de campo lejano (Tolomeo, 2009).

En el caso dado de ser un campo lejano, se admite que la onda se irradia como una onda plana y la atenuación de la señal es igual para todos los sensores. Por el contrario en el caso del campo cercano se toma en cuenta que la onda se propaga en forma esférica y la atenuación de la señal es tomada en cuenta. “Una regla típica dice que la suposición de campo lejano es válida cuando se cumple la desigualdad” (Tolomeo, 2009).

$$r > \frac{d_{total}^2 F_s}{c} \quad (10)$$

“Donde r es la distancia radial de la fuente al centro de los micrófonos del arreglo, d total es la longitud total del arreglo de micrófonos, F_s es la frecuencia de muestreo y c es la velocidad de propagación (velocidad de sonido $340/m_s$)” (Tolomeo, 2009).

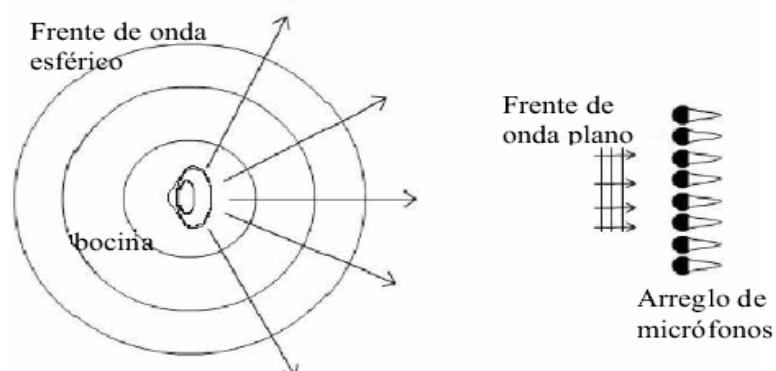


Figura 9. Frente de onda esférica para una bocina.

2.7.7. Desfase de los Cursores

El arreglo semiesférico que se utiliza para el presente análisis consta de un semianillo con 4 micrófonos espaciados uniformemente, es decir, que la apertura entre cada micrófono adyacente es de 30° y el radio r tiene una dimensión de 15 cm .

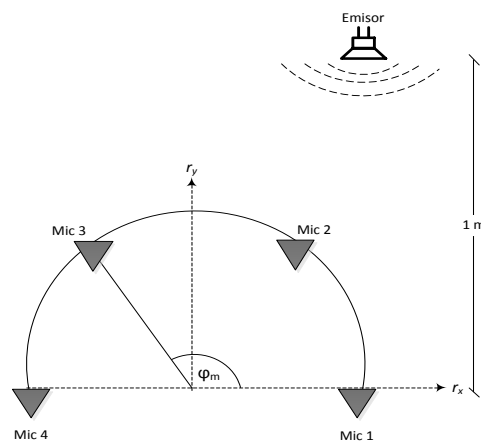


Figura 10. Arreglo Semiesférico.

2.8. Algoritmos adaptativos LCMV

Se denomina algoritmos adaptativos aquellos que varían su comportamiento durante su ejecución, respondiendo a los cambios que se originan en su entorno o en el propio programa. Teniendo presente este factor se afirma que los algoritmos adaptativos LCMV (*Linearly Constrained Minimum Variance*) tiene como objetivo restringir en amplitud y fase la salida del *beamformer* a señales que llegan de una o varias direcciones de no interés (Diniz, 2013).

Los pesos del filtro son elegidos de tal forma que minimice la varianza o la potencia del error sujeto a un conjunto de restricciones lineales, como se muestra en la Ecuación 9.

En la Figura 10. se ejemplifica una estructura de *beamforming* adaptativo *broadband* con M sensores y N pesos (número de coeficientes del filtro).

$$\min_{\mathbf{w}} \xi[k] \quad \text{sujeto a} \quad \mathbf{C}^H \mathbf{w} = \mathbf{f} \quad (11)$$

Donde la señal de error $e[k]$ está relacionada con la función objetivo $\xi[k] = E\{|e[k]|^2\} = E\{e[k]e^*[k]\}$, \mathbf{C} es la matriz de restricción de dimensión $MN \times p$, siendo p el número de restricciones y \mathbf{f} el vector de ganancia de dimensión $p \times 1$.

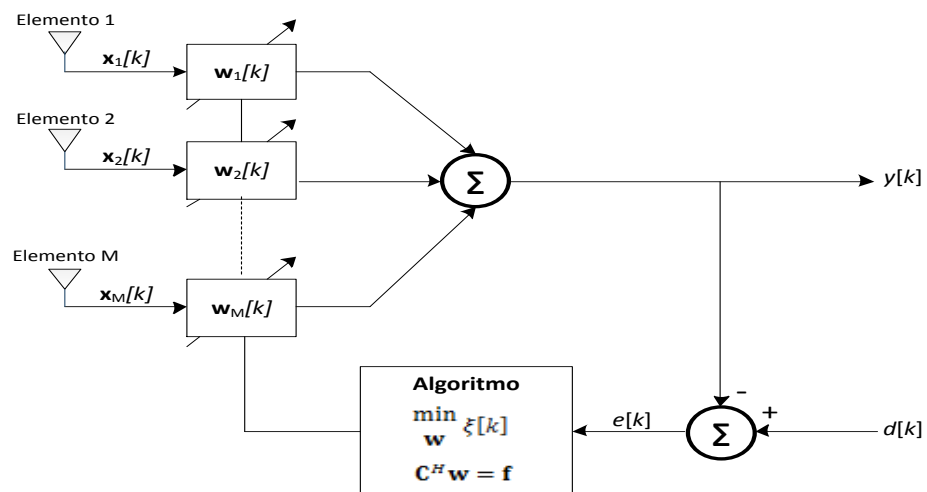


Figura 11. Estructura de *Beamforming* Adaptativo *Broadband*.

Mediante la imposición de restricciones lineales, la necesidad de una señal deseada a menudo puede ser descartada:

$$d[k] = 0. \quad (12)$$

Los algoritmos adaptativos LCMV se dividen en tres familias:

- *Linearly Constrained*.
- Las de estructura *GSC* (*Generalized Sidelobe Canceler*) que permite que cualquier algoritmo *unconstrained* pueda ser empleado como *constrained*.
- De estructura *Householder* (JR, 2009).

La estructura *Householder* es la más apta en comparación a las otras dos estructuras con los algoritmos adaptativos *unconstrained NLMS (Normalized Least Mean Squares)* y *CG (Conjugate Gradient)* para el presente desarrollo del análisis sobre la implementación realizada en los proyectos previos (Caisapanta T. , 2015).

2.8.1. La Estructura Householder

La estructura *Householder* es una de las mejores opciones para implementaciones prácticas por su bajo costo computacional ya que la matriz Q y sus reflectores de Householder son computacionalmente más eficientes (Bernal, Apolinario, & Campos, 2002).

La matriz Q es una matriz rotacional ortogonal que se utiliza como la transformación que va a generar un vector de coeficientes modificados $\bar{w}[k]$ que se relaciona a $w[k]$ (Bernal, Apolinario, & Campos, 2002).

$$\bar{w}[k] = Qw[k] \quad (13)$$

La matriz Q se debe escoger de tal manera que $QQ^H = I$.

$$\bar{C}\{\bar{C}^H\bar{C}\}^{-1}\bar{C}^H = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{p \times p} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Entonces $\bar{C} = QC$ satisface $f = \bar{C}^H\bar{w}[k + 1]$ y la transformada de la matriz de proyección está dada por:

$$\bar{P} = QPQ^H = I - \bar{C}\{\bar{C}^H\bar{C}\}^{-1}\bar{C}^H = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{p \times p} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Si $\bar{w}[0]$ se inicializa según:

$$\bar{\mathbf{w}}[0] = \bar{\mathbf{C}}\{\bar{\mathbf{C}}^H \bar{\mathbf{C}}\}^{-1} \mathbf{f} = \mathbf{QF} \quad (16)$$

Los primeros p elementos de $\bar{\mathbf{w}}[0]$ no necesitan ser actualizados. La solución $\bar{\mathbf{w}}[k]$ es basada en la transformación \mathbf{Q} a la señal de salida y como consecuencia el error de salida no se modifica por la transformación.

2.8.2. Householder NCLMS

El algoritmo HNCLMS posee una lenta velocidad de convergencia y su costo computacional es bajo $(2p + 3)N - (p^2 + p - 1)$ (Caisapanta T. , 2015), por lo que el algoritmo se torna deseable para implementación en dispositivos con prestaciones de hardware limitadas. El algoritmo HNCLMS se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1.
Algoritmo HNCLMS.

Inicialización:

$$\mathbf{w}_{TH}[0] = \mathbf{QF}$$

$$\mathbf{w}_{TH}[k] = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{w}}[0] \\ -\check{\mathbf{w}}[k] \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x}_{TH}[k] = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}[k] \\ \check{\mathbf{x}}[k] \end{bmatrix}$$

Para cada k

$$\mathbf{x}_{TH}[k] = \mathbf{Qx}[k]$$

$$e_{TH}[k] = \hat{\mathbf{w}}^H[0] \hat{\mathbf{x}}[k] - \check{\mathbf{x}}^H[k] \check{\mathbf{w}}[k]$$

$$\check{\mathbf{w}}[k + 1] = \check{\mathbf{w}}[k]$$

$$+ \mu_n \frac{\check{\mathbf{x}}^H[k] e_{TH}^*[k]}{\gamma + \check{\mathbf{x}}^H[k] \check{\mathbf{x}}[k]}$$

2.8.3. Householder CCG

El algoritmo HCCG es de rápida convergencia y su costo computacional $(3N^2 + (10 - 4p)N + p^2 - 8p + 2)$ es mayor en comparación al algoritmo HNCLMS, por lo que es deseable cuando su implementación es en un hardware con alto recursos. En la Tabla 2 se detalla el algoritmo HCCG (Caisapanta T. , 2015).

Tabla 2.
Algoritmo HCCG.

Inicialización:

$$\mathbf{w}_{TH}[0] = QF$$

$$\mathbf{w}_{TH}[k] = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{w}}[0] \\ -\check{\mathbf{w}}[k] \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x}_{TH}[k] = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}[k] \\ \check{\mathbf{x}}[k] \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{g}[0] = \mathbf{c}[0] = \mathbf{0}$$

Para cada k

$$\mathbf{x}_{TH}[k] = Q\mathbf{x}[k]$$

$$\mathbf{R}_{TH}[k] = \lambda_f \mathbf{R}_{TH}[k-1] + \check{\mathbf{x}}[k]\check{\mathbf{x}}^H[k]$$

$$\alpha[k] = \eta \frac{\mathbf{c}^H[k]\mathbf{g}[k-1]}{\mathbf{c}^H[k]\mathbf{R}_{TH}[k]\mathbf{c}[k] + \delta}$$

$$\mathbf{e}_{TH}[k] = \hat{\mathbf{w}}^H[0]\hat{\mathbf{x}}[k] - \check{\mathbf{x}}^H[k]\check{\mathbf{w}}[k]$$

$$\mathbf{g}[k] = \lambda_f \mathbf{g}[k-1] - \alpha[k]\mathbf{R}_{TH}[k]\mathbf{c}[k] - \check{\mathbf{x}}[k]\mathbf{e}_{TH}^*[k]$$

$$\check{\mathbf{w}}[k] = \check{\mathbf{w}}[k-1] - \alpha[k]\mathbf{c}[k]$$

$$\beta[k] = \frac{\{\mathbf{g}[k] - \lambda_f \mathbf{g}[k-1]\}^H \mathbf{g}[k]}{\mathbf{g}^H[k-1]\mathbf{g}[k-1] + \delta}$$

$$\mathbf{c}[k+1] = \mathbf{g}[k] + \beta[k]\mathbf{c}[k]$$

CAPÍTULO 3

3. PRUEBAS CON UN TONO PURO

3.1. Introducción

Para realizar mediciones, tanto electrónicas como acústicas, muchas veces se involucra el uso de señales de prueba, las mismas que se presentan en dos magnos grupos: Tonos puros y ruidos de banda ancha.

Son denominados tonos puros a los sonidos de una única frecuencia con parámetros totalmente distinguidos, los cuales no tienen elementos aleatorios de ningún tipo. Esto permite con exactitud distinguir las deformaciones que compone un sistema a una señal. “Por ejemplo, si se ingresa un tono puro a un sistema y se observa la salida en un osciloscopio, evidentemente será posible observar los cambios de amplitud (atenuación o ganancia), cambio de forma (distorsión) e incluso cambios de fase, pero siempre en una única frecuencia” (Facundo, Ecuaphon University, 2014).

Los tonos puros son empleados para evaluar componentes electrónicos, pero no son populares en acústica, debido a que poseen una escasa relación con lo que normalmente reproduce un parlante (Facundo, Ecuaphon University, 2014).

Cabe señalar que existen señales diseñadas para mediciones específicas que optimizan, “por ejemplo, la relación señal ruido u otras que concentran su energía en un rango de frecuencia de interés, pero que generalmente requieren post-procesos complejos (convoluciones, FFT, etc) y son útiles sólo para mediciones específicas” (Facundo, Ecuaphon University, 2014).

Dentro de los ruidos de banda ancha se hallan los populares ruidos blanco y rosa. El ruido blanco es una continuación aleatoria de valores, en otras palabras, es el nivel instantáneo de la señal en cualquier punto y no tiene ningún tipo de relación con el nivel anterior ni el posterior (ver Figura. 11). “La distribución aleatoria de los valores

responde a una curva de probabilidad llamada “Campana de Gauss”, siendo este ruido también conocido como “ruido gaussiano” (Facundo, Ecuaphon University, 2014).

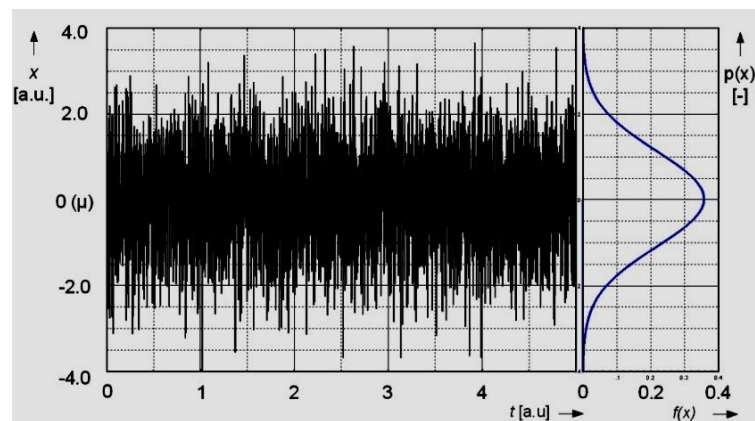


Figura 12. Ruido Blanco o Gaussiano.

“El ruido Gaussiano tiene la peculiaridad de tener su energía distribuida equitativamente en todo el espectro de frecuencia, por lo cual resulta muy útil a la hora de analizar un sistema. Por otra parte el ruido rosa es también ruido blanco, pero filtrado. Es decir que cuando al ruido blanco se le aplica un filtro pasa bajos de -3dB por octava, se obtiene ruido rosa” (Facundo, Investigación & Desarrollo, 2014) .

La principal divergencia reside en que el ruido blanco posee una energía equivalente por frecuencia mientras que el rosa conserva igual energía por banda de octava (Facundo, Investigación & Desarrollo, 2014).

Asimismo es evidente que el ruido rosa es más conocido y utilizado en acústica puesto que se armoniza de mejor manera con la audición humana, siendo que el ruido blanco suena cargado en altas frecuencias mientras que el rosa se percibe mejor balanceado (Facundo, Ecuaphon University, 2014).

Otro ruido manipulado es el MLS (*Maximum Length Sequence* o Secuencia de Longitud Máxima). Este ruido es auditivamente análogo al ruido blanco, no obstante apalea a la diferencia de ser definitivamente determinístico y repetible. “Permitiendo mediante procesamiento de señales, diferenciarlo del ruido de fondo y obtener una mejor relación señal/ruido en una medición” (Facundo, Ecuaphon University, 2014).

3.2. Tono Puro

El sonido posee tres propiedades fundamentales: (Matras, 2003)

- “intensidad” (es débil o intenso),
- “altura” (es grave o agudo),
- “timbre”(es agradable o desagradable).

A partir de esto, se llama tono puro a un sonido sinusoidal simple, privado de armónicos (Matras, 2003).

Es factible evidenciar que el timbre de un tono puro persiste invariable sin concernir las circunstancias en las que se haya originado el sonido. La representación de armónicos más o menos numerosos y más o menos intensos altera ese timbre; cuantos más imponentes son los armónicos, más lleno y cálido parece el sonido, mientras que un tono puro es eternamente endeble (Matras, 2003). Sin embargo, “la presencia de armónicos demasiado agudos causa efectos de silbido y aspereza” (Matras, 2003).

“Una de las principales características que presenta el tono puro es que posee una intensidad que varía con la amplitud de presión de la onda y una altura que varía según su frecuencia” (Matras, 2003).

