



**Estimación de DOA en Coordenadas Cartesianas y  
Polares con Matrix Creator y Algoritmos de Optimización  
Orientado a Señales Nocivas para Mamíferos Marinos.**

**Miriam Carolina Zapata Cabral**

Dr. José Ismael de la Rosa Vargas, Dr. Efrén González Ramírez

Universidad Autónoma de Zacatecas  
Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica  
Zacatecas, México  
22 de octubre 2018

# **Estimación de DOA en Coordenadas Cartesianas y Polares con Matrix Creator y Algoritmos de Optimización Orientado a Señales Nocivas para Mamíferos Marinos.**

Miriam Carolina Zapata Cabral

Tesis de grado que presenta como requisito parcial para optar por el título de:  
**Maestra en Ciencias de la Ingeniería**

Directores de tesis:

Dr. Ismael De La Rosa Vargas

Dr. Efrén Gonzáles Ramírez

Línea de investigación:

Procesamiento Digital de Señales y Mecatrónica

Grupo de Investigación:

Procesamiento Digital de Señales

Universidad Autónoma de Zacatecas  
Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica  
Zacatecas, México  
22 de octubre 2018



**C. MIRIAM CAROLINA ZAPATA CABRAL.**

**PRESENTE:**

De acuerdo al oficio de fecha 27 de junio del 2018, en el cual solicita se le señale el tema a desarrollar para su trabajo de tesis del Programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, le manifiesto a Usted lo siguiente:

Se aprueba su solicitud, designando como directores de tesis a los profesores **DR. JOSÉ ISMAEL DE LA ROSA VARGAS Y DR. EFRÉN GONZÁLEZ RAMÍREZ**, mismo que acordaron acordar en fijar a usted el tema titulado:

**“Estimación de DOA en coordenadas cartesianas y polares utilizando Matrix Creator y Algoritmos de optimización orientado a señales nocivas para mamíferos marinos”.**

Le comunico a Usted que dispone de un plazo máximo de **SEIS MESES**, a partir de la presente fecha para la conclusión de su trabajo de tesis. Asimismo, le indico que, una vez concluido su documento de tesis, deberá remitir cinco copias del mismo para su revisión y aprobación por parte de la Comisión Revisora, que se nombrará en su oportunidad para su aprobación, o en su caso indicarle las correcciones que fueran pertinentes, antes de la impresión de la versión final.

**ATENTAMENTE**

Zacatecas, Zac. 15 de Octubre del 2018



**DR. JORGE DE LA TORRE RAMÍREZ**  
**DIRECTOR DE LA UNIDAD ACADÉMICA DE**  
**INGENIERÍA ELÉCTRICA.**



**CIRCULAR**

Se suplica de la manera más atenta a los señores Doctores que se citan al calce, se sirvan revisar y en su caso aprobar la impresión del **TRABAJO DE TESIS** que se anexa a la presente, del pasante de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería C. **MIRIAM CAROLINA ZAPATA CABRAL** con matrícula 31121918.

**ATENTAMENTE**  
 Zacatecas, Zac. 15 de Octubre 2018



**DR. CARLOS ALBERTO OLIVERA**  
 RESPONSABLE DEL PROGRAMA DE  
 MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

**REVISÓ Y APROBÓ**

DR. JOSÉ ISMAEL DE LA ROSA VARGAS

DR. EFRÉN GONZÁLEZ RAMÍREZ

DR. GERARDO MIRAMONTES DE LEÓN

DRA. IRERI AYDÉE SUSTAITA TORRES

DR. DANIEL ALANIZ LUMBRERAS.



**C. MIRIAM CAROLINA ZAPATA CABRAL.**  
**PRESENTE.**

La Dirección de la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica le notifica a Usted que la Comisión Revisora de su documento de Tesis de Maestría, está integrada por los profesores Dr. José Ismael de la Rosa Vargas, Dr. Efrén González Ramírez, Dr. Gerardo Miramontes de León, Dra. Ileri Aydée Sustaita Torres y Dr. Daniel Alaniz Lumbreras, ha concluido la revisión del mismo y ha dado la aprobación para su respectiva presentación.

