



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

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

**TEMA: RECONSTRUCCIÓN DE ATMÓSFERAS SONORAS
TRIDIMENSIONALES MEDIANTE UN ARREGLO LINEAL
UNIFORME (ULA) DE MICRÓFONOS UTILIZANDO LA
METODOLOGÍA BEAMFORMING DE BANDA ANCHA PARA
UN MEDIO NO ESTACIONARIO.**

AUTOR: BENÍTEZ GANCHALA, BOLÍVAR WLADIMIR

DIRECTOR: ING. BERNAL OÑATE, CARLOS PAÚL

SANGOLQUÍ

2018



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “RECONSTRUCCIÓN DE ATMÓSFERAS SONORAS TRIDIMENSIONALES MEDIANTE UN ARREGLO LINEAL UNIFORME (ULA) DE MICRÓFONOS UTILIZANDO LA METODOLOGÍA BEAMFORMING DE BANDA ANCHA PARA UN MEDIO NO ESTACIONARIO” realizado por el señor **BOLÍVAR WLADIMIR BENÍTEZ GANCHALA**, 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 **BOLÍVAR WLADIMIR BENÍTEZ GANCHALA** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 03 de enero del 2018



ING. CARLOS PAÚL BERNAL OÑATE
DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **BOLÍVAR WLADIMIR BENÍTEZ GANCHALA**, con cédula de identidad N° 1720018868, declaro que este trabajo de titulación **“RECONSTRUCCIÓN DE ATMÓSFERAS SONORAS TRIDIMENSIONALES MEDIANTE UN ARREGLO LINEAL UNIFORME (ULA) DE MICRÓFONOS UTILIZANDO LA METODOLOGÍA BEAMFORMING DE BANDA ANCHA 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, 03 de enero del 2018

BOLÍVAR WLADIMIR BENÍTEZ GANCHALA

C.C. 1720018868



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, **BOLÍVAR WLADIMIR BENÍTEZ GANCHALA**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación **“RECONSTRUCCIÓN DE ATMÓSFERAS SONORAS TRIDIMENSIONALES MEDIANTE UN ARREGLO LINEAL UNIFORME (ULA) DE MICRÓFONOS UTILIZANDO LA METODOLOGÍA BEAMFORMING DE BANDA ANCHA PARA UN MEDIO NO ESTACIONARIO”** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 03 de enero del 2018

BOLÍVAR WLADIMIR BENÍTEZ GANCHALA

C.C. 1720018868

DEDICATORIA

Quiero empezar dedicando el presente trabajo de titulación a Dios y a la Santísima Virgen del Quinche ya que gracias a la sabiduría que ellos me han brindado ha sido posible la realización de este proyecto

De igual manera quiero mencionar que el más grande deseo de mi vida, fue, ha sido y será siempre dedicar mis más grandes logros a esas dos personitas que me vieron nacer y me enseñaron a crecer como un buen ser humano llenándome de buenos valores y el amor necesario para cumplir cada uno de mis objetivos propuestos.

Este trabajo va dedicado para mi madre Blanca Inés Ganchala García y para mi padre José Bolívar Benítez Ortiz ya que ellos han sido los más grandes luchadores para alcanzar una de mis tantas metas, su apoyo incondicional, su amor, su ayuda y sobretodo las noches de desvelo a mi lado junto con su perseverancia para que logre este título hoy da sus frutos, es por ello que el mayor de los respetos a mis padres, los amo con todo mi corazón y por y para ellos siempre estaré creciendo como persona y como profesional.

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento no es solo una palabra que sale de labios hacia afuera sino es un sentimiento que cada persona expresa para ser grato con aquella o aquellas personas que fueron sostén y apoyo en cualquier adversidad de la vida.

Quiero agradecer en primer lugar, a mi familia ya que ellos con su apoyo, preocupación y cariño han logrado que por más oscuro que este el camino, siempre exista una luz para poder caminar tratando de tropezar con las piedras más pequeñas y no sentir un gran dolor, gracias a mis hermanos, cuñadas y sobrinos ya que sin sus ocurrencias y locuras el dolor, estrés e impotencia se hubieran apoderado de mi ser dificultando este proyecto, es por eso que más que gracias un Dios les pague por todo a mi amada familia.

En segundo lugar quiero agradecer a mi amada enamorada Edith Pérez ya que con el apoyo, regaños y locuras de ella ha sido posible cumplir una de mis primeras metas, ella que con su preocupación, con su sonrisa y con sus ocurrencias lograron que supere desde un vicio hasta un trabajo que parecía jamás terminar, te amo mi amor y gracias por estar a mi lado a pesar de mi mal genio y mis locuras, sin ti esto no hubiera sido tan fácil.

En tercer lugar, agradezco a mi tutor de tesis el Ingeniero Paúl Bernal ya que con su ayuda ha sido posible brindar una alegría a mi familia. La constancia, el respeto y la voluntad que me ha brindado sin desmerecer lo fuerte de carácter que ha sido para aguantar desde una pregunta estúpida hasta una pregunta decente me han ayudado para decir un Dios le pague por ese apoyo incondicional y por esa amistad que quizá no es de años pero si de las más sinceras que tengo, es por ello que me es grato poder mencionar que soy amigo de uno de los mejores ingenieros de la ESPE y con él cual me siento muy agradecido.

Finalmente quiero dar gracias a mis amigos ya que a pesar de la distancia siempre estuvieron preocupados por mí y por mi bienestar gracias amigos por siempre brindarme un consejo y su ayuda.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO.....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación e Importancia	2
1.3. Alcance del Proyecto	5
1.4. Objetivos.....	7
1.4.1. General	7
1.4.2. Específicos.....	7
CAPÍTULO 2.....	8
2. FUNDAMENTO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	8
2.1. El sonido	8
2.1.1. Ondas sonoras.....	8
2.1.1.1. Principales características	8
2.1.1.2. Velocidad de propagación	9

2.2.	El habla	10
2.2.1.	Mecanismo del habla.....	10
2.2.2.	Sonidos del habla.....	11
2.2.3.	Las señales de voz	12
2.3.	Medición del sonido.....	13
2.3.1.	Área de audición.....	15
2.4.	Atmósferas sonoras.....	16
2.5.	<i>Beamforming</i>	17
2.5.1.	Clasificación del <i>Beamforming</i>	17
2.5.1.1.	<i>Beamforming</i> tradicional.....	17
2.5.1.2.	<i>Beamforming</i> de haz conmutado.....	18
2.5.2.	Tipos de <i>beamforming</i>	19
2.5.2.1.	<i>Beamforming</i> de banda angosta (<i>Narrowband Beamforming</i>)	19
2.5.2.2.	<i>Beamforming</i> de banda ancha (<i>Broadband beamforming</i>)	20
2.6.	Arreglos de micrófonos	21
2.6.1.	Arreglo Lineal Uniforme (ULA)	22
2.6.1.1.	Interpretación de un arreglo	24
2.6.1.2.	Recepción de la señal del arreglo	25
2.6.1.3.	Patrón de radiación del arreglo	27
2.6.1.4.	Características del patrón de radiación	29
2.6.1.4.1.	Lóbulo principal y lóbulos laterales	29
2.6.1.4.2.	Direccionamiento del lóbulo principal	30
2.7.	Estimación de dirección de llegada (DOA)	31
2.8.	Algoritmos adaptativos LCMV	32
2.8.1.	Estructura <i>Householder</i>	33
2.8.1.1.	<i>Householder</i> CCG.....	34

CAPÍTULO 3	36
3. MÉTODOS Y MATERIALES	36
3.1. Micrófonos MEMS ADMP504	36
3.1.1. Características físicas	36
3.1.2. Descripción de pines e índices absolutos	36
3.2. Labview®	37
3.3. Dispositivo de diseño embebido NI myRIO1900.....	37
3.3.1. Diagrama de bloques de hardware	38
3.3.2. Módulo Labview FPGA	39
3.4. Matlab®	40
3.4.1. Matlab® para procesamiento de señales	40
3.5. Descripción general del sistema	40
CAPÍTULO 4	42
4. IMPLEMENTACIÓN.....	42
4.1. Hardware.....	42
4.1.1. Adquisición de datos	42
4.1.1.1. Acondicionamiento de micrófonos MEMS ADMP504.....	42
4.1.1.2. Descripción de pines para conexiones	43
4.1.1.3. Arreglo de micrófonos MEMS ADMP504.....	44
4.1.1.3.1. Diseño del arreglo lineal uniforme (ULA).....	44
4.1.1.4. Diseño del módulo para adquisición de datos	46
4.1.1.5. Descripción del escenario	49
4.1.1.5.1. Juego de baloncesto.....	49
4.1.1.5.2. Descripción de sub-regiones.....	50
4.1.1.6. Automatización del sistema de adquisición de datos.....	51
4.2. Software	54

4.2.1.	Etapa adquisición de datos	54
4.2.2.	Etapa procesamiento de datos	55
4.2.2.1.	Localización de fuentes sonoras	55
CAPÍTULO 5		57
5.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	57
5.1.	Comportamiento micrófonos MEMS ADMP504.....	57
5.1.1.	Respuesta en frecuencia	58
5.1.2.	Compensación de retardos.....	58
5.2.	División del campo de baloncesto	59
5.3.	División Sub-Regiones	60
5.3.1.	Obtención de ángulos para sub-regiones.....	61
5.3.2.	Análisis de sub-regiones y ángulos	64
5.3.3.	Designación de alturas.....	68
5.4.	Asignación de jugada de baloncesto.....	68
5.5.	Obtención frecuencia fundamental bote del balón	69
5.6.	Obtención y análisis de señales sonoras	71
5.6.1.	Señales en escenario vacío	72
5.6.2.	Señales con jugada predeterminada	74
5.7.	Obtención de señales en sub-regiones	78
5.7.1.	Escenario vacío.....	79
5.7.2.	Jugada predeterminada	82
5.8.	Procesamiento de señales.....	86
5.8.1.	Identificación y cálculo de la media.....	86
5.8.2.	Resta de señal con la media.....	88
5.8.3.	Eliminación de ruido de señales.....	89
5.8.4.	Suma de señales.....	93

5.8.5. Análisis de la suma de señales.....	99
5.9. Obtención de gráficas en 3 dimensiones.....	99
5.10. Reconstrucción atmósferas sonoras tridimensionales.....	101
5.11. Análisis del sistema en general	102
CAPÍTULO 6.....	104
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	104
6.1. Conclusiones.....	104
6.2. Recomendaciones	106
6.3. Trabajos futuros	106
Referencias.....	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Algoritmo Householder CCG	35
Tabla 2 Descripción de pines ADMP504.....	37
Tabla 3 Valores Índice Máximo Absoluto de los Micrófonos MENS ADM504	37
Tabla 4 Descripción de pines conector MXP A y B	39
Tabla 5 Descripción de pines para conexiones con NI myRIO1900	43
Tabla 6 Valores calculados para el arreglo ULA de 4 micrófonos	46
Tabla 7 Ángulos necesarios para sub-regiones 1x1 metro.....	63
Tabla 8 Ángulos calculados para sub-regiones de 2x2 metros	67
Tabla 9 Valores de media escenario vacío h=50cm.....	87
Tabla 10 Valores de media escenario con jugada h=50cm	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Características de una onda sonora.....	8
Figura 2 Representación de una onda de sonido.....	9
Figura 3 Estructura del aparato vocal	10
Figura 4 Ejemplo señal de voz de hombre en el dominio del tiempo.....	12
Figura 5 Curvas espectrales de frecuencias formantes	13
Figura 6 Curvas de Fletcher y Munson.....	14
Figura 7 Curvas de ponderación A, B y C	15
Figura 8 Área de audición.....	16
Figura 9 Teoría <i>beamforming</i> tradicional	18
Figura 10 Esquema de narrowband beamforming	19
Figura 11 Esquema de broadband beamforming	20
Figura 12 Arreglo lineal uniforme de 8 micrófonos	23
Figura 13 Diagrama de directividad de un ULA de 8 micrófonos (a) Con micrófonos omnidireccionales y (b) con micrófonos cardioides	24
Figura 14 Arreglo lineal uniforme de k sensores.....	26
Figura 15 Patrón de radiación, ángulo contra amplitud.....	28
Figura 16 Lóbulo principal y lóbulos laterales.	29
Figura 17 Lóbulo principal a 30° para un arreglo de 16 sensores separados una distancia $d = 1\text{cm}$	31
Figura 18 Estructura de un beamforming adaptativo de banda ancha	33
Figura 19 Diagrama de bloques del dispositivo NI myRIO1900	38
Figura 20 Descripción de pines conector MXP A y B.....	38
Figura 21 Diagrama de bloques general del sistema.....	40
Figura 22 Acondicionamiento de señal para cada micrófono.....	43
Figura 23 Esquema de parámetros de diseño del arreglo ULA con dos fuentes	44
Figura 24 Esquema general de conexiones entre arreglo ULA, circuito de acondicionamiento y tarjeta NI myRIO1900	47
Figura 25 Descripción de conexiones y pines entre arreglo ULA, circuito de acondicionamiento y tarjeta NI myRIO1900	48
Figura 26 Medidas de un campo de baloncesto	49
Figura 27 Obtención de datos de sub-regiones a partir de una región de interés	51
Figura 28 Diseño arreglo 3D a partir de un ULA	52
Figura 29 Esquema de un arreglo ULA de micrófonos con igual dirección a la de una onda plana incidente	55
Figura 30 Verificación comportamiento de micrófonos a partir de un arreglo ULA.....	57
Figura 31 Respuesta en frecuencia micrófonos MEMS ADMP504.....	58
Figura 32 Respuesta en frecuencia compensada de los micrófonos	59
Figura 33 Campo de baloncesto dividido en zonas.....	60
Figura 34 División del escenario en sub-regiones de 1x1 metro	61
Figura 35 Cálculo de ángulos para sub-regiones 1x1 metro.....	62

Figura 36	División de sub-regiones de 2x2 metros	65
Figura 37	Enumeración de sub-regiones de 2x2.....	65
Figura 38	Cálculo de ángulos para sub-regiones de 2x2 metros	66
Figura 39	Jugada de baloncesto predeterminada	69
Figura 40	Señal boteo del balón con $F_s=8000$ Hz	70
Figura 41	Frecuencia fundamental boteo de balón mediante FFT.....	70
Figura 42	Frecuencia fundamental mediante densidad espectral boteo de balón	71
Figura 43	Señales obtenidas por arreglo ULA en escenario vacío $h=0$ cm	72
Figura 44	Señales obtenidas por arreglo ULA en escenario vacío $h=25$ cm	73
Figura 45	Señales obtenidas por arreglo ULA en escenario vacío $h=100$ cm	73
Figura 46	Señales obtenidas por arreglo ULA en escenario con jugada $h=0$ cm	75
Figura 47	Señales obtenidas por arreglo ULA en escenario con jugada $h=25$ cm	75
Figura 48	Señales obtenidas por arreglo ULA en escenario con jugada $h=50$ cm	75
Figura 49	Señales obtenidas por arreglo ULA en escenario con jugada $h=75$ cm	76
Figura 50	Señales obtenidas por arreglo ULA en escenario con jugada $h=100$ cm ..	76
Figura 51	Señales obtenidas por arreglo ULA en escenario con jugada $h=125$ cm ..	76
Figura 52	Señales obtenidas por arreglo ULA en escenario con jugada $h=150$ cm ..	77
Figura 53	Señal obtenida en Sub-región 14 con el arreglo ULA a 0cm en escenario vacío	79
Figura 54	Señal obtenida en Sub-región 15 con el arreglo ULA a 0cm en escenario vacío	79
Figura 55	Señal obtenida en Sub-región 16 con el arreglo ULA a 0cm en escenario vacío	80
Figura 56	Señal obtenida en Sub-región 17 con el arreglo ULA a 0cm en escenario vacío	80
Figura 57	Señal obtenida en Sub-región 18 con el arreglo ULA a 0cm en escenario vacío	81
Figura 58	Señal obtenida en Sub-región 19 con el arreglo ULA a 0cm en escenario vacío	81
Figura 59	Señal obtenida en Sub-región 20 con el arreglo ULA a 0cm en escenario vacío	82
Figura 60	Señal obtenida en Sub-región 14 con el arreglo ULA a 0cm en escenario con jugada predeterminada	83
Figura 61	Señal obtenida en Sub-región 15 con el arreglo ULA a 0cm en escenario con jugada predeterminada	83
Figura 62	Señal obtenida en Sub-región 16 con el arreglo ULA a 0cm en escenario con jugada predeterminada	84
Figura 63	Señal obtenida en Sub-región 17 con el arreglo ULA a 0cm en escenario con jugada predeterminada	84
Figura 64	Señal obtenida en Sub-región 18 con el arreglo ULA a 0cm en escenario con jugada predeterminada	85

Figura 65	Señal obtenida en Sub-región 19 con el arreglo ULA a 0cm en escenario con jugada predeterminada	85
Figura 66	Señal obtenida en Sub-región 20 con el arreglo ULA a 0cm en escenario con jugada predeterminada	86
Figura 67	Señal obtenida en Sub-región 15 con el arreglo ULA a 50cm en escenario con jugada predeterminada	87
Figura 68	Resta de señal con media en Sub-región 15 a 50cm en escenario con jugada predeterminada	89
Figura 69	Eliminación de ruido con app Wavelet Design & Analysis en sub-región 14 escenario vacío h=0cm.....	90
Figura 70	Señal minimizada ruido para sub-región 17 con h=0cm	91
Figura 71	Señal minimizada ruido para sub-región 18 con h=0cm	92
Figura 72	Señal minimizada ruido para sub-región 20 con h=0cm	92
Figura 73	Señal sin media y minimizada ruido para sub-regiones 17, 18 y 20 con h=0cm	94
Figura 74	Señal sin media y minimizada ruido para sub-regiones 17, 18 y 20 con h=25cm	94
Figura 75	Señal sin media y minimizada ruido para sub-regiones 17, 18 y 20 con h=50cm	95
Figura 76	Señal sin media y minimizada ruido para sub-regiones 17, 18 y 20 con h=75cm	95
Figura 77	Señal sin media y minimizada ruido para sub-regiones 17, 18 y 20 con h=100cm	96
Figura 78	Señal sin media y minimizada ruido para sub-regiones 17, 18 y 20 con h=125cm	96
Figura 79	Señal sin media y minimizada ruido para sub-regiones 17, 18 y 20 con h=150cm	97
Figura 80	Señal total para sub-región 17	97
Figura 81	Señal total para sub-región 18	98
Figura 82	Señal total para sub-región 20	98
Figura 83	Boteo producido en sub-región 17.....	100
Figura 84	Boteo producido en sub-región 18.....	100
Figura 85	Boteo producido en sub-región 20.....	100
Figura 86	Reconstrucción de jugada de baloncesto en 3 dimensiones.	102

RESUMEN

El procesamiento digital de señales con el paso de los años se ha convertido en uno de los tópicos más utilizados, gracias a este una gran cantidad de aplicaciones han sido posibles, por ejemplo la localización de fuentes sonoras es una de las aplicaciones más relevantes e interesantes que se ha realizado a partir de un buen procesamiento de señales, claro que para cumplir con el objetivo de esta ha sido necesario que se lo complemente con contenidos basados en arreglos de sensores y *beamforming*. Si bien la mayoría de trabajos de titulación en los cuales se realizan localización de fuentes de interés consiguen su objetivo, entonces es inevitable no preguntarse qué está sucediendo con aplicaciones que permitan la reconstrucción de atmósferas, en las cuales la principal característica sea la localización de una señal sonora situada en el espacio. Es por ello que el presente proyecto de investigación busca unificar los contenidos mencionados para crear un sistema que se encuentre basado en hardware y software y de esta manera poder realizar una reconstrucción de atmósferas sonoras tridimensionales en un campo de baloncesto haciendo uso únicamente de un arreglo lineal uniforme de micrófonos. Para la reconstrucción de este escenario se realiza una jugada básica de baloncesto y a partir de esta el sistema implementado será capaz de percibir todas las señales para posteriormente realizar un procesamiento y poder indicar mediante gráficas tridimensionales específicamente la trayectoria del balón en la jugada planificada.

Palabras claves:

- **ARREGLOS DE MICRÓFONOS**
- **ATMÓSFERA TRIDIMENSIONAL**
- **BEAMFORMING**
- **PROCESAMIENTO DE SEÑALES**
- **FUENTES SONORAS**

ABSTRACT

The digital processing of signals over the years has become one of the most used topics, thanks to this a large number of applications have been possible, for example the location of sound sources is one of the most relevant and interesting applications that has been made from a good signal processing, clear that to meet the objective of this has been necessary to be complemented with content based on sensor arrays and beamforming. Although the majority of titling works in which the location of sources of interest is carried out achieve their objective, then it is inevitable not to ask what is happening with applications that allow the reconstruction of atmospheres, in which the main characteristic is the location of a sound signal located in space. That is why this research project seeks to unify the aforementioned contents to create a system that is based on hardware and software and thus be able to perform a reconstruction of three-dimensional sound atmospheres in a basketball field using only a linear array uniform of microphones. For the reconstruction of this scenario a basic basketball move is made and from this the implemented system will be able to perceive all the signals to later perform a processing and be able to indicate by means of three-dimensional graphics specifically the trajectory of the ball in the planned play.

Keywords:

- **MICROPHONES ARRAY**
- **THREE-DIMENSIONAL ATMOSPHERE**
- **BEAMFORMING**
- **SIGNALS PROCESSING**
- **SOUND SOURCES**

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La discapacidad auditiva o comúnmente más conocida como sordera ha sido un término que las personas han usado habitualmente para referirse a la mayoría de tipos y grados de pérdida auditiva, este término también es utilizado en la actualidad como sinónimo de deficiencia auditiva e hipoacusia (Robles, 2011). Es importante conocer que la sordera, la hipoacusia y la discapacidad auditiva son palabras que las personas escuchan habitualmente, por ende creen que son términos que poseen significados similares, sin embargo lo cierto es que hay que tener cuidado al momento de emplear uno u otro término, ya que la sordera simplemente es sinónimo de deficiencia auditiva e hipoacusia y mas no un término con significado igual como la mayoría de personas lo tiene entendido (Amado, 2011).

La existencia de pérdida de audición sin tener en cuenta el grado de pérdida de la misma se conoce como deficiencia auditiva, el déficit funcional que ocurre cuando un sujeto pierde capacidad auditiva en menor o mayor grado se conoce como hipoacusia, mientras que la sordera se define como aquella deficiencia auditiva tan grave que no se puede beneficiar mediante la adaptación protésica (Santos , 2004). Las causas de la pérdida de la audición y la sordera globalmente están divididas en: causas congénitas y causas adquiridas, sin embargo cualquiera que sea la causa por la cual se determina a una persona con pérdida de audición esta puede mejorar gracias a la detección temprana, utilización de audífonos y otros dispositivos de ayuda (Organización Mundial de la Salud, 2016).

Los datos y cifras publicados en febrero del 2017 por la Organización Mundial de la Salud (OMS) revelaron que más del 5% de la población mundial padece pérdida de la audición, es decir, alrededor de 360 millones de personas de los cuales 328 millones son adultos y 32 millones son niños. Teniendo en cuenta que el índice de personas que presentan pérdida de audición es alto esta cifra no es preocupante, ya que gracias al crecimiento de la tecnología y la implementación de nuevos métodos de procesamiento

de señales, es posible que todas las personas que han sido detectadas tempranamente con algún tipo de discapacidad auditiva en la actualidad puedan beneficiarse de algún dispositivo que cumpla las características de las tradicionales adaptaciones protésicas, haciendo que las personas que padezcan esta enfermedad se comporten como una persona sin discapacidad (Organización Mundial de la Salud, 2017).

Innovaciones referentes a la creación de nuevos dispositivos que beneficien a personas con discapacidad auditiva han crecido exponencialmente en los últimos 10 años, esto se ha ido realizando para detener los resultados de los experimentos que vive la sociedad actual, dichos experimentos han centrado su objetivo en llevar a personas con discapacidad a espacios vulnerables, marginales y sobretodo de exclusión limitando de esta manera sus oportunidades y negando su calidad de vida como personas humanas (Verástegui, 2013). Es por ello que en la actualidad los arreglos de sensores, el *beamforming* y los diferentes tipos de algoritmos adaptativos para procesamiento de señales se han convertido en herramientas con las cuales se están desarrollando nuevos e innovadores dispositivos que permiten incluir a las personas con discapacidad auditiva en una sociedad equitativa y libre de discriminación.

1.2. Justificación e Importancia

La importancia del sistema auditivo en la vida del hombre se encuentra fundamentada en la maravillosa cualidad que tiene para recolectar una gran cantidad de información, misma que luego el cerebro se encarga de procesar a gran velocidad, obteniendo como resultado de este ejercicio la extracción de algunas características que se desea conocer, ejemplos de dicho procesamiento puede ser: distinguir la voz masculina y femenina, distinguir la voz de un niño y de un adulto, proveniencia de sonidos, percepción del movimiento de los objetos en el entorno, y esto es solo un compendio de toda la información que percibe el ser humano a diario (Poveda, 2010).

El desempeño de todo individuo en la sociedad está limitado a las posibilidades que le brindan sus sentidos, desde luego que esto incluye al oído, es por ello que, la nueva constitución de la República del Ecuador mediante una resolución de la Asamblea Nacional (2008) se encuentra de acuerdo con: la convención interamericana para la

eliminación de todas las formas de discriminación contra las personas con discapacidad (CIADDIS) y el Programa de Acción para el Decenio de las Américas por los Derechos y la Dignidad de las Personas con Discapacidad (PAD); en lograr que en cada país se emprendan programas, planes y acciones para alcanzar la inclusión y la participación plena en todos los aspectos de la sociedad de las personas con discapacidad y plantear el desarrollo de aplicaciones tecnológicas que ayuden a contribuir en la construcción de una sociedad inclusiva mejorando la calidad de vida de las personas con discapacidad (OEA, 2016).

El Consejo Nacional de Discapacidades (CONADIS), dio a conocer que el 12,81% de todas las personas en el Ecuador presentan algún tipo de problema auditivo, de igual manera recalcó que este porcentaje obtiene el primer lugar del índice total de personas que presentan algún tipo de discapacidad, el porcentaje obtenido por el CONADIS se convierte en una motivación para que las universidades a nivel nacional desarrollen proyectos de investigación con un enfoque de ayuda social (CONADIS, 2016). Por esta razón en la última década los avances tecnológicos referentes al Procesamiento Digital de Señales o DSP (siglas en inglés *Digital Signal Processor*) han venido desarrollándose de forma sostenible y sustentable. En la actualidad se brinda una gran apertura para el desarrollo de proyectos de investigación que permitan técnicas para el realzado de la voz, algoritmos para localización de fuentes sonoras y por ende reconstrucción de atmósferas sonoras tridimensionales (Rabiner, 2007).

Existen varias técnicas para el procesamiento de señales sonoras, Cadavid, Peñafiel y Marín (2009) describen el diseño de un arreglo adaptativo de micrófonos para el realce de voz en un ambiente tipo teleconferencia usando filtrado espacial. Machín (2016) realiza un estudio de los fundamentos teóricos utilizados para la localización de fuentes acústicas (*beamforming*). Poveda (2010) desarrolla una localización de fuentes sonoras mediante análisis de señales en Matlab. Martínez (2008) propone en su trabajo de grado el análisis de técnicas de procesado en arreglo para realzado de voz en situaciones adversas.

De igual manera O'Brien, Molisani y Burdisso (2013) implementan técnicas avanzadas para la detección de fuentes sonoras, en este trabajo se implementó *Robust Adaptive Beamforming* (RABF) en el cual se utiliza la información recolectada

mediante los micrófonos para eliminar ruido blanco en la imagen acústica y evitar fuentes espurias en el mapa de ruido. Sin embargo el mismo autor posterior a la implementación de la técnica *Robust Adaptive Beamforming* (RABF), decide utilizar algoritmos como *MUltiple Signal Clasification* (MUSIC) y *Delay and Sum* (DS) con la finalidad evaluar la relación señal – ruido.

Estudiantes de pregrado de la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE) como Caizapanta, A (2015), Caizapanta, T (2015) y Torres, A (2016) realizaron sus proyectos de investigación basados en un arreglo semiesférico de micrófonos utilizando la metodología *beamforming*, sus conclusiones abordaron que el mejor algoritmo adaptativo para el realce de voz es el algoritmo *Householder Constrained Conjugate Gradient* (HCCG) de igual forma con estas conclusiones ellos tratan que sus investigaciones en un futuro sean utilizadas para desarrollar aplicaciones con un enfoque a la ayuda social específicamente al trabajar con personas que presenten discapacidad auditiva.

Al realizar un estudio del estado del arte en los trabajos mencionados se puede verificar que los principales temas a tratar para poder ayudar a personas con discapacidad auditiva están ligados directamente con técnicas de realzado de voz y localización de fuentes sonoras, por ende los contenidos principales a ser abordados serán: *beamforming*, dirección de arribo de señal (DOA) y algoritmos adaptativos.

Los distintos algoritmos que ya han sido implementados y comprobados mediante diversos prototipos de arreglos de micrófonos, abordan escenarios en los cuales no transitan personas que muestran algún tipo de discapacidad auditiva, ya que se centran en análisis de diferentes métodos de realce de voz y localización de fuentes sonoras con diferentes geometrías de arreglos de micrófonos, por esta razón, y por todos los antecedentes y con la finalidad de dar continuidad a los trabajos desarrollados por Caizapanta, A (2015), Caizapanta, T (2015) y Torres, A (2016), el presente trabajo de investigación se lo realiza con la finalidad de implementar una aplicación que brinde la posibilidad a personas que presentan algún tipo de discapacidad auditiva de poder relacionar lo escuchado con su medio visual.

1.3. Alcance del Proyecto

Los arreglos de sensores, el *beamforming* y la implementación de algoritmos adaptativos han sido temas de gran importancia para el desarrollo de trabajos de titulación basados en líneas de investigación como el procesamiento de señales, la revisión del estado del arte que abordan los contenidos mencionados han permitido identificar un hueco de información específicamente en los trabajos de titulación desarrollados por Caizapanta, A (2015), Caizapanta, T (2015) y Torres, A (2016). Dicho hueco de información hallado, sumado a las conclusiones suministradas en los trabajos insinuados es lo que permitirá dar continuidad a las investigaciones desarrolladas por los autores señalados en el presente proyecto de investigación.

La reconstrucción de atmósferas sonoras tridimensionales será el tema central que permitirá a este trabajo de titulación llenar el hueco de información encontrado y aportar en el desarrollo de futuros proyectos basados en el procesamiento de señales, es importante mencionar que el cumplimiento de la meta del tema central no será solo de investigación sino también de diseño, implementación y análisis del sistema que se desarrollará.

El proyecto iniciará con la etapa de revisión bibliográfica en la cual se realiza un extenso estudio del estado del arte referente a procesamiento de señales, en la segunda etapa de este trabajo de titulación se diseñará el sistema que se llevará a cabo luego de establecer los parámetros para la reconstrucción de atmósferas sonoras tridimensionales, esta etapa se encontrará dividida en tres partes principales: la primera será diseño e implementación en *hardware* la cual permitirá realizar una adquisición de datos provenientes de 4 micrófonos MENS ADMP504, estos estarán formados en un arreglo lineal uniforme(ULA) y embebidos en una tarjeta la cual permitirá trabajar a los sensores adecuadamente con la tarjeta NI myRIO1900; la segunda componente será diseño e implementación de *software* en la cual se implementará un programa que sea capaz de realizar la adquisición y procesamiento de datos, finalmente la tercera etapa será el análisis de datos.

Es de suma importancia mencionar que el escenario que se manejará en este trabajo y del cual se realizará la reconstrucción de atmósferas sonoras tridimensionales será

un juego deportivo, específicamente un juego de baloncesto, es por ello que, el módulo de *hardware* que será implementado tendrá una particularidad y es que será automatizado para poder permitir movilizar el Arreglo Lineal Uniforme (ULA) apuntando hacia el ángulo en el cual se origina una fuente sonora de interés y de esta manera poder conseguir realizar la adquisición de datos de pequeñas regiones de la atmósfera sonora tridimensional, para ello se utilizará un motor a pasos unipolar y se implementará un algoritmo que se programará en la tarjeta NI myRIO1900, es decir, el sistema tendrá que estar en la capacidad tanto en *hardware* haciendo uso de un arreglo ULA de micrófonos como en *software*, de realizar un barrido de todas las pequeñas zonas de interés a las cuales desde este momento se las conocerá como sub-regiones, para al final poder realizar la reconstrucción de atmósferas sonoras tridimensionales.

Se puede mencionar que la programación que se implementará para la adquisición de datos estará desarrollada en el software Labview® haciendo uso de su interfaz gráfica y del módulo FPGA (*Field Programmable Gate Array*) que es uno de los recursos que ofrece la tarjeta NI myRIO1900, es decir, la programación estará en la capacidad de permitir que la FPGA obtenga datos de los micrófonos, los guarde y cuando el programa principal los necesite se pueda acceder a los mismos y se comience con el procesamiento de estos; si bien la parte más compleja es el procesamiento pues en términos generales lo que la FPGA mediante su programación en Labview® hará es, obtener datos en cada una de las sub-regiones mediante la implementación de un algoritmo que permita la identificación y localización de fuentes sonoras y finalmente guardar los mismos como un conjunto de datos finales.

El conjunto de datos finales obtenidos serán analizados haciendo uso del *software* Matlab® en el cual primero se verificará el comportamiento de los micrófonos, y posterior a ello se realizará la reconstrucción de atmósferas sonoras tridimensionales, mediante la generación de gráficas en tres dimensiones (3D) en los cuales se podrá observar la cantidad de fuentes sonoras que exista en cada sub-región.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

Implementar un sistema que permita la reconstrucción de atmósferas sonoras tridimensionales, mediante un arreglo ULA de micrófonos y la utilización de algoritmos para localización de fuentes sonoras en una FPGA de la marca NI myRIO 1900.

1.4.2. Específicos

- Establecer la zona de interés del escenario propuesto y dividirlos en pequeñas regiones.
- Desarrollar un sistema en *hardware* para la etapa de adquisición de datos con micrófonos MENS ADMP504.
- Implementar un sistema que permita simular un arreglo tridimensional a partir de un arreglo lineal uniforme.
- Implementar un programa para etapa de adquisición de datos en el *software* Labview[®].
- Implementar un algoritmo para localización de fuentes sonoras mediante el *software* Matlab[®].
- Guardar los datos procesados y exportarlos a un software de fácil manejo y acceso.
- Analizar los resultados obtenidos, luego de realizar las mediciones al variar la posición del arreglo.
- Documentar la investigación realizada.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1. El sonido

Se define comúnmente al sonido como un movimiento vibratorio que es transmitido a través de un medio elástico y por ende es capaz de estimular al oído humano hasta poder producir una sensación auditiva, en la mayoría de ocasiones las variaciones oscilantes que permiten al ser humano percibir las auditivamente viajan a través del aire (Asinsten, 2003).

2.1.1. Ondas sonoras

Un ejemplo de onda sonora se produce cuando se lanza en un charco de agua que se encuentra tranquilo o en leve movimiento una piedra, produciendo un movimiento hacia arriba o hacia abajo alrededor de donde se produjo el impacto, si este fue fuerte y el charco es relativamente pequeño se podrá observar después de un tiempo que el movimiento llega hasta la orilla, es decir, este se propaga. Al lanzar una piedra al agua se produce un fenómeno conocido como perturbación que no es más que sacar del estado de reposo al agua, entonces si una piedra cae sobre el agua este perturbará el estado de la misma y además dependiendo de la fuerza con la que fue disparada también se podrá producir una propagación más lejana, estos dos factores principales dependerán de las características de la onda sonora (Ruiz , 2015).

2.1.1.1. Principales características

Las características principales que permiten describir el comportamiento de una onda sonora podemos visualizarlas en la Figura 1.