3.2.1. Sonidos Periódicos y Tonos Puros

Un caso relevante se presenta cuando las perturbaciones se repiten cada un tiempo T , es decir, con una frecuencia $f = 1/T$. En este caso, auditivamente se evoca la sensación de tono. La impresión de altura del tono crece con la frecuencia. Así, los sonidos de baja frecuencia son graves (bajos), mientras que los de alta frecuencia son agudos (altos) (Winckel, 1967). En la Figura 12 se muestran ejemplos de dichos sonidos (Blackman, Blanchard, Benane, & House, 1999).

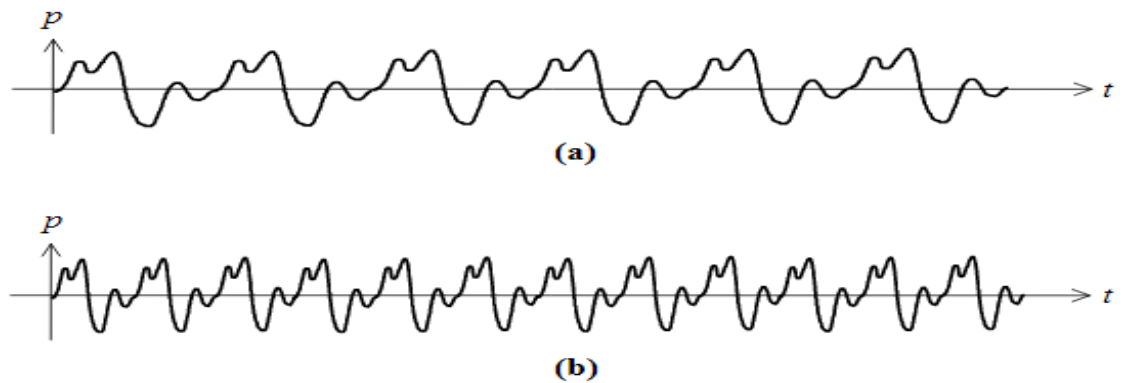


Figura 13. Dos sonidos periódicos

(a) De baja frecuencia (grave); (b) De alta frecuencia (agudo).

La perturbación periódica más simple es la senoidal, es decir, aquella en la que la presión varía senoidalmente con el tiempo:

$$p(t) = P_{\text{máx}} \text{sen} 2\pi ft \quad (17)$$

En este caso el sonido resultante se denomina tono puro. Los tonos puros se encuentran inusualmente en la naturaleza, pero son de relevante valor como herramienta de análisis, ya que todo sonido se considera formado por la incorporación de tonos puros de varias y diversas frecuencias (Pérez, 2012).

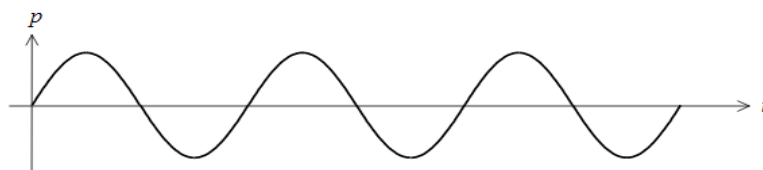


Figura 14. Un tono puro (onda senoidal). Se muestran tres ciclos.

3.3. Descripción de Geometría

Dentro de la descripción de la geometría se analizaron varios puntos importantes como por ejemplo la distancia tomada según el escenario de prueba, el rango de

variación angular para el barrido de toma de muestras, y una distancia promedio a la cual las personas son capaces de mantener una comunicación interactiva adecuada.

Se realizó un barrido cada 15 grados con el objetivo de cubrir de manera adecuada toda el área de la geometría propuesta, además también se consideró este tipo de barrido teniendo en cuenta la distancia de un paso de una persona promedio. Por otro lado también cabe señalar que se tuvo que realizar un análisis de factores del entorno como el escenario donde se realizaron la toma de datos, el cual correspondió a una sala de forma rectangular de 7 m de largo por 3.50 m de ancho, con paredes de 12 cm de grosor.

Por otro lado cabe señalar que el escenario corresponde a un medio no estacionario, donde las señales de prueba se les va a sumar una serie de perturbaciones tales como: Eco y reverberación.

A partir de todos los elementos señalados se puede observar en la siguiente Figura14, la cual corresponde a cada una de las características analizadas en la geometría propuesta.

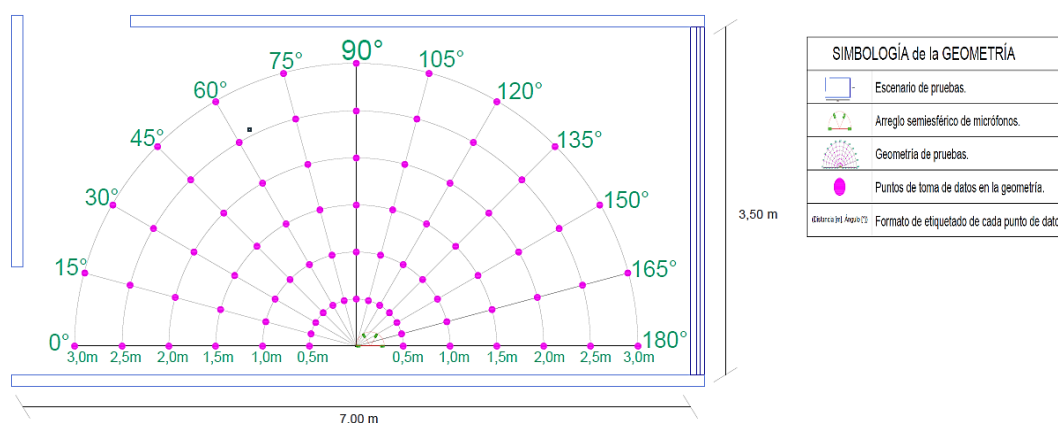


Figura 15. Geometría.

3.4. Amplificación

3.4.1. Construcción del Circuito interfaz de los micrófonos Mems

A partir de la construcción del circuito amplificador (ver Figura 15) para los micrófonos es posible observar que la señal de salida del micrófono se conectara directamente a las entradas analógicas MXP de la tarjeta NI myRIO. (T. Caisapanta, 2015).

El circuito requiriere siete conexiones con la tarjeta NI myRIO que se detallan a continuación:

- Fuente e alimentación de + 5 volts \longrightarrow B/ +5V (pin 1)
- Tierra \longrightarrow B/GND (pin 6)
- Fuente e alimentación de + 3.3 volts \longrightarrow B/+3.3V (pin 33)
- Tierra \longrightarrow B/GND (pin 30)
- Fuente de alimentación de + 15 volts \longrightarrow B/ +15V
- Fuente de alimentación de - 15 volts \longrightarrow B/ -15V
- Salida de los amplificadores
 - MIC 4 \longrightarrow B/A10 (PIN 3)
 - MIC 3 \longrightarrow B/A10 (PIN 5)
 - MIC 2 \longrightarrow B/A10 (PIN 7)
 - MIC 1 \longrightarrow B/A10 (PIN 9)

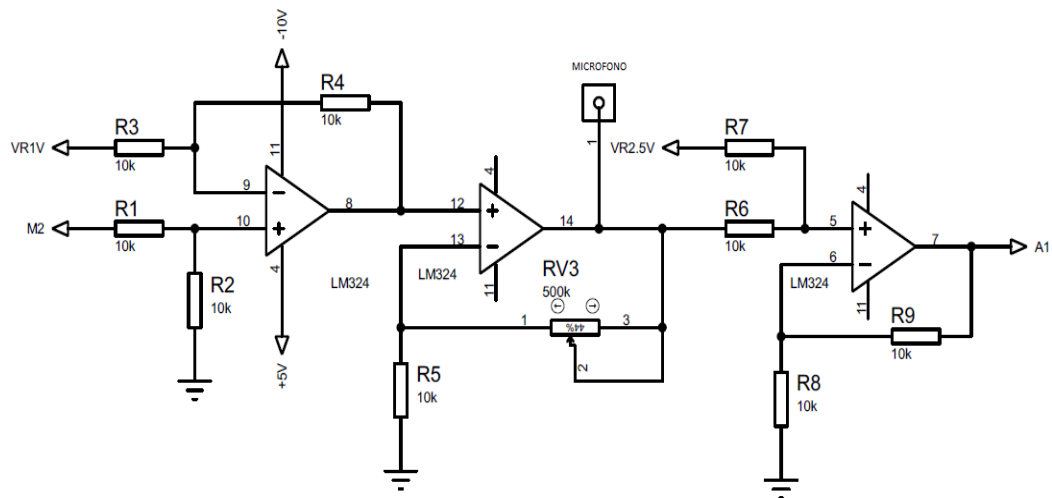


Figura 16. Etapa de amplificación por micrófono.

3.5. Respuesta de los Micrófonos en Frecuencia

Las respuestas de los micrófonos en frecuencia se presentan en la Figura 16 donde se observa que el comportamiento de los mismos es diferente; para compensar las variaciones entre micrófonos, se utiliza la estructura de identificación de sistema tomando como referencia el micrófono 1 (Diniz, 2013).

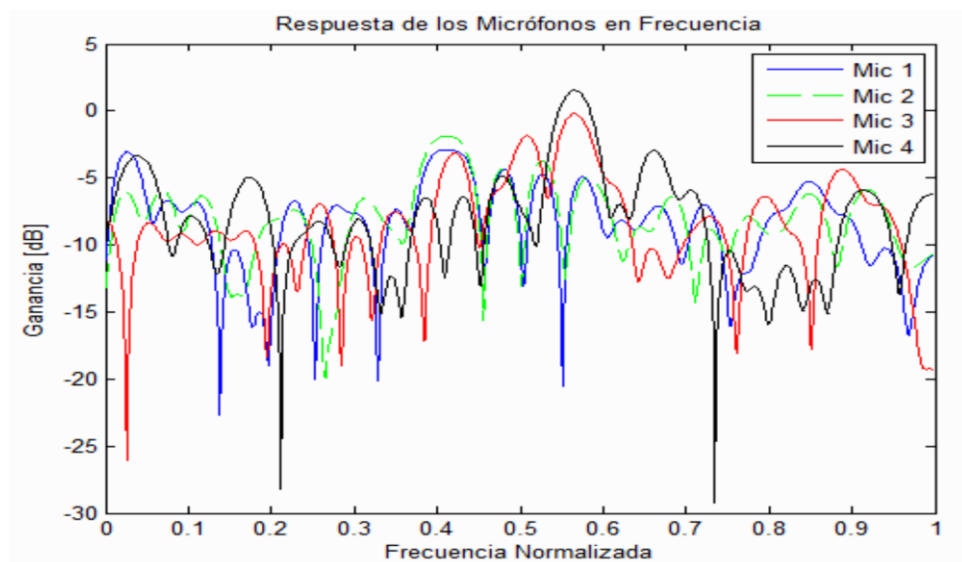


Figura 17. Respuesta de los Micrófonos en Frecuencia para un Arreglo ULA.

3.6. Compensación de retardos en los micrófonos

Las señales tomadas al no haber sido adquiridas en una cabina anecoica (una sala especialmente diseñada en la que las paredes, el techo y el suelo absorben todas las ondas sonoras que le llegan, y encontrándose aislada del exterior de cualquier fuente de ruido o influencia sonora externa.) se ejecuta el algoritmo RLS con el fin de obtener la señal de referencia misma que es adquirida tomando la señal del ruido blanco como señal deseada y la señal de entrada la del micrófono M1, esta señal alcanzada es la señal de referencia para los M2, M3 y M4 en la estructura de identificación del sistema (Caisapanta T. , 2015).

Compensando el retardo de las señales, que se producen a causa del hardware, procesamiento y propagación de la señal, se observa en la Figura 17 que la respuesta de los micrófonos en frecuencia ha cambiado y su comportamiento entre ellos es similar.

La estructura de identificación del sistema genera los coeficientes con los cuales se estimara una función de transferencia para realizar la ecualización del canal y de esta manera compensar la distorsión lineal causado por el canal (Diniz, 2013). Que se desarrolla más adelante.

Debido a la propagación de la señal, procesamiento del hardware se debe compensar los retados existentes por lo que en la Figura 17 se puede visualizar que el comportamiento en los micrófonos es similar ya que la respuesta en frecuencia cambió.

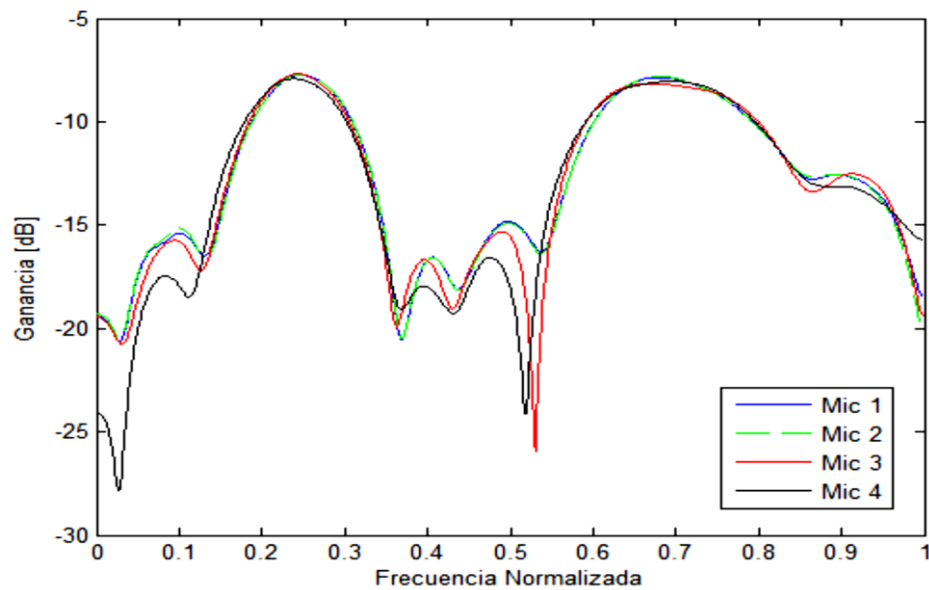


Figura 18. Respuesta Compensada de los Mic. en Frec. para un Arreglo ULA.

3.7. Análisis de datos según la geometría

3.7.1. CCG

El algoritmo CCG por sus siglas en inglés *Constrained Conjugate Gradients* producto de una comparación con la estructura GSC (Bernal, Apolinario, & Campos, 2002). La respuesta de este algoritmo está dada por el parámetro de adaptación λ llamado *forgetting factor* que es un factor de ponderación de tipo exponencial.

Es importante mencionar como antecedente que según el análisis que se realizó en (Caisapanta T. , 2015), el valor de λ que presentó un mejor desempeño es de 0.9993 con un MSE de -34.1565 dB.

En los Anexos A se muestran las tablas de datos obtenidas para el algoritmo CCG, de la misma manera las gráficas correspondientes se encuentran en el Anexo B.

3.7.2. Análisis MSE vs Distancia

Análisis a 0°

En la Figura 18 se muestra una tendencia del paso de adaptación *forgetting factor* del algoritmo CCG. A medida que se va variando la distancia con respecto al MSE en el radio de la geometría correspondiente a 0° . Se puede observar que para 0.5 m de distancia el algoritmo posee mejor desempeño con un $\lambda = 0.9995$, obteniéndose un MSE de $-22,8035\text{ dB}$. Para un 1 m y $1,5\text{ m}$ se sigue manteniendo el mismo valor de λ que presenta un desempeño superior comparado con los otros valores de λ . Sin embargo para las distancias de 2 m y $2,5\text{ m}$ el mejor desempeño resulta ser cuando el valor del *forgetting factor* es de 0.9994 , obteniéndose valores de $-21,4821\text{ dB}$ y $-21,0383\text{ dB}$ respectivamente. Finalmente para una distancia de 3 m el mejor desempeño del algoritmo resulta ser para un valor de $\lambda = 0.9995$ con un MSE de $-20,4936\text{ dB}$. Se puede observar además que al ir aumentando la distancia el MSE también se incrementa.

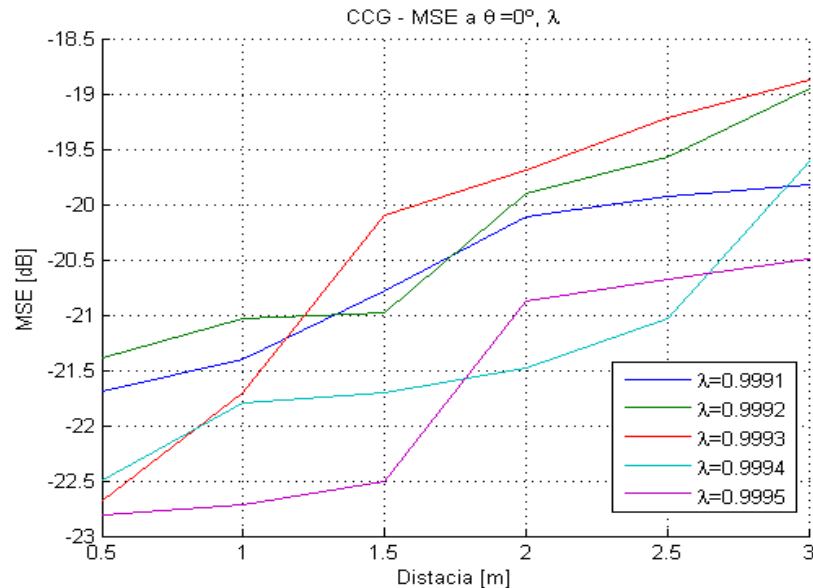


Figura 19. MSE del algoritmo CCG vs la distancia a un ángulo de 0° .

Es así que para un $\lambda = 0.9995$ el algoritmo presenta el mejor desempeño, obteniéndose los menores valores de MSE. Así mismo se observó que el mejor desempeño a 2 m y $2,5\text{ m}$ de distancia el mejor desempeño se obtuvo con un $\lambda =$

0.9994. Por lo que el algoritmo presentaría un desempeño superior con un $\lambda = 0.99945$ a un ángulo de 0° .

Análisis a 45°

Como se puede observar en la Figura 19, se muestra una tendencia del paso de adaptación *forgetting factor* del algoritmo CCG. A medida que se va variando la distancia con respecto al MSE en el radio de la geometría correspondiente a 45° . Se puede observar que para 0.5 m y 1 m de distancia el algoritmo posee mejor desempeño con un $\lambda = 0.9994$, obteniéndose un MSE de $-21,7512\text{ dB}$ y $-20,3718\text{ dB}$ respectivamente, es importante notar que estos valores son muy cercanos a los de un $\lambda = 0.9995$. Mientras que para $1,5\text{ m}$, 2 m , $2,5\text{ m}$ y 3 m el mejor desempeño resulta ser cuando el valor del *forgetting factor* es de $\lambda = 0.9995$, obteniéndose valores de $-19,9264\text{ dB}$, $-19,6779\text{ dB}$, $-19,5811\text{ dB}$ y $-19,5181\text{ dB}$ respectivamente. Se puede observar además que al ir aumentando la distancia el MSE también se incrementa.

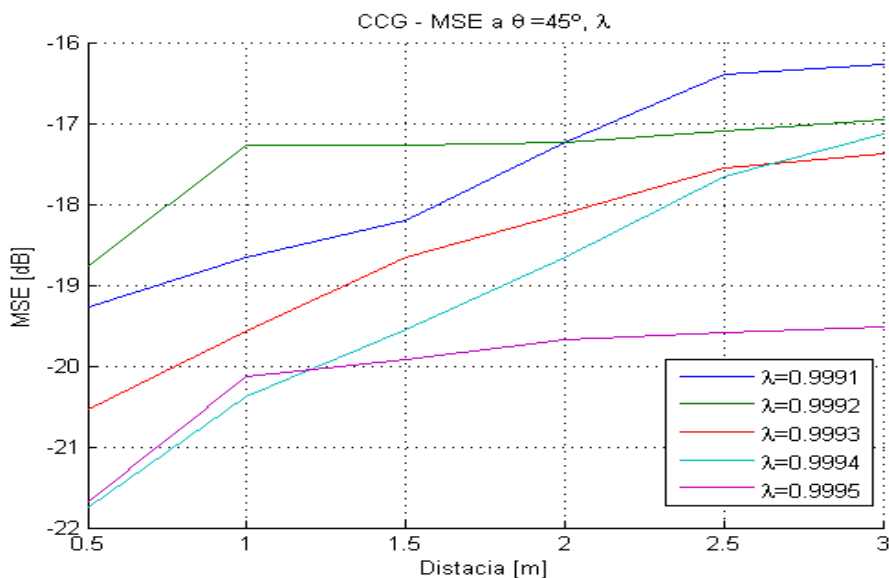


Figura 20. MSE del algoritmo CCG vs la distancia a un ángulo de 45° .

Es así que para un $\lambda = 0.9995$ el algoritmo presenta el mejor desempeño, obteniéndose los menores valores de MSE. Así mismo se observó que el mejor desempeño a $0,5\text{ m}$ y 1 m de distancia el mejor desempeño se obtuvo con un $\lambda =$

0.9994. Por lo que el algoritmo presentaría un desempeño superior con un $\lambda = 0.99945$ para distancias menores a 1 m , sin embargo para distancias superiores el mejor desempeño del algoritmo es con un valor de $\lambda = 0.9995$, todo esto con respecto a un ángulo de 45° .

Análisis a 90°

En la Figura 20 se muestra una tendencia del paso de adaptación *forgetting factor* del algoritmo CCG. A medida que se va variando la distancia con respecto al MSE en el radio de la geometría correspondiente a 90° . Se puede observar que para 0.5 m , 1 m y 1.5 m de distancia el algoritmo posee mejor desempeño con un $\lambda = 0.9995$, obteniéndose un MSE de $-22,3671\text{ dB}$, $-22,0162\text{ dB}$ y $-21,7326\text{ dB}$ respectivamente. Mientras que para 2 m el mejor desempeño es para un $\lambda = 0.9993$ con un MSE de $-21,3561\text{ dB}$, es importante notar que a esta distancia con el paso de adaptación *forgetting factor* de 0.9995 se obtuvo un desempeño menor, inclusive al de $\lambda = 0.9994$. Es así que para una distancia de $2,5\text{ m}$ el mejor desempeño es cuando $\lambda = 0.9994$ con un MSE de $-20,7832\text{ dB}$. Finalmente a una distancia de 3 m el mejor desempeño vuelve a estar cuando $\lambda = 0.9993$ con un MSE de $-19,5312\text{ dB}$. Se puede observar además que al ir aumentando la distancia el MSE también se incrementa.

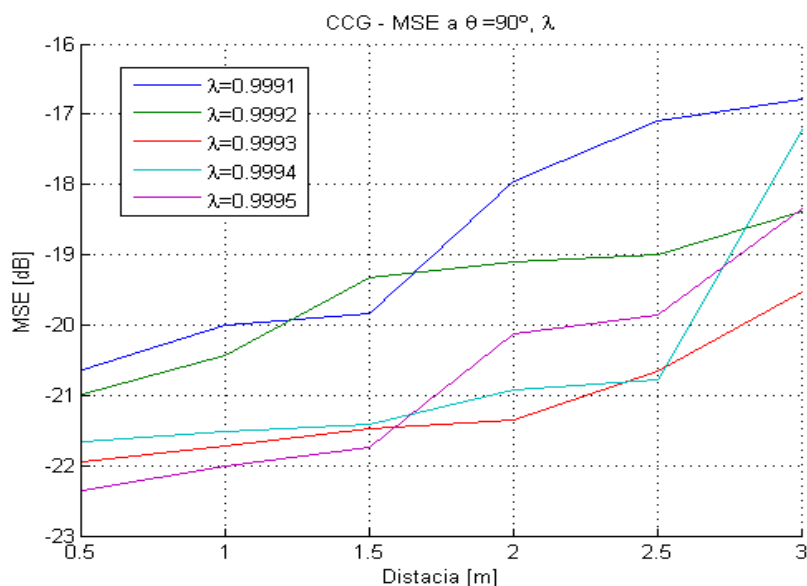


Figura 21. MSE del algoritmo CCG vs la distancia a un ángulo de 90° .

Es así que para un $\lambda = 0.9995$ el algoritmo presenta el mejor desempeño, obteniéndose los menores valores de MSE a distancias de $0.5 m$, $1 m$ y $1,5 m$. Así mismo se observó que el mejor desempeño a $2 m$ y $3 m$ de distancia se obtuvo con un $\lambda = 0.9995$. Mientras que a una distancia de $2,5 m$ en mejor desempeño del algoritmo está dado para un valor de $\lambda = 0.9994$. Por lo que el algoritmo presentaría un desempeño superior con un $\lambda = 0.9995$ para distancias iguales o menores a $1,5 m$, sin embargo para distancias superiores el mejor desempeño del algoritmo es con un valor de $\lambda = 0.9993$, todo esto con respecto a un ángulo de 90° .

Análisis a 135°

En la Figura 21 se muestra una tendencia del paso de adaptación *forgetting factor* del algoritmo CCG. A medida que se va variando la distancia con respecto al MSE en el radio de la geometría correspondiente a 135° . Se puede observar que para $0.5 m$, $1 m$, $1,5 m$ y $2 m$ de distancia el algoritmo posee mejor desempeño con un $\lambda = 0.9991$, obteniéndose un MSE de $-22,7163 dB$, $-19,9893 dB$, $-21,7254 dB$ y $-20,6013 dB$ respectivamente. Mientras que para $2,5 m$ y $3 m$ el mejor desempeño es para un $\lambda = 0.9992$ con un MSE de $-20,1723 dB$ y $-19,8736 dB$ respectivamente, es importante notar que a esta distancia con el paso de adaptación *forgetting factor* de $\lambda = 0.9991$ se obtuvo el desempeño más bajo, inclusive al de $\lambda = 0.9992$. Se puede observar además que al ir aumentando la distancia el MSE también se incrementa.

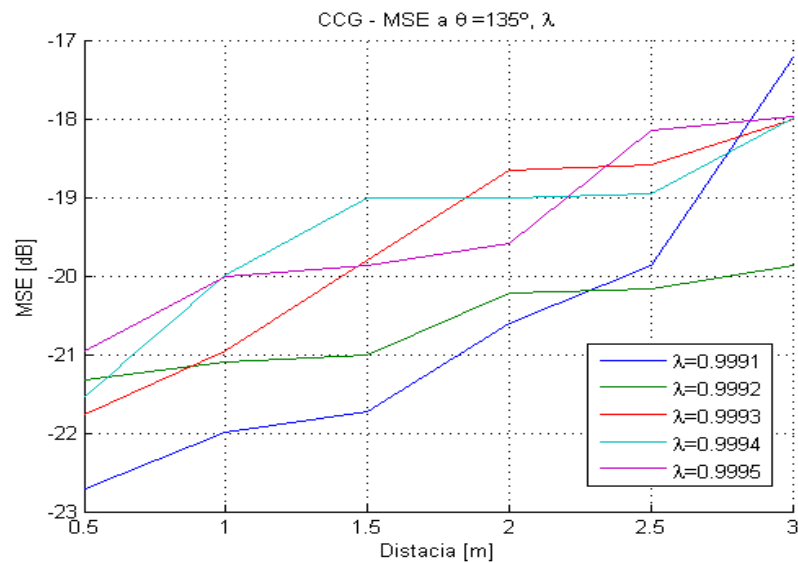


Figura 22. MSE del algoritmo CCG vs la distancia a un ángulo de 135°.

Es así que para un $\lambda = 0.9991$ el algoritmo presenta el mejor desempeño, obteniéndose los menores valores de MSE a distancias de 0.5 m, 1 m, 1,5 m y 2 m. Así mismo se observó que el mejor desempeño a 2,5 m y 3 m de distancia se obtuvo con un $\lambda = 0.9992$. Por lo que el algoritmo presentaría un desempeño superior con un $\lambda = 0.9991$ para distancias iguales o menores a 2 m, sin embargo para distancias superiores el mejor desempeño del algoritmo es con un valor de $\lambda = 0.9992$, todo esto con respecto a un ángulo de 135°.

Análisis a 180°

En la Figura 22 se muestra una tendencia del paso de adaptación *forgetting factor* del algoritmo CCG. A medida que se va variando la distancia con respecto al MSE en el radio de la geometría correspondiente a 180°. Se puede observar que para 0.5 m de distancia el algoritmo posee mejor desempeño con un $\lambda = 0.9992$, obteniéndose un MSE de $-20,9734$ dB. Mientras que para 1 m y 1,5 m el mejor desempeño es para un $\lambda = 0.9995$ con un MSE de $-20,2047$ dB y $-19,9983$ dB respectivamente. Se puede observar también que para una distancia de 2 m y 2,5 m el mejor desempeño es cuando $\lambda = 0.9992$ con un MSE de $-18,7126$ dB y $-18,4027$ dB respectivamente. Finalmente a una distancia de 3 m el mejor desempeño es cuando $\lambda = 0.9994$ con un MSE de $-17,7943$ dB, es importante notar que a esta distancia el valor del MSE es

casi igual al que genera un desempeño con un $\lambda = 0.9995$. Se puede observar además que al ir aumentando la distancia el MSE también se incrementa.

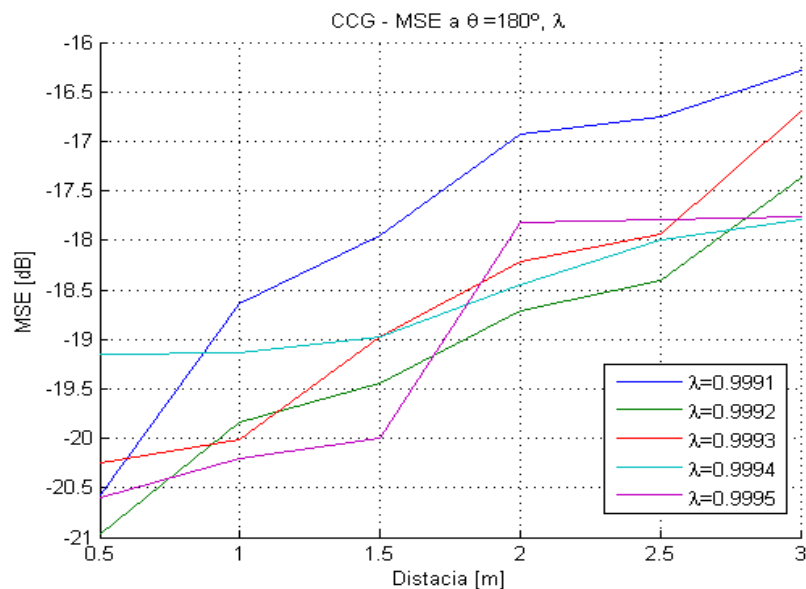


Figura 23. MSE del algoritmo CCG vs la distancia a un ángulo de 180°.

Es así que para un $\lambda = 0.9992$ el algoritmo presenta el mejor desempeño, obteniéndose los menores valores de MSE a distancias de 0.5 m, 2 m y 2,5 m. Así mismo se observó que el mejor desempeño a 1 m y 1,5 m de distancia se obtuvo con un $\lambda = 0.9995$. Mientras que a una distancia de 3 m el mejor desempeño del algoritmo está dado para un valor de $\lambda = 0.9994$. Por lo que el algoritmo presentaría un desempeño superior con un $\lambda = 0.9994$, todo esto con respecto a un ángulo de 180°.

3.7.3. Análisis MSE vs Forgetting Factor

Análisis a 0°

En la Figura 23 se muestra la tendencia del paso de adaptación *forgetting factor* del algoritmo CCG a medida que se va variando este factor con respecto al MSE en el radio de la geometría correspondiente a 45° para cada una de las distancias. Se puede observar que mientras la distancia desde la fuente de interés hasta el punto de origen en el arreglo semiesférico de sensores es menor, el algoritmo posee un mejor desempeño. Además se puede observar que para las distancias de 0.5 m, 1 m, 1,5 m y

3 m el algoritmo presenta un mejor desempeño cuando $\lambda = 0.9995$, obteniéndose para las distancias un MSE de $-22,8835 \text{ dB}$, $-22,7164 \text{ dB}$, $-22,5012 \text{ dB}$, y $-20,4936 \text{ dB}$ respectivamente. Por otro lado se puede ver que para las distancias de 2 m y 2.5 m el algoritmo posee un mejor desempeño con un $\lambda = 0.9994$ con un MSE de $-21,4821 \text{ dB}$ y $-21,0383 \text{ dB}$ respectivamente.

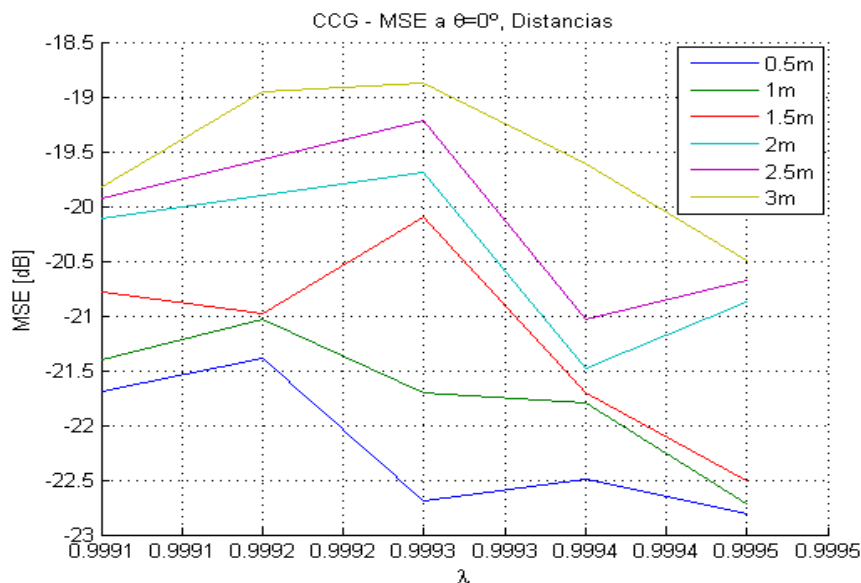


Figura 24. MSE del algoritmo CCG vs *Forgetting factor* a un ángulo de 0° .