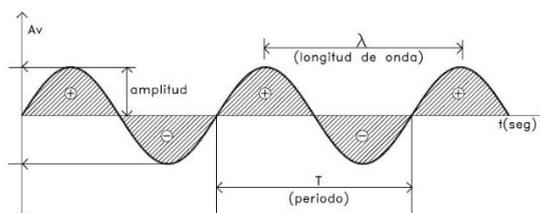


Figura 1 Características de una onda sonora

Fuente: (Sánchez L. , 2015)

Se puede observar en la figura 1 que la amplitud, el periodo y longitud de onda son algunas de las características de una onda sonora, sin embargo a estas también se suman medidas cuantitativas como la fase, velocidad de propagación y número de onda, siendo estas de igual manera necesarias para la descripción de la misma. Si se observa la figura detalladamente se puede mencionar que la frecuencia indica el número de oscilaciones en una unidad de tiempo, esta es denominada con la letra f y su unidad fundamental es el hercio (Hz) el cual equivale al número de oscilaciones que hay en un segundo (ciclos por segundo), por lo tanto si los ciclos por segundo que equivalen al Hz y teniendo en cuenta que el periodo denominado por la letra T es el tiempo necesario para que se lleve a cabo una oscilación obtendremos la relación $f = 1/T$. También es importante mencionar que la longitud de onda es la distancia que existe entre el mismo punto de dos ondulaciones consecutivas (Ruiz , 2015).

2.1.1.2. Velocidad de propagación

Si se tiene un gong (instrumento musical formado por un platillo de metal sonoro sobre el que se golpea con una maza cubierta con un amortiguador) y se lo golpea provocando que el platillo primero se dirija hacia delante causando una presión (amplitud de presión sonora positiva) de todas las moléculas que se encuentren en su camino, posterior al primer movimiento el platillo se dirige hacia atrás causando una depresión (amplitud de presión sonora negativa) de las mismas moléculas creando una especie de vacío, el resultado de la presión y depresión que generan estos dos movimientos en el gong originan una vibración del mismo, la representación de esta onda de sonido se visualiza en la figura 2 (Huidrobo, 2006).

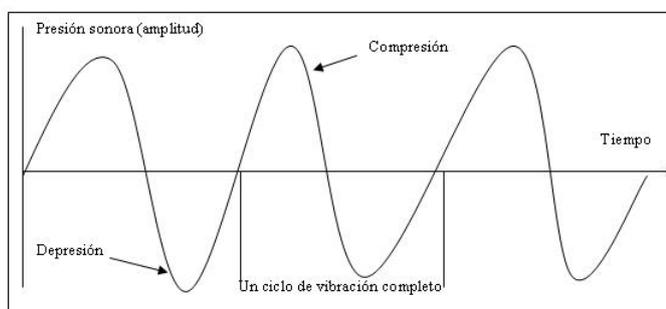


Figura 2 Representación de una onda de sonido

Fuente: (Huidrobo, 2006)

La Figura 2 muestra una representación en los ejes x e y de la presión y depresión de una onda sonora de un gong, en esta se puede determinar que la velocidad a la que viajan estos cambios de presión se conoce como velocidad del sonido o de propagación, el valor nominal es de 340 metros por segundo para cuando su medio de transmisión es el aire (Huidrobo, 2006).

2.2. El habla

La importancia de estipular el funcionamiento de un sistema capaz de realizar realce de la voz y reconstrucción de atmósferas tridimensionales mediante localización de fuentes sonoras es conocer y determinar los mecanismos que producen un mensaje hablado, es por ello que en este ítem se potenciará conceptos fundamentales que involucran directamente al habla (Ruíz, 2005).

El habla mediante la voz es el sonido más habitual que todos los seres humanos utilizan para comunicarse y hacerse entender, sin embargo la pregunta que regularmente las personas se hacen es ¿Cómo se origina la voz?, las respuestas a esta interrogante se las verá a continuación ya que se dará a conocer como se produce la voz y las señales que se ocasionan al momento de hablar (Huidrobo, 2006).

2.2.1. Mecanismo del habla

En la Figura 3 se visualiza el aparato vocal, este al ser observado detenidamente permitirá entender el funcionamiento del mecanismo que utiliza la voz.

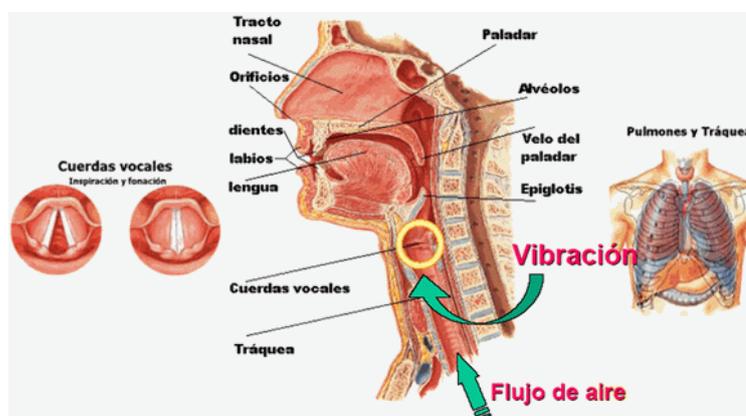


Figura 3 Estructura del aparato vocal

Fuente: (Ruíz, 2005)

Se puede observar en la Figura 3 que al aparato vocal tiene varios órganos que lo conforman, todos estos sumamente importantes para la producción de la voz, sin embargo ¿Cuáles son los que más intervienen al momento de originar la voz?, esta incógnita se podría resolver conociendo que, cuando tratamos de expresarnos mediante el habla las cuerdas vocales vibran causando la presión de las moléculas de aire que se encuentran en las cercanías, esta variación de presión que se transmite viajan en el aire en forma de onda, esta será fuerte en las proximidades de donde se originó pero a medida que viaja esta se va debilitando hasta que llega a desaparecer (Huidrobo, 2006).

Es imprescindible conocer que las cuerdas vocales albergadas en la laringe, son pequeñas membranas de la piel que vibran cuando una brisa de aire pasa entre ellas; sin embargo estas solas no pueden producir un movimiento vibratorio si no actúan en conjunto con la epiglotis que es el hueco que existe entre ambas membranas, el tracto vocal que es un tubo que se extiende desde los labios hasta la laringe, el tracto nasal que de igual manera es un tubo que va desde los orificios nasales hasta el velo del paladar y finalmente el funcionamiento de los pulmones que son tan necesarios para la producción del habla, estos son los encargados de impulsar el aire hacia el resto de los órganos con la ayuda muscular del diafragma. Con las explicaciones mencionadas la duda que se presentó en el transcurso del tratado del habla es resuelta en un 90% ya que el ultimo 10% depende de la clasificación de los sonidos del cual consta el habla este tema será tratado en el siguiente ítem (Ruíz, 2005).

2.2.2. Sonidos del habla

El habla está básicamente constituido por tres sonidos, estos son:

- Sonidos plosivos: se denominan de esta manera ya que se producen cuando existe temporalmente una obstrucción al paso del aire.
- Sonidos sordos: son conocidos así ya que no provocan vibración en las cuerdas vocales.
- Sonidos sonoros: estos son denominados así ya que hacen vibrar tanto a las cuerdas vocales que provocan ondas cuasi periódicas con un espectro muy rico en armónicos (múltiplos de la frecuencia de vibración de las cuerdas).

Los tres tipos de sonidos poseen características especiales que son de gran ayuda al momento de trabajar con procesamiento de señales de voz, sin embargo es necesario saber que en los sonidos sonoros la vibración de las frecuencias de las cuerdas se llama frecuencia fundamental y depende estrictamente de la presión ejercida al pasar el aire por las cuerdas y de la tensión de ellas, existen distintos valores nominales por ejemplo en los hombres el rango varía desde los 50 Hz hasta los 150 Hz y en mujeres el rango varía desde los 50 Hz hasta los 500 Hz, pero también hay que tener en cuenta que el rango de frecuencias conversacionales de la voz humana está entre 250 y 4 KHz (Ruíz, 2005).

2.2.3. Las señales de voz

Las señales de voz son ondas acústicas de presión sonora originadas a partir de movimientos armónicos producidos cuando los seres humanos queremos expresar o transmitir un mensaje a través del habla, estas ondas que dependen de los órganos del aparato vocal corresponden fisiológicamente a los procesos que cumplen la respiración, la fonación y la resonancia (Gracida & Orduña, 2011). Un ejemplo de una señal de voz se visualiza en la Figura 4.

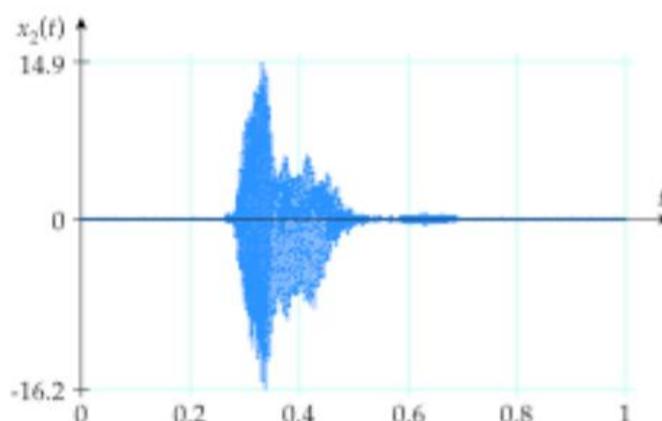


Figura 4 Ejemplo señal de voz de hombre en el dominio del tiempo

Fuente: (Ballado, 2012)

En la gráfica se puede observar que existe variaciones de amplitud a lo largo del tiempo y si se recuerda lo que se mencionó en el ítem anterior se podría decir que en la Figura 4 existen dos tipos de sonidos sonoros y sordos, ya que estos se diferencian

uno de otro por el valor de su amplitud, es decir, los sonidos sordos siempre van a presentar una mayor amplitud que los sonidos sordos (Ballado, 2012).

Para realizar el análisis de una señal de voz se plantean principalmente dos puntos de vista: el primero en el cual se estudian las características temporales de la voz y el segundo en el cual se analiza las características espectrales de la voz, en si estos dos métodos de análisis de señales de voz se los conoce como análisis en el dominio del tiempo y frecuencia respectivamente. Sin embargo el más utilizado es el segundo ya que en este se puede localizar parámetros especiales de la señal de voz centrado su análisis en la información que suministra su espectro (Ruíz, 2005).

En general el uso del análisis de señales de voz en el dominio de la frecuencia es utilizado esencialmente para la determinación de frecuencias que actúan como resonadoras, estas frecuencias reciben este nombre ya que son potencialmente fuertes o poco a poco se van atenuando, en la mayoría de literatura de análisis espectral se menciona que las frecuencias formantes más significativas en cuanto a la voz hablada son las primeras cinco (Gracida & Orduña, 2011).

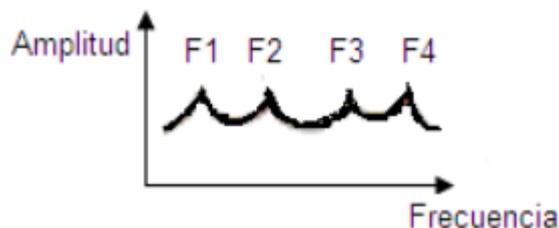


Figura 5 Curvas espectrales de frecuencias formantes

Fuente: (Gracida & Orduña, 2011)

“Las formantes que se originan inicialmente (F1 y F2) son necesarias e importantes para sintetizar la voz, mientras que el resto permiten determinar el color de la voz” (Gracida & Orduña, 2011).

2.3. Medición del sonido

Al ser el sonido una variación de presión en el aire este puede ser medido por el decibelio (dB), ya que es un valor relativo y logarítmico que indica la relación del valor medio con respecto a un valor de referencia, dicho valor es máximo de 20

micropascales para poder percibir sonidos, por lo tanto si en algún caso se tiene 0 dB esto significaría una presión sonora que se encuentra al borde de la perceptibilidad (Martínez & Peters, 2015).

Existen ponderaciones para medir la presión sonora uno de ellas es el nivel sonoro con ponderación A, este indica una medida objetiva y bastante cómoda al momento de identificar la intensidad del sonido, sin embargo también presenta una gran desventaja y es que está lejos de representar con precisión lo que realmente se percibe esto ocurre ya que la sensibilidad del oído depende fuertemente de la frecuencia, la dependencia de esta fue descubierta por Fletcher y Munson quienes dieron a conocer un grupo de curvas (ver Figura 6) con las cuales pensaron construir una red de filtrado, es decir, dar ponderaciones a los niveles sonoros y de esta manera establecer una medida objetiva.

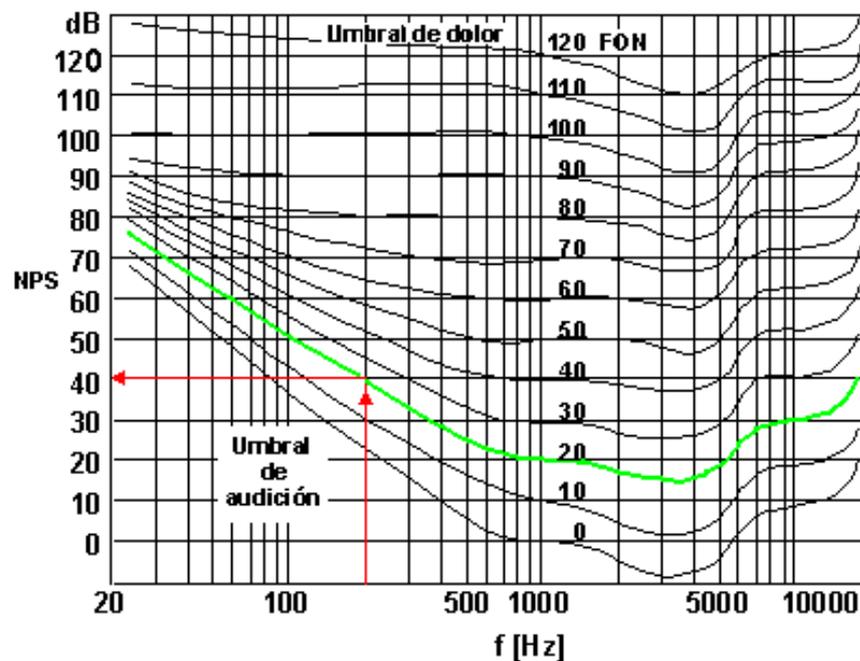


Figura 6 Curvas de Fletcher y Munson

Fuente: (Miyara, 2015)

Sin embargo esta red para realizar una correcta medición tenía que atenuar las altas y bajas frecuencias y las frecuencias medias no alterarlas, esto fue muy difícil de implementar ya que el oído no siempre se comporta de igual manera cuando depende de una frecuencia, por ejemplo a muy bajos niveles, solamente los sonidos de frecuencias medias son perceptibles, mientras que a niveles altos todas las frecuencias

se escuchan más o menos con la misma sonoridad (Miyara, 2015). Por tal razón lo más lógico era diseñar una red con tres ponderaciones de frecuencia a las cuales se las denominó con las letras A, B y C; estos niveles de ponderación poseen diferentes valores los mismos que se visualizan en la Figura 7.

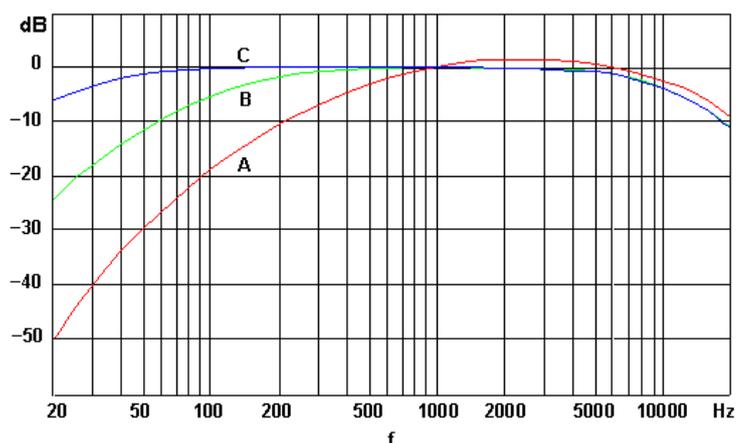


Figura 7 Curvas de ponderación A, B y C

Fuente: (Martínez & Peters, 2015)

Con estas nuevas ponderaciones establecidas cabe recalcar que para realizar una medición lo que primero se realiza es obtener un valor aproximado para establecer cuál de las curvas se usa, es decir, primero se realiza un proceso de recursividad luego se decide la curva A, B o C que se va a usar y finalmente se realiza la medición con una ponderación adecuada (Miyara, 2015).

2.3.1. Área de audición

La variación de frecuencias y amplitudes que viajan en una onda sonora a través del aire son las que permiten al ser humano percibir sonidos, pero para que esto suceda estos sonidos deben encontrarse dentro de un rango determinado, el nombre que este recibe es de rango dinámico del oído y está definido como la relación entre la máxima potencia que el oído puede percibir y la mínima potencia necesaria para divisar un sonido; el rango de frecuencias generalmente asignado para que el sistema auditivo perciba sonidos va desde los 20 Hz hasta los 20 kHz, pero hay que tener en cuenta que este rango de valores varía en función de la edad, en personas con trastornos auditivos y personas con pérdida de sensibilidad temporal o permanente, si bien la sensibilidad

del sistema auditivo no es independiente de la frecuencia entonces en la Figura 8 se pueden observar los parámetros que permiten definir el área de audición (Díaz, 2002).

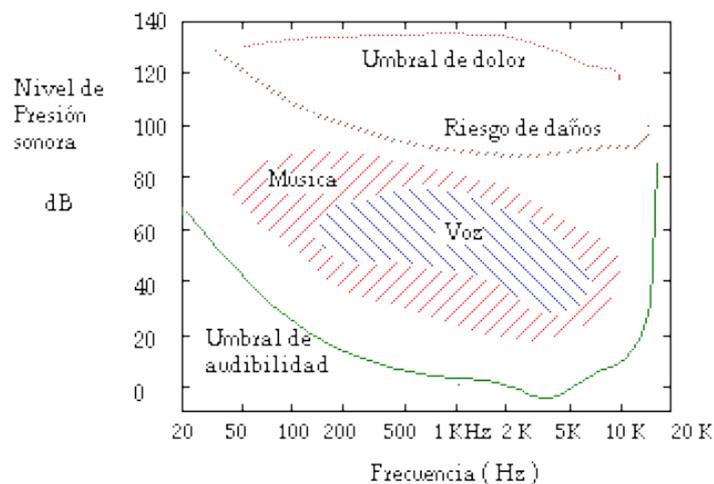


Figura 8 Área de audición

Fuente: (Díaz, 2002)

Se puede observar que el umbral de dolor está dado por el extremo superior del rango dinámico este indica los límites de las presiones sonoras máximas que puede soportar el oído, por debajo de este nivel se encuentra el límite de riesgo de daños, el cual representa un umbral de presión sonora que no debe sobrepasarse o caso contrario puede producirse una pérdida de sensibilidad permanente, por último se tiene el extremo inferior denominado umbral de audibilidad que representa la sensibilidad del aparato auditivo, es decir, el valor mínimo de presión sonora que debe tener un sonido para que éste sea apenas perceptible (Díaz, 2002).

2.4. Atmósferas sonoras

Generalmente se conoce como atmósfera sonora a los diferentes tipos de sonidos que caracterizan un ambiente o paisaje, es decir, se puede tener un ambiente de alegría, tristeza, miedo y tranquilidad producido con diferentes instrumentos musicales, de igual manera se puede tener ambientes de juegos deportivos, movimientos de autos en la ciudad, etc. Todo aquello que produce sonidos en el interior o exterior de un determinado ambiente es conocido como atmósfera sonora (Ortega & Castillo, 2013).

2.5. Beamforming

El término *Beamforming* procedente del inglés habitualmente es traducido como conformación de haz, también en varios libros y revistas este se lo conoce como sinónimo de filtrado espacial, a menudo en la literatura sobre procesamiento de señales y arreglos de sensores se señala que mediante el *beamforming* un receptor es capaz de diferenciar entre un grupo de señales incidentes (Sánchez J. , 2004).

Si bien el *beamforming* es un sistema capaz de proveer una forma de filtraje espacial y que permite la separación de señales que poseen un contenido en frecuencia solapado y que se encuentran en diferentes localizaciones físicas, los sistemas inteligentes que poseen un arreglo de sensores utilizan también el *beamforming* para adecuar los cambios de los niveles de ruido e interferencia que se producen en el medio de propagación (Cerna, 2014).

En términos generales se puede mencionar que un *beamformer* es un filtro espacial el cual se encarga de procesar datos obtenidos desde una matriz de sensores, de manera que sirva para mejorar la amplitud del frente de una señal con respecto al ruido de fondo y la interferencia; el funcionamiento básico del *beamformer* está basado en usar señales que provienen de un ángulo particular o de un conjunto de ángulos y realzarlos mediante una combinación constructiva, mientras que el ruido que proviene de señales con otros ángulos es rechazado por interferencia destructiva (Prasanth, Sreeja, Nidheesh, & Prince, 2013).

2.5.1. Clasificación del *Beamforming*

2.5.1.1. *Beamforming* tradicional

El *beamforming* tradicional se caracteriza por indicar que cuando se emite una fuente de ruido esta tiene una propagación compleja y a su vez también es afectada por otras fuentes complicando directamente su medición, por estas razones se han desarrollado varios métodos de identificación de fuentes de ruido centrando su objetivo en aislar el análisis en el dominio frecuencial y el dominio temporal, si bien se conoce que el *beamforming* tradicional está basado en análisis de retardos y suma de los mismos, sin olvidar que para esto se tiene en cuenta la distancia entre micrófonos

y la fuente para poder realizar el sumatorio de forma correcta es necesario identificar la señal que llega de cada micrófono con diferentes fases, en la Figura 9 se visualiza esta teoría (Madeira, Alloza, Liaño, García, & Lamotte, 2014).

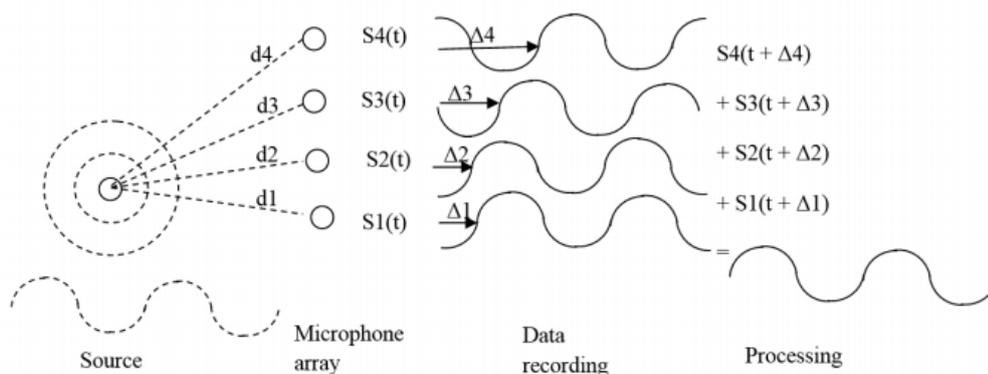


Figura 9 Teoría *beamforming* tradicional

Fuente: (Madeira et al., 2014)

En la gráfica se puede verificar la teoría que menciono en el párrafo anterior, así mismo se puede visualizar primero que el tamaño del arreglo de sensores tiene que ser lo suficientemente grande en comparación a la longitud de onda, de esta manera se puede garantizar una buena resolución espacial, segundo que una alta separación de los sensores puede dar lugar a la generación de fuentes virtuales en alta frecuencia debido al fenómeno que provoca el *aliasing* espacial, por esta razón es importante conocer que la separación de los sensores debe ser menor que la mitad de longitud de onda a la máxima frecuencia de interés (Madeira et al., 2014).

2.5.1.2. *Beamforming* de haz conmutado

El *beamforming* de haz conmutado está basado en la utilización de arreglos de sensores de haz conmutado estos son los más sencillos de diseñar y permiten tener diferentes patrones de radiación fijos con mayor ganancia en direcciones específicas, el funcionamiento del *beamforming* de haz conmutado está basado en detectar el nivel de la señal de interés y realizar los cálculos necesarios para determinar el mejor patrón de radiación y de esta manera ofrecer una mejor calidad de comunicación (Cerna, 2014). En la actualidad existe otro tipo de *beamforming* conocido como adaptativo,

este al usar algoritmos adaptativos para el procesamiento de señales será detallado cuidadosamente en ítems posteriores.

2.5.2. Tipos de *beamforming*

El *beamforming* se ha caracterizado por estar dividido en diferentes tipos para poder realizar un mejor procesamiento de señales, es por ello que en este ítem se detalla y se analiza el comportamiento de cada uno.

2.5.2.1. *Beamforming* de banda angosta (*Narrowband Beamforming*)

Para la descripción de este tipo de *beamforming* lo que primero se hará es observar la figura 10, la cual describe un *narrowband beamforming*.

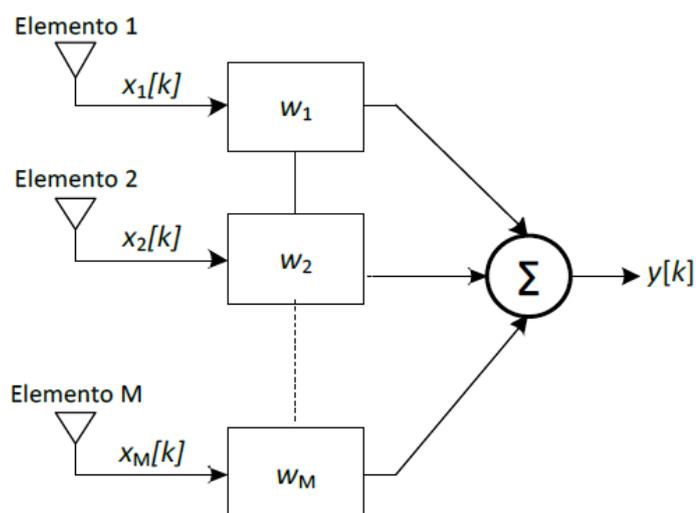


Figura 10 Esquema de *narrowband beamforming*

Fuente: (Madisetti, 2010)

En la gráfica se puede observar un *beamforming* de banda angosta en el cual se verifica que las señales de interés son muestreadas únicamente en el espacio, por lo tanto el filtro que se señala es usado siempre y cuando estas señales sean de *narrowband*, si cumple con lo mencionado entonces la salida de este tipo de *beamforming* estará dado por la siguiente ecuación (Madisetti, 2010).

$$y[k] = \sum_{m=1}^M w_m x_m[k] \quad (2.1)$$

Esta indica la salida $y[k]$ misma que se encuentra en el tiempo discreto k y es el resultado de la combinación lineal de los datos obtenidos por M sensores en el tiempo k , también en la ecuación se observa las expresiones w_m y $x_m[k]$ las cuales indican los coeficientes del filtro también conocidos como pesos y la señal a la salida de cada uno de los sensores respectivamente (Madisetti, 2010).

2.5.2.2. *Beamforming de banda ancha (Broadband beamforming)*

De igual manera que se hizo con el anterior *beamforming*, lo primero que se hace es observar la Figura 11 en la cual se muestra un esquema básico de un *broadband beamforming*.

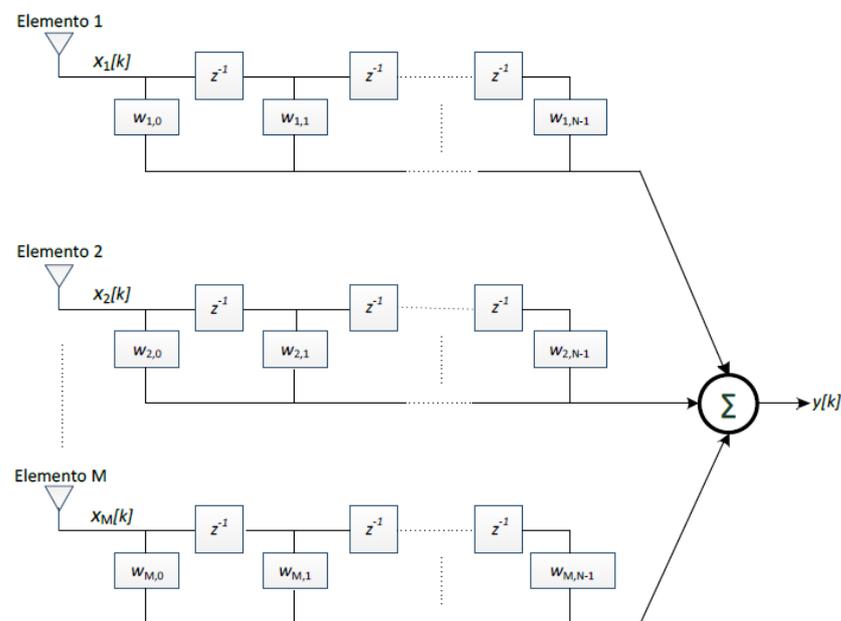


Figura 11 Esquema de *broadband beamforming*

Fuente: (Madisetti, 2010)

La gráfica permite evidenciar las señales en tiempo y espacio en un *broadband beamforming*, este puede operar cuando la señal de interés tiene una amplia frecuencia, es decir, la señal la cual va a ser procesada es de banda ancha, al operar este tipo *beamforming* se puede mencionar que la salida de este viene dado por la ecuación (2.2) (Torres, 2016).

$$y[k] = \sum_{m=1}^M \sum_{i=0}^{N-1} \mathbf{w}_{m,i} \mathbf{x}_m[k - i] \quad (2.2)$$

Donde $N-1$ indica el número de retardos que llegan en diferentes instantes de tiempo a los M sensores y $\mathbf{w}_{m,i}$, $\mathbf{x}_m[k - 1]$ indican los pesos y la señal a la salida de cada uno de los sensores respectivamente; si se analiza la ecuación (2.1) y (2.2) se puede concluir que estas dos expresiones que indican tanto la salida del *narrowband* como la del *broadband beamforming*, pueden expresarse en forma vectorial como se muestra en la ecuación (2.3) (Madissetti, 2010).

$$y[k] = \mathbf{w}^H \mathbf{x}[k] \quad (2.3)$$

Es de suma importancia señalar que los pesos representados por \mathbf{w}^H podrán estar estimados de tal manera que pueden dividirse en dos categorías, la primera que es conocida como *beamforming* fijo y en la cual los pesos están asociados a cada sensor y son fijos, y la segunda que es conocida como *beamforming* adaptativo y en la cual los pesos se ajustan dependiendo directamente de los datos obtenidos de forma dinámica (Caizapanta T. , 2015).

2.6. Arreglos de micrófonos

Se conoce como arreglo de sensores al conjunto de elementos que se encuentran distribuidos en posiciones determinadas formando una geometría específica, a menudo se utilizan para adquirir información mediante campos de ondas de algún medio de transmisión en el cual estas se encuentren propagadas, los campos de ondas más frecuentes y las aplicaciones que se puede realizar con estos arreglos se describen a continuación (Tolomeo, 2010):

- Campos de ondas:
 - Ondas acústicas.
 - Ondas mecánicas en sólidos.
 - Ondas electromagnéticas.
- Aplicaciones:
 - Localización de fuentes sonoras.

- Recepción de mensajes desde una fuente distante.
- Mapeo de una imagen del medio a través del cual el campo de ondas se propaga.

Cabe destacar que el principio básico de los arreglos de sensores está basado en que estos pueden combinarse de tal manera que puedan obtener cada uno una mayor directividad y sensibilidad, brindando un mayor ancho de banda y ganancia en comparación al usar solamente un sensor, existen diversos tipos de arreglos los más utilizados son: el arreglo lineal uniforme (*Uniform Linear Array*, ULA) y el arreglo circular uniforme (*Uniform Circular Array*, UCA), debido a las grandes ventajas que presentan con respecto a su forma de captar el campo de sonido, sin embargo el presente proyecto de investigación estará basado en un arreglo ULA de micrófonos por lo que la conceptualización estará basado solo en este arreglo (Monzingo, Haupt, & Miller, 2011).

Para analizar el comportamiento de un arreglo ULA de micrófonos es importante tener en cuenta las consideraciones de, modo de mando, campo lejano y campo cercano que se describen en el proyecto de titulación de Torres, A (2016) ya que estos conceptos permitirán un mejor entendimiento del análisis que se realizará en base al arreglo ULA que se describen en el siguiente ítem.

2.6.1. Arreglo Lineal Uniforme (ULA)

El arreglo lineal uniforme (ULA) es uno de los más conocidos ya que su sencilla implementación ha hecho de este arreglo uno de los más utilizados cuando se requiere obtener información de ondas sonoras, para conocer lo complejo de su funcionamiento se considera un arreglo de 8 micrófonos, espaciados una distancia d formando una línea recta (Tolomeo, 2010). El diseño básico de un ULA se muestra en la Figura 12.

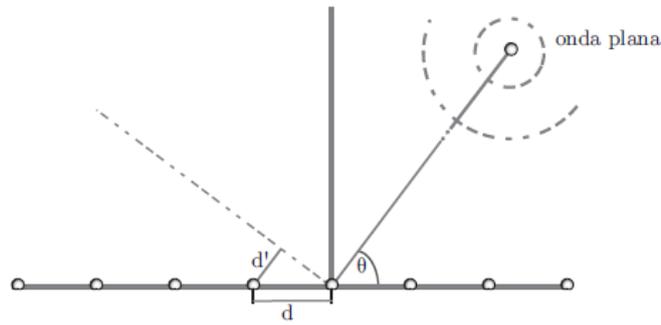


Figura 12 Arreglo lineal uniforme de 8 micrófonos

Fuente: (Martínez D. , 2008)

Para determinar el modo de operación de un arreglo como el que se observa en la gráfica, es necesario suponer que una fuente está en campo lejano (zona en la cual la fuente audible o de ruido se encuentra alejada del arreglo de sensores) con micrófonos que son omnidireccionales y de la misma sensibilidad (Martínez D. , 2008). Las características mencionadas permiten obtener una expresión matemática que indica el comportamiento del arreglo, dicha expresión se muestra en la siguiente ecuación:

$$\underline{A}(f, \theta) = e^{j\frac{w}{c}x\cos(\theta)} \quad (2.4)$$

Donde \mathbf{x} es el vector de posiciones de los micrófonos del arreglo y c es la velocidad del sonido con un valor aproximado de 340 m/s, sin embargo esta sola ecuación no permite al arreglo operar adecuadamente ya que si observamos la Figura 13 para que el arreglo pueda procesar las ondas sonoras captadas por cada micrófono del arreglo, es necesario tener un *beamformer* retardo y suma que es establecido directamente cuando se trabaja con la metodología *beamforming* de banda ancha (Martínez D. , 2008). La ecuación que describe este comportamiento es la siguiente:

$$\underline{W}(f, \theta_0) = \frac{1}{I} e^{j\frac{w}{c}x\cos(\theta_0)} \quad (2.5)$$

Entonces, si se trabaja con las ecuaciones (2.4) y (2.5) utilizando un *beamforming* de banda ancha es posible representar el diagrama de directividad de un ULA, es así que para el ejemplo de la Figura 12 los diagramas obtenidos se muestran en la Figura 13.

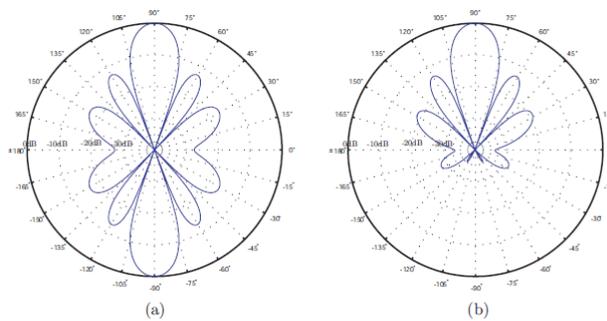


Figura 13 Diagrama de directividad de un ULA de 8 micrófonos (a) Con micrófonos omnidireccionales y (b) con micrófonos cardioides

Fuente: (Martínez D. , 2008)

La principal ventaja que se puede observar en la gráfica, es la simetría que existe en la semicircunferencia cuando $\theta \in [0^\circ - 180^\circ]$ y cuando $\theta \in [0^\circ - (-180^\circ)]$, sin embargo también existe una desventaja y esta ocurre cuando se desea apuntar a una fuente que se encuentre situada con $\theta = 90^\circ$ ya que al realizar este proceso se amplificara el ruido o interferencia que se encuentra situado en $\theta = 270^\circ$; sin duda alguna el problema de trabajar con micrófonos omnidireccionales será la amplificación de señales no deseadas, una de las soluciones que se plantea es trabajar con micrófonos cardioides apuntando hacia la semicircunferencia de interés, sin embargo al solventar el primer problema ahora se presenta otro inconveniente y este es que el trabajar con micrófonos cardioides nos impide apuntar satisfactoriamente hacia fuentes situadas en los 360° (Martínez D. , 2008).

El emplear arreglos esféricos dan solución a los problemas que presentan los micrófonos cardioides, sin embargo en el presente proyecto de investigación se indicará un nuevo método que permite simular un arreglo esférico utilizando arreglos ULA con solo 4 micrófonos.

2.6.1.1. Interpretación de un arreglo

Se puede interpretar un arreglo como un sistema que realiza un muestreo espacial de la señal de interés que se va a procesar, es decir, es como si se tuviera una señal discreta espacial, cuyo periodo de muestreo espacial sería $\Omega_s = \frac{2\pi}{\Delta x}$ siendo Δx la

separación entre micrófonos (Martínez D. , 2008). Si se emplea el teorema de *Nyquist* se puede afirmar que la separación máxima de los micrófonos vendrá dada por

$$\Delta x \leq \frac{c}{2 * f_{max}} \quad (2.6)$$

Donde c es la velocidad del sonido con un valor aproximado de 340 m/s y f_{max} es la frecuencia máxima, el utilizar la ecuación (2.6) podría empeorar el problema del *aliasing*, para solventar este inconveniente se puede disminuir la separación de los micrófonos pero esto implicaría obtener un arreglo más pequeño con el mismo número de micrófonos agravando el problema de la escasa directividad a bajas frecuencias, sin embargo esto se puede solucionar utilizando el criterio de *Rayleigh* en el cual debe cumplirse la condición expuesta en la ecuación (2.7) (Martínez D. , 2008).

$$I\Delta x \leq \frac{c}{f_{min}} \quad (2.7)$$

Finalmente con esta ecuación se establece la separación máxima de los micrófonos, teniendo en cuenta que esta tendrá una dependencia directa de la frecuencia de la fuente de interés para que no exista *aliasing* espacial y las señales de información que capturen los micrófonos no contengan señales indeseables como lo es el ruido o la interferencia, de igual manera esta ecuación dependerá de los factores del *beamforming* de banda ancha para ser o no alterada.

2.6.1.2. Recepción de la señal del arreglo

El proceso por el cual pasa el arreglo lineal para recibir la señal se visualiza en la Figura 14.

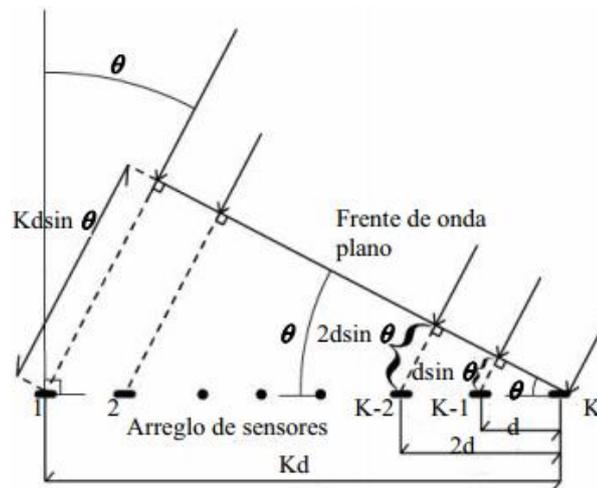


Figura 14 Arreglo lineal uniforme de k sensores.

Fuente: (Tolomeo, 2010)

Se observa que el arreglo lineal uniforme de K elementos recibe la señal cuando el frente de una onda plana alcanza los K elementos en un cierto instante de tiempo, es decir, para que el frente de onda alcance al elemento $K-1$, este viajó una distancia d , para que alcance al elemento $K-2$ la distancia que viajó fue el doble y así sucesivamente hasta alcanzar todos los elementos que forman parte del arreglo, si se normaliza las fases de las señales recibidas de tal manera que la fase del elemento k sea cero, se puede obtener la diferencia de fases con respecto al elemento k de las señales recibidas, las fases denominadas ϕ_i se describen en la ecuación (2.8) y son obtenidas de la multiplicación del número de onda (Tolomeo, 2010).

$$\phi_i = k(N - i)d * \sin\theta ; \text{ para } i = 1, 2, 3, \dots, K \quad (2.8)$$

donde

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.9)$$

De esta manera las señales recibidas por el arreglo pueden escribirse como

$$S_i(\theta) = S_e(\theta)a_i e^{jk(K-i)d*\sin(\theta)}; \text{ para } i = 1, 2, \dots, K \quad (2.10)$$

Donde $S_e(\theta)$ simboliza el patrón de radiación de un micrófono y a_i indica la amplitud recibida por el i ésimo elemento, si se toma en cuenta que todas las amplitudes de los elementos son iguales y normalizados a uno se tiene: $a_i = 1$ para $i = 1, 2, \dots, K$, ahora si se suman todas las señales recibidas por la ecuación (2.10) obtenemos la señal total $S(\theta)$ (Tolomeo, 2010).

$$S(\theta) = \sum_{i=1}^K S_i(\theta) = S_e(\theta) \sum_{i=1}^K e^{jk(K-i)d*\sin(\theta)} \quad (2.11)$$

“Si se toma en cuenta las condiciones de normalización que se mencionó anteriormente, se puede mencionar que la señal total recibida puede separarse en una componente única de un sensor y en otro debido a las condiciones del arreglo” (Tolomeo, 2010). Dejando como resultado la siguiente ecuación:

$$S_a(\theta) = \sum_{i=1}^K e^{jk_a(K-i)d*\sin(\theta)} \quad (2.12)$$

Donde $S_a(\theta)$ indica el factor arreglo del patrón de radiación de k sensores.

2.6.1.3. Patrón de radiación del arreglo

El patrón de radiación de un arreglo está dado por la ecuación (2.12) y puede ser expresado como

$$S_a(\theta) = \sum_{i=1}^K e^{j(K-i)T} \quad (2.13)$$

donde

$$T = kd * \sin(\theta) \quad (2.14)$$

Si a la ecuación (2.13) se la multiplica por e^{jT} se obtiene

$$S_a(\theta)e^{jT} = e^{jKT} + e^{j(K-1)T} + \dots + e^{j2T} + e^{jT} \quad (2.15)$$

Y si se resta la ecuación (2.15) de (2.13) se tiene

$$S_a(\theta)(e^{jT} - 1) = e^{jKT} - 1 \quad (2.16)$$

Al reordenar y se reescribir términos de la ecuación (2.16) se consigue

$$S_a(\theta) = \frac{e^{\frac{KT}{2}} \left(e^{j\frac{KT}{2}} - e^{-j\frac{KT}{2}} \right)}{e^{j\frac{T}{2}} \left(e^{j\frac{T}{2}} - e^{-j\frac{T}{2}} \right)} = e^{j\frac{(K-1)T}{2}} \frac{\sin\left(\frac{K}{2}T\right)}{\sin\left(\frac{T}{2}\right)} \quad (2.17)$$

Finalmente si se sustituye la ecuación (2.14) en la ecuación (2.17) y calculando el modulo se logra

$$|S_a(\theta)| = \left| \frac{\sin\left(\frac{K}{2}kd * \sin(\theta)\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}kd * \sin(\theta)\right)} \right| = \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi kd * \sin(\theta)}{\lambda}\right)}{\sin\left(\frac{\pi d * \sin(\theta)}{\lambda}\right)} \right| \quad (2.18)$$

Esta ecuación en la cual se expresa solamente el módulo de la ecuación (2.17) es la que permite graficar el patrón de radiación de un arreglo lineal uniforme, entonces si se aplica esta para un arreglo de 16 sensores que se encuentran separados entre ellos una distancia de 1cm y en la cual incide una señal senoidal de frecuencia igual a 17 kHz se obtiene la Figura 15, la cual indica el comportamiento de la amplitud normalizada en base a cada uno de los ángulos de incidencia (Tolomeo, 2010).

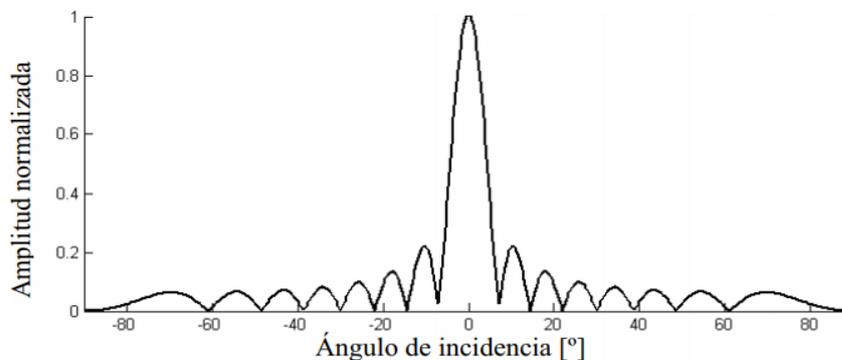


Figura 15 Patrón de radiación, ángulo contra amplitud

Fuente: (Tolomeo, 2010)

2.6.1.4. Características del patrón de radiación

2.6.1.4.1. Lóbulo principal y lóbulos laterales

A partir de la ecuación (2.18) se puede analizar algunas características como lo son lóbulo principal y lóbulos laterales, si se observa la Figura 15 se puede verificar que el valor máximo del patrón de radiación ocurre cuando θ es igual a 0° , para ángulos que se encuentran próximos al lóbulo principal se puede realizar una aproximación a partir de la ecuación (2.18) (Tolomeo, 2010). El resultado de esta aproximación aborda un resultado como el de la siguiente expresión:

$$|S_a(\theta)| \approx K \left| \frac{\sin(Kx)}{Kx} \right| \quad (2.19)$$

donde

$$x = \frac{\pi d * \sin(\theta)}{\lambda} \quad (2.20)$$

En la ecuación (2.19) se tiene que, el segundo valor máximo sucede cuando el argumento Kx es de 4.5 aproximadamente, si se aplica el método de Newton-Raphson se consigue calcular la amplitud de ese máximo con un valor de 0.21723, por lo tanto si este valor obtenido lo pasamos a decibelios se puede obtener el valor del primer lóbulo lateral que es de -13,26 dB y está por debajo del lóbulo principal, tal y como se puede observar en la Figura 16.

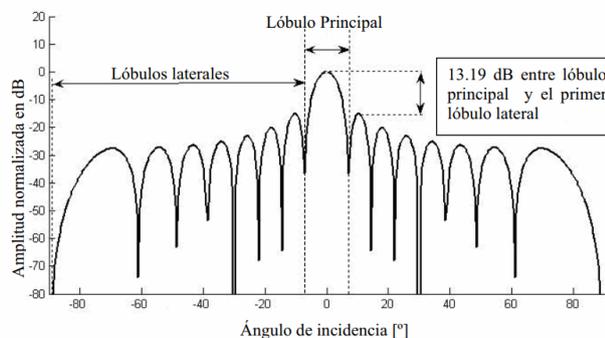


Figura 16 Lóbulo principal y lóbulos laterales.

Fuente: (Tolomeo, 2010)

Utilizando los mismo datos con los cuales se obtuvo la Figura 15 a partir de la ecuación (2.18) y luego de haber utilizado de igual manera la ecuación (2.19) obteniéndose la Figura 18, se verifica que el lóbulo principal se encuentran entre los dos puntos mínimos más cercanos a 0° , mientras que los lóbulos laterales están entre los puntos mínimos más cercanos a 0° (Tolomeo, 2010).

2.6.1.4.2. Direccionamiento del lóbulo principal

El lóbulo principal del patrón de radiación se obtuvo cuando $\theta = 0^\circ$ tal y como se observó en la Figura 16, este ángulo puede cambiar siempre y cuando cada elemento del arreglo se desfase un tiempo τ (Tolomeo, 2010). Las expresiones matemáticas que permiten representar una señal recibida por un sensor del arreglo con un retardo τ_1 son:

$$S_1(\theta) = e^{jk(K-1)d*\sin\theta - \tau_1} \quad (2.21)$$

$$\tau_1 = k(K - 1)d * \sin(\theta_0) \quad (2.22)$$

Donde θ_0 es el ángulo en el cual se desea tener el valor máximo del lóbulo principal, ahora si se reemplaza (2.22) en (2.21) se tiene

$$S_1(\theta) = e^{jk(K-1)d(\sin\theta - \sin\theta_0)} \quad (2.23)$$

Si la ecuación obtenida se aplica para cada elemento del arreglo entonces la expresión que permita determinar el patrón de radiación será:

$$S_a(\theta) = \sum_{i=1}^K e^{jk(K-1)d(\sin\theta - \sin\theta_0)} \quad (2.24)$$

Finalmente obteniendo el módulo de la ecuación (2.24) se tiene

$$|S_a(\theta)| = \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi K d k (\sin\theta - \sin\theta_0)}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\pi d k (\sin\theta - \sin\theta_0)}{2}\right)} \right| \quad (2.25)$$

Si se analiza la ecuación (2.25) se puede concluir que el máximo valor del patrón de radiación se produce cuando

$$\sin \theta - \sin \theta_0 = 0 \quad (2.26)$$

Con la condición de la ecuación (2.26) se puede concluir mencionando que el máximo valor del patrón de radiación ocurrirá cuando $\theta = \theta_0$, es decir, el máximo valor del lóbulo principal estará en θ_0 , en vez del ángulo 0° como lo era en la ecuación (2.18), este procedimiento se lo realiza para aplicaciones que estén basadas en la detección de fuentes sonoras (Tolomeo, 2010).

Si se tiene en cuenta los datos del arreglo de 16 sensores con los cuales se obtuvo las Figuras 15 y 16, es posible graficar el nuevo patrón de radiación aplicando la ecuación (2.25) con un ángulo θ_0 de 30° , de esta manera la gráfica conseguida es:

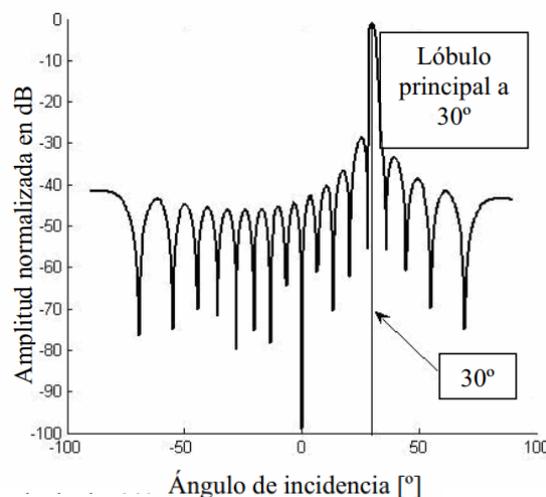


Figura 17 Lóbulo principal a 30° para un arreglo de 16 sensores separados una distancia $d = 1\text{cm}$.

Fuente: (Tolomeo, 2010)

2.7. Estimación de dirección de llegada (DOA)

La estimación de dirección de llegada (*Direction Of Arrival*, DOA) o conocida comúnmente como procesamiento de señales recibidas es una técnica que a lo largo de los años ha venido mejorando a la par con la tecnología, por ejemplo la primera técnica

para estimación de la posición de un blanco estaba basado en el uso de sistemas de radar con antenas rotativas de alta directividad, posteriormente esta técnica fue base para el desarrollo de nuevos métodos de estimación usando nuevas tecnologías por lo que en la actualidad esta técnica ha permitido tener distintos algoritmos que permitan identificar o localizar fuentes acústicas (Borja , 2012).

A medida que han pasado los años han aparecido diferentes métodos para determinar la estimación del DOA, los más relevantes han sido implementados basados en los algoritmos MUSIC y *Delay And Sum*, mismos que por sus características propias y expresiones matemáticas han permitido estimar, el ángulo acimut para atmósferas o escenarios de una dimensión, los ángulos (φ, θ) para dos y tres dimensiones (Yang, Cho, & Cho, 2012).

2.8. Algoritmos adaptativos LCMV

Se conoce como algoritmos adaptativos LCMV (*Linearly Constrained Minimum Variance*) aquellos que van alterando su comportamiento durante el tiempo que demore su ejecución, es decir, estos algoritmos responde a los cambios que se van originando en el medio, su objetivo es restringir la salida del *beamformer* en base a fase y amplitud de señales que no interesan y llegan de una o más direcciones (Diniz, 2013).

El *beamformer* que permite analizar el comportamiento de los algoritmos adaptativos se visualiza en la Figura 18, en este se puede destacar que los pesos son seleccionados con la finalidad de minimizar la potencia de error o varianza que están sujetos a un conjunto de restricciones lineales (Caizapanta T. , 2015). Estas restricciones estarán expresadas por la siguiente ecuación:

$$\min_{\mathbf{w}} \xi[k] \quad \text{sujeto a} \quad \mathbf{C}^H \mathbf{w} = \mathbf{f} \quad (2.27)$$

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

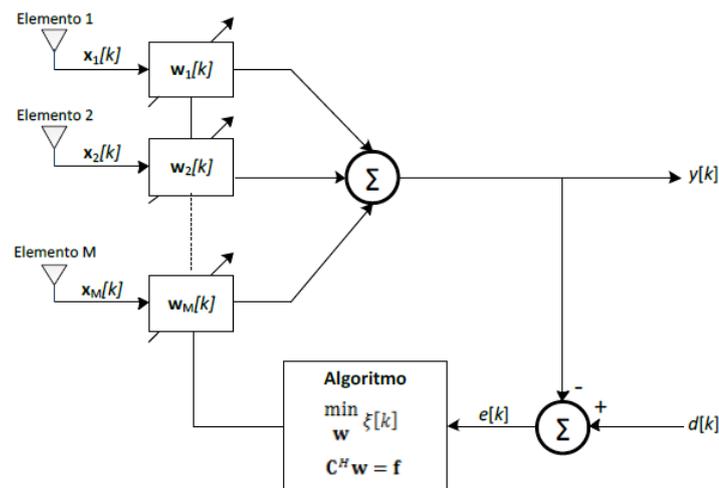


Figura 18 Estructura de un *beamforming* adaptativo de banda ancha

Fuente: (Caizapanta T. , 2015)

En la Figura 18 se puede observar que una señal que se desea puede ser descartada siempre y cuando $d[k] = 0$, esto ocurre gracias a la ayuda de la imposición de restricciones lineales. Los algoritmos adaptativos LCMV pueden dividirse en tres familias: de estructura GSC (*Generalized Sidelobe Canceler*) que permite que cualquier algoritmo *unconstrained* pueda ser empleado como *constrained*, *Linearly Constrained*, y los de estructura *Householder* (Apolinário J. A., 2009). En la presente investigación se analizará conceptualmente solo los de estructura *Householder* ya que estos presentan mejor desempeño como se verificó en los trabajos previos presentados por Caizapanta, A (2015), Caizapanta, T. (2015) y Torres, A (2016).

2.8.1. Estructura *Householder*

El bajo costo computacional ha convertido a la estructura *Householder* en una de las de mejor desempeño y más utilizada, la principal característica que presenta esta estructura se basa en la eficiencia computacional que presenta la matriz \mathbf{Q} y sus reflectores de *Householder* (de Campos, Werner, & Apolinário como se citó en Caizapanta T., 2015).

La matriz \mathbf{Q} que también es conocida como una matriz rotacional ortogonal, se utiliza como una transformación que es capaz de originar un vector de coeficientes modificados $\bar{\mathbf{w}}[k]$ estos se relacionan directamente con $\mathbf{w}[k]$ (de Campos, Werner, &

Apolinário como se citó en Caizapanta T., 2015). Su expresión matemática está dada por la siguiente ecuación:

$$\bar{\mathbf{w}}[k] = \mathbf{Q}\mathbf{w}[k] \quad (2.28)$$

La matriz \mathbf{Q} debe ser seleccionada de tal manera que se cumpla que $\mathbf{Q}\mathbf{Q}^H = \mathbf{I}$.

$$\bar{\mathbf{C}}\{\bar{\mathbf{C}}^H\bar{\mathbf{C}}\}^{-1}\bar{\mathbf{C}}^H = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{p \times p} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Por lo tanto $\bar{\mathbf{C}} = \mathbf{Q}\mathbf{C}$ satisface $\mathbf{f} = \bar{\mathbf{C}}^H\bar{\mathbf{w}}[n + 1]$ y la transformada de la matriz de proyección está dada por la ecuación (2.41).

$$\bar{\mathbf{P}} = \mathbf{Q}\mathbf{P}\mathbf{Q}^H = \mathbf{I} - \bar{\mathbf{C}}\{\bar{\mathbf{C}}^H\bar{\mathbf{C}}\}^{-1}\bar{\mathbf{C}}^H = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{p \times p} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Si $\bar{\mathbf{w}}[0]$ se inicializa según la expresión siguiente.

$$\bar{\mathbf{w}}[0] = \bar{\mathbf{C}}\{\bar{\mathbf{C}}^H\bar{\mathbf{C}}\}^{-1}\mathbf{f} = \mathbf{Q}\mathbf{F} \quad (2.31)$$

Los primeros p elementos de $\bar{\mathbf{w}}[0]$ no necesitan ser reestablecidos. Entonces la solución $\bar{\mathbf{w}}[k]$ se encuentra basada en la transformación \mathbf{Q} a la señal de salida y como consecuencia el error de salida no se modificará posterior a la transformación efectuada (de Campos, Werner, & Apolinário como se citó en Caizapanta T., 2015).

2.8.1.1. Householder CCG

Este algoritmo posee dos características principales la primera tiene que ver con su rápida convergencia mientras que la segunda se basa en su costo computacional, aunque la segunda característica indica que este tiene mayor costo en comparación al algoritmo *Householder* NCLMS, esta razón hace que este sea deseable cuando se trata de implementarlo en un dispositivo con un hardware que sea alto en recursos (Caizapanta T., 2015). La Tabla 1 presenta en general un detalle del algoritmo HCCG y el proceso para su implementación.

Tabla 1
 Algoritmo *Householder CCG*

Algoritmo de inicialización y proceso

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Fuente: (Caizapanta T. , 2015)

CAPÍTULO 3

3. MÉTODOS Y MATERIALES

3.1. Micrófonos MEMS ADMP504

El ADMP504 está compuesta por: un micrófono MEMS, un amplificador de salida y un convertidor de impedancia, la descripción general de este dispositivo indica que es de alto rendimiento, muy bajo en ruido y potencia, lo que caracteriza al ADMP504 es la alta relación señal/ruido y la respuesta de frecuencia de banda ancha extendida que posee, además su especificación de sensibilidad ha permitido convertirlo en una buena opción cuando se trabaja con aplicaciones de campo cercano y lejano (Analog Devices, 2012).

3.1.1. Características físicas

Las principales características físicas de este dispositivo son:

- Montaje en una superficie paquete pequeña de: $3.35 \text{ mm} \times 2.50 \text{ mm} \times 0.88 \text{ mm}$.
- Respuesta omnidireccional.
- SNR muy alto de 65 dBA.
- Sensibilidad de -38 dBV.
- Respuesta de frecuencia extendida de 100 Hz a 20 kHz.
- Bajo consumo de corriente: $180 \mu\text{A}$.
- Salida analógica de un extremo.

3.1.2. Descripción de pines e índices absolutos

La descripción de pines y los índices absolutos que caracterizan al ADMP504 nos permiten establecer valores máximos absolutos para no causar daños permanentes al dispositivo, los valores establecidos también permiten minimizar los periodos en los cuales el dispositivo esté en funcionamiento, los parámetros mencionados se describen en las Tablas 2 y 3.

Tabla 2
Descripción de pines ADMP504

Pin N°	Nombre	Descripción
1	<i>OUTPUT</i>	Señal análoga de salida
2	<i>GND</i>	Tierra
3	VDD	Tensión de alimentación

Fuente: (Analog Devices, 2012)

Tabla 3
Valores Índice Máximo Absoluto de los Micrófonos MENS ADM504

Parámetros	Índice
Tensión de alimentación	-0.3 V a +3.6 V
Nivel de presión sonora (SPL)	160 dB
Choque mecánico	10,000g
Rango de temperatura	-40°C to +85°C

Fuente: (Analog Devices, 2012)

3.2. Labview®

Es un software que permite el desarrollo de sistemas de ingeniería, su entorno de programación el cual es un modo gráfico simplifica la integración de hardware para diferentes aplicaciones, este software también permite visualizar resultados inmediatamente con la creación de interfaces de usuario o desarrollados a partir algoritmos para análisis de datos y control avanzado con IP de matemáticas y procesamiento de señales, una de las principales ventajas es que Labview® puede interactuar con bibliotecas de otros software y lenguajes de fuente abierta (National Instruments, 2008).

3.3. Dispositivo de diseño embebido NI myRIO1900

El NI myRIO1900 es una herramienta que permite implementar múltiples conceptos de diseño mediante las utilización de E/S reconfigurables, este dispositivo está compuesto con E/S en ambos lados del dispositivo en forma de conectores, 10 entradas analógicas, 6 salidas analógicas, 40 líneas de E/S digitales, WiFi, leds, un push-button, acelerómetro interno, un FPGA Xilinx Z-710 y un procesador *dual-core* ARM Cortex-A9 de 667MHz (National Instruments, 2017).

3.3.1. Diagrama de bloques de hardware

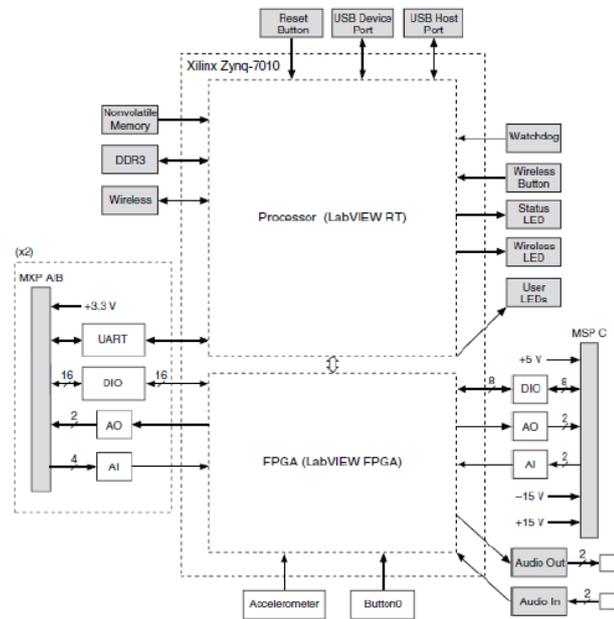


Figura 19 Diagrama de bloques del dispositivo NI myRIO1900

Fuente: (National Instruments, 2016)

En la Figura 19 se muestra una descripción del diagrama de bloques en la cual se puede observar un módulo FPGA, este es el que se utilizará y permitirá realizar el procesamiento de señales en la presente investigación y además un conector MXP el mismo que se describe a continuación:

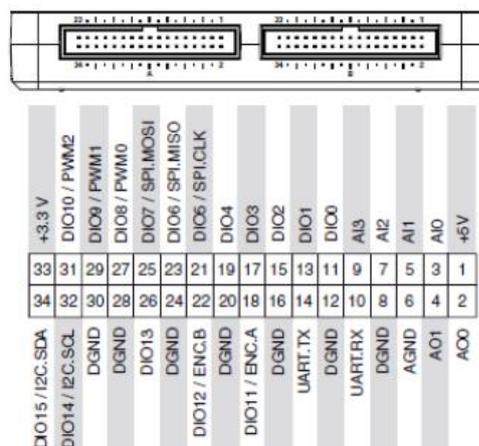


Figura 20 Descripción de pines conector MXP A y B

Fuente: (National Instruments, 2016)

En la Figura 20 se describe el conector MXP el cual permite establecer conexiones al momento de implementar un sistema de adquisición de datos, este sistema y sus componentes se detalla en el Capítulo 4, cabe recalcar que la descripción de estos pines son de suma importancia para entender los diagramas que representarán al sistema de adquisición de datos en capítulos posteriores, por ello finalmente se presenta en la Tabla 4 la descripción de cada uno de los pines del conector mencionado.

Tabla 4
Descripción de pines conector MXP A y B

Señal	Referencia	Dirección	Descripción
+15V/-15V	<i>DGND</i>	Salida	+15V/-15V Fuente de poder de salida.
AI0+/AI0-; AI1+/AIA-	<i>AGND</i>	Entrada	±10 V, Diferencial entrada del canal análogo.
AO<0..1>	<i>AGND</i>	Salida	±10 V, referencia, salida análoga.
<i>AGND</i>	N/A	N/A	Referencia para señal análoga entrada y salida y +15 V/ -15 V poder salida.
+5V	<i>DGND</i>	Salida	+5V Fuente de poder de salida
DIO <0..7>	<i>DGND</i>	Entrada o salida	Líneas digitales de 3.3 V salida, 3.3 V/5 V-entrada.
UART.RX	<i>DGND</i>	Entrada	UART recibir de entrada. Las líneas UART son eléctricamente idéntica a las líneas DIO.
<i>DGND</i>	N/A	N/A	Referencias para señales digitales +5V y poder de salida.

Fuente: (National Instruments, 2016)

3.3.2. Módulo Labview FPGA

El módulo FPGA es un componente de desarrollo gráfico de Labview® este complemento que ofrece este software es el más utilizado para programar FPGAs en hardware de E/S reconfigurables, su objetivo principal está basado en el diseño de manera más eficiente y efectiva de sistemas complejos, de forma que proporciona un entorno de desarrollo altamente integrado. Las FPGA (*Field Programmable Gate Array*) o más conocidas como arreglos de compuertas programables en campo son chips de silicio reprogramables que brindan velocidades temporizadas por hardware y

fiabilidad, sin requerir altos volúmenes de recursos para compensar el gran gasto que genera un diseño personalizado de ASIC (National Instruments, 2012).

3.4. Matlab®

3.4.1. Matlab® para procesamiento de señales

El software Matlab® cuenta con funciones y bibliotecas para realizar procesamiento de señales, mismas que serán utilizadas en los diferentes algoritmos para alcanzar los objetivos planteados, los procedimientos, funciones, desarrollo y análisis puede encontrarse en el libro *Digital Signal Processing* (Ingle & Proakis, 2010).

3.5. Descripción general del sistema

La descripción general del sistema que se implementa en el presente proyecto de titulación se visualiza en la Figura 21, en esta gráfica se observa de manera global los principales bloques que permitirán describir el proceso que se implementa hasta obtener los resultados deseados, mismos que ayudan cumplir con el objetivo principal del proyecto.

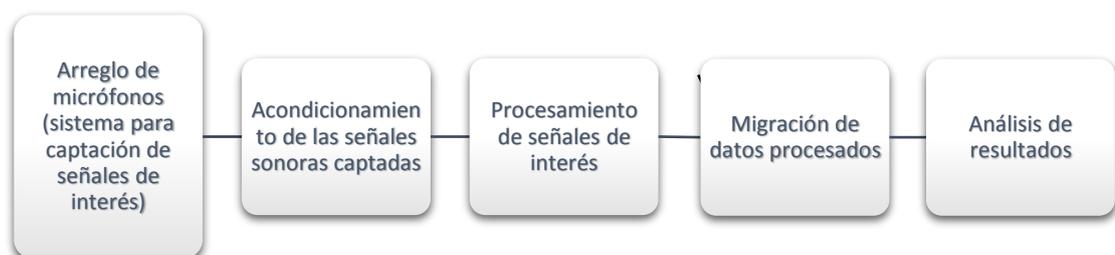


Figura 21 Diagrama de bloques general del sistema

Como se observa en la gráfica se parte de un arreglo de micrófonos el cual es capaz de permitir la captación de señales, mismas que pertenecen a señales sonoras o acústicas de diferentes fuentes específicas de interés que se encuentran situados en un escenario o atmósfera sonora tridimensional, posteriormente se realiza un acondicionamiento de señales en *hardware* esto se realiza con la finalidad de poder

conectar cada micrófono que pertenece al arreglo a una tarjeta de adquisición y procesamiento de información.

Una vez que se ha conseguido obtener conexión entre el arreglo y la tarjeta de adquisición, se implementa en *software* un método que es capaz de realizar localización de fuentes sonoras basado en DOA por medio de procesamiento digital de señales, finalmente una vez que se ha implementado este algoritmo se realiza una migración de datos a un programa específico y el cual permite realizar el análisis de los mismos cuando el usuario lo requiera.

Los datos obtenidos una vez terminado el procesamiento de señales permitirán establecer la localización de fuentes sonoras en un escenario tridimensional, esto se realiza a través del análisis de imágenes en tres dimensiones, mismas que mediante niveles de energía nos permitirán conocer cuántas fuentes se encuentran en una parte del escenario en un determinado momento, cabe recalcar que este procedimiento nos permite cumplir con el propósito del proyecto de titulación el cual es ayudar a personas con discapacidad auditiva a relacionar lo que escuchan con su medio visual a través de la reconstrucción de atmósferas sonoras tridimensionales.

En el capítulo 4 se describe cada uno de los bloques expuestos en la Figura 21, en este se explicará con más detalle el funcionamiento de cada bloque y el *software* que permite la implementación de los algoritmos mencionados, de igual manera se dará a conocer el sistema que permite captar las señales de interés de la atmósfera sonora tridimensional, el cual es lo que hace novedoso, interesante y permite cumplir con los objetivos propuestos a través de una FPGA.

CAPÍTULO 4

4. IMPLEMENTACIÓN

El actual capítulo se encuentra dividido en dos partes fundamentales, la primera detalla el diseño y la implementación en hardware de un prototipo que permita realizar la captación de fuentes de interés en una atmósfera sonora tridimensional, mientras que la segunda será la implementación en software, misma que procesará los datos obtenidos por el prototipo permitiendo determinar un método de realce de voz y un algoritmo para localización de fuentes sonoras, posteriormente se realiza un análisis el cual se describe en el Capítulo 5.

Es importante tener en cuenta que tanto el software como hardware que se diseñan e implementan en este capítulo estarán desarrollados haciendo uso de los materiales y métodos descritos en el Capítulo 3, es decir, todo el diseño estará basado en la utilización de 4 micrófonos MENS ADMP504 para hardware y los programas Labview y Matlab para implementar el software de procesamiento y análisis de señales.

4.1. Hardware

4.1.1. Adquisición de datos

Para el prototipo que permite analizar una atmósfera sonora tridimensional es necesario tener en cuenta algunas consideraciones, cada una de estas van a permitir que el prototipo final opere de manera adecuada al momento de captar las fuentes que proporcionan las señales sonoras de interés, cada una de estas consideraciones se detallan en los siguientes ítems.

4.1.1.1. Acondicionamiento de micrófonos MEMS ADMP504

Si se tiene en cuenta que la mayoría de señales requieren alguna forma de preparación antes que puedan ser procesadas, la aplicación del presente proyecto de titulación no es la excepción, ya que es necesario un acondicionamiento de señales debido a que los datos implican medidas ambientales que son captadas a través de micrófonos, en este sistema el acondicionamiento de la señal es uno de los componentes más importantes del sistema de adquisición de datos (National

Instruments, 2015). En la Figura 22 se puede observar el acondicionamiento de señal que se implementa para cada uno de los micrófonos del arreglo.

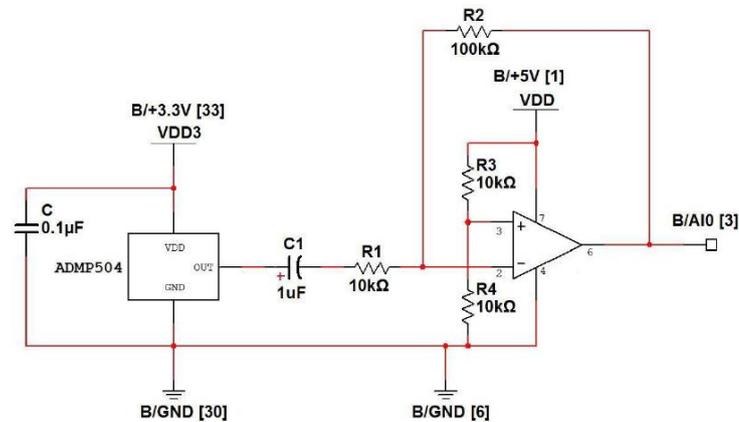


Figura 22 Acondicionamiento de señal para cada micrófono

Fuente: (Caizapanta T. , 2015)

En la gráfica se distingue principalmente un amplificador, este es de suma importancia ya que a través de este el acondicionamiento de la señal permite aumentar el nivel de voltaje, la resolución de la sensibilidad y medida, y se tiene una mejor relación señal al ruido con respecto al ruido de la medida que se obtiene mediante los micrófonos (National Instruments, 2015).

4.1.1.2. Descripción de pines para conexiones

La descripción de pines que permiten conectar el circuito de acondicionamiento de cada uno de los micrófonos con la tarjeta NI myRIO1900 se describe en la Tabla 5.