Es así que el algoritmo presenta su mejor desempeño, obteniéndose los valores de MSE más bajos cuando $\lambda = 0.9995$ para las distancias de 0.5 m, 1 m, 1,5 m y 3 m. Mientras que para las distancias de 2 m y 2.5 m el desempeño más alto del algoritmo es cuando $\lambda = 0.9994$.

Análisis a 45°

En la Figura 24 se muestra una tendencia del paso de adaptación *forgetting factor* del algoritmo CCG, a medida que se va variando este factor con respecto al MSE en el radio de la geometría correspondiente a 45° para cada una de las distancias. Se puede observar que mientras la distancia desde la fuente de interés hasta el punto de origen en el arreglo semiesférico de sensores es menor, el algoritmo posee un mejor desempeño. Además se puede observar que para las distancias de 0.5 m y 1 m el algoritmo presenta un mejor desempeño cuando $\lambda = 0.9994$, obteniéndose para las

distancias un MSE de $-21,7512 \text{ dB}$ y $-20,3718 \text{ dB}$ respectivamente. Por otro lado se puede observar que para las distancias de $1,5 \text{ m}$, 2 m , $2,5 \text{ m}$ y 3 m el algoritmo posee un mejor desempeño con un $\lambda = 0.9995$ con un MSE de $-19,9264 \text{ dB}$, $-19,6779 \text{ dB}$, $-19,5811 \text{ dB}$ y $-19,5181 \text{ dB}$ respectivamente.

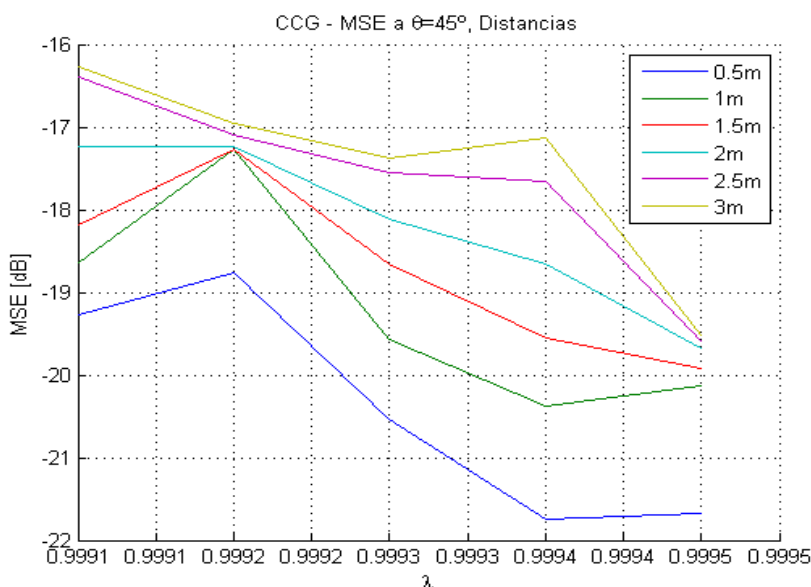


Figura 25. MSE del algoritmo CCG vs *Forgetting factor* a un ángulo de 0° .

Es así que el algoritmo presenta su mejor desempeño, obteniéndose los valores de MSE más bajos cuando $\lambda = 0.9994$ para las distancias de 0.5 m y 1 m . Mientras que para las distancias de $1,5 \text{ m}$, 2 m , $2,5 \text{ m}$ y 3 m el desempeño más alto del algoritmo es cuando $\lambda = 0.9995$.

Análisis a 90°

En la Figura 25 se muestra una tendencia del paso de adaptación *forgetting factor* del algoritmo CCG, a medida que se va variando este factor con respecto al MSE en el radio de la geometría correspondiente a 90° para cada una de las distancias. Se puede observar que mientras la distancia desde la fuente de interés hasta el punto de origen en el arreglo semiesférico de sensores es menor, el algoritmo posee un mejor desempeño. Además se puede observar que para las distancias de 0.5 m , 1 m y $1,5 \text{ m}$ el algoritmo presenta un mejor desempeño cuando $\lambda = 0.9995$, obteniéndose para las distancias un MSE de $-22,3671 \text{ dB}$, $-22,0162 \text{ dB}$ y $-21,7326 \text{ dB}$ respectivamente.

Por otro lado se puede observar que para las distancias de 2 m y 3 m el algoritmo posee un mejor desempeño con un $\lambda = 0.9993$ con un MSE de $-21,3561\text{ dB}$ y $-19,5312\text{ dB}$ respectivamente. Finalmente para una distancia de $2,5\text{ m}$ el desempeño más alto corresponde a un $\lambda = 0.9994$ con un MSE de $-20,7832\text{ dB}$.

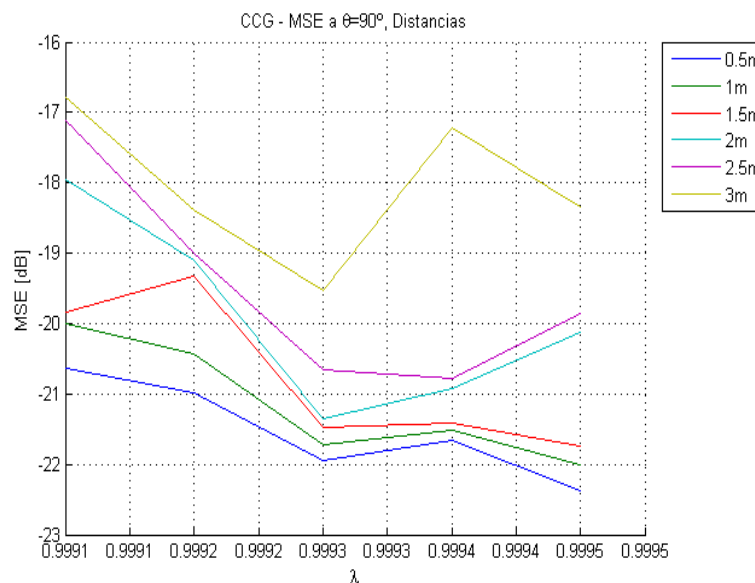


Figura 26. MSE del algoritmo CCG vs *Forgetting factor* a un ángulo de 90° .

Es así que el algoritmo presenta su mejor desempeño, obteniéndose los valores de MSE más bajos cuando $\lambda = 0.9995$ para las distancias de $0,5\text{ m}$, 1 m y $1,5\text{ m}$. Mientras que para las distancias de 2 m y 3 m el desempeño más alto del algoritmo es cuando $\lambda = 0.9993$. Finalmente para la distancia de $2,5\text{ m}$ el mejor desempeño corresponde a un $\lambda = 0.9994$.

Análisis a 135°

En la Figura 26 se muestra una tendencia del paso de adaptación *forgetting factor* del algoritmo CCG, a medida que se va variando este factor con respecto al MSE en el radio de la geometría correspondiente a 135° para cada una de las distancias. Se puede observar que mientras la distancia desde la fuente de interés hasta el punto de origen en el arreglo semiesférico de sensores es menor, el algoritmo posee un mejor desempeño. Además se puede observar que para las distancias de $0,5\text{ m}$, 1 m , $1,5\text{ m}$ y 2 m el algoritmo presenta un mejor desempeño cuando $\lambda = 0.9991$, obteniéndose para

las distancias un MSE de $-22,7163 \text{ dB}$, $-21,9893 \text{ dB}$, $-21,7254 \text{ dB}$ y $-20,6013 \text{ dB}$ respectivamente. Por otro lado se puede observar que para las distancias de $2,5 \text{ m}$ y 3 m el algoritmo posee un mejor desempeño con un $\lambda = 0.9992$ con un MSE de $-19,8732 \text{ dB}$ y $-17,2184 \text{ dB}$ respectivamente.

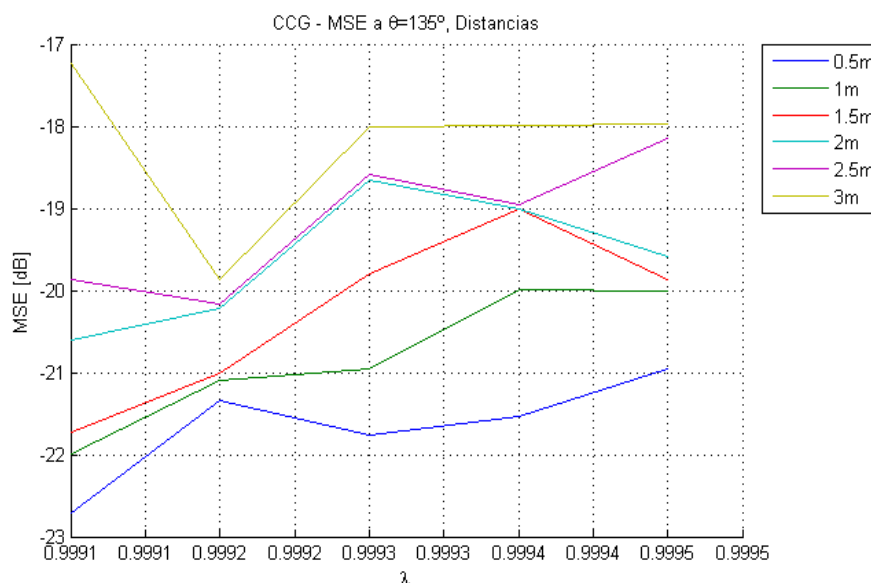


Figura 27. MSE del algoritmo CCG vs *Forgetting factor* a un ángulo de 135° .

Es así que el algoritmo presenta su mejor desempeño, obteniéndose los valores de MSE más bajos cuando $\lambda = 0.9991$ para las distancias de $0,5 \text{ m}$, 1 m , $1,5 \text{ m}$ y 2 m . Mientras que para las distancias de $2,5 \text{ m}$ y 3 m el desempeño más alto del algoritmo es cuando $\lambda = 0.9992$.

Análisis a 180°

En la Figura 27. Se muestra una tendencia del paso de adaptación *forgetting factor* del algoritmo CCG, a medida que se varía este factor con respecto al MSE en el radio de la geometría correspondiente a 180° para cada una de las distancias. Se puede observar que mientras la distancia desde la fuente de interés hasta el punto de origen en el arreglo semiesférico de sensores es menor, el algoritmo posee un mejor desempeño. Además se puede observar que para las distancias de 0.5 m , 2 m y $2,5 \text{ m}$ el algoritmo presenta un mejor desempeño cuando $\lambda = 0.9992$, obteniéndose para las distancias un MSE de $-20,9734 \text{ dB}$, $-18,7126 \text{ dB}$ y $-18,4027 \text{ dB}$ respectivamente.

Por otro lado, se puede observar que para las distancias de 1 m, 1,5 m y 3 m el algoritmo posee un mejor desempeño con un $\lambda = 0.9995$ con un MSE de $-20,2047$ dB, $-19,9983$ dB y $-17,7612$ dB respectivamente.

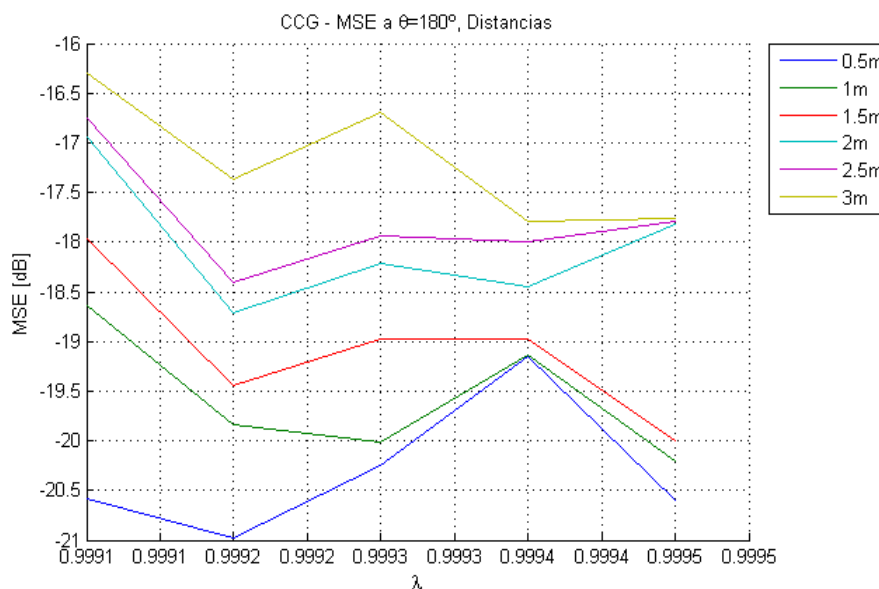


Figura 28. MSE del algoritmo CCG vs Forgetting factor a un ángulo de 180° .

Es así que el algoritmo presenta su mejor desempeño, obteniéndose los valores de MSE más bajos cuando $\lambda = 0.9992$ para las distancias de 0.5 m, 2 m y 2,5 m. Mientras que para las distancias de 1 m, 1,5 m y 3 m el desempeño más alto del algoritmo es cuando $\lambda = 0.9995$.

3.8. HNLMS

El algoritmo NCLMS es la versión normalizada del algoritmo CLMS, además este algoritmo ha sido ampliamente utilizado ya que posee una gran simplicidad y sobre todo porque computacionalmente presenta una baja complejidad (Caisapanta A. , 2015). Este algoritmo depende de un parámetro llamado *step size* que se representa con el símbolo μ , este parámetro tiene como objetivo controlar la estabilidad y la velocidad a la que converge el algoritmo (Caisapanta A. , 2015). En la tesis previa de Tatiana Caisapanta “Implementación De Un Arreglo Semiesférico De Micrófonos

Utilizando La Metodología *Beamforming* De Banda Ancha Para El Realce De La Voz” se determinó que el valor del paso de adaptación para el *step size* es de $\mu = 0.3$ con un MSE de -28.8352 [dB].

El algoritmo CCG por sus siglas en inglés *Constrained Conjugate Gradients* producto de una comparación con la estructura GSC (Bernal, Apolinario, & Campos, 2002). La respuesta de este algoritmo está dada por el parámetro de adaptación λ llamado *forgetting factor* que es un factor de ponderación de tipo exponencial.

Es importante mencionar como antecedente que según el análisis que se realizó en la anterior trabajo de titulación (Caisapanta T. , 2015), el valor de λ que presentó un mejor desempeño es de 0.9993 con un MSE de -34.1565 dB.

En el Anexo C se muestran las tablas de datos obtenidas para el algoritmo CCG, de la misma manera las gráficas correspondientes se encuentran en el Anexo D.

Análisis a 0°

En la Figura 28 se muestra una tendencia del paso de adaptación *step size* del algoritmo HNLMS. A medida que se varía la distancia con respecto al MSE en el radio de la geometría correspondiente a 0° . Se puede observar que para 0.5 m de distancia el algoritmo posee mejor desempeño con un $\mu = 0.4$, obteniéndose un MSE de $-22,7125$ dB. Mientras que para 1 m el mejor desempeño es para un $\mu = 0.3$ con un MSE de $-20,3981$ dB. Se puede observar también que para las distancias de 1,5m y 2 m el mejor desempeño es cuando $\mu = 0.2$ con un MSE de $-22,6892$ dB y $-21,7751$ dB respectivamente.

Finalmente a las distancias de 2,5 m y 3 m el mejor desempeño es cuando $\mu = 0.4$ con un MSE de $-20,6293$ dB y $-17,8473$ dB, es importante notar que a esta distancia el valor del MSE es casi igual al que genera un desempeño con un $\mu = 0.5$. Se puede observar además que al ir amentando la distancia el MSE también se incrementa.

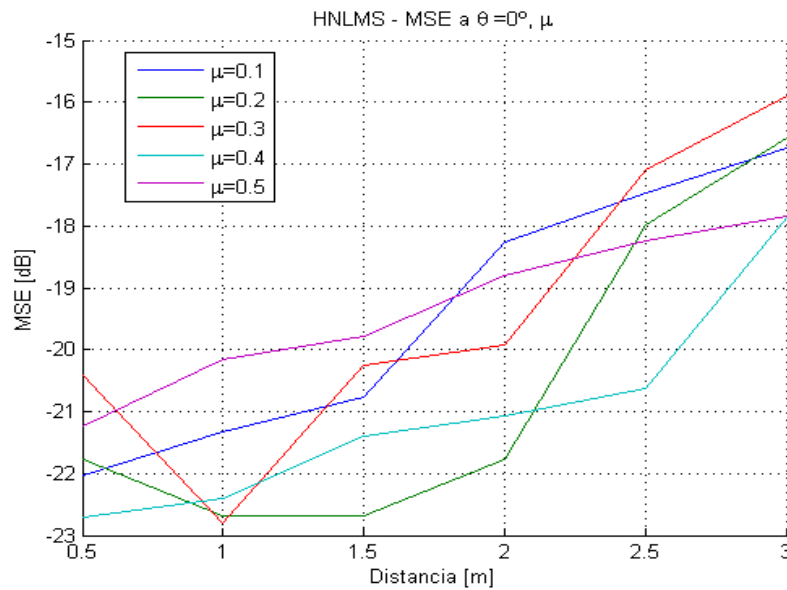


Figura 29. MSE del algoritmo HNLMS vs la distancia a un ángulo de 0° .