Tabla 5

Descripción de pines para conexiones con NI myRIO1900

Número de pin	Descripción general	Descripción en puerto MXP
1	Alimentación 5 voltios	B/+5v
30	Tierra	B/GND
3	Salida amplificador M1	B/AI0
5	Salida amplificador M2	B/AI1
7	Salida amplificador M3	B/AI2
9	Salida amplificador M4	B/AI3

4.1.1.3. Arreglo de micrófonos MEMS ADMP504

Una vez que se implementa la etapa de acondicionamiento para los 4 micrófonos, se diseña el arreglo de sensores el cual principalmente hace énfasis en la separación que hay entre ellos y permite una mejor captación de señales de fuentes de interés.

4.1.1.3.1. Diseño del arreglo lineal uniforme (ULA)

Para el diseño de un arreglo de micrófonos que permita localizar fuentes sonoras se deben tomar en cuenta aspectos como: frecuencia mínima y máxima que se desea localizar, ancho del lóbulo principal, lóbulos secundarios, distancia de las fuentes y resolución espacial (Machín , 2016). Entonces si se toma en cuenta los aspectos mencionados, el diseño que se propone en el presente proyecto de titulación parte de la interpretación de la Figura 23.

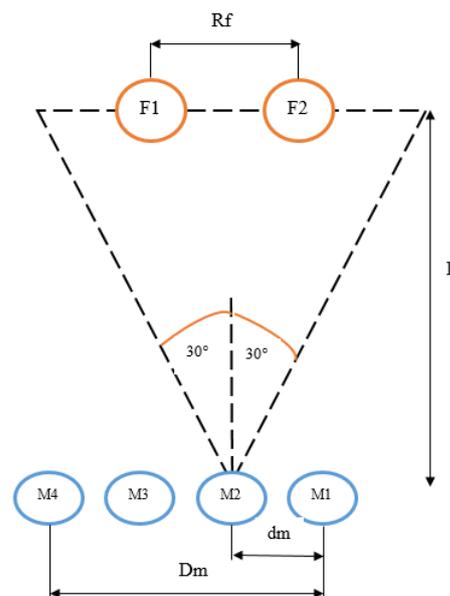


Figura 23 Esquema de parámetros de diseño del arreglo ULA con dos fuentes

Se observa un esquema que permite determinar los parámetros principales del diseño de arreglo de micrófonos, siendo estos descritos a continuación:

- $F1, F2$.- Son las fuentes emisoras de señales sonoras o acústicas.
- R_f .- Distancia entre las fuentes sonoras.
- L .- Distancia desde las fuentes hasta el arreglo de micrófonos.

- $M1, M2, M3, M4$.- Número de micrófonos que pertenecen al arreglo.
- dm .- Distancia entre los micrófonos más cercanos.
- Dm .- Distancia entre los micrófonos más alejados.
- 60° .- Apertura máxima.

Una vez que se conoce los principales parámetros se empieza con el diseño del mismo, por lo tanto hay que tener en cuenta que el rango de frecuencias conversacionales de la voz humana está entre los 20 Hz y 3 KHz, entonces al sustituir los valores de frecuencia máxima de 4 KHz, y velocidad del sonido de 340 m/s en la ecuación (2.6) se obtiene:

$$\Delta x \leq 0,0425 \text{ m} \quad (4.1)$$

Siendo Δx equivalente al valor dm , y el cual permite establecer la separación entre micrófonos cumpliendo con la ecuación (4.1), por lo tanto la separación máxima entre los micrófonos que conformen el arreglo ULA será de 4,25 cm. Ahora para determinar los demás parámetros que se establecen en el esquema de la Figura 23 se parte de:

$$f_{min}(30^\circ) = \frac{2c}{Dm} \quad (4.2)$$

Si se toma en cuenta el ángulo de apertura igual a 60° la ecuación (4.2) queda expresada como:

$$2 * \sin 30^\circ = \frac{2c}{Dm * f_{min}} \quad (4.3)$$

Ahora si se despeja Dm se obtiene:

$$Dm = \frac{2c}{2 * \sin 30^\circ * f_{min}} \quad (4.4)$$

Finalmente la resolución espacial en el plano focal para medidas de distancia L entre el arreglo y la fuente está dada por la ecuación (4.5).

$$Rf = \frac{L}{Dm} \lambda \quad (4.5)$$

La Tabla 4 muestra los resultados de los cálculos obtenidos una vez que las expresiones matemáticas han sido reemplazadas con los valores que fueron adquiridos a partir de la ecuación (4.1), teniendo en cuenta las consideraciones de rango de frecuencias que se establecen para una conversación.

Tabla 6

Valores calculados para el arreglo ULA de 4 micrófonos

Parámetro	Valor calculado
<i>dm</i>	4,25 cm
<i>Dm</i>	272 cm
<i>L</i>	1,5 m
<i>Rf</i>	75 cm
<i>Ángulo de apertura</i>	60°

Es importante mencionar que los parámetros que se establecen en la Tabla 4 no marcan valores fijos, esto es debido a que los datos que se obtienen son captados de un ambiente no estacionario en el cual las variables cambian constantemente, es por ello, que de los 5 solamente se podrá modificar *dm* y *L* en caso de ser necesario, el resto de parámetros vendrán definidos por el escenario, por tal razón el diseño del arreglo en este trabajo de investigación depende básicamente de la distancia entre los micrófonos y la distancia entre el arreglo y la fuente. Cabe recalcar que el diseño que se realiza a partir de la Figura 23 es de suma importancia ya que mediante este se puede establecer un sistema de adquisición de datos el cual permita bosquejar de alguna manera posible un escenario que cumpla con las características de la gráfica mencionada.

4.1.1.4. Diseño del módulo para adquisición de datos

Una vez que se ha diseñado el circuito de acondicionamiento para cada micrófono y se ha establecido los parámetros del arreglo ahora se diseña previo a la implementación, un módulo que permita realizar la adquisición de datos de tal forma

que pueda cumplir con las características del esquema de la Figura 21. El módulo que se implementa en esta investigación (ver Figura 24) permite unificar el circuito de acondicionamiento, el arreglo ULA y la tarjeta NI myRIO1900 la cual nos permite adquirir los datos y procesarlos.

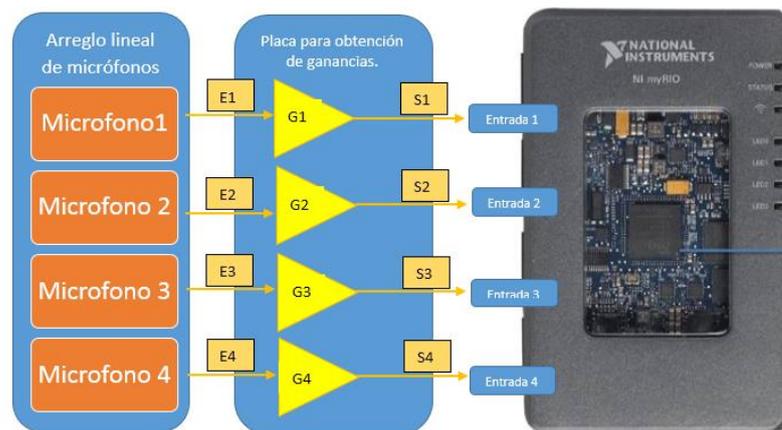


Figura 24 Esquema general de conexiones entre arreglo ULA, circuito de acondicionamiento y tarjeta NI myRIO1900

En la gráfica se puede observar 3 componentes principales, el primero describe el diseño del arreglo de micrófonos el cual fue descrito en el ítem anterior partiendo de la Figura 23, el segundo pertenece al circuito de acondicionamiento de micrófonos el cual está basado en la Figura 22 y el tercero corresponde a las entradas en las cuales se conectarán las salidas del circuito de acondicionamiento de cada micrófono con la tarjeta NI myRIO1900.

El primer componente que pertenece al arreglo de micrófonos está implementado en una tarjeta (baquelita con conexiones necesarias para interconectar con otros elementos u componentes electrónicos) en la cual los micrófonos se encuentran distanciados el valor que se calculó a partir de la ecuación (4.1), la segunda componente al igual que la primera se encuentra en una tarjeta, en la cual se hallan los circuitos de acondicionamiento para cada uno de los micrófonos, la salida de cada uno de estos circuitos acondicionadores serán las que se conecten a la tarjeta NI myRIO1900 mediante el puerto de expansión MXP y la descripción de la Tabla 5. Ahora, lo que se hará es asociar las conexiones de la Figura 24 con las del conector MXP de la Figura 23 y la tarjeta que tiene como elementos los arreglos de micrófonos.

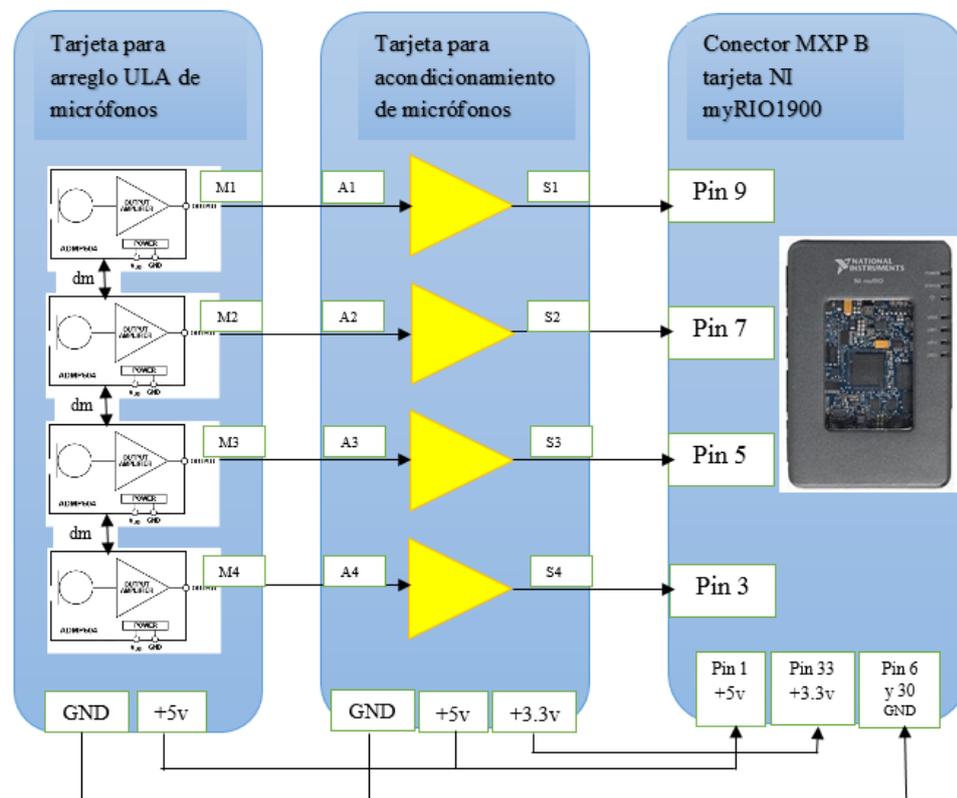


Figura 25 Descripción de conexiones y pines entre arreglo ULA, circuito de acondicionamiento y tarjeta NI myRIO1900

En la figura 25 lo que primero se observa es la tarjeta que contiene el arreglo de sensores, todos los micrófonos se encuentran separados 4,25 cm entre sí, luego se puede visualizar las iniciales M1, M2, M3 y M4 estas indican la señal de salida de cada micrófono MENS ADMP504 que es conectada con A1, A2, A3 y A4 que no son más que las entradas de la tarjeta de acondicionamiento, en la cual se realiza el proceso de amplificación de señal con los elementos establecidos por la Figura 22, luego se observa la conexión entre S1, S2, S3 y S4 y los pines del conector MXP B, el cual está conectado directamente como un expansor de pines en la tarjeta NI myRIO1900, finalmente se observan las conexiones entre los pines de alimentación y GND entre todas las tarjetas, de esta manera queda listo el módulo de adquisición de datos el cual cuenta con 2 tarjetas y un conector externo.

Sin embargo el sistema que permite captar señales en una atmósfera tridimensional no está aún terminado, ya que falta uno de los componentes más importantes y con el que se variara la dirección del arreglo para poder realizar la adquisición de datos,

misma que ayudó a realizar la localización de fuentes sonoras en un escenario tridimensional, este sistema se completará en la descripción de los siguientes ítems.

4.1.1.5. Descripción del escenario

El escenario en el cual el sistema propuesto se implementa, se realiza la adquisición y procesamiento de datos está basado en un juego de baloncesto, este escenario se caracteriza por cumplir con las características de una atmósfera sonora tridimensional, por lo tanto la implementación de *hardware* y *software* que se lleva a cabo será para procesamiento de señales y localización de fuentes en tres dimensiones.

4.1.1.5.1. Juego de baloncesto

El baloncesto es un deporte que se juega entre dos equipos cada uno cuenta con 5 jugadores, el objetivo es introducir el balón en una canasta (también conocido como aro) que se encuentra ubicada a 3,05 m del suelo, generalmente este deporte es jugado por personas de grande estatura (Pérez & Merino, 2009). El campo de juego es de forma rectangular tiene una dimensión de 28 m de largo y 15 m de ancho (ver Figura 26), además está constituida de una superficie dura y plana, el área de seguridad tiene un área de 2 m que bordea el campo, está dividida en secciones para que cada equipo se ubique en el área que le corresponde (Tobar, 2014).

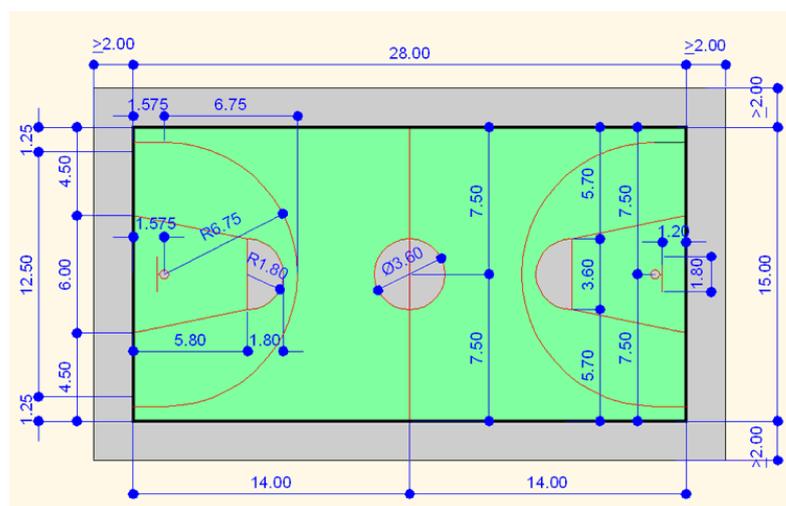


Figura 26 Medidas de un campo de baloncesto

Fuente: (OFICAD, 2017)

En la Figura 26 se puede observar cada una de las medidas que contemplan un campo de baloncesto, cada una de estas es importante ya que mediante estas se puede establecer el posicionamiento del sistema de adquisición de datos, es decir, con los valores que se observa se puede decidir en qué lugar específico se ubica el arreglo de micrófonos y cuál es el procedimiento que se sigue para poder captar fuentes sonoras que provienen de otras direcciones con respecto a la posición del arreglo. El campo de baloncesto el cual cumple con las características mencionadas de la Figura 26 y en el cual se realizan todas las pruebas necesarias de este proyecto de investigación es campo de juego del coliseo de la Unidad Educativa Salesiana Don Bosco La Tola.

4.1.1.5.2. Descripción de sub-regiones

Una vez que se conoce las medidas y características del campo, es necesario poder dividir a estas en pequeñas regiones, es decir, el campo completo en cada juego no se lo analiza ya que al contar solamente con un arreglo de 4 micrófonos no se pueden captar las señales de todas las fuentes sonoras que se encuentren en la atmósfera tridimensional.

Por lo tanto si se tiene en cuenta que en un juego de baloncesto al menos se tiene un aproximado de 11 fuentes sonoras, la localización de las mismas es muy compleja, ya que una de las fuentes depende del ruido que provoca al chocar el balón con la superficie y las otras pertenecen a la señal de voz de cada uno de los jugadores cuando cada uno de ellos expresa alguna palabra o frase. Es por ello que la localización de fuentes sonoras en una atmósfera tridimensional es compleja al contar solamente con un arreglo limitado de 4 micrófonos.

La solución que se plantea en el presente trabajo de titulación es dividir al campo y por ende a la atmósfera sonora tridimensional en pequeñas zonas, estas serán las llamadas sub-regiones a las cuales ya se mencionó anteriormente, entonces al dividir el escenario principal en pequeñas regiones también es necesario diseñar un sistema de adquisición de datos, el cual sea capaz de adquirir las señales de diferentes regiones en un instante de tiempo, es decir, en un determinado intervalo de tiempo el sistema de adquisición de datos tiene que adquirir las señales de fuentes sonoras de todas las sub-regiones que pertenezcan a una zona específica de la atmósfera tridimensional, el

proceso será repetitivo hasta poder realizar la reconstrucción de atmósferas sonoras tridimensionales, sin embargo al ser un proceso repetitivo en el presente trabajo se analiza una determinada zona del juego de baloncesto para esta manera comprobar y evaluar el funcionamiento del sistema.

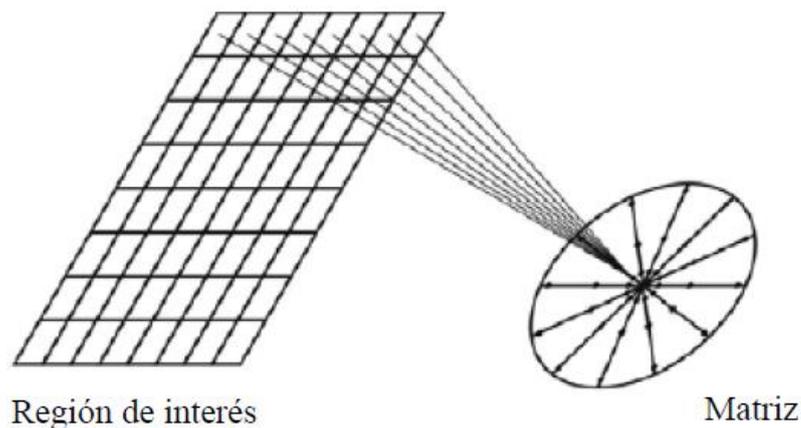


Figura 27 Obtención de datos de sub-regiones a partir de una región de interés

Fuente: (Gerges, 2011)

En la Figura 27 se puede observar un ejemplo de la división de un escenario (región de interés) en pequeñas sub-regiones, mismas que son analizadas una vez que el sistema de adquisición de datos capte información de las fuentes de interés ubicadas en esa sub-región, proceso que será realizado principalmente por el arreglo de micrófonos formando una especie de matriz de puntos de interés.

4.1.1.6. Automatización del sistema de adquisición de datos

Una vez desarrollado e implementado, el diseño de circuitos de acondicionamiento, el diseño de arreglo de micrófonos, división de un escenario en sub-regiones, y determinar el proceso para captar señales que provienen de fuentes sonoras de interés mediante una matriz de puntos (ver Figura 28), finalmente se propone diseñar un sistema el cual sea capaz de unificar las etapas mencionadas y cumplir con las siguientes características:

- Captar señales de interés situadas en cada sub-región simulando un arreglo tridimensional a partir de un arreglo ULA.

- Reconstruir la atmósfera sonora tridimensional de la zona específica seleccionada del campo de baloncesto, mediante un barrido de sub-regiones en un determinado intervalo de tiempo.

Al tener en cuenta las características mencionadas, se parte con el diseño de un arreglo tridimensional a partir de un arreglo ULA, para ello es importante visualizar la siguiente figura.

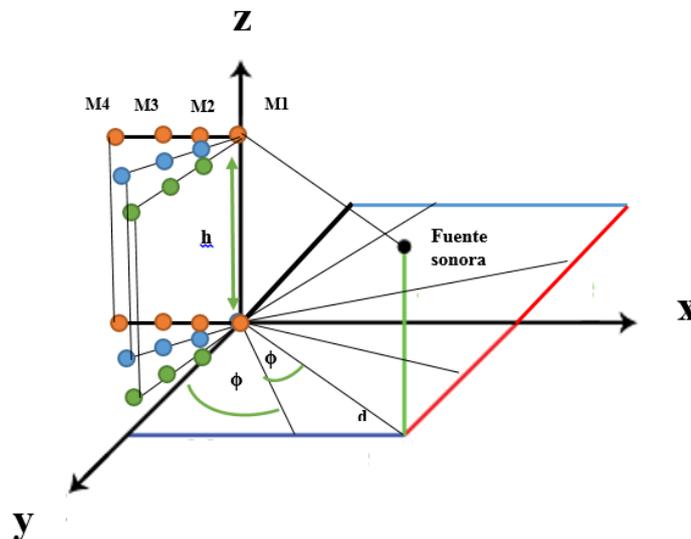


Figura 28 Diseño arreglo 3D a partir de un ULA

En la gráfica se puede observar M1, M2, M3 y M4 que son los microfónos que conforman el arreglo ULA, entonces sí se puede formar un arreglo tridimensional a partir de un ULA, esto se realiza simplemente moviendo el arreglo ULA en el eje X (cambiar el ángulo de azimut con referencia al arreglo) y eje Z (moviendo la altura del arreglo), el diseño del sistema que se implementa tiene esta característica principal la cual es variar el ángulo en el eje x y una cierta altura h en el eje z y de esta manera simular un arreglo tridimensional, cabe recalcar que el realizar este procedimiento nos permite diseñar un *software* en el cual se puede realizar un método de extrapolación de datos y de esta manera realizar la localización de fuentes sonoras situadas en otras sub-regiones, este procedimiento en *software* se lo implementa en los siguientes ítems.

Una vez que se determina el diseño de este arreglo tridimensional basado en un ULA se necesita determinar un sistema que permita realizar el barrido sub-regiones tal

como se visualizó en la Figura 28, es decir, se implementa un sistema mediante un motor a pasos (*stepper* motor) el cual permite cambiar de dirección a la tarjeta del arreglo de micrófonos (ver Figura 24). En términos generales el proceso que el sistema realiza es:

1. Definir la zona de interés del campo de baloncesto.
2. Dividir la zona en sub-regiones.
3. Capturar las señales sonoras en la sub-región originada por el choque del balón contra el piso, mediante el arreglo de micrófonos inicialmente ubicado en una posición específica y guardar los datos.
4. Cambiar el ángulo del motor a pasos para capturar y guardar datos de las siguientes sub-regiones.
5. Variar manualmente h (altura del arreglo) y repetir el paso 4.
6. Variar automáticamente ϕ (ángulo azimut del arreglo) y repetir el paso 4.
7. Guardar los datos para su posterior procesamiento.

En el procedimiento descrito se observa que el ángulo ϕ y la altura h serán variados automáticamente y manualmente respectivamente pero, ¿Qué sucede con el cambio del ángulo del *stepper* motor?, este proceso es sencillo y se lo realiza automáticamente con la ayuda del *software* Labview[®], es decir, el *stepper* motor es manipulado mediante una secuencia de señales misma que a través de Labview[®] permite variar el ángulo de dirección del arreglo, por lo tanto, el arreglo cambia su dirección para poder analizar las diferentes sub-regiones, este ángulo será definido por la cantidad de sub-regiones y fuentes de interés que se tenga en la zona seleccionada de la atmósfera tridimensional.

Finalmente, se describe al sistema como el que se visualiza en la Figura 25, con la única diferencia que la tarjeta que contiene el arreglo de micrófonos se encuentra adherida al servomotor, las flechas que se visualizan en la Figura mencionada indican conexiones entre las diferentes tarjetas, solo hay que tener en cuenta que las conexiones que van desde el arreglo hasta la tarjeta de acondicionamiento tendrán una longitud máxima de 10 cm para que la tarjeta del arreglo pueda estar en movimiento a la par del servomotor, sin tener inconveniente alguno de desconexión de sus pines principales. De esta manera es como la implementación en *hardware* termina.

4.2. Software

En el presente ítem se describe un sistema para el cual se toman como bases las conceptualizaciones y ecuaciones analizadas en capítulos anteriores, el proceso que se abarca en este ítem incluye procesos que permiten el diseño de un sistema para localización de fuentes sonoras en un escenario tridimensional, es decir, los conceptos y expresiones matemáticas que se mencionan en el Capítulo 2 serán de suma importancia para comprender el funcionamiento del sistema que se diseña, implementa y analiza en el presente capítulo y capítulos posteriores.

Es de suma importancia indicar que la adquisición de datos están implementados mediante el uso del módulo FPGA de la tarjeta NI myRIO1900, sin embargo este solo obtiene señales de interés ya que el procesamiento de los mismos son procesados en el software Matlab[®], en resumen además del sistema de adquisición de datos implementado se trabaja con los software Labview[®] y Matlab[®] para cumplir con los objetivos del presente proyecto de titulación.

4.2.1. Etapa adquisición de datos

El *hardware* que se encuentra diseñado e implementado no tendrá valor alguno sino trabaja en conjunto con *software*, es por ello que, para el sistema diseñado de adquisición de datos se implementa un programa en Labview[®] mismo que cumple con el procedimiento mencionado en el ítem anterior y en el cual las principales características están dadas por el proceso automático para realizar un barrido de sub-regiones a diferentes alturas, y la frecuencia de muestreo con la cual se realiza la obtención de señales, de esta manera se permite captar las señales sonoras en cada una de las sub-regiones, cabe recalcar que desde el diseño del arreglo ULA se viene trabajando con una frecuencia de muestreo de 8000 Hz, es por ello que el código en el *software* mencionado trabaja bajo estos parámetros y cumple con las características necesarias para conquistar el objetivo propuesto.

4.2.2. Etapa procesamiento de datos

El diseño de software para implementar un algoritmo que permita localizar las fuentes de interés se lo realiza mediante el uso del software Matlab[®], este va a permitir realizar el procesamiento de los mismos.

4.2.2.1. Localización de fuentes sonoras

Para poder localizar las fuentes de interés una vez que el barrido de sub-regiones culmina es necesario llevar a cabo un procedimiento el cual permita identificar de que sub-región proviene el sonido del bote del balón, para ello parte del análisis de la Figura 29.

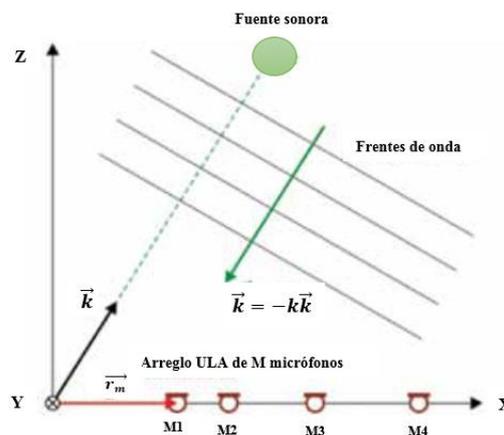


Figura 29 Esquema de un arreglo ULA de micrófonos con igual dirección a la de una onda plana incidente

Fuente: (Gerges, 2011)

La gráfica indica los frentes de onda de una onda plana proveniente de una fuente sonora, para poder captar señales de interés provenientes de una dirección específica y está pueda ser localizada por el arreglo ULA ubicándola en la sub-región adecuada es necesario:

1. Realizar el barrido del arreglo ULA para las sub-regiones necesarias y guardar los datos obtenidos por cada micrófono.
2. Graficar las señales adquiridas y dividir la señal completa en sub-regiones.
3. Determinar la media de cada señal.

4. Restar la señal de cada sub-región con su media.
5. Reducir el ruido de cada señal de cada sub-región.
6. Sumar las señales y obtener una señal final.
7. Realizar una gráfica en 3 dimensiones identificando el bote del balón en cada sub-región.

Siguiendo el proceso descrito se puede realizar la reconstrucción de atmósferas sonoras tridimensionales, mediante en un arreglo tridimensional desarrollado a partir de un arreglo ULA de 4 micrófonos, cabe recalcar que el procesamiento de señales se realiza a partir de la división de la señal captada en un intervalo de tiempo que se describe en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Una vez que se culmina con la implementación de *hardware* y se realiza el procedimiento descrito en el capítulo anterior para *software*, se obtienen los resultados que se analizan en el presente capítulo.

5.1. Comportamiento micrófonos MEMS ADMP504

El análisis del comportamiento de los micrófonos es de suma importancia para verificar el desempeño de los mismos antes de poder realizar el procedimiento que permite la identificación y localización de fuentes sonoras en una atmósfera tridimensional, es por ello que para su respectivo análisis se parte de la Figura 30.

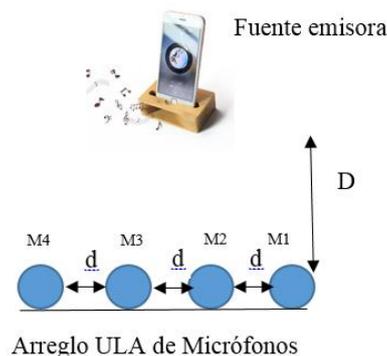


Figura 30 Verificación comportamiento de micrófonos a partir de un arreglo ULA

La gráfica nos permite identificar 2 componentes necesarios para proceder a realizar el análisis del comportamiento de los micrófonos, uno de ellos es un celular el cual mediante la aplicación *ToneGenerator* emitirá una señal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) separada una distancia $D = 1\text{m}$, del segundo componente que pertenece al arreglo ULA, este se encarga mediante sus 4 micrófonos separados una distancia $d = 4,25\text{cm}$ de captar las señales emitidas por la aplicación, los resultados (ver Figura 31) obtenidos una vez que la señal captada ha sido manipulada por el software Matlab[®] indican una descompensación de cada micrófono al verificar su respuesta en frecuencia a pesar de tener las mismas características físicas, dicha descompensación puede ser rectificadas y es el análisis que se describe en los siguientes ítems del presente proyecto.

5.1.1. Respuesta en frecuencia

Se conoce como la respuesta en frecuencia a la respuesta de un sistema o en este caso a la respuesta de cada uno de los micrófonos en régimen permanente cuando se utiliza una señal de entrada conocida, para poder determinar la respuesta en frecuencia de cada uno de los micrófonos se parte de una señal AWGN que por sus características matemáticas su espectro abarca frecuencias desde 0 hasta el infinito con amplitud constante.

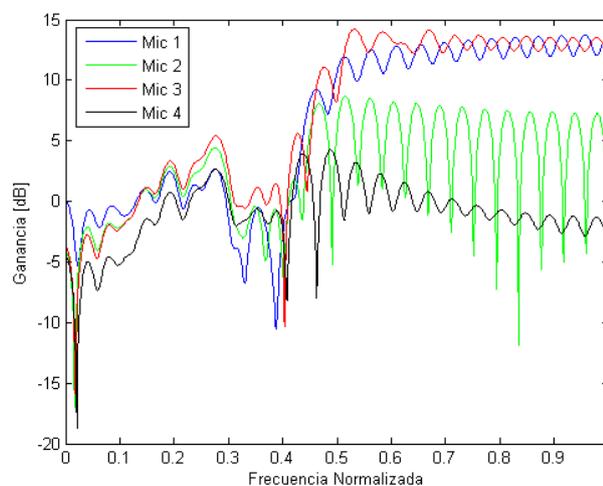


Figura 31 Respuesta en frecuencia micrófonos MEMS ADMP504

Se observa en la Figura 31 claramente una descompensación en cada uno de los micrófonos, es decir la diferencia de sus características físicas de construcción para cada micrófono no es igual pese a que la teoría y los *datasheet* indiquen que si tienen igual construcción pues se verifica que no es así, sin embargo este no es tema de preocupación ya que la descompensación puede ser corregida utilizando una estructura de identificación de sistema tomando como referencia el micrófono 1 (Diniz, 2013).

5.1.2. Compensación de retardos

Para compensar los retardos se ejecuta el algoritmo RLS (*Recursive Least Squares*) el mismo que permite obtener una señal de referencia misma que es adquirida a partir de la señal de ruido blanco como la señal que se desea a la salida y la señal del

micrófono 1 como señal de entrada, dicha señal conseguida se convierte en señal de referencia para el resto de micrófonos que conforman el arreglo ULA.

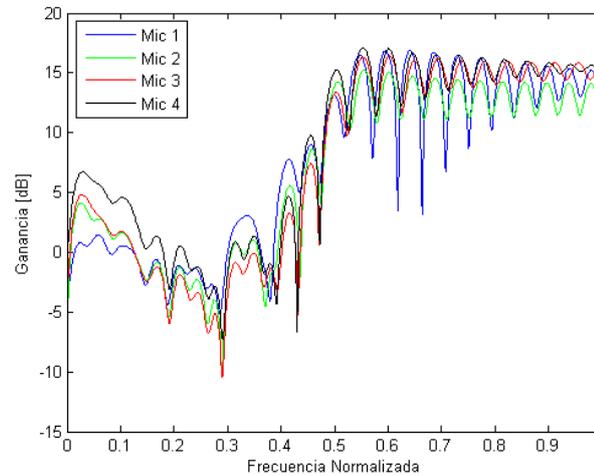


Figura 32 Respuesta en frecuencia compensada de los micrófonos

El análisis que se realiza de esta descompensación está basado estrictamente en que la descompensación de las señales captadas por los micrófonos se producen en primer lugar, por las características propias de construcción de cada micrófono y segundo, porque los datos obtenidos provienen de señales que no han sido tomadas en una cámara anecoica, estos factores son los que provocan que la respuesta en frecuencia de cada micrófono varié, sin embargo al aplicar el algoritmo RLS ahora se denota que cada micrófono posee una respuesta compensada al micrófono 1 (ver figura 32).

5.2. División del campo de baloncesto

Una vez que se comprueba la respuesta en frecuencia de la compensación de los micrófonos se comienza con la división de sub-regiones, para ello lo primero que se realiza es una división del escenario en 4 zonas, esta decisión se la toma ya que se cuenta con una limitación de recursos, como lo es el contar solamente con un arreglo ULA de 4 micrófonos, por tal razón se empieza por dividir al escenario en 4 zonas de interés (ver Figura 33) las mismas que se conocen como: zona norte, zona de transición 1, zona de transición 2 y zona sur.

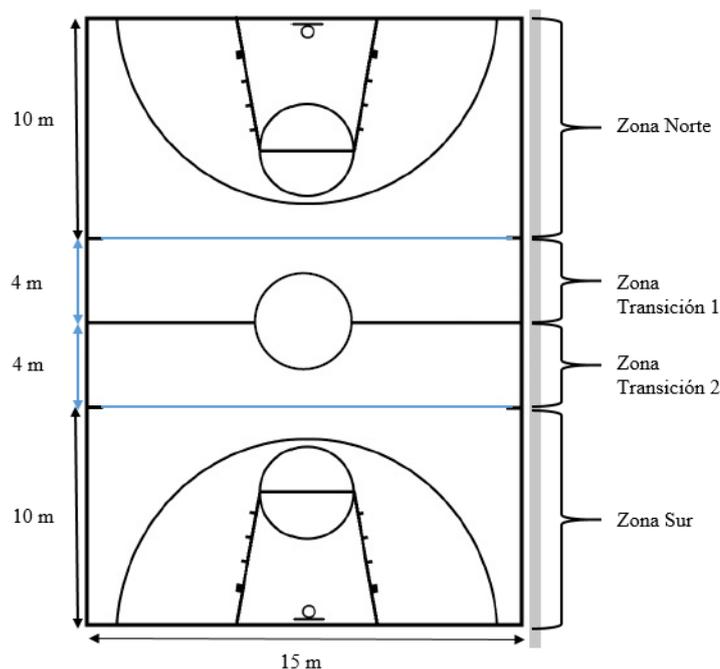


Figura 33 Campo de baloncesto dividido en zonas

De las 4 zonas que se observan se toma la zona sur ya que la limitación de recursos no ayuda para realizar la reconstrucción de atmósferas sonoras tridimensionales en el campo completo, también se toma en cuenta que la zonas de transición no son contadas como zonas de interés ya que como su nombre lo dice solo son zonas en las cuales los jugadores de baloncesto transitan y mas no arman jugadas, por lo tanto la zona sur es la que se utiliza para realizar la división en pequeñas regiones, de igual manera cabe recalcar que en esta zona se va a desarrollar una jugada básica de baloncesto y a partir de esta se realiza la obtención de señales sonoras.

5.3. División Sub-Regiones

Una vez que se determina la zona en la cual se trazan las sub-regiones se define el perímetro que cubre cada una de las mismas la cual es de 1x1 metro, es decir la zona sur contará con un total de 151 sub-regiones (ver Figura 34), los ángulos al cual el arreglo de micrófonos basado en la Figura 28 debe se asignan mediante el cálculo de triángulos rectángulos (ver Figura 35) y se describen en la Tabla 7.

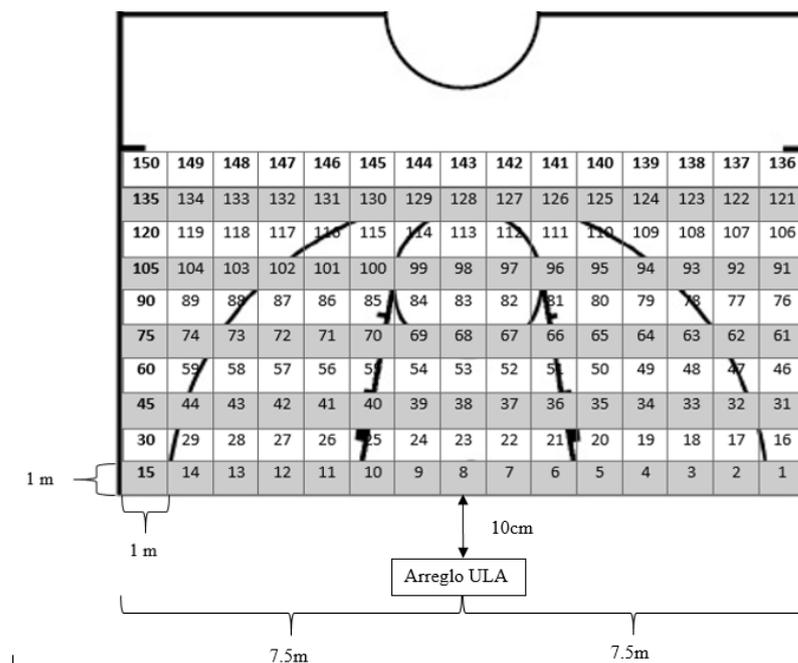


Figura 34 División del escenario en sub-regiones de 1x1 metro

Las sub-regiones que se observan en la gráfica son enumeradas siguiendo la forma que el motor a pasos gira para realizar la obtención de señales sonoras en cada una de estas, no está por demás mencionar que en la gráfica también se puede visualizar que el arreglo de micrófonos conjuntamente con las tarjetas descritas en la Figura 25 y el motor a pasos se encuentran a una distancia de 10cm a partir del límite del campo y a 7.5m de las líneas de saque, este dato es de suma importancia para el cálculo de ángulos.

5.3.1. Obtención de ángulos para sub-regiones

La importancia del cálculo de ángulos es debido a que la tarjeta en la cual se encuentra el arreglo de micrófonos está adherida al motor a pasos y a partir de este se puede direccionar a la tarjeta a cada una de los sub-regiones, no está por demás mencionar que el motor a pasos es un motor de precisión y por ello la importancia de un cálculo aproximado de ángulos. De igual manera es de suma importancia conocer que para este cálculo se toma como referencia al micrófono 1 (ver Figura 28).



Figura 35 Cálculo de ángulos para sub-regiones 1x1 metro

En la gráfica se puede observar que los ángulos como se mencionó anteriormente se obtienen a partir del trazo de triángulos rectángulos para cada sub-región, los valores de los catetos a y b corresponden al perímetro en el que se encuentre la sub-región, mientras que el valor de los ángulos β_1 , β_2 y β_3 se determinan aplicando la regla básica de ángulos de triángulos rectángulos, por ejemplo para los triángulos que se visualizan en la gráfica el valor de $a = 1.10$ m valor constante para las sub-regiones 1-15, mientras que b , b_1 y b_2 toman valores de 7.5m, 6.5m y 5.5m respectivamente, entonces al aplicar la regla de ángulos se obtiene $\beta_1=8.34^\circ$, $\beta_2=9.61^\circ$ y $\beta_3=11.31^\circ$. Cabe recalcar que el proceso es cíclico lo único que se debe tener en cuenta son los valores de los catetos a y b para cada sub-región.

Ahora, si se tiene en mente la Figura 28 y la Figura 35 se puede verificar que el ángulo β calculado es el que, el motor deber alcanzar con respecto al arreglo ULA que parte de 0° , por lo tanto este no es el ángulo que el motor gira para llegar a cada sub-región, hay que tomar en cuenta que el motor llega a la primera sub-región y a partir de esta continúa su curso, no vuelve a cero y setea un nuevo valor, entonces el ángulo que el arreglo debe girar una vez que llegue a cada sub-región se lo conoce como γ (ver Tabla 7), y se lo calcula restando el valor con respecto a 0° que pertenece al valor

del ángulo obtenido a partir de los triángulos rectángulos del valor del ángulo en el cual se encuentre actualmente el motor.

Tabla 7
Ángulos necesarios para sub-regiones 1x1 metro

Sub-Región	Cateto a[m]	Cateto b[m]	Ángulo β [°]	Ángulo en radianes	Ángulo γ [°]
1	1,10	7,50	8,344	0,15	8,344
2	1,10	6,50	9,605	0,17	1,261
3	1,10	5,50	11,310	0,20	1,705
4	1,10	4,50	13,736	0,24	2,426
5	1,10	3,50	17,447	0,30	3,711
6	1,10	2,50	23,749	0,41	6,302
7	1,10	1,50	36,254	0,63	12,504
8	1,10	0,00	90,000	1,00	53,746
9	1,10	1,50	36,254	0,63	12,504
10	1,10	2,50	23,749	0,41	6,302
11	1,10	3,50	17,447	0,30	3,711
12	1,10	4,50	13,736	0,24	2,426
13	1,10	5,50	11,310	0,20	1,705
14	1,10	6,50	9,605	0,17	1,261
15	1,10	7,50	8,344	0,15	8,344

En la Tabla 7 se puede observar primero, que los valores de los ángulos varían ascendentemente con intervalos entre 2 y 4 grados hasta la sub-región 6 y el doble y cuádruple aproximadamente entre las sub-regiones 6-8 y segundo, para las sub-regiones 9-15 los valores se repiten pero en forma invertida a los valores de las sub-regiones 1-7, esto se debe a la forma en la que se encuentran divididas las sub-regiones dentro del campo de juego en la zona sur y a los valores que toman los catetos b, no olvidar que el campo es de 15 metros de ancho y el motor junto al arreglo de micrófonos están ubicados en la mitad de este, es por esta razón que los valores se repiten para direccionar al motor a pasos.

Pues bien en la Tabla 7 se detallan solamente valores para las primeras 15 sub-regiones, el resto de valores se puede conseguir con el proceso descrito en el Anexo 1, esto se debe a que la gran cantidad de valores abarcarían un espacio bastante grande en el presente escrito y por eso se decide anexar el resto de valores. Ahora posterior al cálculo de ángulos estos son implementados en el software Labview® para que el

programa de control del motor realice el barrido y se pueda verificar que los cálculos coincidan con la práctica.

5.3.2. Análisis de sub-regiones y ángulos

Al implementar en la práctica los ángulos antes calculados mediante el programa de control de motor a pasos desarrollado en Labview® se verifica que el valor que varía cada uno de estos es bastante pequeño, a pesar que esto es una ventaja para realizar un barrido más preciso y con el cual se captó señales sonoras que se encuentren bastante cerca, a la vez se convierte en una desventaja para el desempeño del sistema ya que con la cantidad de sub-regiones que se tiene es fácil darse cuenta que la cantidad de datos es bastante grande, por lo tanto el desempeño de la reconstrucción de atmósferas mejora, pero el desempeño en lo que se refiere a costo computacional de procesamiento empeora mientras más datos se obtenga.

La solución que se implementa es ampliar el perímetro de cada sub-región de tal forma que la captación de señales sonoras cuando se encuentren lo más cercanas no sea posible, pero sin la necesidad de realizar un barrido tan preciso como el que se muestra en la Figura 35, entonces para poder desarrollar el nuevo cálculo de sub-regiones y ángulos es importante conocer algunas otras características del juego de baloncesto, por ejemplo mediante investigaciones referentes al comportamiento de los jugadores en un campo de baloncesto se puede mencionar que cada jugador en el campo abarca aproximadamente un perímetro de 1.5 a 2m cuando se encuentra con la posesión del balón, mientras que su rival se ubica de igual manera a 2m de distancia aproximadamente para realizar una marca personal, por lo tanto si se tiene en cuenta estos dos factores se puede ampliar el perímetro sin ningún inconveniente para cada sub-región.

Entonces, la nueva distribución de sub-regiones se la realiza a partir de la primera división, es decir, la división de las 150 sub-regiones será reutilizada de tal forma que ayude a definir el nuevo perímetro de cada sub-región (ver Figuras 36 y 37), cabe recalcar que para el cálculo de los nuevos ángulos se mantiene el proceso descrito anteriormente, el cual obtiene estos a partir del cálculo de triángulos rectángulos.

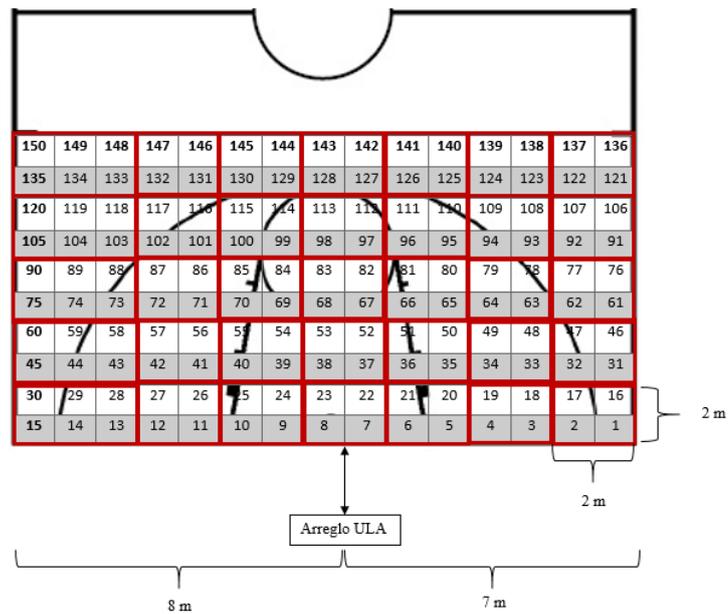


Figura 36 División de sub-regiones de 2x2 metros

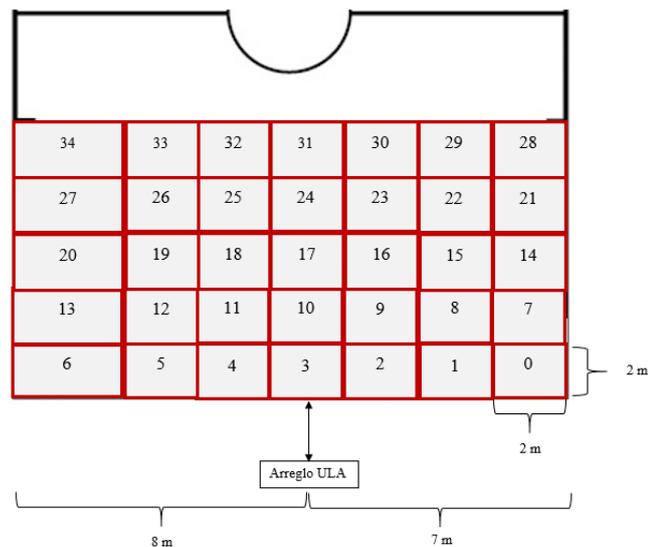


Figura 37 Enumeración de sub-regiones de 2x2

Se puede observar que la cantidad de 150 sub-regiones cambio a un total de 35 siendo este un valor aceptable, para poder realizar la reconstrucción de atmósferas sonoras y minimizar el costo computacional de procesamiento. De igual manera se observa que las sub-regiones 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135 y 150 han pasado a no ser parte de las sub-regiones con perímetro de 2x2 ya que el campo de juego no es un numero par y por ende su perímetro general no permite generar una cantidad par de sub-regiones, si se toma 1m más allá del límite del campo para completar la última sub-región de 2x2 se estaría incluyendo señales que no son parte de la reconstrucción

de atmósferas de un juego de baloncesto en el presente proyecto, ya que se estaría incluyendo público general entonces al no ser parte del análisis el ruido que genera el público en un juego de baloncesto se toma la decisión de hacer que las sub-regiones mencionadas formen parte de la última nueva sub-región calculada.

Por lo tanto, se puede mencionar que la decisión que se toma no se convierte en un inconveniente ya que aun con ese perímetro marcado para la última nueva sub-región la captación de señales sonoras no presenta problema alguno, con este análisis cabe recalcar que incluso con un perímetro de 3x3 es posible realizar la reconstrucción de atmósferas todo debido a las condiciones y características propias del juego de baloncesto, sin embargo se decide tomar solo la última sub-región de 3x3 y el resto seguirá manteniéndose en 2x2.

Ahora para el cálculo de ángulos es de suma importancia identificar hacia qué punto de las nuevas sub-regiones se debe apuntar con referencia al micrófono 1 (ver Figura 38), al establecer este punto de interés se puede conocer el valor del ángulo que debe girar el motor a pasos.

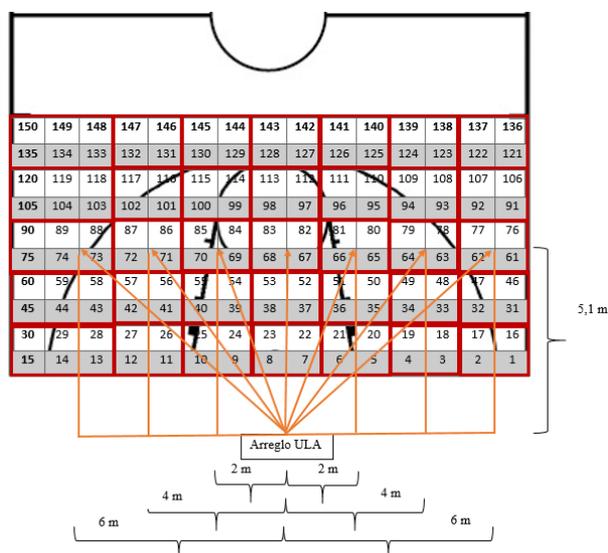


Figura 38 Cálculo de ángulos para sub-regiones de 2x2 metros

En la gráfica se puede observar que el punto de interés al cual el arreglo ULA debe apuntar con respecto al micrófono 1 se encuentra en las intersecciones de cada 4 sub-regiones formando un cuadrado, en la gráfica se toma como ejemplo las 7 primeras sub-regiones de 2x2, se recuerda que este proceso es cíclico hasta completar las 35,

sus ángulos se describen en la Tabla 8 manteniendo el mismo principio que se utilizó para el cálculo de los ángulos en sub-regiones de 1x1 metro.

Tabla 8
Ángulos calculados para sub-regiones de 2x2 metros

Sub-Región	Cateto a[m]	Cateto b[m]	Ángulo β [°]	Ángulo γ [°]
0	1,10	6,00	10,39	10,39
1	1,10	4,00	15,38	4,99
2	1,10	2,00	28,81	13,43
3	1,10	0,00	90,00	61,19
4	1,10	2,00	28,81	13,43
5	1,10	4,00	15,38	4,99
6	1,10	6,00	10,39	10,39
7	3,10	6,00	27,32	27,32
8	3,10	4,00	37,78	10,46
9	3,10	2,00	57,17	19,40
10	3,10	0,00	90,00	32,83
11	3,10	2,00	57,17	19,40
12	3,10	4,00	37,78	10,46
13	3,10	6,00	27,32	27,32
14	5,10	6,00	40,36	40,36
15	5,10	4,00	51,89	11,53
16	5,10	2,00	68,59	16,69
17	5,10	0,00	90,00	21,41
18	5,10	2,00	68,59	16,69
19	5,10	4,00	51,89	11,53
20	5,10	6,00	40,36	40,36
21	7,10	6,00	49,80	49,80
22	7,10	4,00	60,60	10,80
23	7,10	2,00	74,27	13,66
24	7,10	0,00	90,00	15,73
25	7,10	2,00	74,27	13,66
26	7,10	4,00	60,60	10,80
27	7,10	6,00	49,80	49,80
28	9,10	6,00	56,60	56,60
29	9,10	4,00	66,27	9,67
30	9,10	2,00	77,60	11,33
31	9,10	0,00	90,00	12,40
32	9,10	2,00	77,60	11,33
33	9,10	4,00	66,27	9,67
34	9,10	6,00	56,60	56,60

No está por demás recalcar que el principio de cálculo de ángulos está basado en triángulos rectángulos como ya se realizó y mencionó en el ítem anterior, con estos nuevos datos obtenidos se implementa prácticamente y los resultados son favorables, el problema en el cual se verificaba una diferencia de 2° y 3° que se obtuvo al tener sub-regiones de 1×1 , se soluciona y ahora la diferencia de ángulos una vez que el motor empieza su recorrido es considerable y favorable para obtener señales sonoras deseadas.

5.3.3. Designación de alturas

Si se tiene en cuenta que posterior al procesamiento de señales que se adquieran se realiza una reconstrucción de atmósferas sonoras tridimensionales, pues es necesario definir una cantidad de alturas con la finalidad de realizar en cada una de estas un barrido de sub-regiones y de esta manera conseguir simular un arreglo tridimensional a partir de un arreglo ULA.

Entonces, si se tiene en cuenta este factor y adicionalmente se conoce que la mayoría de jugadores de baloncesto son altos pues las alturas que se definen son: 0, 25, 50, 75, 100, 125 y 150 cm. Con estos datos se consigue simular el arreglo tridimensional como el descrito en la Figura 28, captar señales sonoras que se propagan en el espacio y graficar la expansión de la onda en el espacio cuando el balón choca contra el suelo.

5.4. Asignación de jugada de baloncesto

Si bien a lo largo del presente proyecto se ha mencionado como tema principal la reconstrucción de un juego de baloncesto en un escenario tridimensional, para lograr el objetivo principal se asigna una jugada de baloncesto (ver Figura 39) la cual empieza con el boteo del balón de baloncesto en la sub-región 31, luego se realiza un pase hacia la sub-región 20 en la cual también se realiza un boteo del balón, finalmente se lanza un pase final a la sub-región 4 en la cual se realiza el último boteo del balón antes de ser lanzado hacia el aro.

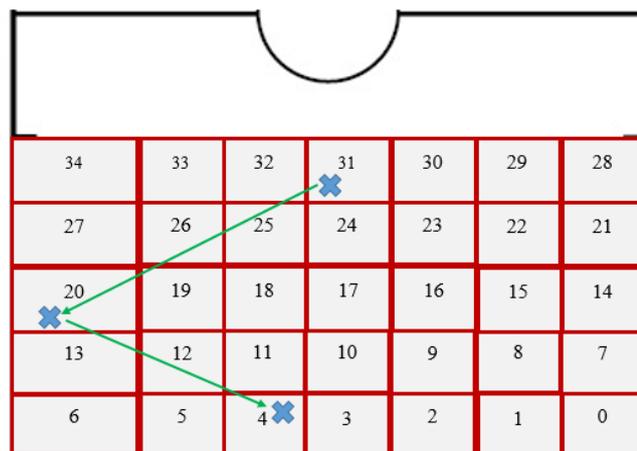


Figura 39 Jugada de baloncesto predeterminada

En la gráfica se observa mediante flechas el camino que recorre el balón antes de ser lanzado al aro tal como se mencionó anteriormente, es importante conocer que en esta jugada predeterminada y de la cual se realiza la reconstrucción de atmósferas sonoras tridimensionales solo existen señales sonoras cuando el balón es boteado contra el suelo en cada sub-región, por ello la importancia de conocer las características principales de una señal sonora en el espacio obtenida a partir del boteo de un balón de baloncesto y es lo que se desarrolla y verifica en el siguiente ítem.

5.5. Obtención frecuencia fundamental bote del balón

Una vez que se conocen los parámetros de división del campo de juego y en los cuales se definen las señales sonoras a ser analizadas con la jugada especificada, es imprescindible conocer la frecuencia fundamental que pertenece al boteo de un balón de baloncesto, ya que esta es la única señal de interés y la cual va a estar presente en diferentes sub-regiones. Para determinar esta frecuencia se graba una señal de bote del balón mediante uno de los micrófonos MEMS ADMP504 durante 3 segundos a una frecuencia de muestreo (F_s) igual a 8000 Hz, posterior a este proceso se grafica la señal captada (ver Figura 40).

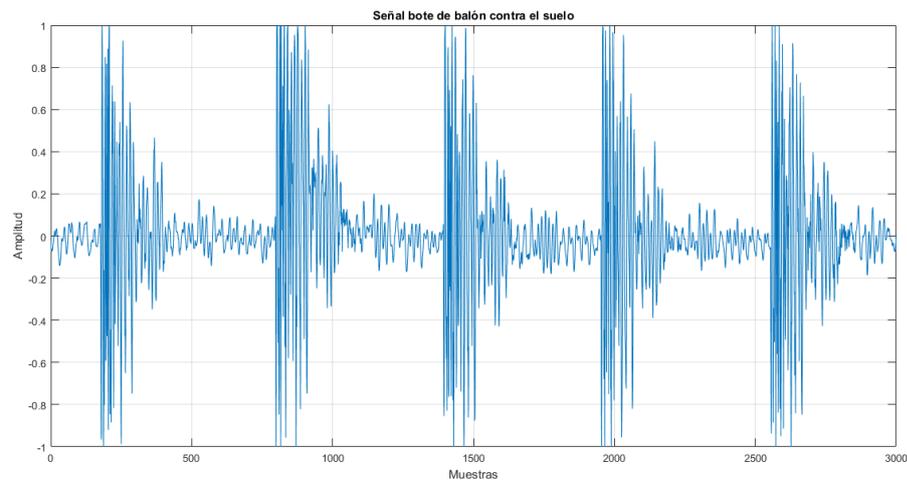


Figura 40 Señal boteo del balón con $F_s=8000$ Hz

En la gráfica se observa una señal en función del tiempo que pertenece al sonido que provoca el choque de un balón de baloncesto con el piso, esta señal es procesada mediante la FFT (*Fast Fourier Transform*) y la obtención de potencia de densidad espectral para determinar su frecuencia fundamental, los resultados se observan en las Figuras 41 y 42, hay que tomar en cuenta que el valor que se determina es un valor de frecuencia digital y se tendrá que hacer la conversión para determinar la frecuencia fundamental analógica.

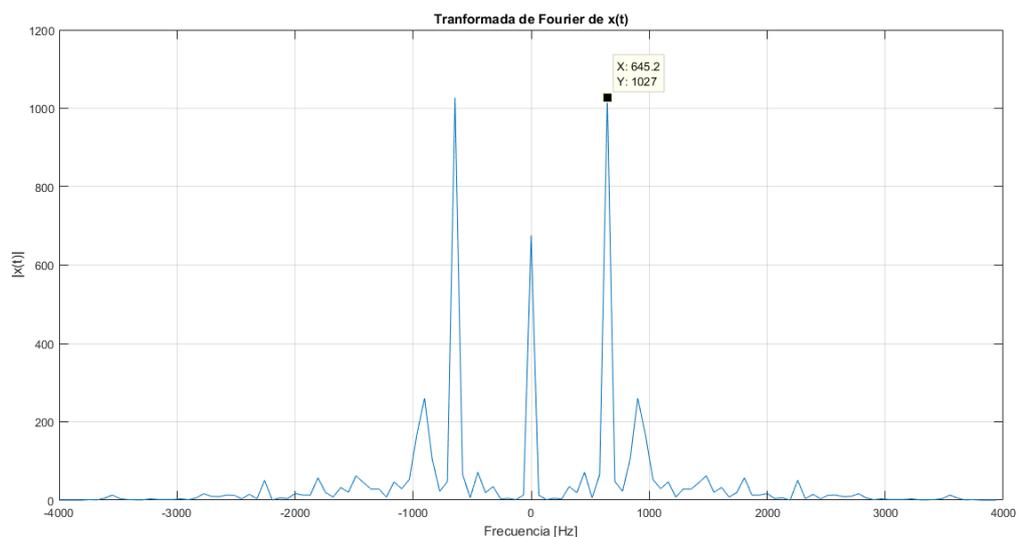


Figura 41 Frecuencia fundamental boteo de balón mediante FFT

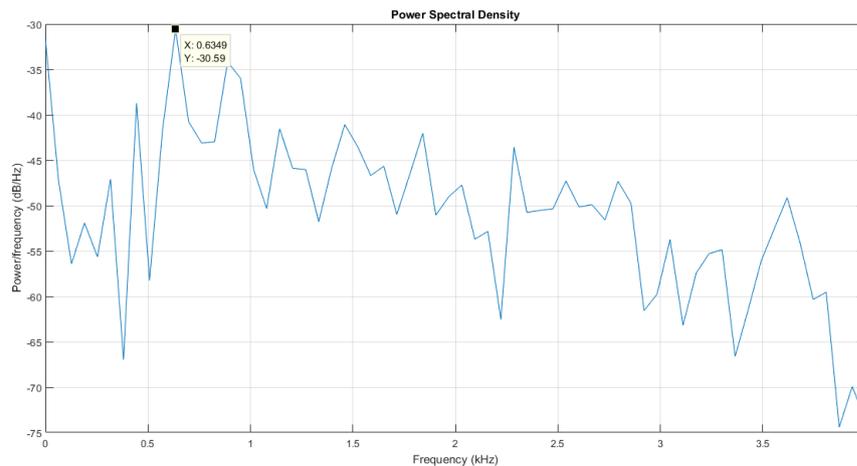


Figura 42 Frecuencia fundamental mediante densidad espectral boteo de balón

El valor que se obtiene a partir de la Figura 41 es de 645,2 Hz pero no se tiene que olvidar que es un valor digital, por lo tanto si se está muestreando a 8000 Hz entonces, este tiene que ser dividido entre 2 para poder conocer su valor analógico, es decir, una vez que se realiza la división el valor que pertenece a la frecuencia fundamental del boteo del balón es de 322,6 Hz.

Sin embargo antes de concluir que en realidad la frecuencia es la mencionada es necesario comprobar el valor obtenido mediante una distribución de potencias o energías de la señal sobre las distintas frecuencias de las cuales se encuentra formada nuestra señal, para ello se adquiere y gráfica la densidad espectral de la señal (ver Figura 42) consiguiendo un valor de 634,9 Hz en digital y 317,45 Hz analógica, entonces al comparar los dos valores se puede alcanzar un valor promedio el mismo que es de 320,025 Hz determinando a este como el valor de la frecuencia fundamental del boteo del balón.

5.6. Obtención y análisis de señales sonoras

Es importante aclarar que para la obtención de señales sonoras se plantea 2 parámetros principales, el primero, es la $F_s = 8000$ Hz que equivale a un periodo de muestreo (T_s) igual 125 microsegundos y con la cual se obtiene 125954 muestras para cada uno de los micrófonos y el segundo, es un tiempo máximo de 3 segundos para obtención de señales en cada sub-región.

Se puede mencionar que se obtienen 4 señales generales para cada micrófono con valores entre -1 y 1 en el eje de las ordenadas y valores entre 1 y 125954 en el eje de las abscisas que equivalen al número de muestras obtenidos a partir del T_s , para los 21 segundos de un barrido de 7 sub-regiones, es decir, el tener 35 sub-regiones divididas en bloques de 7 me permiten obtener 5 señales de barrido de sub-regiones, si a este lo multiplicamos por el número de micrófonos que son 4 se tiene un total de 20 señales sonoras y si finalmente multiplicamos este valor para la cantidad de alturas que varían entre 0cm y 150cm se obtiene un total de 140 señales para escenario vacío y 140 para el escenario en el cual se implementa la jugada predeterminada.

El número de señales aun sin estar divididas en sub-regiones es de 280, cantidad bastante grande para poder visualizarlas en el presente proyecto, entonces lo que se realiza es colocar solamente las gráficas más importantes que ayudan para realizar un análisis específico de lo que está sucediendo en el sistema, sin embargo todas las gráficas y tablas con sus respectivos valores tomados por muestra se los puede ver al cumplir el proceso explicado en el Anexo 1. De esta forma se ayuda a entender de mejor manera el análisis del desempeño de la reconstrucción de atmósferas sonoras tridimensionales.

5.6.1. Señales en escenario vacío

La obtención de señales en escenario vacío serán de ayuda para conocer la acústica en la cual se encuentra el campo de baloncesto, es decir, los niveles de ruido que existe cuando ninguna fuente de interés se encuentra en el campo y el ruido que provoca el motor a pasos al girar para apuntar y girar al arreglo ULA de una sub-región a otra.

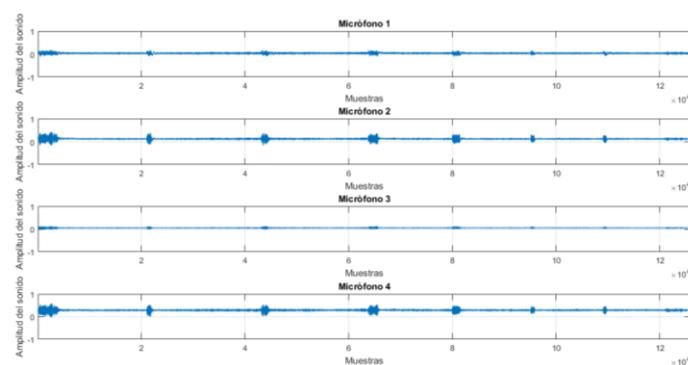


Figura 43 Señales obtenidas por arreglo ULA en escenario vacío $h=0\text{cm}$

En la Figura 43 se puede observar una única señal en función que se encuentra en función de cada una de las muestras tomadas a una $F_s = 8000\text{Hz}$, si bien se habría dividido el campo en 35 sub-regiones como es que solo aparece una señal, esto se debe a que el programa desarrollado en el *software* Labview[®] realiza una sola adquisición de datos la misma que dura 21 segundos, si se toma en cuenta los parámetros mencionados anteriormente pues se recordará que el tiempo máximo para adquirir señales en cada sub-región es de 3 segundos, si a este tiempo se lo multiplica por 7 sub-regiones se obtiene un tiempo de 21 segundos.

Ahora hay que tomar en cuenta que el escenario se encuentra vacío por lo tanto el barrido que se realiza para las primeras 7 sub-regiones será la misma para las otras y a diferentes alturas, sin embargo esto se puede comprobar en las Figuras 44 y 45, ya que en estas se indican las señales captadas por cada micrófono y tomadas a alturas $h=25\text{cm}$ y $h=100\text{cm}$.

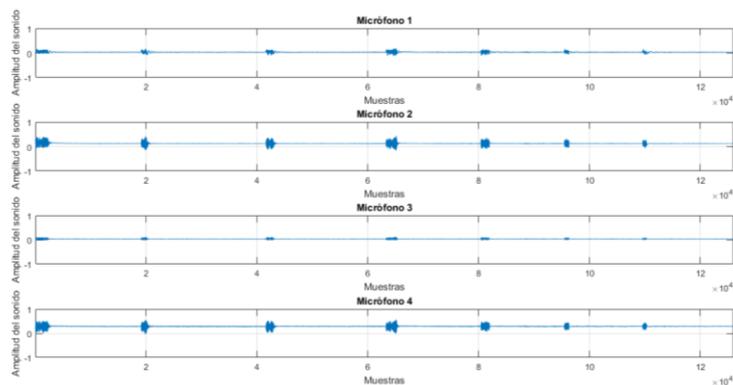


Figura 44 Señales obtenidas por arreglo ULA en escenario vacío $h=25\text{cm}$

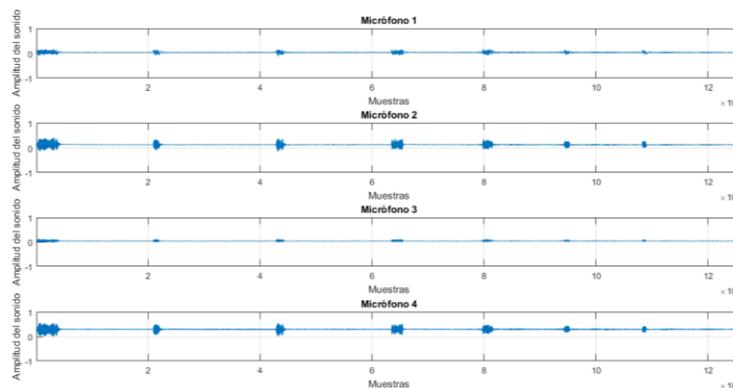


Figura 45 Señales obtenidas por arreglo ULA en escenario vacío $h=100\text{cm}$

Luego de observar y comparar las gráficas se comprueba que los niveles de ruido tanto de la acústica del escenario y el provocado por el motor tienen valores aproximadamente iguales en sus diferentes alturas. Es por ello la importancia de comparar las gráficas en escenario vacío, ya que cuando llegue el momento de minimizar ruido este pueda realizarse reusando código en los programas que se desarrollan en Matlab® para procesamiento de señales, de igual manera no está por demás recalcar que estos datos mediante sus gráficas permiten conocer el momento exacto en el cual el motor cambia de una sub-región a otra, ayudando de esta forma a identificar cada una de las sub-regiones.

5.6.2. Señales con jugada predeterminada

Al conocer que la jugada predeterminada abarca las sub-regiones 4, 20 y 31 se decide tomar los datos del barrido realizado desde la sub-región 14 a la 20, es decir, a partir de ahora en el presente ítem se analizan 7 señales las mismas que corresponden al barrido mencionado pero graficado en base a todas las alturas designadas, esta decisión se toma ya que el análisis de las señales mencionadas permitirán identificar en que sub-región se encuentra desarrollando el boteo del balón en un tiempo determinado obviamente que esto depende directamente de los valores de amplitud de sonido que cada una de estas señales indiquen.

Es importante mencionar que la jugada comienza una vez que inicia a funcionar el sistema de adquisición de datos, es decir, el boteo del balón inicia en la sub-región 31, pero el primer pase se realiza una vez que el arreglo ULA llega a posicionarse a 90° con respecto de su primera posición, el segundo pase ocurre luego de recibir el primer pase y botear el balón por 3 segundos, el boteo final antes de encestar el balón se lo realiza una vez recibido el balón de la sub-región 20 y haber boteado el balón un par de veces.