Es así que para un $\mu = 0.4$ el algoritmo presenta el mejor desempeño, obteniéndose los menores valores de MSE a distancias de 0.5 m , $2,5\text{ m}$ y 3 m . Así mismo se observó que el mejor desempeño a 1 m de distancia se obtuvo con un $\mu = 0.3$. Mientras que a una distancia de $1,5\text{ m}$ y 2 m el mejor desempeño del algoritmo está dado para un valor de $\mu = 0.2$. Por lo que el algoritmo presentaría un desempeño superior con un $\mu = 0.32$, todo esto con respecto a un ángulo de 0° .

Análisis a 45°

En la Figura 29 se muestra una tendencia del paso de adaptación *step size* del algoritmo HNLMS. A medida que se varía la distancia con respecto al MSE en el radio de la geometría correspondiente a 45° . Se puede observar que para 0.5 m , 1 m y 1.5 m de distancia el algoritmo posee mejor desempeño con un $\mu = 0.4$, obteniéndose un MSE de $-21,7424\text{ dB}$, $-21,4912\text{ dB}$ y $-20,9581\text{ dB}$ respectivamente. Mientras que para 2 m , $2,5\text{ m}$ y 3 m el mejor desempeño es para un $\mu = 0.5$ con un MSE de $-18,4183\text{ dB}$, $-18,7817\text{ dB}$ y $-18,4193\text{ dB}$ respectivamente. Se puede observar además que al ir aumentando la distancia el MSE también se incrementa.

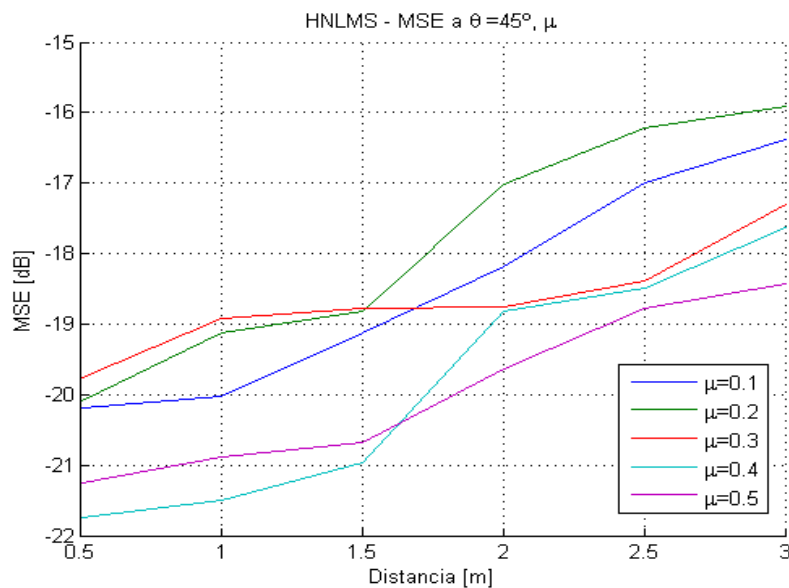


Figura 30. MSE del algoritmo HNLMS vs la distancia a un ángulo de 45° .

Es así que para un $\mu = 0.4$ el algoritmo presenta el mejor desempeño, obteniéndose los menores valores de MSE a distancias de 0.5 m , 1 m y 1.5 m . Así mismo se observó que el mejor desempeño a 2 m , 2.5 m y 3 m de distancia se obtuvo con un $\mu = 0.5$. Por lo que el algoritmo presentaría un desempeño superior con un $\mu = 0.45$, todo esto con respecto a un ángulo de 45° .

Análisis a 90°

En la Figura 30 se muestra una tendencia del paso de adaptación *step size* del algoritmo HNLMS. A medida que se varía la distancia con respecto al MSE en el radio de la geometría correspondiente a 90° . Se puede observar que para 0.5 m , 1 m , 1.5 m , 2 m , 2.5 m y 3 m de distancia el algoritmo posee mejor desempeño con un $\mu = 0.3$, obteniéndose un MSE de $-21,6713\text{ dB}$, $-21,0532\text{ dB}$, $-20,6253\text{ dB}$, $-20,1034\text{ dB}$, $-19,6784\text{ dB}$ y $-18,9653\text{ dB}$ respectivamente. Se puede observar además que al ir aumentando la distancia el MSE también se incrementa.

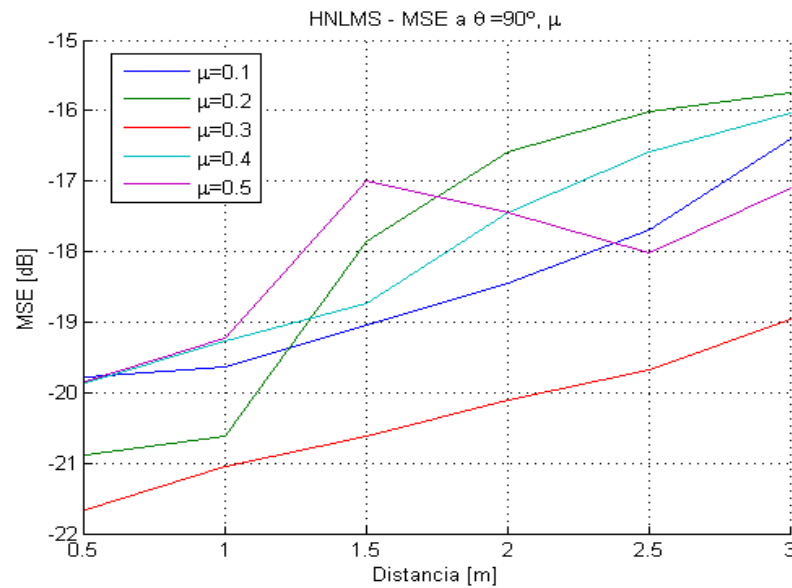


Figura 31. MSE del algoritmo HNLMS vs la distancia a un ángulo de 90° .

Es así que para un $\mu = 0.3$ el algoritmo presenta el mejor desempeño, obteniéndose los menores valores de MSE a distancias de 0.5 m , 1 m , 1.5 m , 2 m , 2.5 m y 3 m . Por lo que el algoritmo presentaría un desempeño superior con un $\mu = 0.3$, todo esto con respecto a un ángulo de 90° .

Análisis a 135°

En la Figura 31 se muestra una tendencia del paso de adaptación *step size* del algoritmo HNLMS. A medida que se varía la distancia con respecto al MSE en el radio de la geometría correspondiente a 135° . Se puede observar que para 0.5 m y 1 m de distancia el algoritmo posee mejor desempeño con un $\mu = 0.3$, obteniéndose un MSE de $-20,7141\text{ dB}$ y $-19,7812\text{ dB}$ respectivamente. Mientras que para 1.5 m el mejor desempeño es para un $\mu = 0.2$ con un MSE de $-17,9724\text{ dB}$, sin embargo se puede observar que a esta distancia con un $\mu = 0.5$ el desempeño del algoritmo es cercano al de $\mu = 0.2$. Para una distancia de 2 m el factor del algoritmo que presenta un mejor desempeño es $\mu = 0.3$ con un MSE de $-17,3715\text{ dB}$. Finalmente para distancias de 2.5 m y 3 m el mejor desempeño corresponde a un valor del filtro de $\mu = 0.5$ con un MSE de $-17,0082\text{ dB}$ y $-16,8173\text{ dB}$ respectivamente. Se puede observar además que al ir aumentando la distancia el MSE también se incrementa.

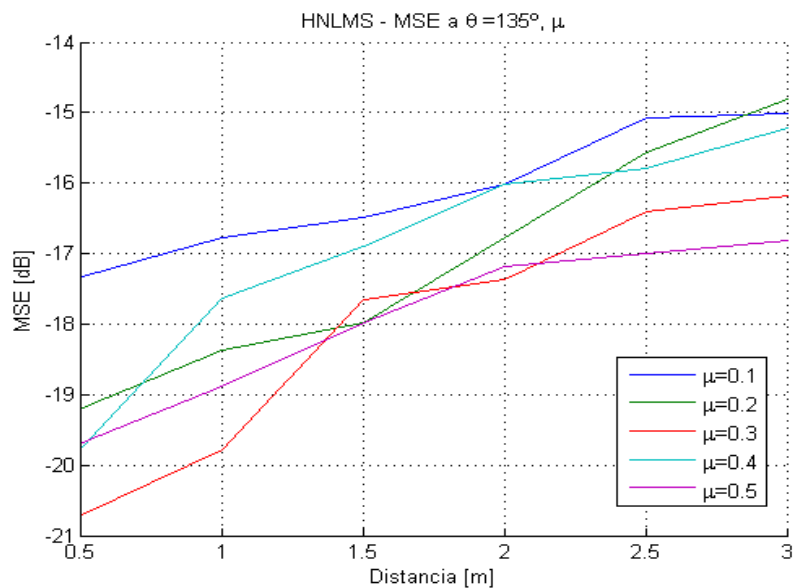


Figura 32. MSE del algoritmo HNLMS vs la distancia a un ángulo de 135°.

Es así que para un $\mu = 0.3$ el algoritmo presenta el mejor desempeño, obteniéndose los menores valores de MSE a distancias de 0.5 m y 1 m. Así mismo se observó que el mejor desempeño a 1,5 m de distancia se obtuvo con un $\mu = 0.2$. Para 2 m el mejor desempeño fue para un $\mu = 0.2$. Finalmente en las distancias de 2.5 m y 3 m el desempeño más alto correspondió a un factor $\mu = 0.5$. Por lo que el algoritmo presentaría un desempeño superior con un $\mu = 0.37$, todo esto con respecto a un ángulo de 135°.

Análisis a 180°

En la Figura 32. Se muestra una tendencia del paso de adaptación *step size* del algoritmo HNLMS. A medida que se varía la distancia con respecto al MSE en el radio de la geometría correspondiente a 180°. Se puede observar que para 0.5 m y 1 m de distancia el algoritmo posee mejor desempeño con un $\mu = 0.1$, obteniéndose un MSE de $-21,7312$ dB y $-19,5572$ dB respectivamente. Mientras que para 1,5 m el mejor desempeño es para un $\mu = 0.3$ con un MSE de $-18,5834$ dB, sin embargo se puede observar que a esta distancia con un $\mu = 0.5$ el desempeño del algoritmo es cercano al de $\mu = 0.3$. Para una distancia de 2 m el factor del algoritmo que presenta un mejor desempeño es $\mu = 0.3$ con un MSE de $-17,6018$ dB. Finalmente para distancias de

2.5 m y 3 m el mejor desempeño corresponde a un valor del filtro de $\mu = 0.5$ con un MSE de $-17,0213 \text{ dB}$ y $-16,7439 \text{ dB}$ respectivamente. Se puede observar además que al ir amentando la distancia el MSE también se incrementa.

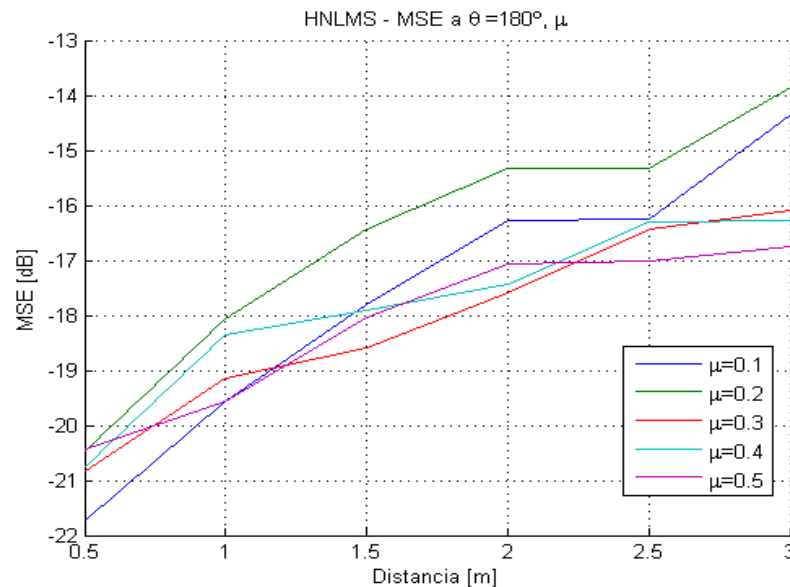


Figura 33. MSE del algoritmo HNLMS vs la distancia a un ángulo de 180° .

Es así que para un $\mu = 0.1$ el algoritmo presenta el mejor desempeño, obteniéndose los menores valores de MSE a distancias de 0.5 m y 1 m. Así mismo se observó que el mejor desempeño a 1,5 m y 2 m de distancia se obtuvo con un $\mu = 0.3$. Finalmente en las distancias de 2.5 m y 3 m el desempeño más alto correspondió a un factor $\mu = 0.5$. Por lo que el algoritmo presentaría un desempeño superior con un $\mu = 0.3$, todo esto con respecto a un ángulo de 180° .

3.8.1. Análisis MSE vs STEP SIZE

Análisis a 0°

En la Figura 33 se muestra una tendencia del paso de adaptación *step size* del algoritmo HNLMS, a medida que se va variando este factor con respecto al MSE en el radio de la geometría correspondiente a 0° para cada una de las distancias. Se puede observar que mientras la distancia desde la fuente de interés hasta el punto de origen en el arreglo semiesférico de sensores es menor, el algoritmo posee un mejor desempeño. Además se puede observar que para las distancias de 0,5 m, 2,5 m y 3 m

el algoritmo presenta un mejor desempeño cuando $\mu = 0.4$, obteniéndose para las distancias un MSE de $-22,7125 \text{ dB}$, $-18,2514 \text{ dB}$ y $-17,8492 \text{ dB}$ respectivamente. Por otro lado, se puede observar que para las distancias de 1 m , $1,5 \text{ m}$ y 2 m el algoritmo posee un mejor desempeño con un $\mu = 0.2$ con un MSE de $-22,6892 \text{ dB}$, $-22,6892 \text{ dB}$ y $-21,7751 \text{ dB}$ respectivamente.

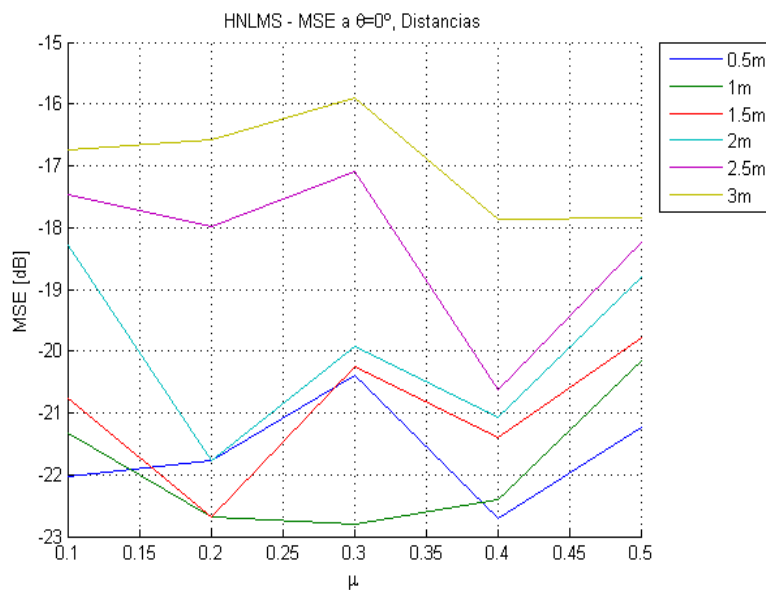


Figura 34. MSE del algoritmo HNLMS vs *Step size* a un ángulo de 0° .

Es así que el algoritmo presenta su mejor desempeño, obteniéndose los valores de MSE más bajos cuando $\mu = 0.4$ para las distancias de $0,5 \text{ m}$, $2,5 \text{ m}$ y 3 m . Mientras que para las distancias de 1 m , $1,5 \text{ m}$ y 2 m el desempeño más alto del algoritmo es cuando $\mu = 0.2$.