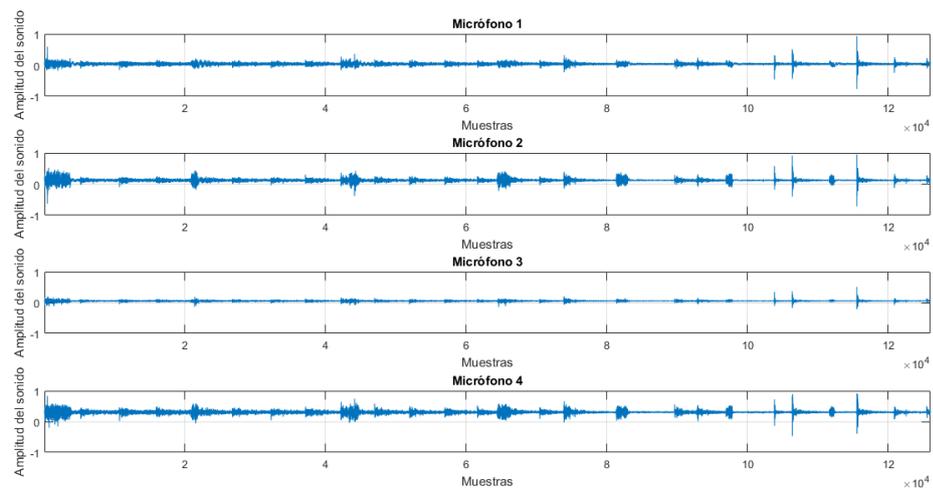


Figura 46 Señales obtenidas por arreglo ULA en escenario con jugada $h=0\text{cm}$

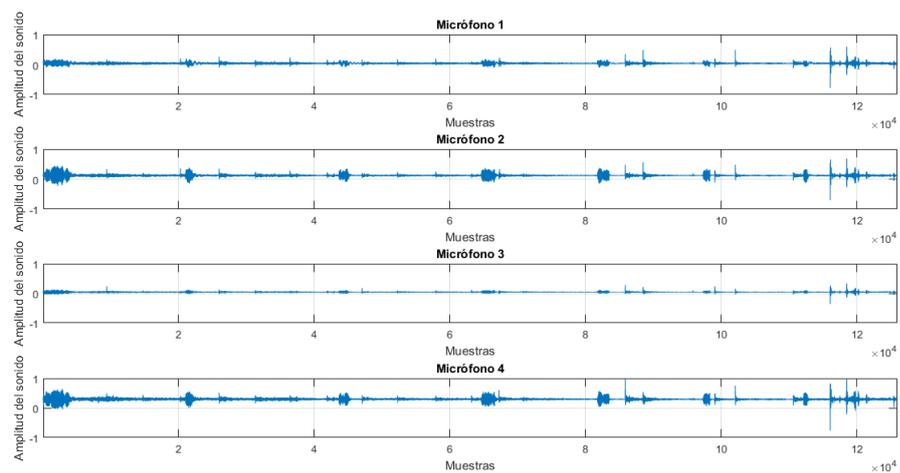


Figura 47 Señales obtenidas por arreglo ULA en escenario con jugada $h=25\text{cm}$

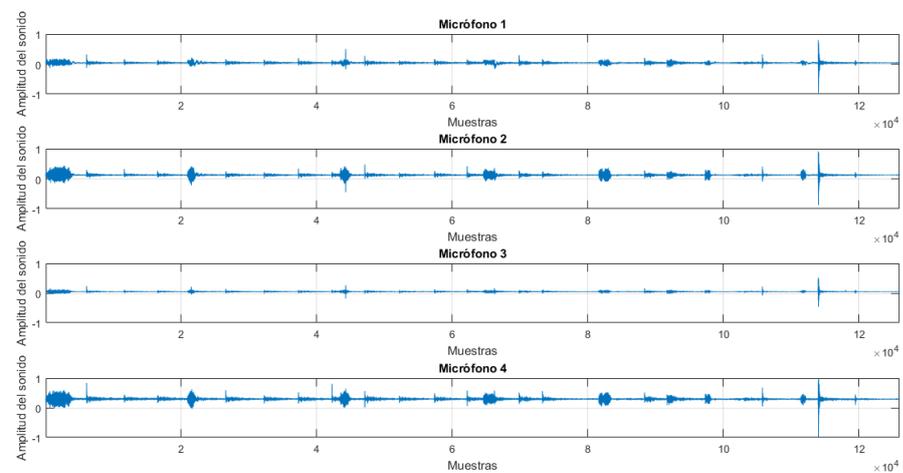


Figura 48 Señales obtenidas por arreglo ULA en escenario con jugada $h=50\text{cm}$

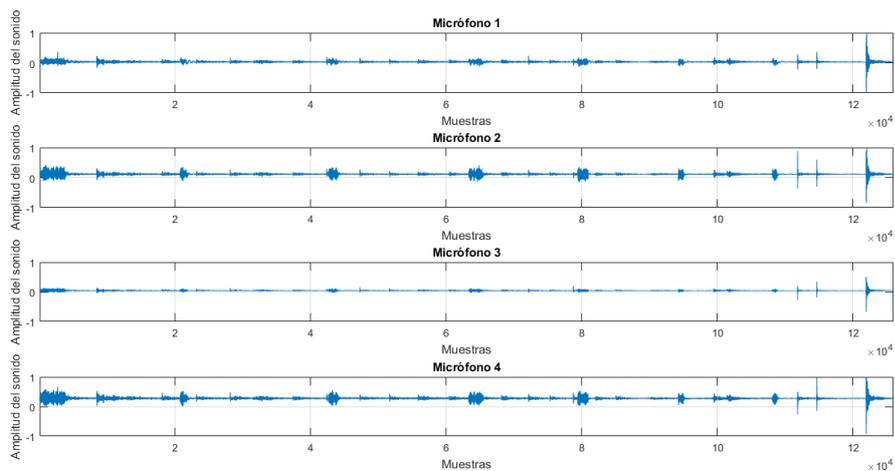


Figura 49 Señales obtenidas por arreglo ULA en escenario con jugada $h=75\text{cm}$

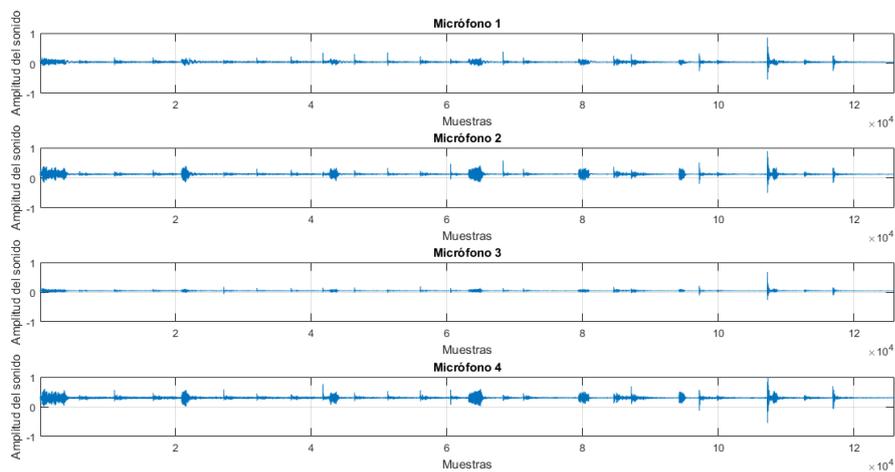


Figura 50 Señales obtenidas por arreglo ULA en escenario con jugada $h=100\text{cm}$

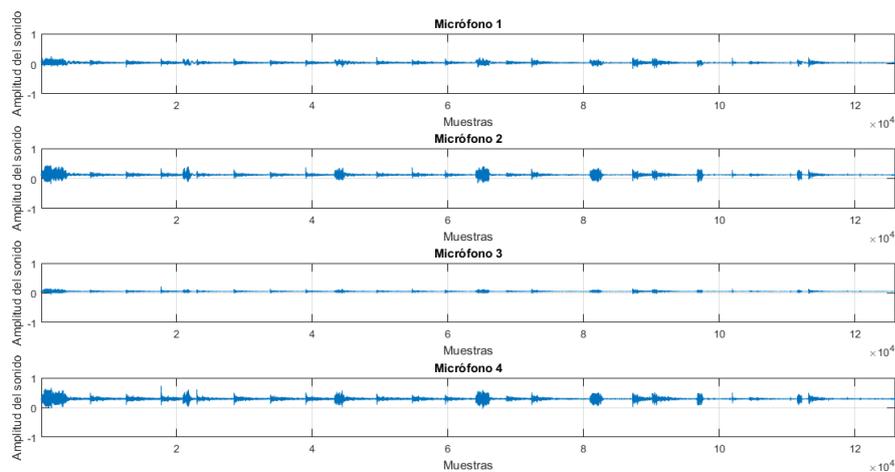


Figura 51 Señales obtenidas por arreglo ULA en escenario con jugada $h=125\text{cm}$

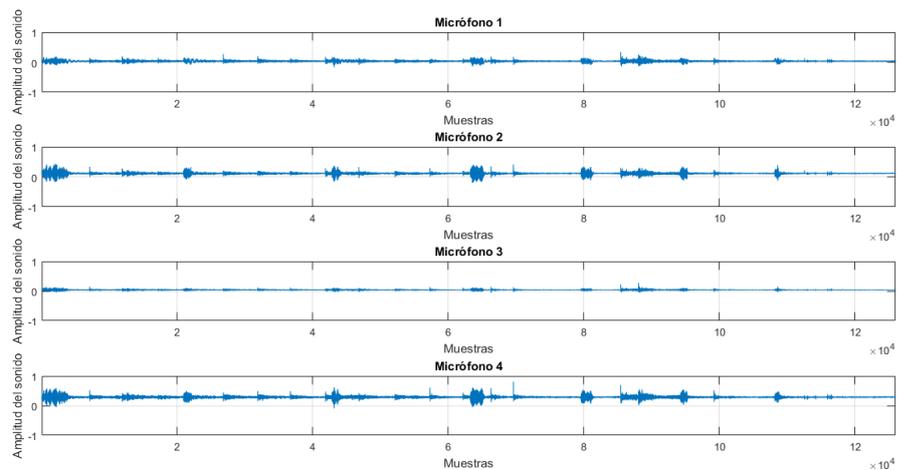


Figura 52 Señales obtenidas por arreglo ULA en escenario con jugada $h=150\text{cm}$

Como se observa en las Figuras 46-52 la importancia de la amplitud del sonido es el pilar fundamental para poder determinar factores como: nivel de energía de la señal de interés, ubicación de la señal sonora, distancia a la que se encuentra la señal y comportamiento de la jugada en todas las sub-regiones. Las señales tomadas a diferentes alturas también aportan con un gran análisis el más importante es aquel que indica hasta que altura la señal sonora ubicada en el espacio es capaz de propagarse una vez que el balón choca contra el suelo, para determinar cada una de las características mencionadas es necesario realizar una división de estas señales adquiridas en sub-regiones, procesarlas y al final analizar el comportamiento de las mismas.

Si se realiza una breve comparación del comportamiento de las señales captadas por cada micrófono a diferentes alturas se puede rápidamente mencionar que a medida que la altura sube, el sonido que provoca el boteo del balón se va perdiendo pero se van incrementando en amplitud señales producidos por factores externos (por ejemplo el sonido provocado por el choque del balón con la palma de la mano al recibir un pase), por lo tanto el análisis una vez que se realiza el procesamiento y se analiza el comportamiento general del sistema será de suma importancia para poder determinar varias conclusiones de lo que ocurre al aumentar la altura del sistema de adquisición de datos.

De igual manera se puede notar que los botes en cada sub-región no ocurren en la misma muestra esto se debe a la sincronización de la jugada, hay que tomar en cuenta que el barrido de sub-regiones es automático pero la toma de datos en diferentes alturas no lo es, por lo tanto lo que se realiza para la toma de datos es simular la jugada predeterminada para cada toma de datos a diferentes alturas, sin embargo por mas sincronización que se tiene al desarrollar la jugada esta no coincide, a la final este no es un inconveniente ya que se realiza un pre-procesamiento de señales y en esta se trata la señal de forma que los picos más altos que indican el boteo de balón coincidan en una muestra determinada y el resto de la señal sea tomada como ruido, este proceso se lo detalla más adelante. Los valores de datos obtenidos en cada señal se detallan luego de cumplir con el proceso detallado en el Anexo 1 ya que cada señal tiene una longitud de 125954 valores que equivalen a las muestras obtenidas por cada micrófono.

5.7. Obtención de señales en sub-regiones

Para la obtención de señales en cada sub-región es necesario tomar en cuenta el análisis realizado al comparar las Figuras 43-45 el cual indica un escenario en el cual se verifica el ruido propio del escenario y el ruido que provoca el motor al cambiar de una dirección a otra para captar señales de interés, entonces si se conoce el momento exacto en el cual el motor comienza y termina de girar para cambiar de sub-región mediante el ruido que provoca el mismo pues se puede determinar la sub-región en la cual se encuentra, este concepto ayuda a la división tanto en escenario vacío y en el cual se desarrolla la jugada predeterminada.

La división de señales se es realizada mediante un programa en Matlab[®] el cual permite identificar el ruido que provoca el motor y de esta manera dividir a la señal general obtenida en un total de 7 sub-regiones, los datos obtenidos para cada sub-región se detallan más adelante y posterior se realiza el análisis de señales en sub-regiones para poder suprimirlas y de esta forma evitar una carga computacional al desarrollar el procesamiento de las mismas.

5.7.1. Escenario vacío

Los datos que se muestran a continuación son obtenidos a partir de la señal situada a 0cm, el resto de señales captadas a diferentes alturas tendrán el mismo concepto y ya que sus valores reflejados en sus gráficas poseen valores aproximadamente iguales como ya se mencionó y verificó en las Figuras 43-45 se decide tomar los valores solamente de la señal a 0cm para el presente escrito, sin embargo y como ya se recalcó varias veces los valores obtenidos y gráficas para cada sub-región a diferentes alturas se detallan luego de cumplir con el proceso descrito en el Anexo 1.

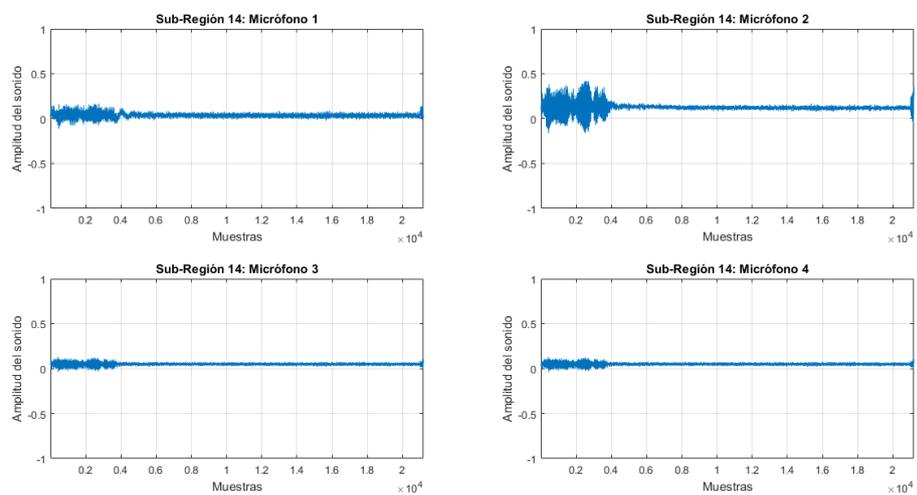


Figura 53 Señal obtenida en Sub-región 14 con el arreglo ULA a 0cm en escenario vacío

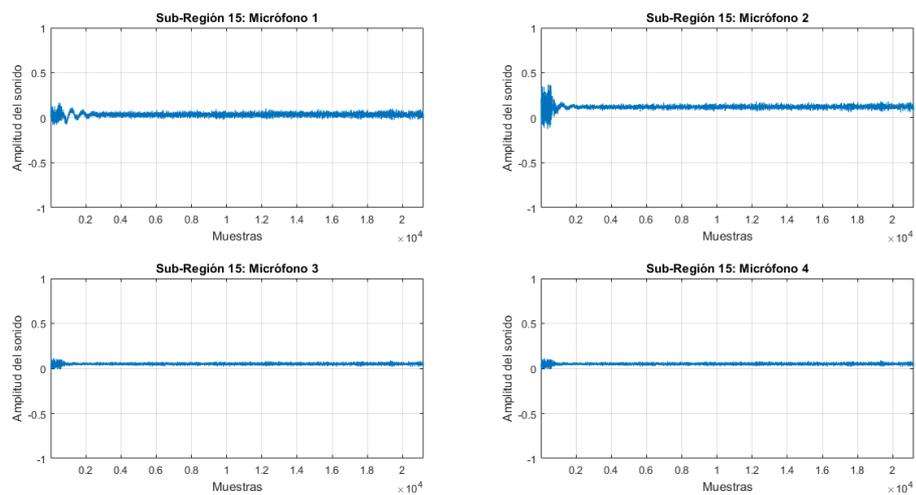


Figura 54 Señal obtenida en Sub-región 15 con el arreglo ULA a 0cm en escenario vacío

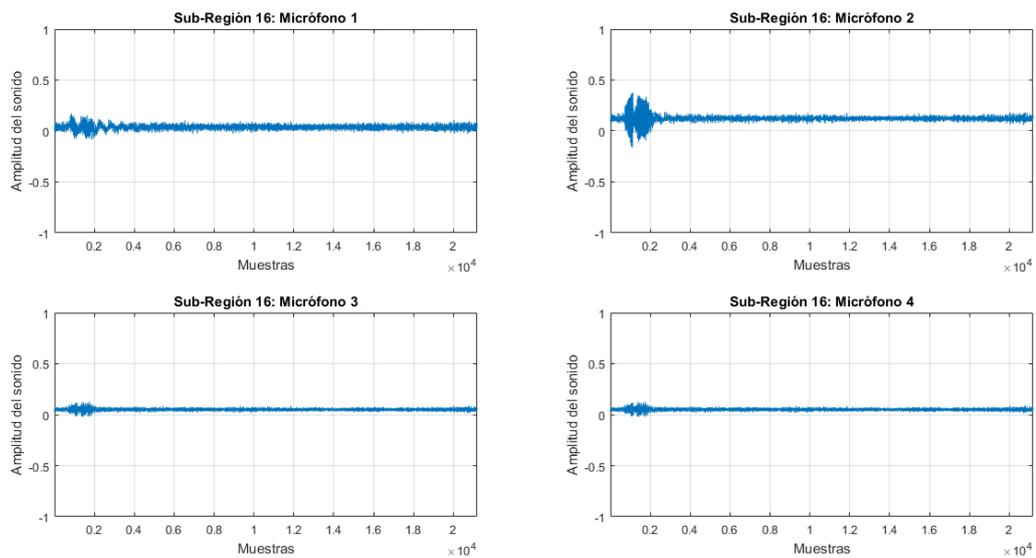


Figura 55 Señal obtenida en Sub-región 16 con el arreglo ULA a 0cm en escenario vacío

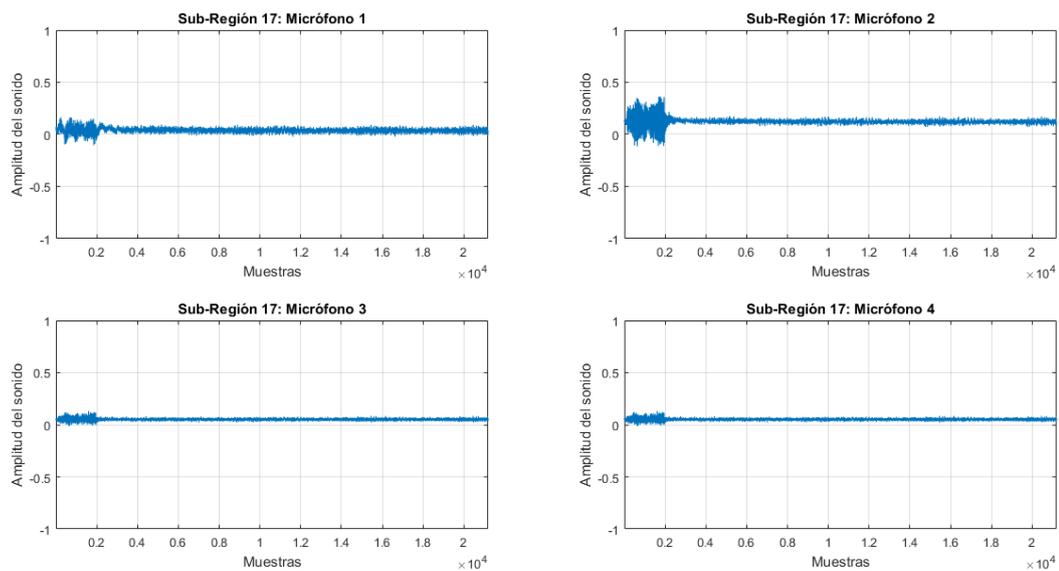


Figura 56 Señal obtenida en Sub-región 17 con el arreglo ULA a 0cm en escenario vacío

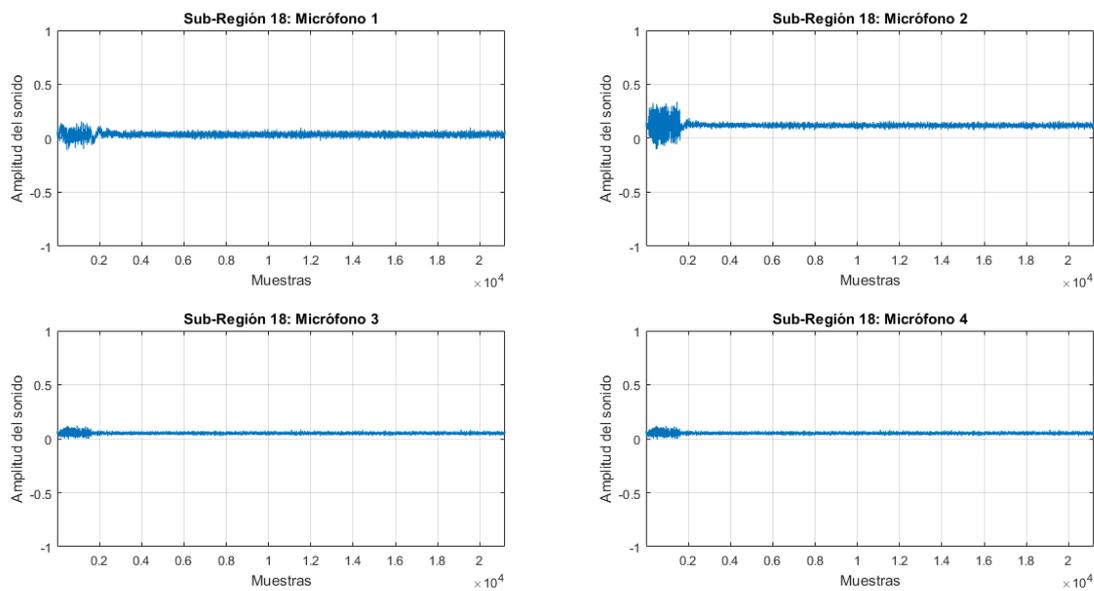


Figura 57 Señal obtenida en Sub-región 18 con el arreglo ULA a 0cm en escenario vacío

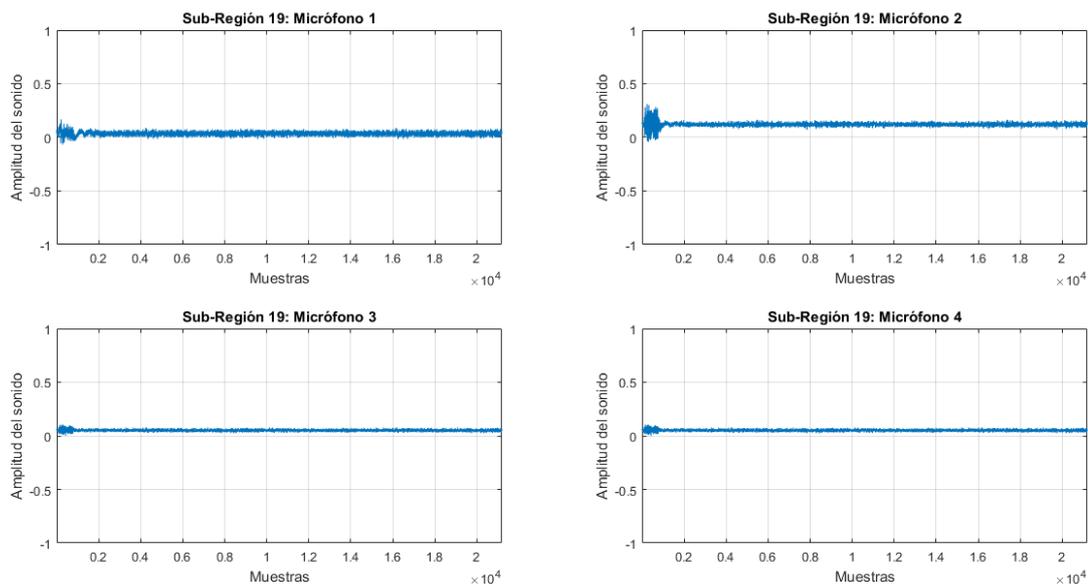


Figura 58 Señal obtenida en Sub-región 19 con el arreglo ULA a 0cm en escenario vacío

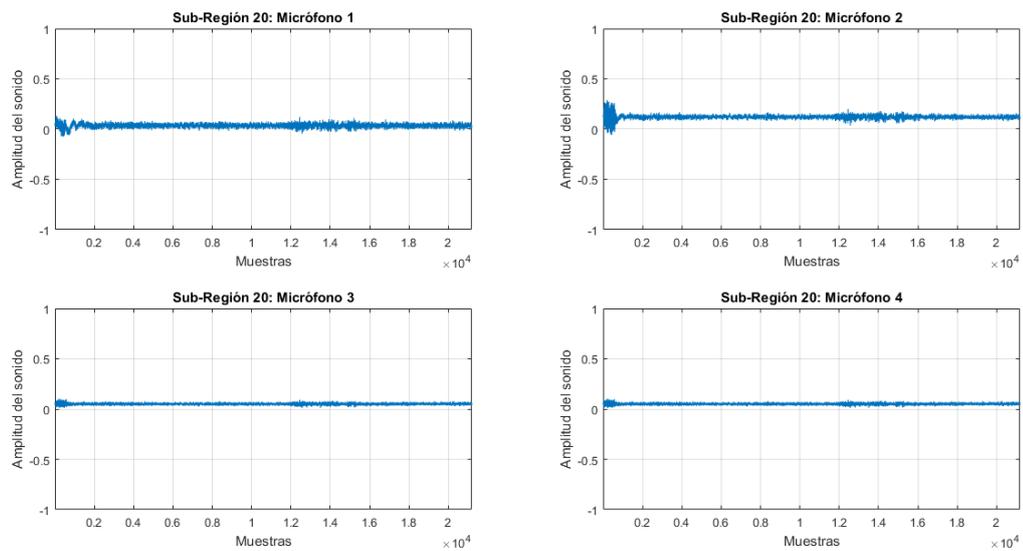


Figura 59 Señal obtenida en Sub-región 20 con el arreglo ULA a 0cm en escenario vacío

Al comparar las gráficas mostradas se puede verificar el ruido que provoca el motor al momento de cambiar su dirección y su valor de amplitud que más adelante con el procesamiento de señales que se realiza se puede minimizar considerablemente, es importante dar a conocer que los valores de cada sub-región cuando el escenario esta sin señales de interés son utilizados para establecer una matriz de puntos al momento de realizar la reconstrucción de atmósferas sonoras tridimensionales.

5.7.2. Jugada predeterminada

Con la ayuda de gráficas en escenario vacío es posible dividir las señales 46-52 en sub-regiones, el proceso que se realiza para determinar estas señales de interés comienza al sobreponer la gráfica obtenida en escenario vacío en las señales 46-52 y, de esta manera identificar el momento del cambio de sub-región y poder obtener una división satisfactoria, los datos alcanzados tomando como ejemplo la señal situada a 0cm (ver Figura 46) se muestran en la figuras 60-66, este proceso es cíclico hasta terminar con la señal que capta datos a una altura de 150cm, los datos obtenidos para cada una de ellos se muestran luego de cumplir con el proceso definido en el Anexo 1.

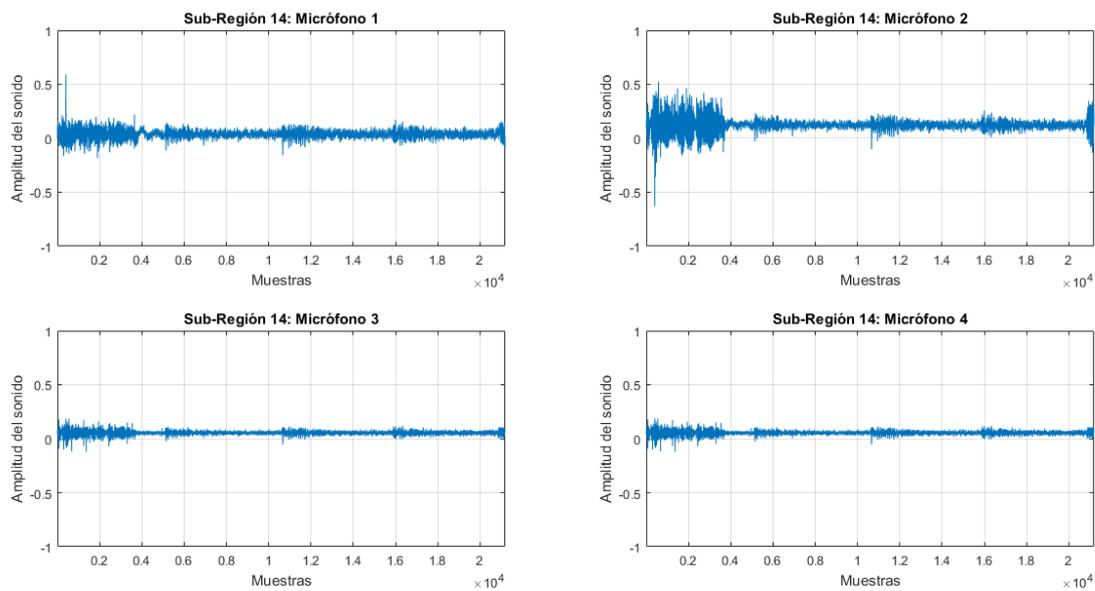


Figura 60 Señal obtenida en Sub-región 14 con el arreglo ULA a 0cm en escenario con jugada predeterminada

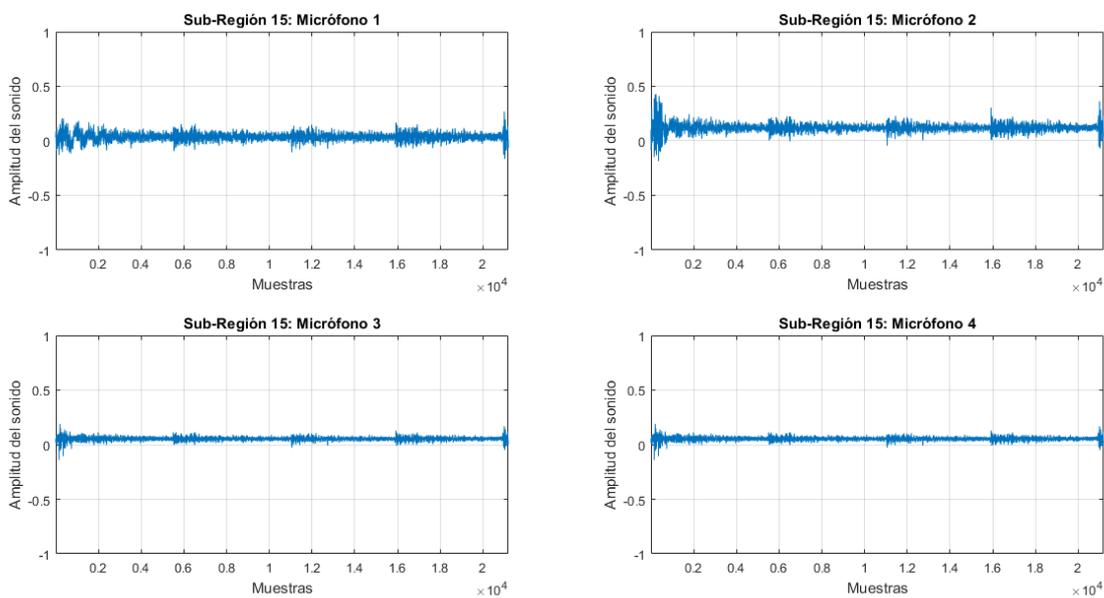


Figura 61 Señal obtenida en Sub-región 15 con el arreglo ULA a 0cm en escenario con jugada predeterminada

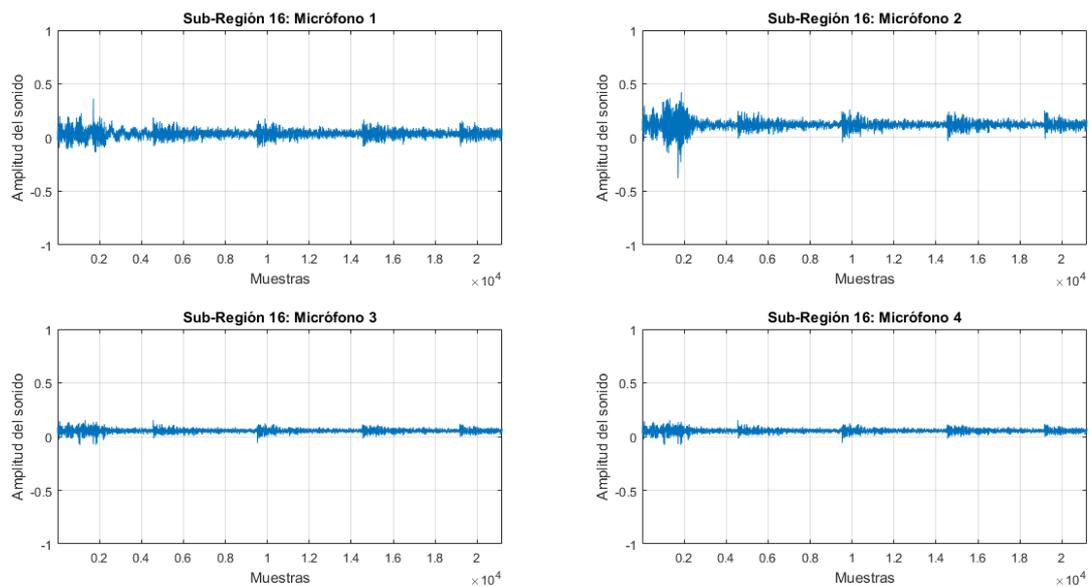


Figura 62 Señal obtenida en Sub-región 16 con el arreglo ULA a 0cm en escenario con jugada predeterminada

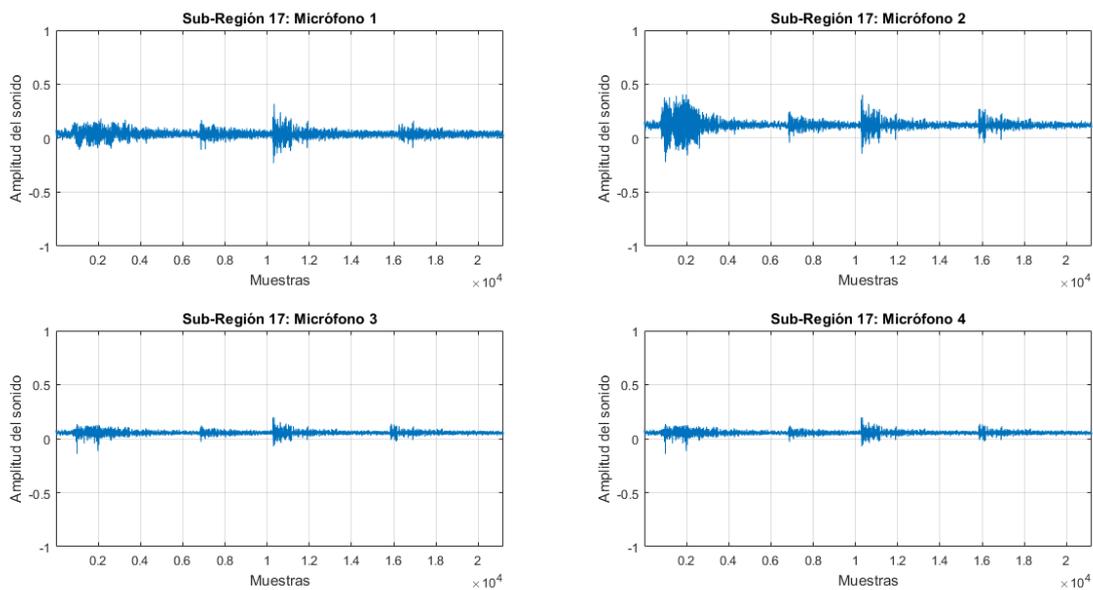


Figura 63 Señal obtenida en Sub-región 17 con el arreglo ULA a 0cm en escenario con jugada predeterminada

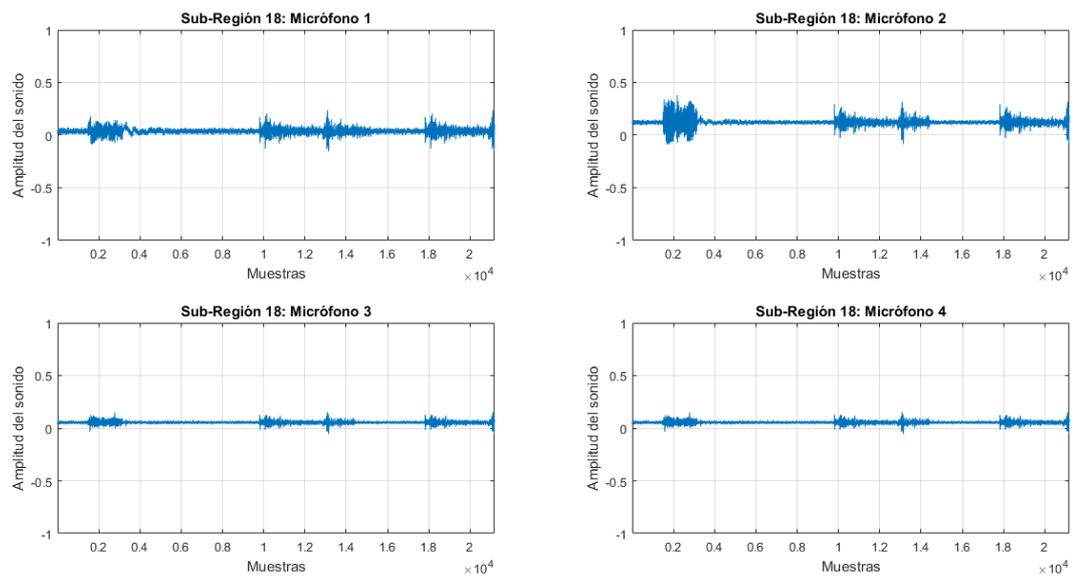


Figura 64 Señal obtenida en Sub-región 18 con el arreglo ULA a 0cm en escenario con jugada predeterminada

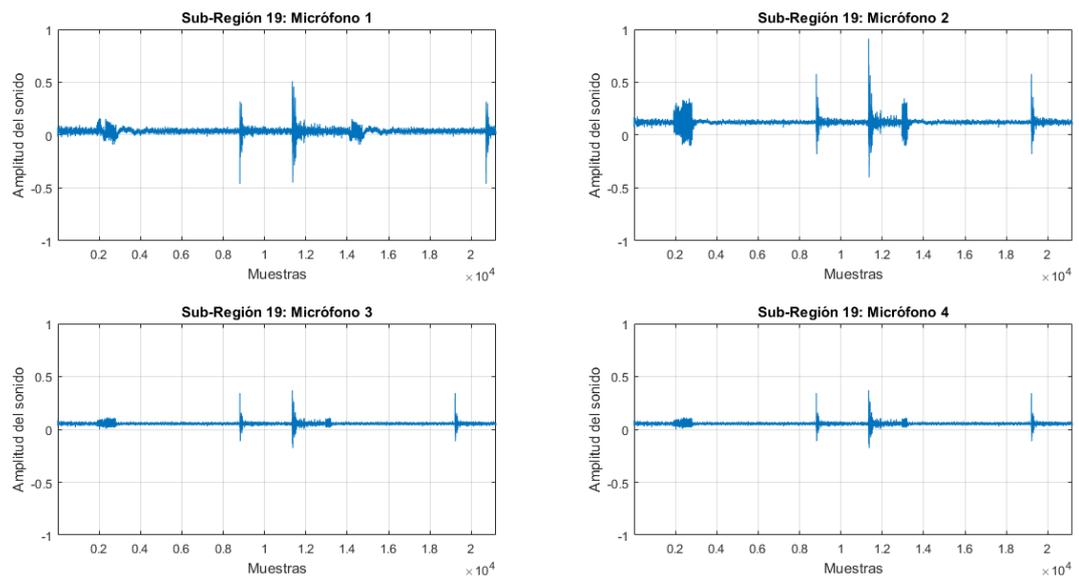


Figura 65 Señal obtenida en Sub-región 19 con el arreglo ULA a 0cm en escenario con jugada predeterminada

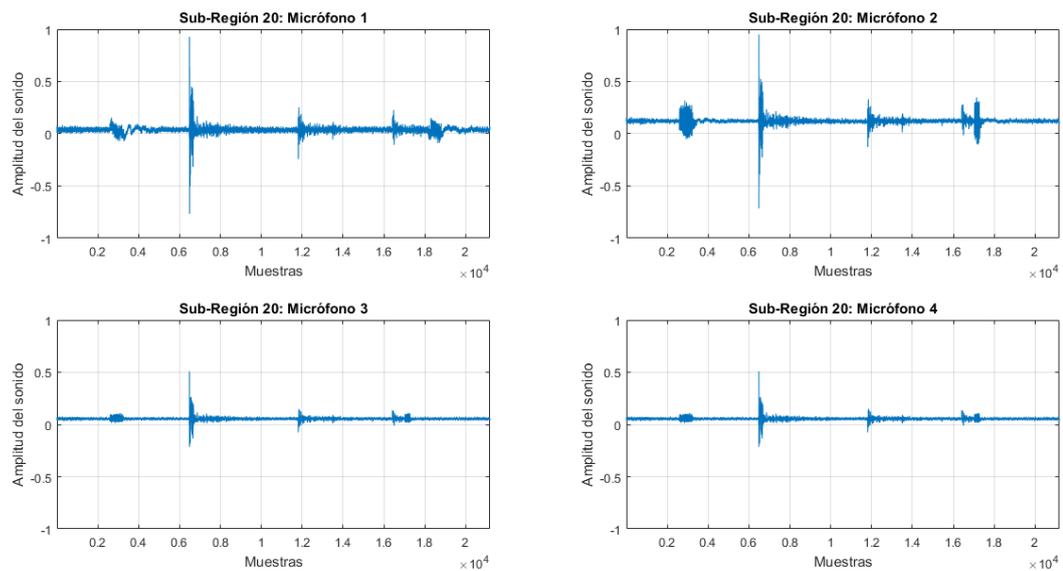


Figura 66 Señal obtenida en Sub-región 20 con el arreglo ULA a 0cm en escenario con jugada predeterminada

Un vez que se consigue la división de señales en sub-regiones es posible realizar el procesamiento respectivo y de esta forma obtener señales que ayuden a la reconstrucción de atmósferas sonoras tridimensionales.

5.8. Procesamiento de señales

5.8.1. Identificación y cálculo de la media

Si bien se conoce a la media como aquel valor promedio que una señal posee, para el procesamiento de las señales obtenidas este valor es sumamente importante ya que mediante este se puede hacer que las señales de interés tomadas a diferentes alturas puedan de una u otra manera estandarizarse, es decir, la señal puede ser graficada a partir del valor 0 en amplitud permitiendo de esta forma no observarse ningún tipo de desfase en amplitud, es por ello que la identificación y cálculo de la media se convierten en el primer parámetro importante del procesamiento de señales.

Este valor es calculado con ayuda de la función del cálculo de la media de Matlab[®], quizás al observar las Figuras 53-66 no se pueda notar un valor de desfase en amplitud pero esto se debe a la forma en que se encuentran representadas las gráficas, sin embargo si se selecciona aleatoriamente y de alguna forma se ilustra una de las sub-

regiones por ejemplo la numero 15 que pertenece a la altura de 50 cm dejando que el programa lo haga automáticamente (ver Figura 67) es notable observar que la gráfica presenta un valor de media, valor que si no es calculado y suprimido hace que la reconstrucción de atmósferas en 3 dimensiones puede causar picos que confundan ruido con señal de interés, los valores de media que se calculan para cada una de las señales se describen en las Tablas 9 y 10.

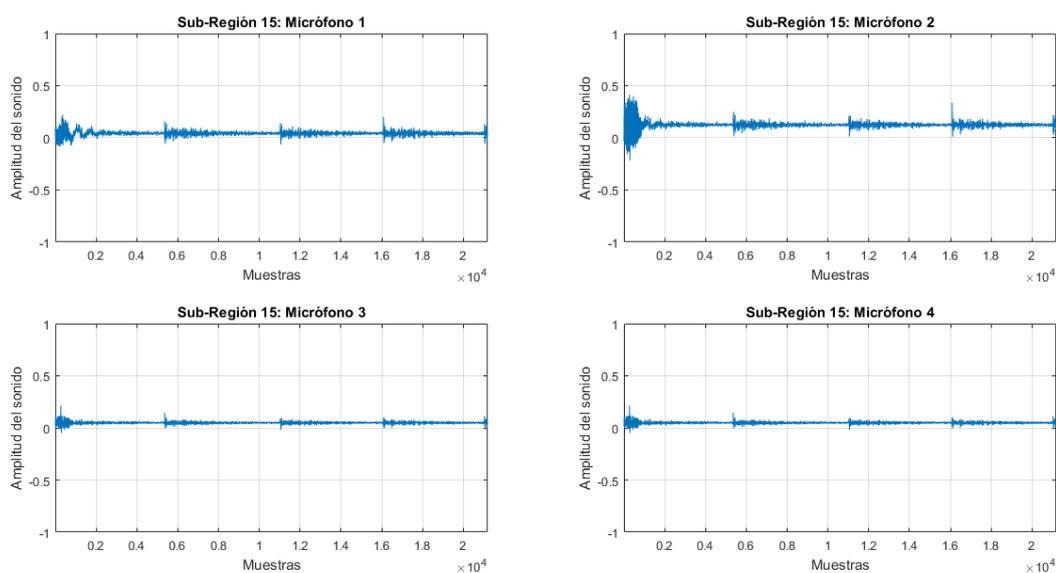


Figura 67 Señal obtenida en Sub-región 15 con el arreglo ULA a 50cm en escenario con jugada predeterminada

Tabla 9

Valores de media escenario vacío $h=50\text{cm}$

Sub-Región	Mic 1	Mic 2	Mic 3	Mic 4
14	0,0370	0,1289	0,0496	0,3020
15	0,0358	0,1214	0,0490	0,2994
16	0,0359	0,1212	0,0490	0,3006
17	0,0375	0,1233	0,0491	0,3027
18	0,0369	0,1223	0,0492	0,3001
19	0,0353	0,1202	0,0494	0,2990
20	0,0359	0,1211	0,0493	0,2983

Tabla 10
Valores de media escenario con jugada h=50cm

Sub-Región	Mic 1	Mic 2	Mic 3	Mic 4
14	0,0417	0,1273	0,0495	0,2959
15	0,0433	0,1249	0,0494	0,2959
16	0,0428	0,1246	0,0492	0,2962
17	0,0398	0,1241	0,0495	0,2956
18	0,0412	0,1247	0,0493	0,2941
19	0,0403	0,1244	0,0491	0,2917
20	0,0407	0,1250	0,0492	0,2909

Bien, una vez que se conoce los valores de media que posee cada señal en cada una de las sub-regiones para el ejemplo de la sub-región 15 y al no ser este un valor que se aproxime a 0,0001; es necesario realizar alguna operación que permita suprimir los valores calculados y de esta forma llegar al valor aproximado que se necesita para trabajar en la reconstrucción de atmósferas con las señales deseadas, por lo tanto la operación que se necesita realizar se describe en el siguiente ítem. Los valores obtenidos de media para cada micrófono en cada sub-región se visualizan luego de cumplir con el proceso descrito en el Anexo 1.

5.8.2. Resta de señal con la media

Uno de los procedimientos más comunes en el procesamiento de señales es el restar la señal obtenida a partir de un sistema de adquisición de datos con la media de esa señal, esto se realiza con la finalidad de eliminar por completo la media y obtener señales en las cuales su valor de amplitud parte de 0 y no obtener desfases de amplitud que complican el desempeño del sistema, por lo tanto, en este caso al tener los valores de medias se realiza la operación mencionada y se obtiene la Figura 68.

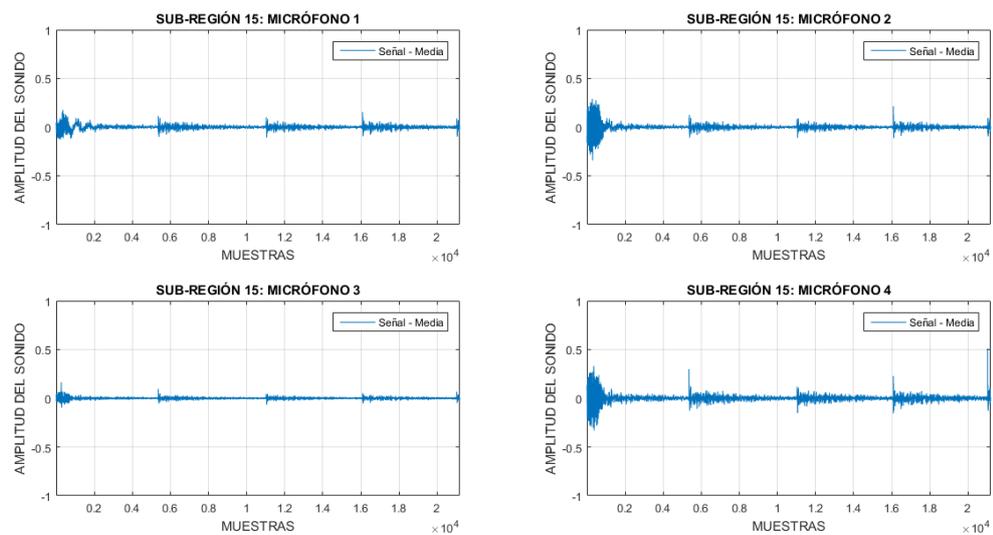


Figura 68 Resta de señal con media en Sub-región 15 a 50cm en escenario con jugada predeterminedada

En la gráfica se observa que una vez realizada la operación la señal muestra su comportamiento sin tener desfase alguno en amplitud, por lo tanto se realiza el proceso para todas las sub-regiones de cada una de las señales tomadas a diferentes alturas y sus resultados se pueden comprobar luego de cumplir con el proceso descrito en el Anexo 1.

5.8.3. Eliminación de ruido de señales

La resta de señales con su respectiva media permiten que se proceda a la eliminación de ruido, procedimiento de suma importancia para determinar en las señales los picos en amplitud que se producen al captar el sistema de adquisición un bote de balón, si bien se conoce a través de la jugada predeterminedada las sub-regiones que son de más importancia y en las cuales el sistema detecta claramente un bote de balón, no se desprestigia los valores que son captados por el resto de sub-regiones ya que su análisis permitió determinar que en principio existe un bote de balón pero que al no coincidir el arreglo ULA con la posición en la que se encuentra la jugada no son señales de interés.

Entonces, a partir de las Figuras 46-52 se puede mencionar que las sub-regiones en las cuales se pondrá énfasis y en las cuales no se suprime el ruido por completo son la 17, 18 y 20, es decir, en las sub-regiones 14, 15, 16, y 19 se procede a minimizar el

ruido de tal forma que los valores de sus picos más altos en estos, no alteren la reconstrucción de la jugada determinada cabe recalcar que en el presente proyecto se analizan las señales sonoras que produce el bote del balón contra el suelo, es por ello que se decide eliminar el ruido de las sub-regiones con señales que en amplitud no indiquen un valor que permita identificar el bote del balón.

Ahora, se plantea una forma sencilla de eliminar ruido, esta se basa en usar una app propia de Matlab® (MathWorks, 2015). La cual mediante selección de niveles elimina frecuencias que no interesan para la reconstrucción de señales finales, la eliminación de ruido mediante esta app propia de Matlab® es usada en las sub-regiones en escenario vacío obteniéndose como resultado la eliminación casi completa de ruido (ver Figura 69) producido por la acústica del escenario y el ruido de los motores.

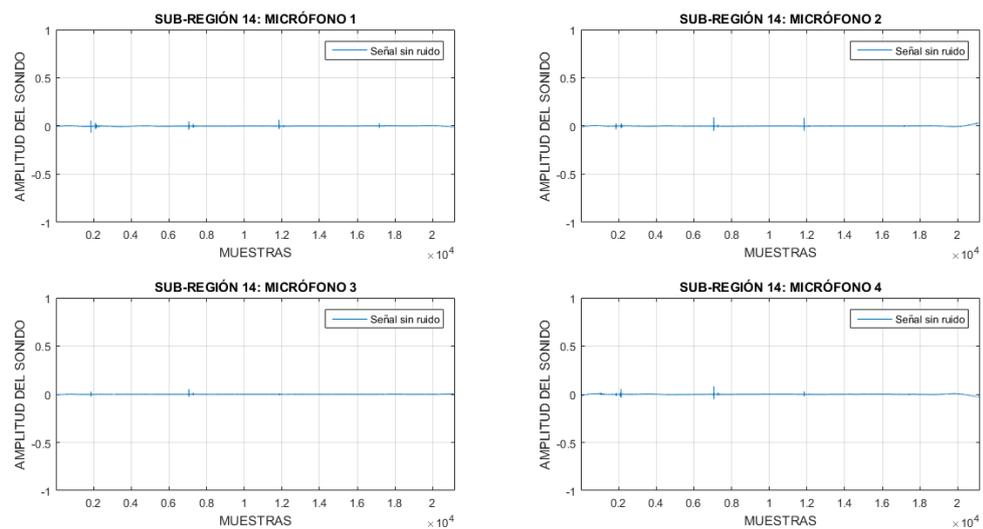


Figura 69 Eliminación de ruido con app *Wavelet Design & Analysis* en sub-región 14 escenario vacío $h=0\text{cm}$

En la gráfica se puede observar la comparación de las señales una antes de eliminar ruido y la otra una vez que la app elimina el ruido producido por el motor y la acústica del lugar en la cual se realiza la toma de datos, las señales una vez que el ruido ha sido suprimido se verifican luego de cumplir con el proceso descrito en el Anexo 1.

Si bien se consigue eliminar casi por completo el ruido de cada sub-región en escenario vacío, ahora el problema se centra en eliminar ruido que provoca el motor y la acústica del lugar sin alterar los picos con valores más altos que indican el bote del

balón, no olvidar que el utilizar la app con 10 niveles provocan que exista pérdida de información que en escenario vacío no es de importancia pero en el escenario en el cual se identifica los botes de balón si es de suma importancia, por lo tanto el usar la app en las sub-regiones 17, 18 y 20 provocan que los picos con valores en amplitud más altos sean afectados minimizando su valor, obviamente el minimizar los valores producen que la reconstrucción de atmósferas en el espacio se vea afectada.

La solución que se plantea una vez realizado el análisis mencionado en el párrafo anterior para no perder información consiste en identificar los picos que indican que existe un bote de balón en las sub-regiones 17, 18 y 20 para de esta manera estos valores mantenerlos y el resto reemplazarlos con valores obtenidos a partir de la eliminación de ruido con la app de Matlab[®]. De esta manera la información captada cuando un bote de balón contra el piso se produce no es alterada y los valores que son identificados como ruido se minimizan hasta el punto de ser aproximadamente 0. Se toma como ejemplo las sub-regiones 3, 4 y 6 para realizar el proceso que se menciona y los resultados se visualizan en las siguientes figuras.

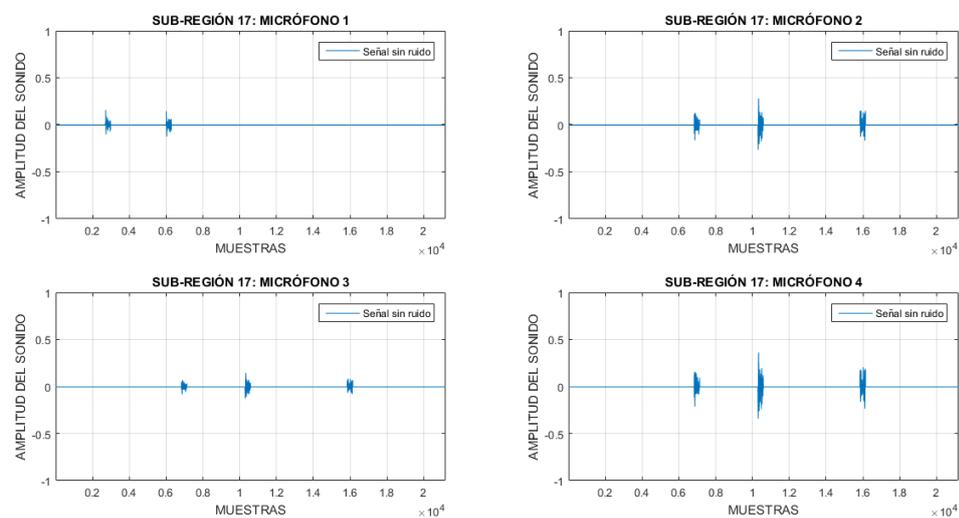


Figura 70 Señal minimizada ruido para sub-región 17 con $h=0\text{cm}$

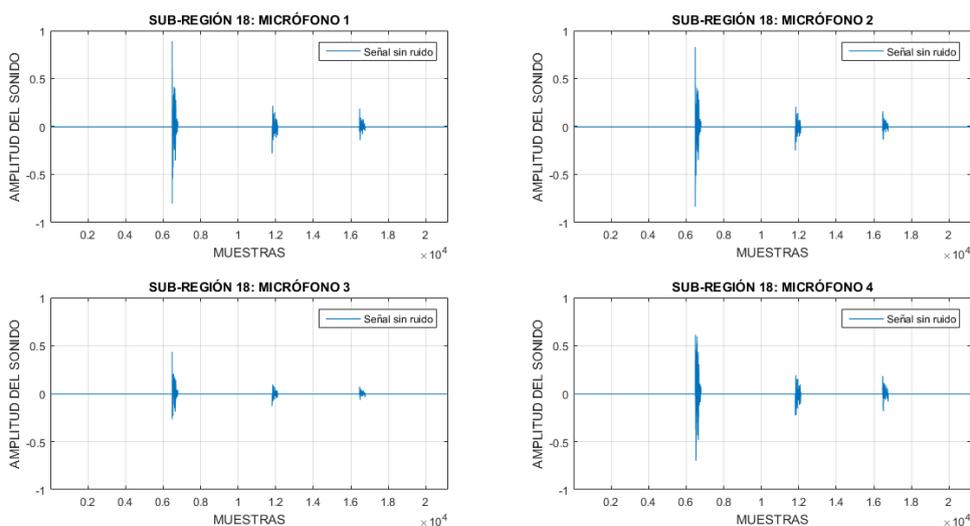


Figura 71 Señal minimizada ruido para sub-región 18 con h=0cm

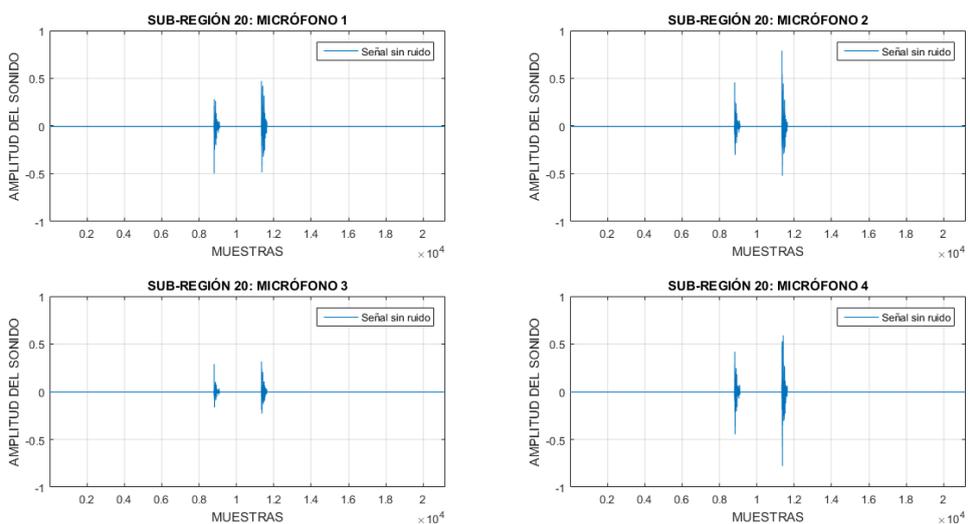


Figura 72 Señal minimizada ruido para sub-región 20 con h=0cm

Si se compara las gráficas obtenidas con las visualizadas en las Figuras 63, 64 y 66 se puede analizar que la resta de la media complementada con la minimización de ruido permiten tener una señal más puras y en la cual se puede notar claramente el pico que se produce una vez que el balón choca contra el suelo, sin embargo la pregunta que vale realizarse es: ¿Por qué las sub-regiones 14, 15, 16 y 19 no son tomadas en cuenta?

La respuesta a esta incógnita es que no son tomadas en cuenta estas sub-regiones ya que la jugada predeterminada identifica los lugares en los cuales se está

produciendo un bote del balón, y esta ayudó a que minimicemos el ruido y señales con información que no son analizadas en el presente proyecto de investigación, es por ello que para los siguientes ítems solo se toma en cuenta las sub-regiones 17, 18 y 20.

Es importante mencionar que hasta el momento todas las gráficas presentadas aparecen señales captadas por el arreglo ULA, es decir, señales que captan los 4 micrófonos, si se compara cada una de estas gráficas se puede mencionar que los micrófonos 1 y 4 son los que mejor captan la señal, sin embargo en base al valor del pico del bote del balón que se analiza se decide trabajar con el micrófono 1 que es el que mejor desempeño presenta para captar las señales de las sub-regiones mencionadas.

Los resultados que se obtienen para cada una de las alturas y los valores que cada muestra tiene se encuentran descritos luego de cumplir con el proceso detallado en el Anexo 1, finalmente resta por decir que el análisis que se realiza en este momento es para las sub-regiones mencionadas, el desempeño en general del sistema con señales que no son analizadas en el presente proyecto son analizadas antes de finalizar el presente capítulo.

5.8.4. Suma de señales

Si bien los datos obtenidos una vez realizado la resta de señal con la media y la minimización de niveles de ruido no han sido presentados, para el presente análisis lo que primero se realiza es presentar las gráficas de las sub-regiones 17, 18 y 20 a diferentes alturas (ver Figuras 73-79) para conocer el procesamiento final que se realiza y de esta manera obtener las gráficas en 3 dimensiones.

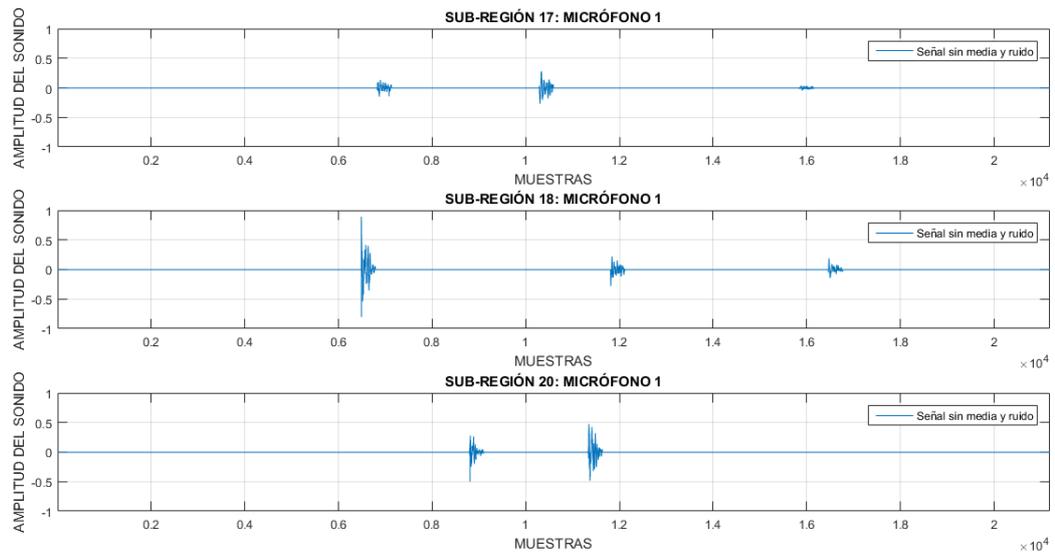


Figura 73 Señal sin media y minimizada ruido para sub-regiones 17, 18 y 20 con $h=0$ cm

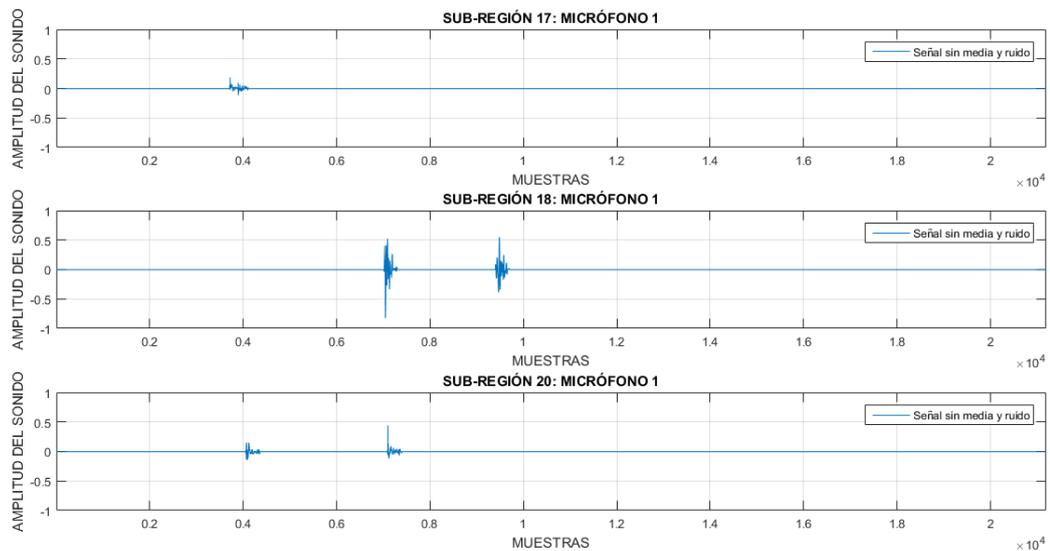


Figura 74 Señal sin media y minimizada ruido para sub-regiones 17, 18 y 20 con $h=25$ cm

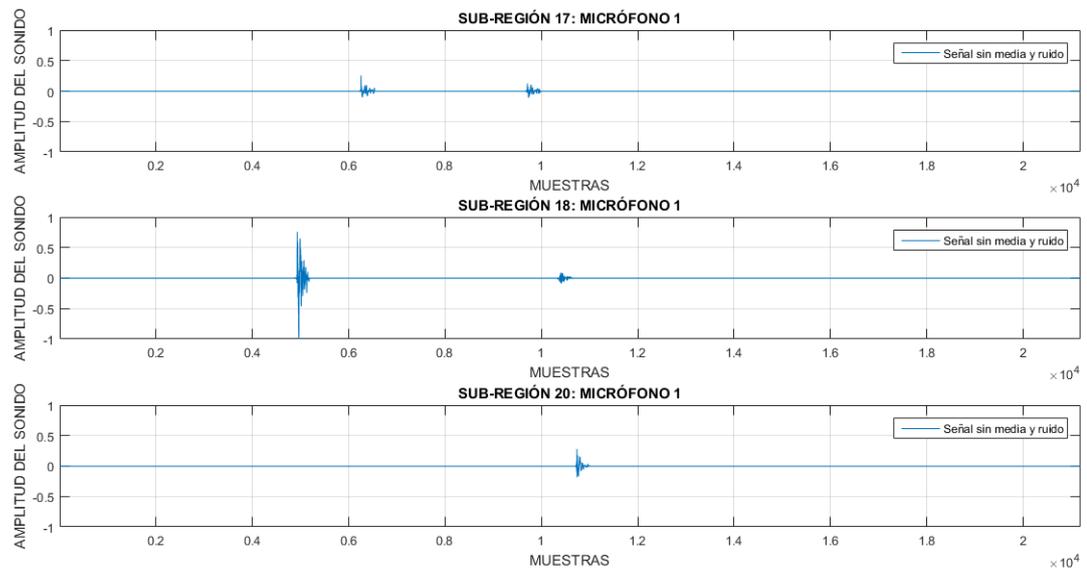


Figura 75 Señal sin media y minimizada ruido para sub-regiones 17, 18 y 20 con $h=50\text{cm}$

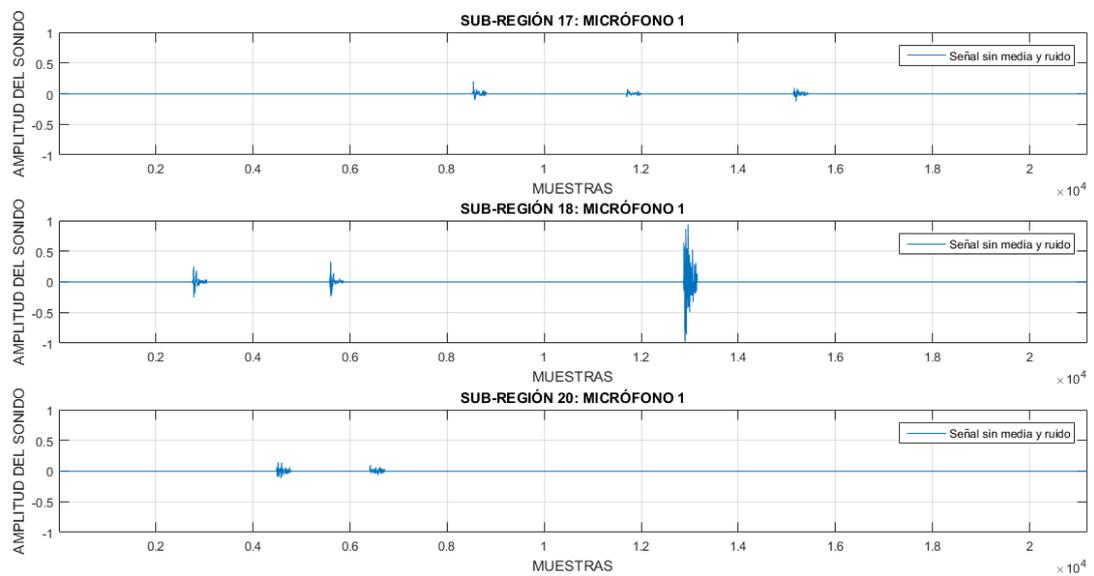


Figura 76 Señal sin media y minimizada ruido para sub-regiones 17, 18 y 20 con $h=75\text{cm}$

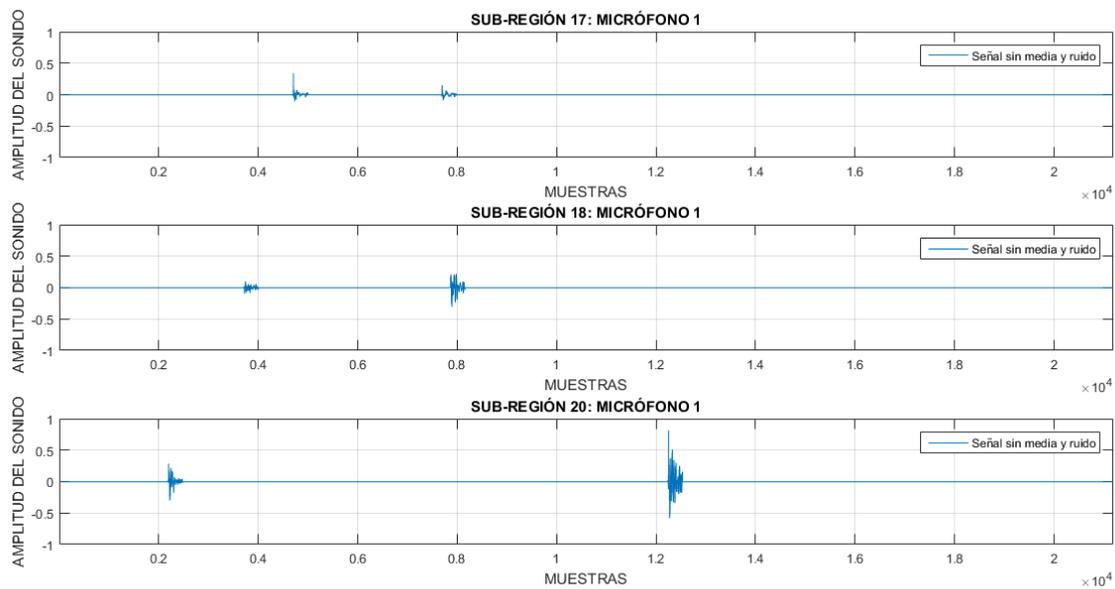


Figura 77 Señal sin media y minimizada ruido para sub-regiones 17, 18 y 20 con $h=100\text{cm}$

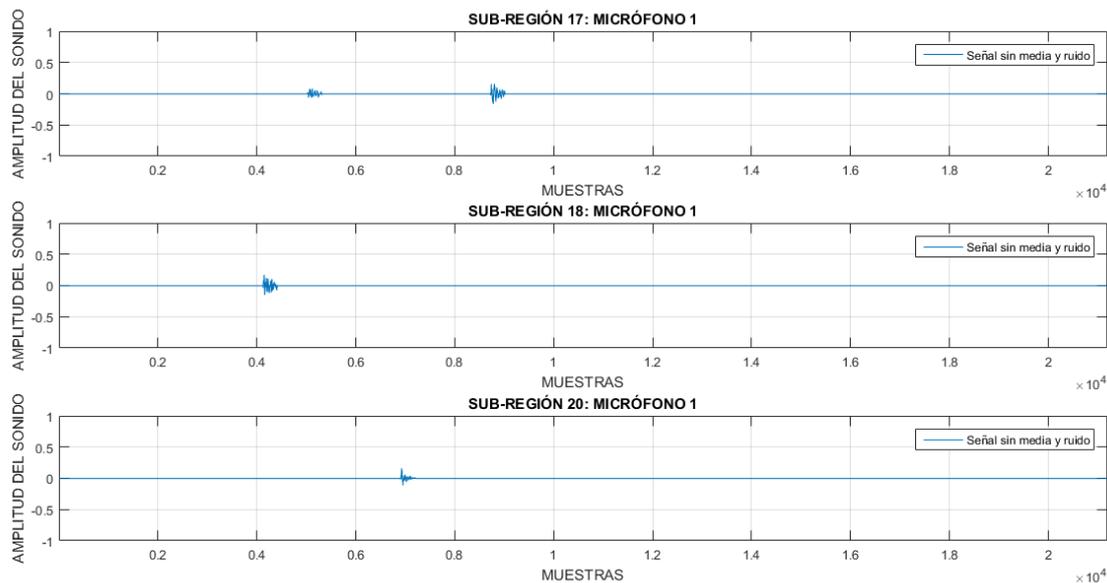


Figura 78 Señal sin media y minimizada ruido para sub-regiones 17, 18 y 20 con $h=125\text{cm}$

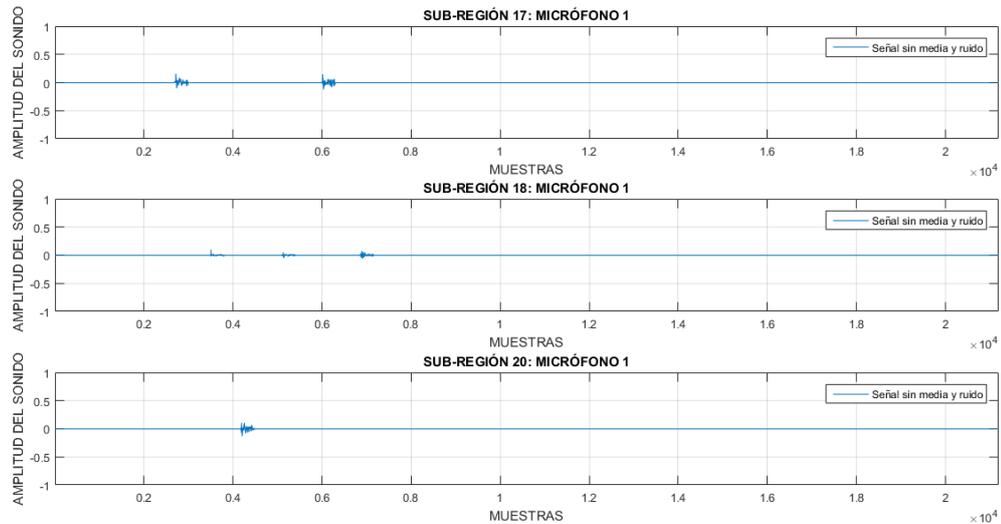


Figura 79 Señal sin media y minimizada ruido para sub-regiones 17, 18 y 20 con $h=150\text{cm}$

En cada una de las gráficas se puede observar los picos producidos por el bote del balón y como mientras la altura aumenta esta señal se minimiza, por lo tanto al tener estas señales y conocer que la señal del bote se atenúa mientras mayor es la altura se puede realizar una suma de señales, el fin de esta suma es, primero, simular y cumplir con uno de los objetivos el cual es desarrollar un arreglo tridimensional a partir de un arreglo ULA y segundo, establecer una señal que permita comprobar que mientras la altura a la cual se encuentra el arreglo ULA aumenta la señal del bote se atenúa de tal forma que llega una altura en la cual la señal del bote desaparece por completo.