Análisis a 45°

En la Figura 34 se muestra una tendencia del paso de adaptación *step size* del algoritmo HNLMS, a medida que se va variando este factor con respecto al MSE en el radio de la geometría correspondiente a 45° para cada una de las distancias. Se puede observar que mientras la distancia desde la fuente de interés hasta el punto de origen en el arreglo semiesférico de sensores es menor, el algoritmo posee un mejor desempeño. Además se puede observar que para las distancias de $0,5 \text{ m}$, 1 m y $1,5 \text{ m}$ el algoritmo presenta un mejor desempeño cuando $\mu = 0.4$, obteniéndose para las

distancias un MSE de $-21,7424 \text{ dB}$, $-21,4912 \text{ dB}$ y $-20,9581 \text{ dB}$ respectivamente. Por otro lado, se puede observar que para las distancias de 2 m , $2,5 \text{ m}$ y 3 m el algoritmo posee un mejor desempeño con un $\mu = 0.5$ con un MSE de $-19,6413 \text{ dB}$, $-18,7817 \text{ dB}$ y $-18,4193 \text{ dB}$ respectivamente.

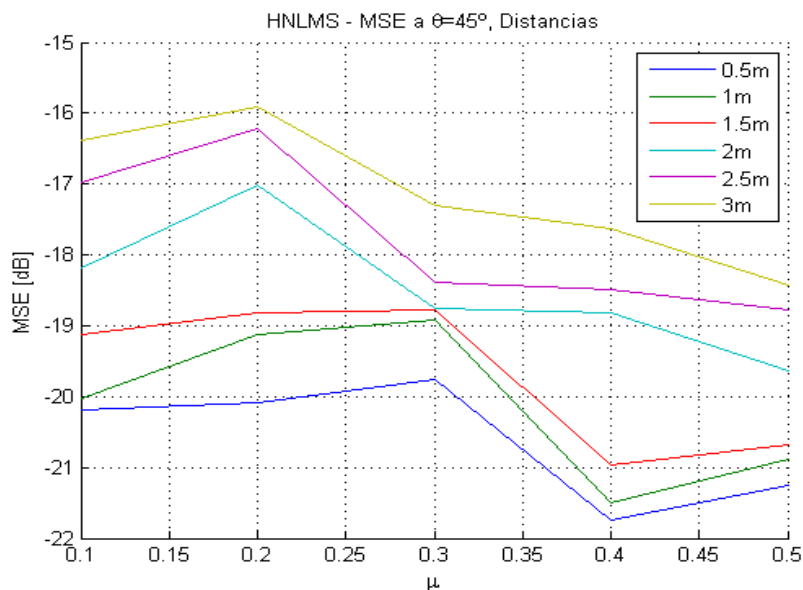


Figura 35. MSE del algoritmo HNLMS vs *Step size* a un ángulo de 45° .

Es así que el algoritmo presenta su mejor desempeño, obteniéndose los valores de MSE más bajos cuando $\mu = 0.4$ para las distancias de $0,5 \text{ m}$, 1 m y $1,5 \text{ m}$. Mientras que para las distancias de 2 m , $2,5 \text{ m}$ y 3 m el desempeño más alto del algoritmo es cuando $\mu = 0.5$.

Análisis a 90°

En la Figura 35 se muestra una tendencia del paso de adaptación *step size* del algoritmo HNLMS, a medida que se va variando este factor con respecto al MSE en el radio de la geometría correspondiente a 90° para cada una de las distancias. Se puede observar que mientras la distancia desde la fuente de interés hasta el punto de origen en el arreglo semiesférico de sensores es menor, el algoritmo posee un mejor desempeño. Además se puede observar que para las distancias de $0,5 \text{ m}$, 1 m , $1,5 \text{ m}$, 2 m , $2,5 \text{ m}$ y 3 m el algoritmo presenta un mejor desempeño cuando $\mu = 0.3$,

obteniéndose para las distancias un MSE de $-21,6713 \text{ dB}$, $-21,0532 \text{ dB}$, $-20,6253 \text{ dB}$, $-20,1034 \text{ dB}$, $-19,6784 \text{ dB}$ y $-18,9653 \text{ dB}$ respectivamente.

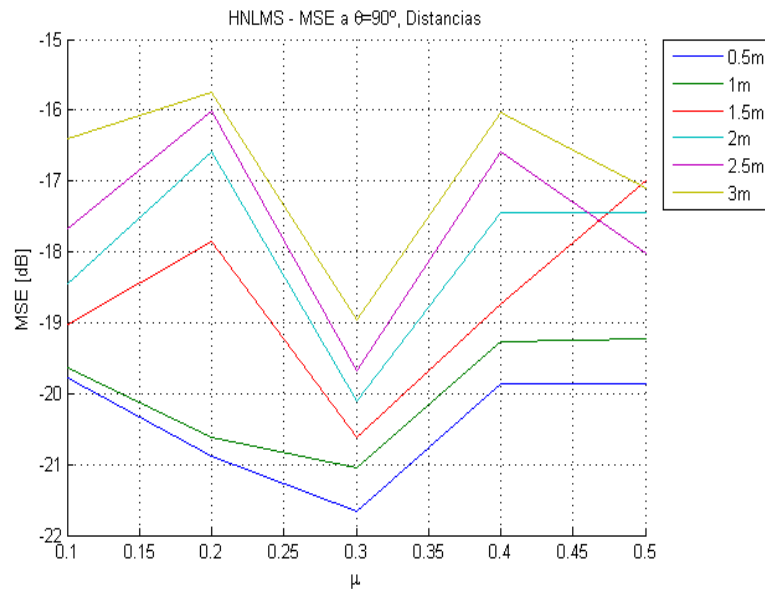


Figura 36. MSE del algoritmo HNLMS vs Step size a un ángulo de 90° .

Es así que el algoritmo presenta su mejor desempeño, obteniéndose los valores de MSE más bajos cuando $\mu = 0.3$ para las distancias de $0,5 \text{ m}$, 1 m , $1,5 \text{ m}$, 2 m , $2,5 \text{ m}$ y 3 m .

Análisis a 135°

En la Figura 36 se muestra una tendencia del paso de adaptación *step size* del algoritmo HNLMS, a medida que se va variando este factor con respecto al MSE en el radio de la geometría correspondiente a 135° para cada una de las distancias. Se puede observar que mientras la distancia desde la fuente de interés hasta el punto de origen en el arreglo semiesférico de sensores es menor, el algoritmo posee un mejor desempeño. Además se puede observar que para las distancias de $0,5 \text{ m}$, 1 m y 2 m el algoritmo presenta un mejor desempeño cuando $\mu = 0.3$, obteniéndose para las distancias un MSE de $-20,7141 \text{ dB}$, $-19,7812 \text{ dB}$ y $-17,3715 \text{ dB}$ respectivamente. Por otro lado, se puede observar que para la distancia de $1,5 \text{ m}$ el algoritmo posee un mejor desempeño con un $\mu = 0.2$ con un MSE de $-17,9724 \text{ dB}$. Finalmente para las distancias de $2,5 \text{ m}$ y 3 m el algoritmo presenta un mejor desempeño cuando $\mu = 0.5$,

obteniéndose para las distancias un MSE de $-17,0082 \text{ dB}$ y $-16,8173 \text{ dB}$ respectivamente.

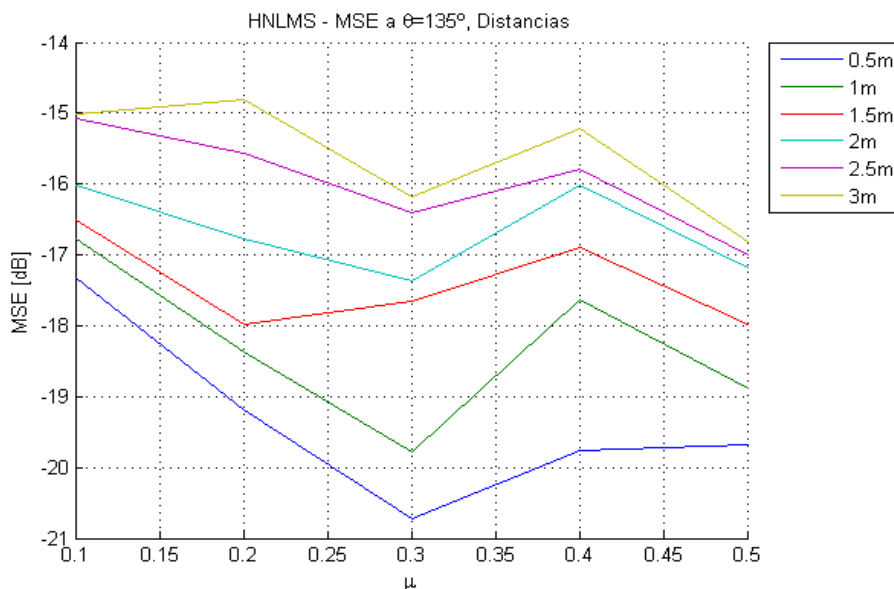


Figura 37. MSE del algoritmo HNLMS vs Step size a un ángulo de 135° .

Es así que el algoritmo presenta su mejor desempeño, obteniéndose los valores de MSE más bajos cuando $\mu = 0.3$ para las distancias de 0.5 m , 1 m y 2 m . Para la distancia de 1.5 m el desempeño más alto del algoritmo es cuando $\mu = 0.2$. Mientras que para las distancias de 2.5 m y 3 m el mejor desempeño es cuando $\mu = 0.5$.

Análisis a 180°

En la Figura 37 se muestra una tendencia del paso de adaptación *step size* del algoritmo HNLMS, a medida que se va variando este factor con respecto al MSE en el radio de la geometría correspondiente a 180° para cada una de las distancias. Se puede observar que mientras la distancia desde la fuente de interés hasta el punto de origen en el arreglo semiesférico de sensores es menor, el algoritmo posee un mejor desempeño. Además se puede observar que para la distancia de $0,5 \text{ m}$ el algoritmo posee un mejor desempeño con un $\mu = 0.1$ con un MSE de $-21,7312 \text{ dB}$. Para las distancias de 1 m , $2,5 \text{ m}$ y 3 m el algoritmo presenta un mejor desempeño cuando $\mu = 0.5$, obteniéndose para las distancias un MSE de $-19,5742 \text{ dB}$, $-17,0213 \text{ dB}$ y $-16,7439 \text{ dB}$ respectivamente. Finalmente para las distancias de $1,5 \text{ m}$ y 2 m el

algoritmo presenta un mejor desempeño cuando $\mu = 0.3$, obteniéndose para las distancias un MSE de $-18,5834 \text{ dB}$ y $-16,6018 \text{ dB}$ respectivamente.

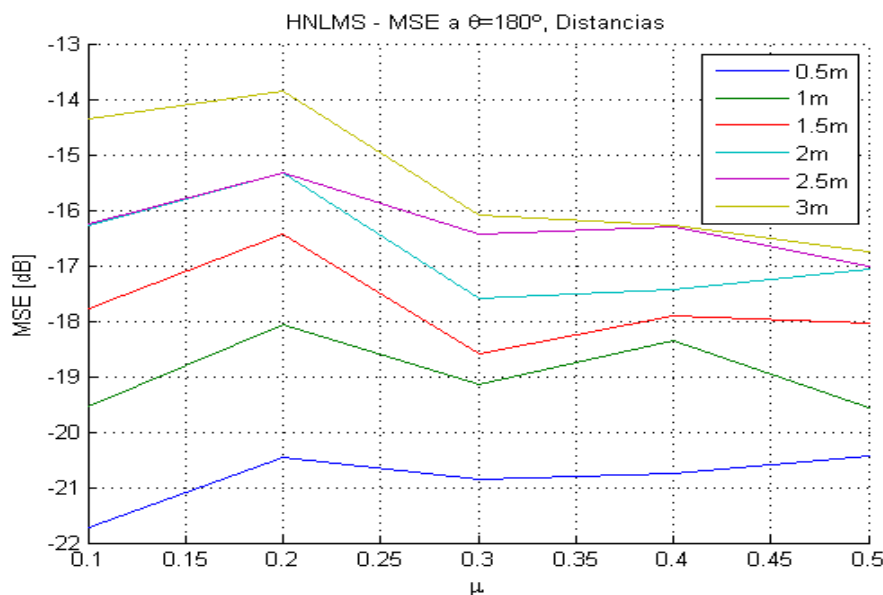


Figura 38. MSE del algoritmo HNLMS vs *Step size* a un ángulo de 180° .

Es así que el algoritmo presenta su mejor desempeño, obteniéndose los valores de MSE más bajos cuando $\mu = 0.1$ para las distancias de $0,5 \text{ m}$. Para las distancias de 1 m , $2,5 \text{ m}$ y 3 m el desempeño más alto del algoritmo es cuando $\mu = 0.5$. Finalmente que para las distancias de $1,5 \text{ m}$ y 2 m el mejor desempeño es cuando $\mu = 0.3$.

3.9. Generación de Fórmula

Mediante la ayuda de Matlab se puede generar una fórmula polinómica que describa cómo va variando el MSE con respecto al valor del factor del filtro que en este caso es el *forgetting factor* para el algoritmo CCG y *step size* para el algoritmo HNLMS. Utilizando la opción *Basic Fitting* dentro del GUI, se puede seleccionar el grado del polinomio con el cual se desea que se aproxime una curva a la existente.

Para este caso se escogió que la aproximación se realice mediante la generación de un polinomio de quinto grado, como se muestra en la Figura 39 y Figura 40.

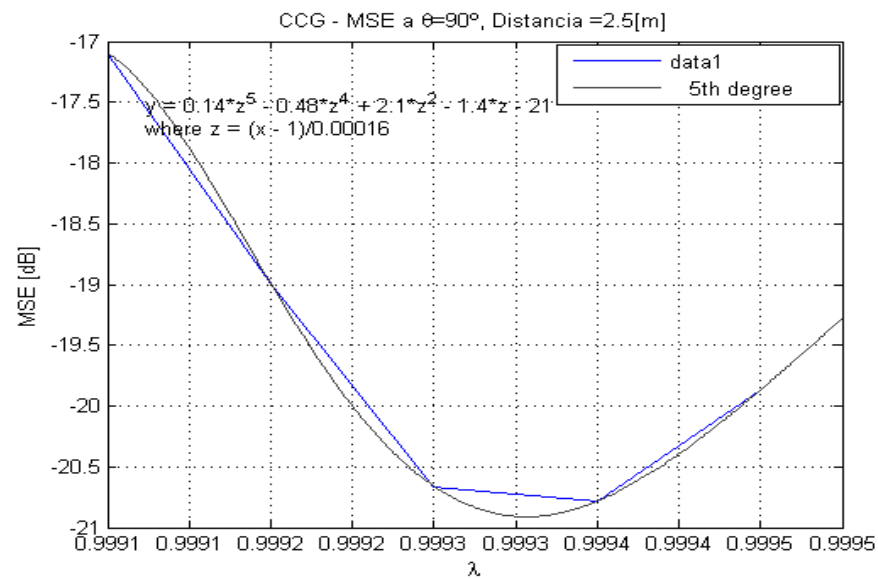


Figura 39. CCG - Aproximación MSE vs λ – Polinomio 5to grado.

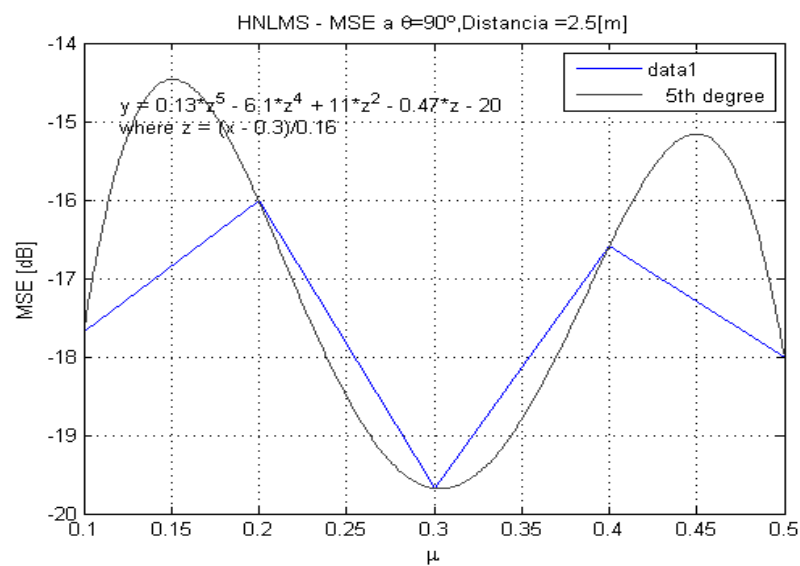


Figura 40. HNLMS - Aproximación MSE vs λ – Polinomio 5to grado.

Donde el polinomio de quinto grado genera una curva que pasa por los puntos de los datos tomados, aproximando esta curva a la existente, como se puede observar en la Figura 39.

Dentro de la opción *Basic fitting*, además de poder escoger el grado del polinomio con el que se genera la aproximación, permite mostrar la fórmula que describe tal

curva. En este caso la fórmula describe los valores de los factores de cada filtro con el que se genera un cierto MSE según el ángulo de la geometría.