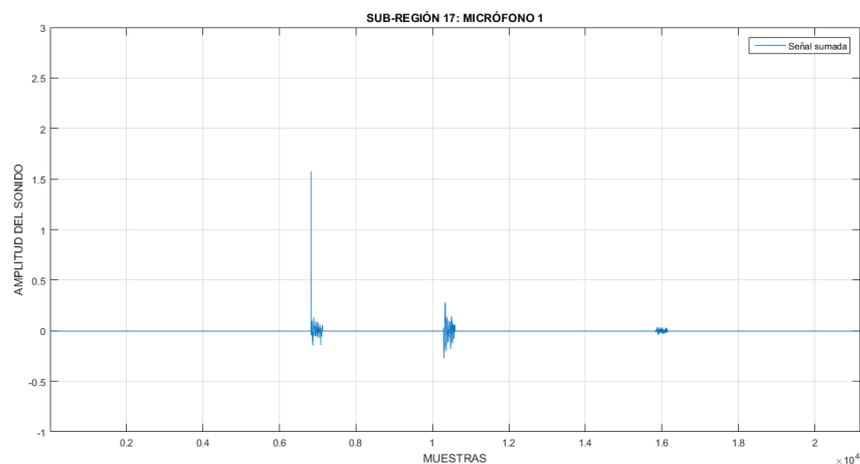


Figura 80 Señal total para sub-región 17

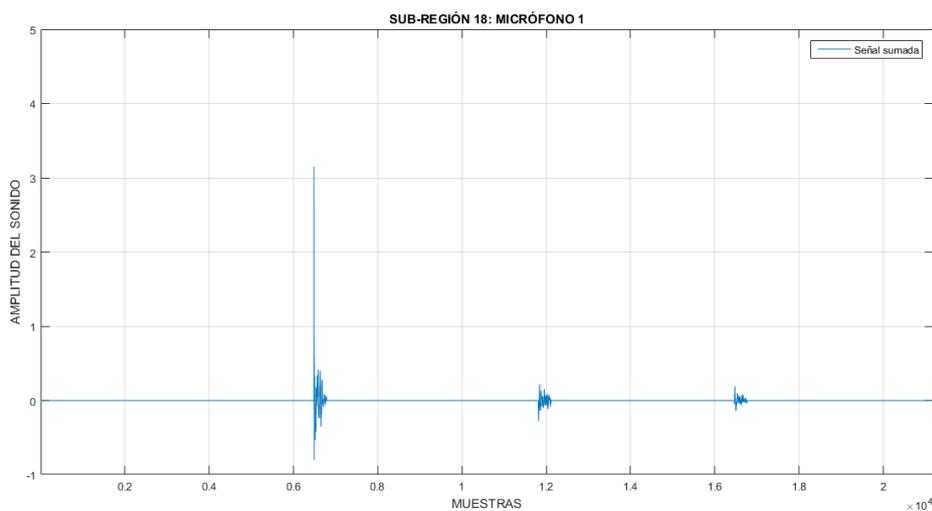


Figura 81 Señal total para sub-región 18

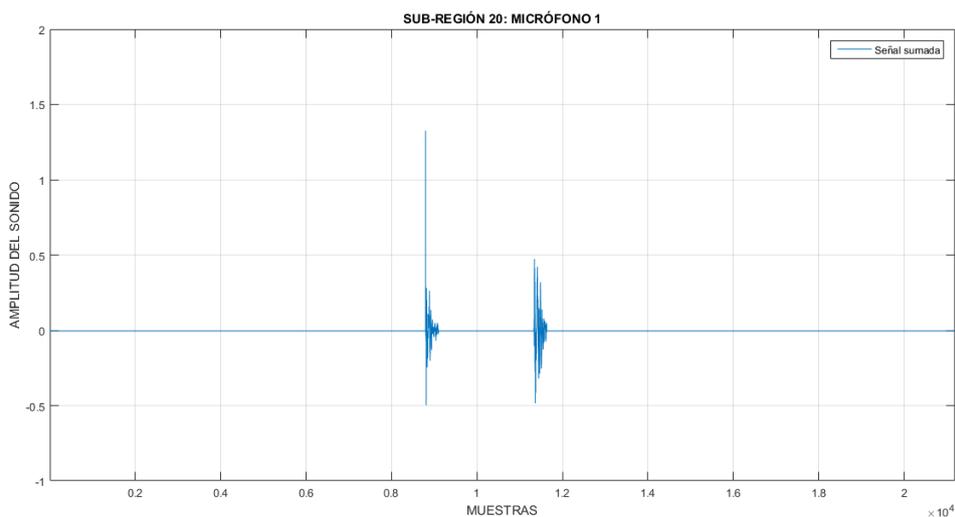


Figura 82 Señal total para sub-región 20

En las Figuras 80-82 se observa las señales finales obtenidas a partir de la suma de las señales en cada sub-región a diferentes alturas, es decir, la señal total de la sub-región 17 se obtiene al sumar la señal captada a 0, 25, 50, 75, 100, 125 y 150 cm y el proceso se repite para las sub-regiones 18 y 20. De esta manera es como se obtiene la señal final con la cual se realiza la reconstrucción de atmósferas sonoras tridimensionales de un juego de baloncesto con una jugada determinada.

5.8.5. Análisis de la suma de señales

Pues bien, la suma de señales que se obtiene al final del procesamiento indica un valor en amplitud ya no entre -1 y 1 para la sub-región 4 que es la región en la cual el bote se da más cerca del arreglo ULA, sino un valor que oscila entre 1 y 4 este valor que se obtiene indica que en realidad la señal está llegando hasta los 100 cm, a partir de esta altura la señal empieza a no ser captada tal como se observa en las Figuras 46-52, es decir, la señal se atenúa mientras la altura en la cual se encuentre el arreglo aumenta, de igual forma pasa con las otras dos sub-regiones.

Si se piensa que la adquisición de datos es ideal y que el bote del balón produce un pico entre -1 y 1 cuando más cerca del arreglo está, pues se tendría una gráfica en la que el pico máximo muestra en amplitud un valor de 5, valor en el cual se establece que pertenece a una altura igual a 100cm, sin embargo hay que tomar en cuenta las condiciones en las cuales se realiza la adquisición de datos, estas condiciones vienen establecidas por múltiples factores, uno de ellos el sistema de cableado que posee cada tarjeta y el otro las condiciones acústicas del lugar en el cual se realiza la toma de datos.

Estos factores mencionados no permiten establecer condiciones ideales de trabajo, es por esta razón que los valores obtenidos no están dentro del rango de los ideales, sin embargo a pesar de estas condiciones no favorables el sistema en si logra detectar que la señal del bote de balón se va perdiendo mientras la altura del arreglo ULA crece, es decir, la señal sonora captada en el espacio producida por el choque del balón contra el piso a través de su valor en amplitud obtenida muestra la altura aproximada hasta la cual esta llega antes de atenuarse por completo.

5.9. Obtención de gráficas en 3 dimensiones

Una vez obtenidas las señales finales se grafica cada una de estas en 3 dimensiones, para ello se realiza un programa en Matlab[®] y mediante el uso de la función *meshgrid* se simula una grilla la cual en los ejes x e y muestra la cantidad de sub-regiones y en el eje z se observa los picos, es decir, los valores de amplitud cada que se realiza un bote de balón (ver Figuras 83-85).

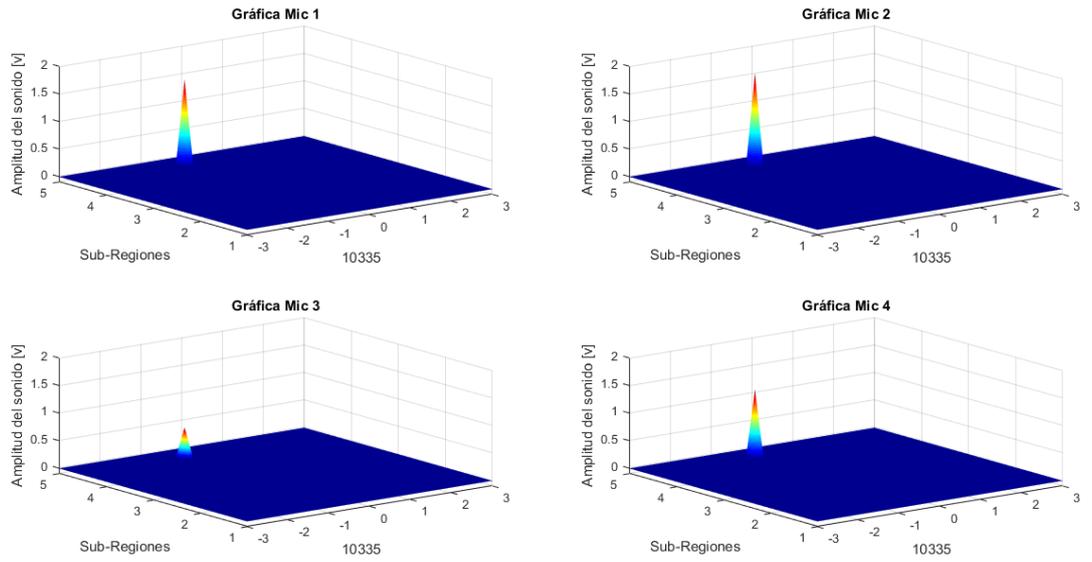


Figura 83 Boteo producido en sub-región 17

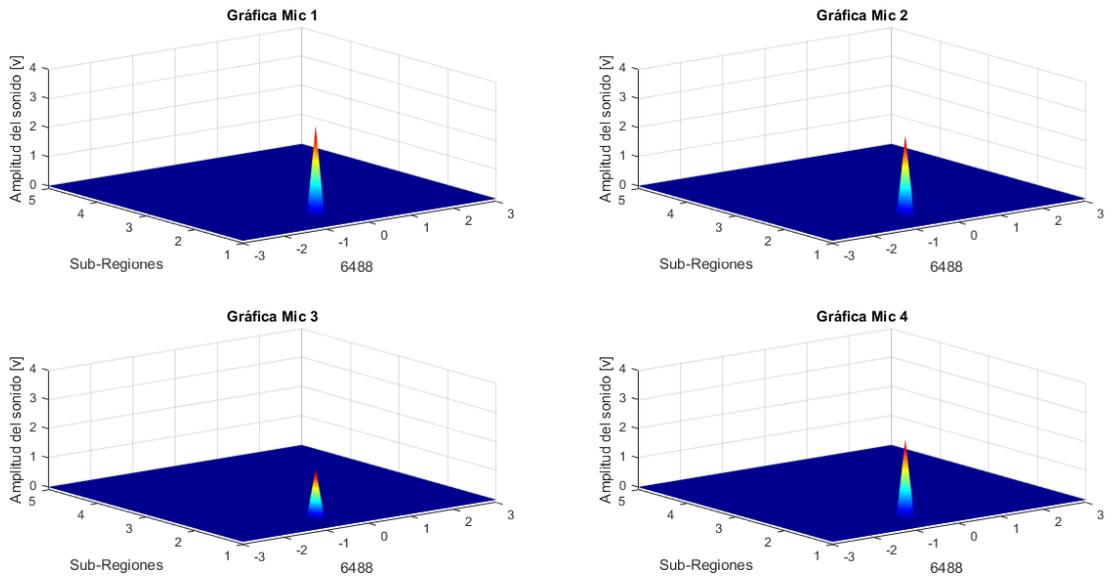


Figura 84 Boteo producido en sub-región 18

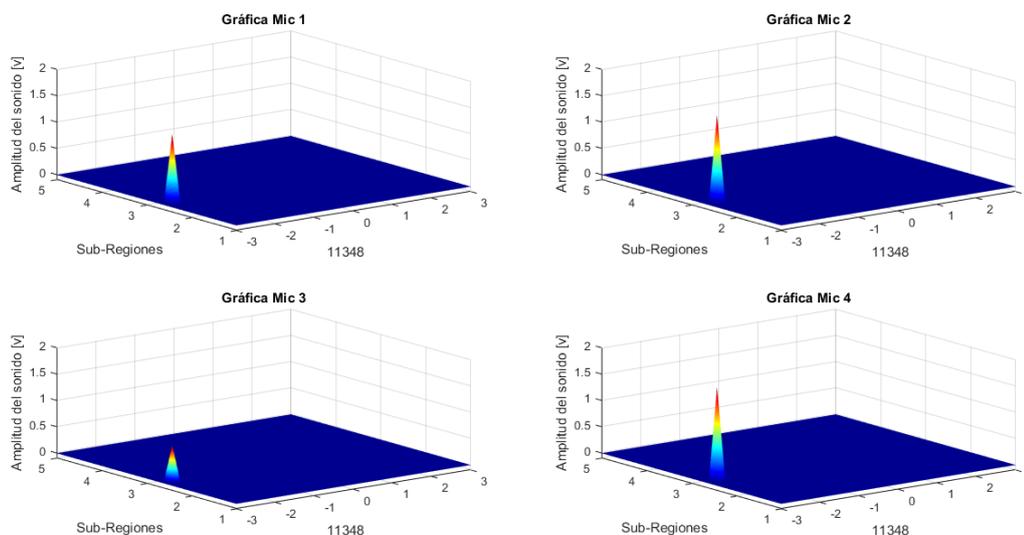


Figura 85 Boteo producido en sub-región 20

En las gráficas se muestra el valor de una señal sonora situada en el espacio pero en la cual se identifica en que sub-región se encuentra, hay que tomar en cuenta que esta señal pertenece al valor de una muestra específica, es decir, el valor de la muestra en la cual se produce el máximo pico pertenece a un valor en un instante de tiempo, con las gráficas mostradas se puede mencionar que es posible observar una señal en función del tiempo en un espacio tridimensional.

5.10. Reconstrucción atmósferas sonoras tridimensionales

Para realizar la reconstrucción de atmósferas tridimensionales se grafica las 3 señales en una sola simulando la jugada predeterminada, pero hay que tomar en cuenta que los valores obtenidos para las sub-regiones 31, 20 y 4 equivalen a los valores de la sub-región 17, 20 y 18 analizados en el presente capítulo, con esta aclaración el primer boteo se produce en la sub-región 31, luego pasa hacia la sub-región 20 y finaliza en la sub-región 4, este proceso se realiza creando una matriz de puntos que es implementada a partir del comando *meshgrid* en Matlab®, la matriz que se implementa es particular ya que se asignan los valores obtenidos en cada una de las sub-regiones dejando visualizar para cada muestra que sucede en el sistema.

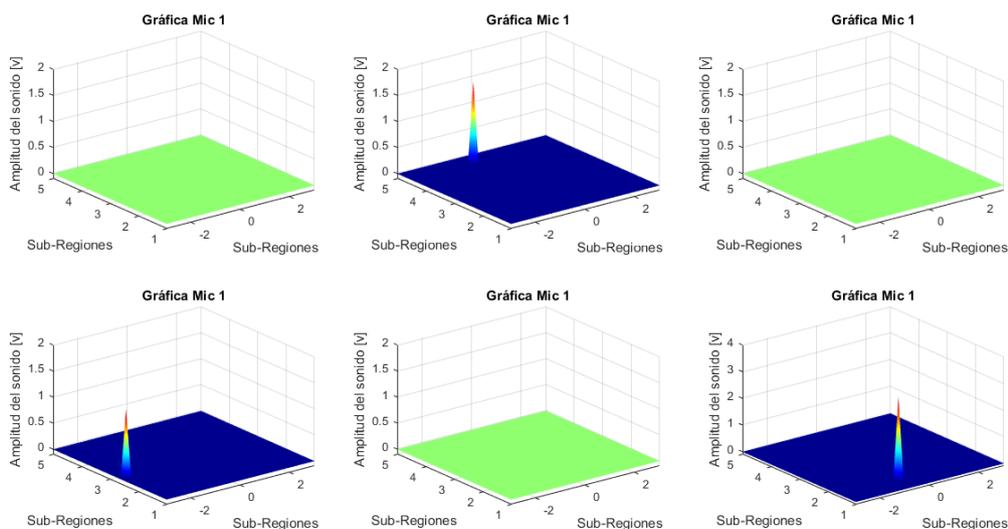


Figura 86 Reconstrucción de jugada de baloncesto en 3 dimensiones.

En la figura 86 se observa el camino que sigue el balón al ser establecido con la jugada predeterminada, en resumen se observa primero el escenario vacío esto indica que es ese instante de tiempo en las sub-regiones 31, 20 y 4 no existe ningún boteo, seguido de esto se observa que en la sub-región 31 se produce un boteo, mismo que luego desaparece ya que una vez que se produce el boteo se lanza un pase hacia la sub-región 20 se repite el mismo proceso de boteo y pase y se finaliza con el boteo en la sub-región 4, y de esta manera se realiza la reconstrucción de atmósferas sonoras tridimensionales del juego de baloncesto en el cual se desarrolla una jugada básica.

5.11. Análisis del sistema en general

En el presente análisis se tomaron en cuenta varios aspectos, el primero de ellos fue la adquisición de datos en las sub-regiones 14 a la 20, y a partir de estas empezar con el análisis de datos, si bien la jugada se desarrolla en las sub-regiones 31, 20 y 4, se decide realizar el barrido de las sub-regiones 14 a la 20 ya que mediante este se puede considerar varios aspectos, el primero de ellos es determinar aproximadamente la distancia a la cual se encuentra la señal de interés, segundo, la ubicación exacta de la señal y tercero las señales que no interesan para realizar la reconstrucción de atmósferas.

Los valores de amplitud son los que permiten definir si la señal que se obtiene al realizar el barrido en las sub-regiones 14-20 se encuentra más alejada o más cercana

al arreglo, es por ello que se toma como referencia los valores de amplitud de la sub-región 20, a partir de esta se considera en que sub-región está la señal de interés, por ejemplo los valores de amplitud obtenido en la señal de la sub-región 17 es menor los valores de la sub-región 20, por lo tanto se asigna dichos valores a las sub-región 31 ya que esta es la que se encuentra más alejada del arreglo, mientras que los valores de amplitud de la sub-región 18 sobrepasan los de la sub-región 20 determinando de esta manera que los valores de la sub-región 18 pertenecen a la sub-región 4 por estar más cerca del arreglo. De esta manera es como la amplitud del sonido ayuda a identificar y localizar las fuentes sonoras de interés, los valores y gráficas que comprueban lo mencionado se detallan luego de cumplir con el proceso descrito en el Anexo 1.

Bien, a lo largo del presente capítulo se ha desarrollado un extenso análisis de señales referentes al bote del balón en un juego de baloncesto, sin embargo y a pesar de no ser un estudio del presente proyecto de investigación se puede comprobar que mientras la señal del bote se atenúa cuando el arreglo ULA de micrófonos aumenta su altura hay señales que van apareciendo, una de estas es la señal captada una vez que el balón choca contra la palma de la mano para recibir un pase, esta señal se puede verificar en la Figura 52 que pertenece a la señal que captan los micrófonos cuando la altura del arreglo es de 150cm.

La señal que aparece se encuentra desde la muestra 8×10^4 hasta 10×10^4 , por lo tanto se puede mencionar que una reconstrucción de atmósferas más detallada es posible con el mismo sistema implementado en la presente proyecto de investigación, pero tomando en cuenta factores desde sonidos provocados por el choque del balón, sonidos de la voz e incluso sonidos luego de realizar un salto para encestar el balón.

Finalmente, se puede mencionar que la reconstrucción de atmósferas sonoras tridimensionales luego del análisis realizado en el presente capítulo cumple con los parámetros establecidos para lograr cumplir con cada una de los objetivos específicos y por ende con el cumplimiento del objetivo general, el análisis entrega varios datos para la continuación del estudio de señales sonoras producidas por varios factores en un escenario tridimensional y dejando así cada vez más cerca el desarrollo de aplicaciones con las cuales se beneficien las personas que poseen discapacidad auditiva.

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Se corroboró el teorema de Nyquist para determinar la distancia de separación entre cada uno de los micrófonos del arreglo lineal uniforme y definir en software la cantidad de muestras que cada señal tendrá para poder realizar la reconstrucción de atmósferas sonoras tridimensionales.
- En base a la frecuencia de muestreo se identificó que el número de muestras que se toma para cada una de las señales durante los 23 segundos que dura el barrido con la jugada predeterminada a diferentes alturas, es una desventaja para el costo computacional del sistema al momento de realizar el procesamiento de señales en software.
- Se demostró que la implementación de un arreglo tridimensional generado a partir de un arreglo lineal es posible gracias a la división de un campo de juego en sub-regiones, a la asignación de alturas que permitan identificar una señal sonora en el espacio y a la implementación de un sistema automático que sea capaz de realizar un barrido de las mismas.
- Mediante la división de regiones del campo de baloncesto se demostró que mientras más pequeña sea la división del escenario en sub-regiones se obtendrán señales sonoras que se encuentren bastante cerca y que no necesariamente puede ser las del bote del balón, sin embargo también se evidenció que el realizar esta división tan pequeña necesita de recursos computacionales bastante altos para un correcto procesamiento de señales.
- La determinación de la frecuencia fundamental mediante la FFT y la potencia de densidad espectral de una señal sonora producida por el choque del balón de baloncesto con el piso permitió, identificar valores de amplitud que ayudan

a localizar en que sub-región se encuentra la señal y a aproximar un valor de distancia en la cual se produjo un bote.

- La identificación de la media de una señal permitió evaluar al sistema de adquisición de datos y también ayudó a eliminar los desfases de amplitud generados específicamente en la tarjeta electrónica que entrega las ganancias de los micrófonos en *hardware*.
- Se comprobó que la utilización de la app *Wavelet Design & Analysis* para minimizar el ruido, eliminando diferentes valores de frecuencias que no ayudan en la reconstrucción de atmósferas y fueron provocados por la acústica del escenario y el motor a pasos es de vital importancia.
- El uso de un motor a pasos permitió implementar un sistema de adquisición de datos bastante preciso, al momento de captar señales mediante el arreglo ULA provenientes de sub-regiones en las cuales su principal desventaja es el ángulo al cual se debe direccionar el arreglo.
- Con la implementación de gráficas en 3 dimensiones se logró realizar la reconstrucción de atmósferas tridimensionales, identificando señales sonoras en el espacio mediante sus valores de amplitud de sonido, que a su vez se muestran como valores de energía en escala de colores en las cuales se verificó la energía de la señal y como esta se atenúa mientras la altura del arreglo aumenta.
- Se comprobó que al trabajar con una frecuencia de muestreo igual a 8000 Hz mientras la altura del arreglo aumenta y la señal del bote de balón captada a esta frecuencia se atenúa, van apareciendo señales causadas por factores externos pero que van de la mano del bote del balón como por ejemplo el sonido que provoca el choque del balón con la palma de la mano cuando esta recibe un pase.

- Se confirmó que la implementación del sistema de adquisición de datos en una FPGA a pesar de no trabajar en tiempo real ayudó a que los datos captados por los micrófonos minimicen costo computacional en el software Labview® y estos puedan ser manipulados por programas de fácil acceso y manejo.
- Se evidenció que la reconstrucción de atmósferas sonoras tridimensionales y los algoritmos de métodos de realce de voz son de gran apoyo para la realización de aplicaciones en las cuales se pueda desarrollar dispositivos de ayuda para personas con discapacidad auditiva.

6.2. Recomendaciones

- Se recomienda añadir otras jugadas en el mismo escenario para determinar el comportamiento del sistema de adquisición de datos.
- Desarrollar nuevos métodos de procesamiento de señales que permitan identificar la ubicación exacta de la señal en el escenario.
- Añadir más señales de interés como por ejemplo la voz de los propios jugadores de baloncesto sería una de las principales recomendaciones que se realiza para determinar si el arreglo es capaz de percibir estas señales o no.
- Se recomienda dividir al escenario en sub-regiones con perímetro de 1,5 metros y determinar si los ángulos varían considerablemente y se puede realizar una reconstrucción de atmósferas diferentes a la realizada en el presente proyecto.

6.3. Trabajos futuros

Con el fin de continuar con la reconstrucción de atmósferas sonoras tridimensionales el único trabajo que se propone, es la reconstrucción de atmósferas pero implementado mediante un pequeño arreglo tridimensional que cuente con 8 micrófonos, en este trabajo también se propone que se implemente un nuevo método de localización de fuentes sonoras basado en DOA para que se permita identificar y ubicar la señal sonora en la posición exacta de cada una de las sub-regiones.

Referencias

- Amado, I. (2011). *Sordera, hipoacusia y discapacidad auditiva*. Obtenido de <https://www.bebesymas.com/desarrollo/sordera-hipoacusia-y-discapacidad-auditiva>
- Analog Devices. (2012). *Data Sheet ADMP504*. Obtenido de <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/obsolete-data-sheets/ADMP504.pdf>
- Apolinário, J. A. (2009). *QRD-RLS Adaptive Filtering*. Boston, Estados Unidos: Springer.
- Apolinário, J., de Campos, M., & Bernal, C. (2000). The constrained Conjugate Gradient Algorithm. *IEEE Signal Processing Letters* , 7(12), 351-354.
- Asinsten, J. (2003). *El sonido, edición de sonido en computadoras, para proyectos en Clic, multimedia y otras actividades educativas*. Obtenido de http://cvonline.uaeh.edu.mx/Cursos/Maestria/MTE/Gen02/disenio_creacion_mat_mult/unidad_3/El_sonido.pdf
- Ballado, A. (2012). *Análisis de codificaciones perceptuales de la voz y su comparación en el reconocimiento de comandos* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma, Distrito Federal, México.
- Borja , A. (2012). *Estimación de Dirección de Llegada Basada en Métodos de Optimización Metaheurística Mediante un Único Muestreo* (tesis doctoral). Universidad de Alcalá, Madrid, España.
- Cadavid, A., Peñafiel, J., & Marín , J. (2009). Aplicación de un arreglo adaptativo de micrófonos para el realce de voz. *Universidad de Quindío*, (19), 71-78.
- Caizapanta, A. (2015). *Optimización de señales acústicas en un arreglo semiesférico de micrófonos utilizando la metodología de beamforming de banda ancha* (tesis de pregrado). Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador.
- Caizapanta, T. (2015). *Implementación de un arreglo semiesférico de micrófonos utilizando la metodología beamforming de banda ancha para el realce de la voz* (tesis de pregrado). Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador.

- Cerna, R. (2014). *Diseño e implementación de un sistema de beamforming utilizando una matriz de buttler compacta para las bandas AWS y PCS 1900 MHz* (tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica, Lima, Perú.
- CONADIS. (2016). *Estadísticas de discapacidad*. Obtenido de <http://www.consejodiscapacidades.gob.ec/estadisticas-de-discapacidad/>
- Díaz, R. (2002). *Técnicas audiométricas en la infancia* (tesis de pregrado). Universidad Austral, Valdivia, Chile.
- Diniz, P. (2013). *Adaptive Filtering: Algorithms and Practical Implementation* (Fourth ed). Rio de Janeiro, Brazil: Springer New York Heidelberg Dorrecht London.
- Gerges, S. (2011). Identificación de fuentes de ruido por el método de Beamforming. *SONAC*, 2(1), 77-94.
- González, P. (2013). *Influencia de la estimulación sonora binaural en la generación de ondas cerebrales. Estudio electroencefalográfico* (tesis doctoral). Universidad Complutense, Madrid, España.
- Gracida , G., & Orduña, F. (2011). Evocanto: Programa de cómputo para analizar la voz cantada mediante técnicas de procesamiento digital de señales. *Computación y Sistemas*, 15(1), 39-50.
- Huidrobo, J. (2006). *Manual de telecomunicaciones*. México Distrito Federal, México: Alfaomega.
- Ingle, V., & Proakis, J. (2010). *Digital Signal Processing*. Stamford: Global Engineering.
- Machín , J. (2016). *Beamforming, localización de fuentes sonoras mediante arrays de micrófonos* (tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Gandia, Valencia, España.
- Madeira, R., Alloza, P., Liaño, J., García, G., & Lamotte, L. (2014). *Micrófono direccional basado en beamforming en tiempo real*. Obtenido de <http://www.sea-acustica.es/fileadmin/Murcia14/AED-2%20015.pdf>
- Madisetti, V. (2010). *The Digital Signal Processing Handbook* (Second ed). Taylor and Francis Group, LLC.

- Martínez , D. (2008). *Técnicas de procesado en array para realzado de voz en situaciones adversas* (tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Martínez, J., & Peters, J. (2015). *Contaminación acústica y ruido*. Madrid: Ecologistas en acción .
- MathWorks. (2015). *Wavelet Design & Analysis App*. Obtenido de <https://www.mathworks.com/products/wavelet/apps.html>
- Miyara, F. (2015). *Niveles sonoros*. Obtenido de <https://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/niveles.htm>
- Monzingo, R., Haupt, R., & Miller, T. (2011). *Introduction to Adaptive Arrays* (Second ed). Published by SciTech Publishing, Inc.
- Morales, L. (2014). *Señales aleatorias*. Obtenido de <https://hellsingge.files.wordpress.com/2014/04/lec02-sec3b1ales-aleatorias.pdf>
- National Instruments. (2008). *Labview*. Obtenido de <http://www.ni.com/es-cr/shop/labview/buy-labview.html>
- National Instruments. (2012). *FPGAs a fondo*. Obtenido de <http://www.ni.com/white-paper/6983/es/#toc2>
- National Instruments. (2015). *Guía de acondicionamiento de señales para ingenieros*. Obtenido de ftp://ftp.ni.com/evaluation/signal_conditioning/23807_Engineer_s_guide_to_signal_conditioning_Spanish_localisation_HR.pdf
- National Instruments. (2016). *User Guide and Specifications NI myRIO-1900*. Obtenido de <http://www.ni.com/pdf/manuals/376047c.pdf>
- National Instruments. (2017). *myRIO-1900*. Obtenido de <http://www.ni.com/es-cr/support/model.myrio-1900.html>
- O'Brien , R., Molisani, L., & Burdisso, R. (2013). Técnicas avanzadas para la detección de fuentes sonoras . *Mecánica Computacional* , 32, 2951-2967.
- OEA. (2016). *Personas con discapacidad*. Obtenido de <http://www.oas.org/es/sedi/ddse/paginas/index-4.asp>
- OFICAD. (2017). *Dimensiones de un campo de baloncesto*. Obtenido de http://www.oficad.com/medidas_y_dimesnsiones/pista_de_baloncesto.htm

- Organización Mundial de la Salud. (2016). *La sordera y los defectos de audición*.
Obtenido de <http://www.who.int/topics/deafness/es/>
- Organización Mundial de la Salud. (2017). *Sordera y pérdida de la audición*. Obtenido de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs300/es/>
- Ortega, I., & Castillo, M. (2013). *Atmósferas sonoras, melodías y texturas*. Obtenido de <http://liceo1.cl/icores/downloadcore/153967>
- Pérez, J., & Merino, M. (2009). *Definición de baloncesto*. Obtenido de <https://definicion.de/baloncesto/>
- Peris, J. (2011). *¿Cómo llegamos al año?-3. Los lloros*. Obtenido de <http://laurnadecristal.blogspot.com/2011/04/>
- Poveda, J. (2010). *Localización de fuentes sonoras mediante análisis de señales* (tesis de pregrado). Universidad de San Buenaventura, Bogotá DC, Colombia.
- Prasanth, C., Sreeja, K., Nidheesh, H., & Prince, J. (2013). Beamforming and Adaptive beamforming Techniques and its implementation on ADSP TS 201 Processor. *IOSR Journal of VLSI and Signal Processing*, 3, 7-17.
- Rabiner, L. &. (2007). *Theory and applications of digital speech processing*. Obtenido de http://research.iaun.ac.ir/pd/mahmoodian/pdfs/UploadFile_2643.pdf
- Robles, I. (2011). *Discapacidad Auditiva*. Obtenido de <https://sites.google.com/a/cetys.net/educacion-especial/discapacidad-auditiva>
- Ruiz, S. (2015). *La velocidad del sonido y su relación con las propiedades termodinámicas para la obtención de la ecuación de estado en alimentos líquidos* (tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Mixteca, Oaxaca, México.
- Ruiz, B. (2005). La voz y su espectro. *SIGMA Revista de matemáticas*, 179-191.
Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/28258479_La_voz_y_su_especto
- Sánchez, J. (2004). *Mejora de señal de voz en condiciones acústicas adversas mediante array de micrófonos* (tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, España.

- Sánchez, L. (2015). *Sonido: Naturaleza, propagación, velocidad, concepto de onda sonora*. Obtenido de <https://www.taringa.net/posts/apuntes-y-monografias/18682617/Aprende-algo-de-acustica.html#comments>
- Santos, S. (2004). *Hipoacusia neurosensorial infantil: estudio retrospectivo de factores de riesgo y etiología* (tesis doctoral). Universidad Complutense, Madrid, España.
- Sarmiento, J., & Chilpe, D. (2010). *Iniciación de la enseñanza del voleibol en el ciclo básico del Colegio Jose Benigno Iglesias* (tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Ecuador.
- Tobar, E. (2014). *Diseño arquitectónico de un polideportivo para la parroquia de llano chico* (tesis de pregrado). Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito, Ecuador.
- Tolomeo, P. (2010). *Capítulo 3: Arreglos de sensores y formador de haz*. Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/762/6/A6.pdf>
- Torres, A. (2016). *Análisis de comportamiento de algoritmos adaptativos en un arreglo semiesférico de micrófonos utilizando la metodología de beamforming para un medio no estacionario* (tesis de pregrado). Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador.
- Verástegui, M. (2013). *Principales determinantes sociales que inciden en el acceso de jóvenes sordos a nivel de educación superior* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma, Distrito Federal, Mexico.
- Yang, W., Cho, Y., & Cho, C. (2012). *MATLAB/Simulink for Digital Signal Processing*. Hangrung Publishing Company.