Para el algoritmo CCG la fórmula está dada de la siguiente manera:

$$y_{CCG} = p1 * z^5 + p2 * z^4 + p3 * z^3 + p4 * z^2 + p5 * z + p6 \quad (18)$$

Donde:

$$z = (x - \lambda) / \alpha$$

$$\lambda = 0.9993$$

$$\alpha = 0.00015811$$

Coefficientes:

$$p1 = 0.13517$$

$$p2 = -0.47924$$

$$p3 = 0$$

$$p4 = 2.1284$$

$$p5 = -1.4396$$

$$p6 = -20.661$$

Mientras que para el algoritmo HNLMS la fórmula está dada de la siguiente manera:

$$y_{HNLMS} = p1 * z^5 + p2 * z^4 + p3 * z^3 + p4 * z^2 + p5 * z + p6 \quad (19)$$

Donde

$$z = (x - \mu) / \alpha$$

$$\mu = 0.3$$

$$\alpha = 0.15811$$

Coefficientes

$$p1 = 0.13347$$

$$p2 = -6.0893$$

$$p3 = 0$$

$$p4 = 10.886$$

$$p5 = -0.47325$$

$$p6 = -19.678$$

La generación de esta fórmula permite determinar el comportamiento del algoritmo para una distancia y ángulo determinados. Si se reemplaza el MSE obtenido de cada valor del factor del filtro en la ecuación generada, se puede conseguir un valor estimado del MSE para un punto determinado de la geometría.

3.10. Pasos de adaptación para los algoritmos CCG y HNLMS

Una vez realizado el análisis de las muestras según la geometría propuesta, es importante determinar el valor más idóneo del factor del filtro con el que debe ser configurado cada algoritmo para así obtener un desempeño adecuado del mismo dentro de la geometría de prueba.

Tabla 3.
Algoritmo CCG - Mejores resultados.
ALGORITMO CCG

ÁNGULO	<i>Forgetting</i> <i>Factor</i>
0°	0.99945
45°	0.9995
90°	0.9993
135°	0.9992
180°	0.9994

Tabla 4.
Algoritmo HNLMS - Mejores resultados.
ALGORITMO HNLMS

ÁNGULO	<i>Step Size</i>
0°	0.32
45°	0.45

Continua →

90°	0.3
135°	0.37
180°	0.3

En la Tabla 3 se muestran valores con los que el *forgetting factor* genera un mejor desempeño del algoritmo CCG en cada ángulo de la geometría. Tomando en cuenta los valores expuestos y haciendo un promedio, se llega a la conclusión de que el valor más adecuado para este algoritmo resulta ser cuando $\lambda = 0.99937$.

De la misma manera en la Tabla 4 se muestran valores con los que el *step size* genera un mejor desempeño del algoritmo HNLMS en cada ángulo de la geometría. Tomando en cuenta los valores expuestos y haciendo un promedio, se llega a la conclusión de que el valor más adecuado para este algoritmo resulta ser cuando $\mu = 0.348$.

CAPÍTULO 4

4. PRUEBAS DE RECORRIDO EN LA GEOMETRÍA

4.1. Pruebas con todo puro

4.1.1. Pruebas con el algoritmo CCG con un tono puro

Como se demostró en el capítulo anterior, el algoritmo CCG presentaría el mejor desempeño cuando el valor del paso de adaptación *forgetting factor* es igual a $\lambda = 0.99937$. Por lo que con este valor de λ se procedió a tomar datos en cada punto de la geometría para observar el comportamiento. En la Tabla 5 se puede observar el desempeño del algoritmo para el valor del factor del filtro mencionado.

Tabla 5.
Resultados pruebas tono puro – Algoritmo CCG para $\lambda=0.99937$.

	0,5 [M]	1,0 [M]	1,5 [M]	2,0 [M]	2,5 [M]	3,0 [M]
0°	-22,5941	-21,7461	-20,8962	-20,5887	-20,1289	-19,2463
15°	-22,2249	-21,9462	-21,7012	-19,5191	-18,7955	-18,3308
30°	-22,2417	-21,5205	-20,8825	-20,3859	-20,1164	-19,5797
45°	-21,1462	-19,9715	-19,1052	-18,3822	-17,5999	-17,2556
60°	-22,1895	-21,7732	-21,5112	-21,0035	-20,2146	-18,0061
75°	-19,8140	-19,2455	-18,8015	-18,3746	-18,0521	-17,7268
90°	-21,7972	-21,6141	-21,4476	-21,1371	-20,7222	-18,3785
105°	-19,8962	-19,3336	-19,0162	-18,9025	-18,1712	-17,5127
120°	-20,1646	-19,6308	-18,7418	-18,3214	-18,1446	-17,9231
135°	-21,6515	-20,4697	-19,4081	-18,8356	-18,7718	-18,0006
150°	-19,5748	-19,2487	-18,8242	-18,6411	-18,1031	-17,7254
165°	-21,4082	-20,4301	-19,6862	-19,2701	-18,811	-18,4003
180°	-19,6955	-19,5787	-18,9718	-18,3288	-17,9645	-17,2427

Como se muestra en la Tabla 5 y corroborando los resultados del capítulo anterior, se puede observar que mientras la distancia aumenta, el MSE también se incrementa, por lo tanto el desempeño del filtro va disminuyendo. Además se puede ver que el

MSE no varía considerablemente al variar el ángulo en cada distancia respectivamente, manteniéndose valores estables.

4.1.2. Pruebas con el algoritmo HNLMS para tono puro

En el capítulo anterior se demostró que el algoritmo HNLMS presentaría el mejor desempeño cuando el valor del paso de adaptación *step size* es igual a $\mu = 0.348$. Por lo que con este valor de μ se procedió a tomar datos en cada punto de la geometría para observar el comportamiento. En la Tabla 6 se puede observar el desempeño del algoritmo para el valor del factor del filtro mencionado.

Tabla 6.
Resultados pruebas tono puro - Algoritmo HNLMS para $\mu=0.348$.

	0,5 [M]	1,0 [M]	1,5 [M]	2,0 [M]	2,5 [M]	3,0 [M]
0°	-21,5553	-22,5967	-20,8214	-20,4977	-18,8593	-16,8804
15°	-22,1545	-20,8081	-20,2840	-18,9950	-18,5087	-16,9838
30°	-21,4229	-20,8465	-20,4138	-20,0440	-19,2411	-17,4230
45°	-20,7494	-20,2088	-19,8713	-18,7833	-18,4399	-17,4673
60°	-20,9040	-20,3998	-20,1742	-19,8074	-18,1853	-17,8000
75°	-21,3697	-20,9233	-20,6050	-20,1460	-18,4973	-18,2534
90°	-20,7682	-20,1592	-19,6855	-18,7728	-18,1312	-17,4954
105°	-19,9699	-19,1505	-18,8003	-18,2501	-17,8036	-17,2212
120°	-21,0005	-19,7824	-18,1433	-17,7930	-17,0195	-16,3459
135°	-20,2387	-18,7062	-17,2707	-16,6965	-16,0947	-15,6948
150°	-19,2365	-18,013	-17,2718	-16,7265	-16,1626	-15,9742
165°	-20,9932	-18,8584	-17,9781	-16,8819	-16,3571	-15,8790
180°	-20,8054	-18,7576	-18,2476	-17,5165	-16,3625	-16,1851

Como se muestra en la Tabla 6 y corroborando los resultados del capítulo anterior, se puede observar que mientras la distancia aumenta, el MSE también se incrementa, por lo tanto el desempeño del filtro *step size* va disminuyendo. Además se puede ver que el MSE no varía considerablemente al variar el ángulo en cada distancia respectivamente, manteniéndose valores estables.

4.1.3. Pruebas de recorrido en la geom. con tono puro

El objetivo de realizar pruebas del desempeño de los algoritmos mientras la fuente de interés se mueve por la geometría, es observar cómo se comportan los mismos. Para esto se seleccionó una serie de puntos dentro de la geometría por los cuales se moverá dicha fuente. Se trató de realizar el recorrido cubriendo todos los ángulos y distancias, tal como se muestra en la Figura 41.

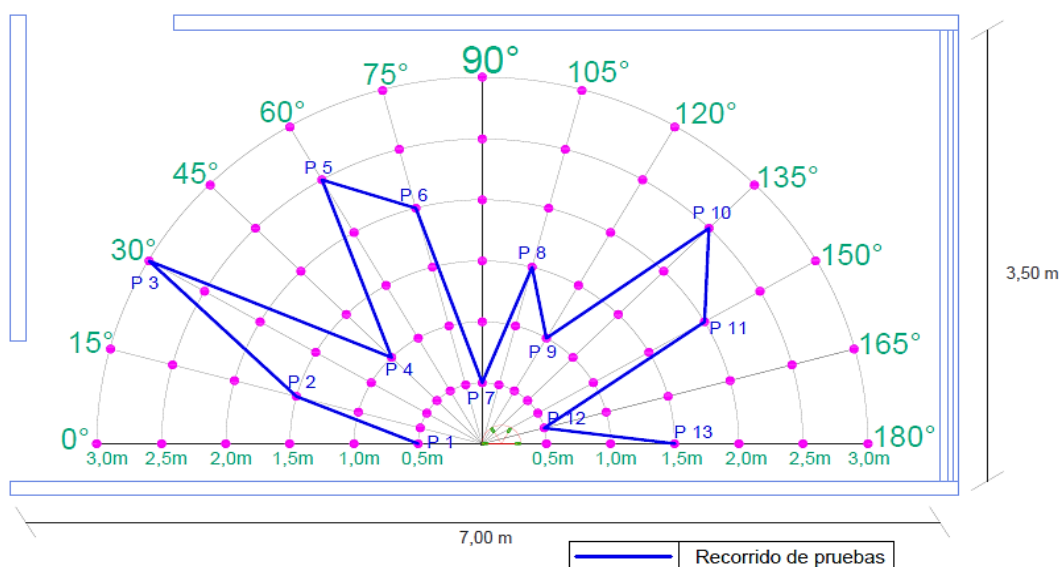


Figura 41. Recorrido de pruebas en la geometría.

En la Tabla 7 se describe los puntos por los que pasa el recorrido de la fuente de interés, así como también las coordenadas de los mismos. Además se ve el desempeño de cada algoritmo, mostrando los valores de MSE para punto del recorrido dentro de la geometría.

Tabla 7.

MSE – Recorrido en geometría con tono puro.

PUNTO	COORDENADA	MSE - CCG	MSE - HNLMS
P 1	(0,5 , 0°)	-21,7461	-20,9711
P 2	(1,5 , 15°)	-20,6037	-21,4712
P 3	(3 , 30°)	-18,3131	-18,4615
P 4	(1 , 45°)	-18,8611	-16,9771
P 5	(2,5 , 60°)	-19,3322	-18,5512

Continua →

P 6	(2 , 75°)	-17,2746	-17,3816
P 7	(0.5 , 90°)	-20,6991	-18,0042
P 8	(1.5 , 105°)	-18,1004	-18,5112
P 9	(1 , 120°)	-18,5113	-17,4992
P 10	(2.5 , 135°)	-17,6093	-16,3341
P 11	(2 , 150°)	-17,7612	-16,2461
P 12	(0.5 , 165°)	-20,5961	-19,1995
P 13	(1.5 , 180°)	-18,0043	-17,1847

El desempeño de cada algoritmo a lo largo del recorrido se muestra en la Figura 42. Se puede observar que el algoritmo CCG muestra un mejor desempeño en los puntos P1, P4, P5, P7, P9, P10, P11, P12 y P13. Los valores de MSE de cada algoritmo para estos puntos se muestran en la Tabla 5. Por otra parte se observa un desempeño superior del algoritmo HNLMS en los puntos P2, P3, P6 y P8. De igual forma los valores de MSE para estos puntos se muestran en la Tabla 5.

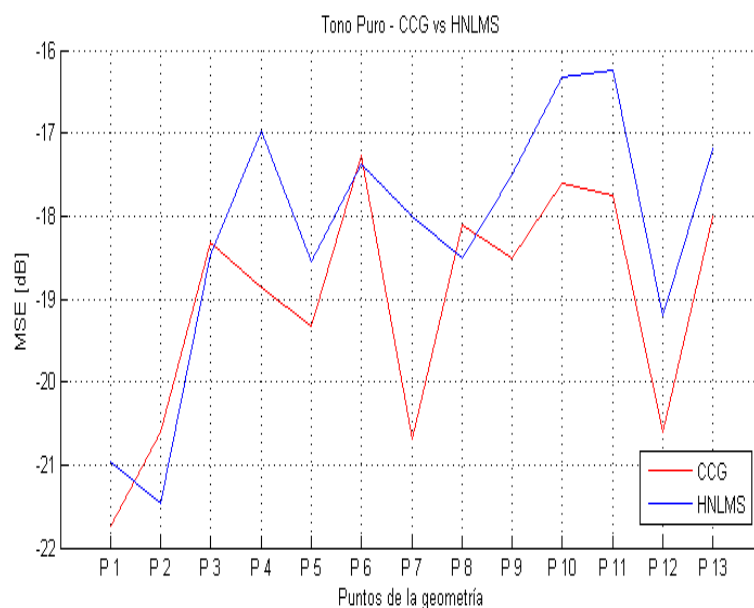


Figura 42. CCG vs HNLMS – Tono puro.

Por todo lo expuesto, se puede determinar que el algoritmo CCG muestra un mejor desempeño que HNLMS para una fuente de interés de tono puro, ya que en la mayoría de puntos se muestra una superioridad de CCG, además la media de desempeño para este algoritmo es de $-19,0317 [dB]$, mientras que para HNLMS es de $-18,2148 [dB]$.

4.2. Pruebas con tonos de voz

4.2.1. Pruebas con el algoritmo CCG para tono de voz

Como se demostró en el capítulo anterior, el algoritmo CCG presentaría el mejor desempeño cuando el valor del paso de adaptación *forgetting factor* es igual a $\lambda = 0.99937$. Por lo que con este valor de λ se procedió a tomar datos en cada punto de la geometría para observar el comportamiento. En la Tabla 8 se puede observar el desempeño del algoritmo para el valor del factor del filtro mencionado.

Tabla 8.
Resultados pruebas tono de voz - Algoritmo CCG para $\lambda=0.99937$.

	0,5 [m]	1,0 [m]	1,5 [m]	2,0 [m]	2,5 [m]	3,0 [m]
0°	-20,2761	-19,6642	-18,7424	-18,4235	-18,0543	-17,1849
15°	-20,0018	-19,8134	-19,6321	-17,7537	-16,6779	-16,2232
30°	-20,1003	-19,3452	-18,9414	-18,4425	-18,2568	-17,4829
45°	-19,5132	-17,8776	-17,0069	-16,6427	-15,4525	-15,3342
60°	-19,9982	-19,5561	-19,3158	-19,2468	-18,1643	-16,1003
75°	-17,9152	-19,9123	-16,7379	-16,3679	-16,1467	-15,6823
90°	-19,2412	-21,7003	-19,2457	-19,6426	-18,8659	-16,2847
105°	-17,5128	-17,7314	-17,1853	-16,7539	-16,3622	-15,4829
120°	-18,0274	-18,4215	-16,6679	-16,5325	-16,6282	-15,8436
135°	-18,7461	-19,5413	-17,4776	-16,7428	-16,7091	-15,9232
150°	-17,7512	-17,4217	-16,6425	-16,5543	-16,0032	-15,6029
165°	-19,4971	-19,3321	-17,5864	-17,1875	-16,5902	-16,3092
180°	-17,3861	-19,6414	-16,8642	-16,6438	-15,8991	-15,1193

Como se muestra en la Tabla 8 y confirmando los resultados del capítulo anterior, se puede observar que mientras la distancia aumenta, el MSE también se incrementa, por lo tanto el desempeño del filtro va disminuyendo. Además se puede ver que el MSE no varía considerablemente al variar el ángulo en cada distancia respectivamente, manteniéndose valores estables.

4.2.2. Pruebas con el algoritmo HNLMS para tono de voz

En el capítulo previo se demostró que el algoritmo HNLMS presentaría el mejor desempeño cuando el valor del paso de adaptación *step size* es igual a $\mu = 0.348$. Por

lo que con este valor de μ se procedió a tomar datos en cada punto de la geometría para observar el comportamiento. En la Tabla 9 se puede observar el desempeño del algoritmo para el valor del factor del filtro mencionado.

Tabla 9.
Resultados pruebas tono de voz - Algoritmo HNLMS para $\mu=0.348$.

	0,5 [m]	1,0 [m]	1,5 [m]	2,0 [m]	2,5 [m]	3,0 [m]
0°	-19,4827	-20,4459	-18,7133	-18,3341	-16,7927	-14,6812
15°	-20,0917	-18,7267	-18,1742	-16,8820	-16,5723	-14,7981
30°	-19,3928	-18,6821	-18,3912	-18,1735	-18,1857	-15,8392
45°	-18,6719	-28,1039	-17,7922	-16,6923	-16,6822	-15,3482
60°	-18,8932	-18,5012	-18,0981	-17,7512	-17,7512	-15,7521
75°	-19,7252	-18,8701	-18,1741	-18,0871	-17,6810	-16,1362
90°	-18,6696	-18,0912	-17,4909	-16,9127	-16,6911	-15,3441
105°	-17,8764	-17,0118	-16,9712	-16,1903	-16,1867	-15,1895
120°	-19,0742	-17,6091	-16,0722	-15,6923	-15,7721	-14,2975
135°	-18,1754	-16,3821	-15,1847	-14,8261	-16,5867	-13,5832
150°	-17,1636	-16,1005	-14,8221	-14,6551	-14,6912	-13,9782
165°	-18,6428	-16,7035	-15,7992	-14,7261	-14,4867	-13,8765
180°	-18,7753	-16,3341	-16,1854	-15,4551	-15,4927	-14,2861

Como se muestra en la Tabla 9 y confirmando los resultados del capítulo anterior, se puede observar que mientras la distancia aumenta, el MSE también se incrementa, por lo tanto el desempeño del filtro va disminuyendo. Además se puede ver que el MSE no varía considerablemente al variar el ángulo en cada distancia respectivamente, manteniéndose valores estables.

4.2.3. Pruebas de recorrido en la geom. con tono de voz

El objetivo de realizar pruebas del desempeño de los algoritmos mientras la fuente de interés se mueve por la geometría, es observar cómo se comportan los mismos. Para esto se seleccionó una serie de puntos dentro de la geometría por los cuales se moverá dicha fuente. Se trató de realizar el recorrido cubriendo todos los ángulos y distancias, tal como se muestra en la Figura 41. Las pruebas que se muestran fueron llevadas a cabo con una fuente de interés emisora de voz.

En la Tabla 10 se describe los puntos por los que pasa el recorrido de la fuente de interés, así como también las coordenadas de los mismos. Además se ve el desempeño de cada algoritmo, mostrando los valores de MSE para punto del recorrido dentro de la geometría.

Tabla 10.
Recorrido en geometría con tono de voz.

PUNTO	COORDENADA	MSE [dB] - CCG	MSE [dB] - HNLMS
P 1	(0.5, 0°)	-19,1471	-19,3741
P 2	(1.5, 15°)	-18,8461	-19,3747
P 3	(3, 30°)	-17,0811	-17,5261
P 4	(1, 45°)	-17,1881	-15,2471
P 5	(2.5, 60°)	-17,4722	-16,5662
P 6	(2, 75°)	-16,2749	-17,3301
P 7	(0.5, 90°)	-18,5355	-17,8004
P 8	(1.5, 105°)	-16,9119	-17,0052
P 9	(1, 120°)	-17,6681	-15,5994
P 10	(2.5, 135°)	-17,0034	-13,2481
P 11	(2, 150°)	-16,4882	-16,2471
P 12	(0.5, 165°)	-18,9004	-17,8461
P 13	(1.5, 180°)	-16,5714	-16,4871

El desempeño de cada algoritmo a lo largo del recorrido se muestra en la Figura 43. Se puede observar que el algoritmo CCG muestra un mejor desempeño en los puntos P4, P5, P7, P9, P10, P11, P11 y P13. Los valores de MSE de cada algoritmo para estos puntos se muestran en la Tabla 8. Por otra parte se observa un desempeño superior del algoritmo HNLMS en los puntos P1, P2, P3 y P6. De igual forma los valores de MSE para estos puntos se muestran en la Tabla 8.

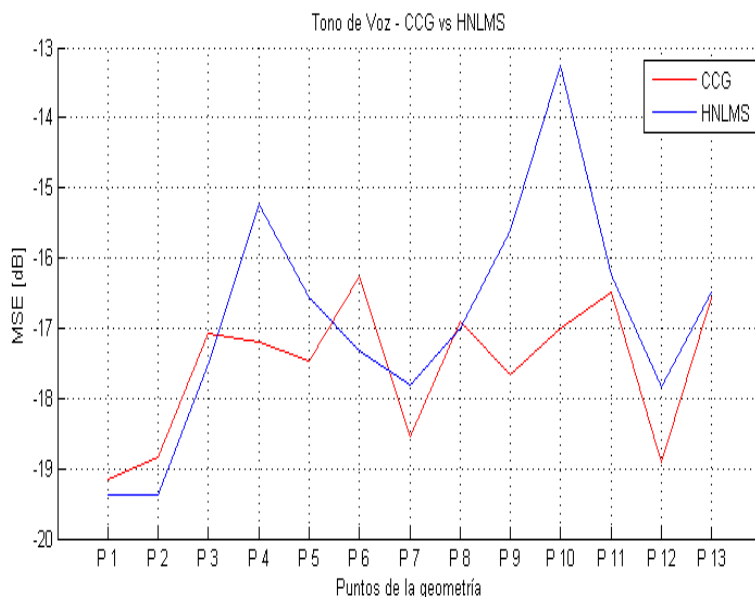


Figura 43. CCG vs HNLMS – Tono de Voz.

Por todo lo expuesto, se puede determinar que el algoritmo CCG muestra un mejor desempeño que HNLMS para una fuente de interés de tono de voz, ya que en la mayoría de puntos se muestra una superioridad de CCG, además la media de desempeño para este algoritmo es de $-17,5452$ [dB], mientras que para HNLMS es de $-16,8962$ [dB].

En la Tabla 11 se muestra los valores promedios de MSE para los algoritmos CCG y HNLMS tanto para las pruebas realizadas con una fuente de tono puro y con una fuente de voz. El mejor algoritmo resulta ser CCG presentando el mejor desempeño tanto en las pruebas con un tono puro, así como también para las pruebas con voz.

Tabla 11.
Valores promedio de MSE.

	CCG [dB]	HNLMS [dB]
Tono Puro	-19,0317	-18,2148
Tono de Voz	-17,5452	-16,8962

En la Figura 42 y 43 se puede observar que en el recorrido realizado en la geometría en los puntos P6 y P8 el algoritmo HNLMS presenta ligeramente un mejor

desempeño que CCG. Por este motivo se procedió a tomar nuevos datos en los que se obtuvo los siguientes resultados.

Tabla 12.
Datos Tono Puro P6 yP8

TONO PURO	
CCG	
P6	P8
-17.4591	-18.0029
HNLMS	
P6	P8
-17.2948	-17.8218

Tabla 123.
Datos Tono de Voz P6 yP8.

TONO VOZ	
CCG	
P6	P8
-17.3841	-17.5344
HNLMS	
P6	P8
-17.2867	-17.3692

Como se puede observar en las Tablas 11 y 12 el algoritmo CCG presenta un mejor desempeño que HNLMS. Por lo que se concluye que para los datos anteriores la variación presentada en estos puntos pudo haber sido causada por perturbaciones introducidas en el canal al momento de tomar datos para el algoritmo CCG, viéndose así afectado su desempeño. Además se observó que a una distancia de 1.5 m dentro de la geometría los algoritmos presentan una variación atípica en su desempeño debido al tipo de micrófonos utilizados y a la amplificación realizada.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES & RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Con el objetivo de calibrar los parámetros de los algoritmos, fue necesario realizar pruebas dentro de la geometría cada 15° , asemejando la apertura del ángulo a la distancia de un paso de una persona promedio y en medidas que van variando cada 50 cm para así cubrir todo el escenario de pruebas, obteniendo datos de desempeño en la mayor cantidad de puntos posibles. Mientras que los parámetros *forgetting factor* para CCG y *step size* para HNLMS, se consideró variaciones de tal manera que sea posible escoger entre ellas el valor que presente el mejor desempeño para cada algoritmo.

Después de haber obtenido los datos de cada algoritmo en todos los puntos de la geometría y mediante un análisis de desempeño, tomando en cuenta las variaciones de distancia, ángulo y la tendencia de cada factor, todo con respecto al MSE, se llegó a determinar los valores de los factores que presentan el mejor desempeño para cada algoritmo. Obteniéndose para CCG un $\lambda = 0.99937$, mientras que para HNLMS un $\mu = 0.348$.

Se observó una tendencia en cuando a los parámetros de cada filtro a lo largo de los puntos de prueba dentro de la geometría. A medida que se va aumentando la distancia de la fuente de interés con respecto al arreglo de micrófonos semiesférico el desempeño de cada filtro fue disminuyendo, por lo que el MSE aumentaba paulatinamente. Por otro lado con los mejores valores de cada parámetro tomadas en cada medición, se obtuvo un valor promedio para el cual cada algoritmo presentaría el desempeño más alto.

Al realizar las diferentes pruebas de desempeño para los algoritmos se observaron variaciones en los datos propias del medio no estacionario donde fueron realizadas,

dichas variaciones no corresponden a las tendencias que en general presentan los algoritmos, por ejemplo mientras va aumentando la distancia el MSE va disminuyendo. Existiendo datos que se muestran en Anexos donde hay puntos más lejanos al arreglo de sensores que presentan un mejor desempeño que puntos cercanos. Esto ocurre ya que un sonido externo al escenario de pruebas haya sido captado por el arreglo de sensores mientras se realizaba alguna prueba con la fuente de interés.

Una vez que se determinaron los valores de los factores *forgetting factor* y *step size* para los algoritmos CCG y HNLMS respectivamente en los que se presenta el mejor desempeño de los mismos. Se realizaron pruebas que de recorrido a lo largo de la geometría, tanto con un tono de puro como con un tono de voz, llegando a la conclusión de que el algoritmo que presenta el mejor desempeño es CCG ya que el MSE es menor que el de HNLMS.

Las pruebas realizadas en un medio no estacionario mostraron un desempeño real de los algoritmos, ya que durante todas las pruebas el canal estuvo sujeto a la intrusión de perturbaciones a la señal emitida por la fuente de interés.

En las gráficas de la investigación se puede observar que en la distancia de 1,5m a 2m se presenta un patrón de cambio, disminuyendo de forma notoria el desempeño de los algoritmos. Por tal razón se concluye que los micrófonos presentan un punto de quiebre en su sensibilidad a esa distancia, que además puede ser provocado por la amplificación utilizada.

La presente investigación ha sido documentada de tal manera que facilita su entendimiento y comprensión del desarrollo de la misma. Se ha realizado tanto tablas como gráficas que detallan y muestran el desempeño de los algoritmos para cada una de las pruebas realizadas.

5.2. Recomendaciones

Con el fin de continuar el estudio se deben realizar pruebas en ambientes *outdoor* que muestren el desempeño de los algoritmos en escenarios distintos.

Se recomienda ampliar la investigación introduciendo otra fuente de interés en un punto específico de la geometría para observar cómo se comportan los algoritmos.

Para seguir con el estudio se recomienda tomar en cuenta variables como la altitud, temperatura, humedad, entre otras. Obteniendo así una comparativa de desempeño de los algoritmos según las diferentes variables.

REFERENCIAS

- Bernal, P., Apolinario, J. A., & Campos, M. L. (2002). The constrained conjugate gradient algorithm. *IEEE Signal Processing Letters - Volume: 7 Issue: 12*, 12-18.
- Blackman, C., Blanchard, J., Benane, S., & House, D. (1999). Experimental Determination of Hydrogen Bandwidth for the Ion Parametric Resonance Model. *Bioelectromagnetics*, 5-12.
- Caisapanta, A. (2015). *Optimización de las señales acústicas en un arreglo semiesférico de micrófonos utilizando la metodología de beamforming de*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
- Caisapanta, T. (2015). *Implementación de un arreglo semiesférico de micrófonos utilizando la metodología beamforming de banda ancha para el realce de la voz*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
- Diniz, P. S. (2013). Adaptive Filtering Algorithms and Practical Implementation (Fourth ed.). En P. S. Diniz, *Adaptive Filtering Algorithms and Practical Implementation (Fourth ed.)* (págs. 53-67). Rio de Janeiro: Springer New York Heidelberg Dordrecht London.
- Equipo Técnico del Consejo Nacional de Discapacidades. (2013). *Agenda Nacional para la Igualdad en Discapacidades*. Obtenido de <http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/09/Agenda-Nacional-para-Discapacidades.pdf>
- Facundo, R. (29 de septiembre de 2014). *Equaphon University*. Obtenido de Señales de prueba: <http://www.equaphon-university.net/senales-de-prueba/>
- Facundo, R. (2014). *Investigación & Desarrollo*. Obtenido de Equaphon University: <http://www.equaphon-university.net/senales-de-prueba/>
- Giovanetti, J. A. (2008). *Evolución de 3G y su convergencia a 4G en comunicaciones móviles*. Valdivia: UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE.
- Henríquez, R. (2016). *Propiedades Acústicas*. Obtenido de <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Temall.2.4.ACUSTICAS.B.pdf>
- Hernández, A. (2005). *Estudio y simulación de un codificador de voz basado en la recomendación G.729 de la ITU-T*. Sevilla: Escuela Superior de Ingenieros Universidad de Sevilla.
- JR, J. A. (2009). QRD-RLS Adaptive Filtering. En J. A. JR, *QRD-RLS Adaptive Filtering* (pág. 356). Rio de Janeiro: Springer.
- Kühnel, S. L. (2008). Procesamiento de Señales para Pérdidas Auditivas de Severas a Profundas. *PHONAK Soluciones Auditivas*, 5-11.
- Lawrence Rabiner, R. W. (2011). Theory and Application of Digital Speech Processing. En R. W. Lawrence Rabiner, *Theory and Application of Digital Speech Processing* (págs. 81-93). Santa Barbara: Prentice Hall Inc.

- Madisetti, V. (2010). The Digital Signal Processing Handbook (SECOND ed.). En V. Madisetti, *The Digital Signal Processing Handbook (SECOND ed.)* (págs. 71-89). Georgia: Taylor and Francis Group, LLC.
- Marcos H. Maruo, J. C. (2015). *Statistical Analysis of a GSC-based Jointly Optimized Beamformer-Assisted Acoustic Echo Canceller*. Florianópolis: CNPq.
- Martínez, D. (2008). *Técnicas de procesamiento en array para realzado de voz*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Martínez, D. (2008). *Técnicas de procesamiento en array para realzado de voz en situaciones adversas*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Matras, J. (2003). *Intensidad de un sonido puro*. Obtenido de Intensidad de un sonido puro: <http://presencias.net/invest/ht3022.html>
- Ministerio de Salud Pública. (Abril de 2015). *Registro Nacional de Discapacidades*. Obtenido de http://www.consejodiscapacidades.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/04/registro_nacional_discapacidades.pdf
- Miyara, F. (2000). *La voz humana*. Obtenido de La voz humana: <http://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/fonatori.pdf>
- Monzingo, R. H. (2011). Introduction to Adaptive Arrays (Second ed.). En R. H. Monzingo, *Introduction to Adaptive Arrays (Second ed.)* (págs. 105-121). Texas: Scitech Publishing, Inc.
- Nadeu, C. (2004). *Representación de la voz en el reconocimiento del habla*. Obtenido de Representación de la voz en el reconocimiento del habla: <http://quark.prbb.org/21/021063.htm>
- Pepe, M. (9 de abril de 2004). *Filtrado espacial adaptativo*. Obtenido de Filtrado espacial adaptativo: http://iie.fing.edu.uy/ense/assign/tes/materiales/monografias/FiltradoEspacialAdaptivo_MarceloPepe.pdf
- Pérez, C. (2012). *Sonido y Audición*. Cantabria: Universidad de Cantabria.
- Richard Cox, P. C. (1996). Low bit-rate speech coders for multimedia Communication. *IEEE Communications Magazine*, 34-41.
- Scalerandi, C. (7 de mayo de 2013). *Air Live*. Obtenido de Beam Forming, el mejor camino para las señales inalámbricas: <http://airlivelab.blogspot.com/2013/05/beam-forming-el-mejor-camino-para-las.html>
- Tolomeo, P. (12 de octubre de 2009). *Arreglos de sensores y formador de haz*. Obtenido de Arreglos de sensores y formador de haz: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/762/A6.pdf?sequence=6>
- Urabayen Cerviño, I. (2012). *Estudio e implementación de un codificador de voz tipo sinusoidal*. Navarra: Universidad Pública de Navarra.

- Van Veen, B. D. (Abril 1988). Beamforming: A Versatile Approach to Spatial Filtering. *IEEE ASP Magazine*, 4-24.
- William Andrés Cadavid, J. A. (2009). Aplicación de un arreglo adaptativo de micrófonos para el realce de voz. *invest. univ. quindío*, 71-78.
- Winckel, F. (1967). Music, Sound and Sensation. En F. Winckel, *Music, Sound and Sensation* (págs. 2-3). Berlin: Phänomene des musikalischen Hörens.
- Yang, W. Y. (2012). Matlab /Simulink for Digital Signal Processing. En Y. S. Won Y. Yang, *Matlab /Simulink for Digital Signal Processing* (págs. 134-151). Georgia: Hongrung Publishing Company.
- Yang, W. Y. (2012). Matlab /Simulink for Digital Signal Processing. En W. Y. Yang, *Matlab /Simulink for Digital Signal Processing* (págs. 37-46). Seul: Hongrung Publishing Company.
- Zwicker, E. F. (1999). The Ear As a Communication Receiver. En E. F. Zwicker, *The Ear As a Communication Receiver* (págs. 55-57). Öhringen: Acoustical Society of Amer.