Por lo anterior, se le autoriza la impresión definitiva de su documento de Tesis de Maestría a fin de dar trámite a la sustentación de su Examen de Grado, a presentarse el 22 de Octubre del 2018.

ATENTAMENTE.  
Zacatecas, Zac., 15 de Octubre 2018.

**DR. JORGE DE LA TORRE Y RAMOS.**  
**DIRECTOR DE LA UNIDAD ACADÉMICA DE**  
**INGENIERÍA ELÉCTRICA**

## *DEDICATORIA*

A mis padres, Beatriz Cabral Miranda y José de Jesús Zapata Cuevas, quienes me trajeron al mundo y me otorgaron los mejores dones que la vida puede dar. Gracias, los amo muchísimo y espero enorgullecerlos y poner en alto el nombre de nuestra familia, siempre. Es un honor ser su hija.

A José Manuel Guerrero Garfias, te amo, gracias por llegar a mi vida.

A mis hermanas y hermanos, Rocío, por creer en mí y echarme porras, tus consejos son invaluable y siempre los tengo presentes, Ana, sigue luchando así por tus objetivos. Betty espero que esto te demuestre que las chicas de esta familia somos capaces de lograr todo lo que nos proponemos, especialmente tú hermosa. A Pepe que no leerá esto, Ricardo por compartir tus ideales tan apasionadamente, los amo mucho, todos me han enseñado muchas cosas a lo largo de mi vida.

A mis amigas y amigos, Nancy, porque desde que nos conocemos, hemos ido logrando nuestras metas, te admiro mucho y siempre estaré contigo, Mimi tú eres mi hermanita bebé de siempre, gracias por existir en este mundo. Ariadna, estar contigo siempre es una horda de aprendizaje y amor y creatividad todo junto en la misma bella mujer. A Gabriela del mal, que es más del bien que qué cosa, amiga gracias por todo. A Sahraí, amiga no sabes cómo me ayudaste en esta maestría con tu presencia, eres adorable, A Ruby mi amiga desde primaria hasta hoy. Las amo mis hermosas.

A Iván González Zamora compi, el hecho de ser tu compañera en este posgrado fue una de las mejores cosas que me pasaron aquí y en el cotorreo, mil gracias por todo, siempre. Michel gracias por las porras carnal, motivaciones mutuas y regaños. Rodrigo Abel, eres un buen amigo y un buen Paquito. Por último, pero no menos importante, Luisito, no tengo palabras por todo el cariño, la amistad y sobretodo la ayuda que me otorgaste para entrar y seguir en el posgrado, te quiero mucho ahora y siempre. Gracias totales, los amo.

## *AGRADECIMIENTOS*

Gracias al doctor Gerardo Miramontes de León por sus consejos, enseñanzas y amistad, sin duda no habría llegado hasta acá de no ser por usted y nunca sabré cómo agradecerle, sin embargo, siempre lo querré y admiraré.

Gracias al doctor Efrén González Ramírez, gracias infinitas por su paciencia, sus consejos y sus enseñanzas, sé que no fue fácil y siempre tendré muy en cuenta todo lo que hizo por mí y por este trabajo.

Gracias a la doctora Ileri Aydée Sustaita Torres quien me enseñó mucho más que ciencia con cariño, paciencia y amistad en toda mi estadía la maestría.

Gracias al doctor José Ismael de la Rosa Vargas por su sinceridad y amistad, desde mis inicios en el posgrado.

Gracias al doctor Daniel Alaníz Lumbreras por sus consejos y amistad.

Gracias a la maestría en ciencias de la ingeniería, al Dr. Carlos Olvera, por aceptarme en el programa a pesar de no ser de formación en ingeniería.

Gracias a mi alma mater de licenciatura y maestría, Universidad Autónoma de Zacatecas, siempre.

## Resumen

El siguiente trabajo está enfocado en la detección de fuentes acústicas no deseadas usando tecnología de Monitoreo Acústico Pasivo o PAM por sus siglas en inglés (Passive Acoustic Monitoring). Siendo la parte central del trabajo la localización de una fuente acústica, se ha utilizado un sistema formado por un arreglo circular de ocho sensores, y la tarjeta de desarrollo Matrix Creator en una plataforma Raspberry 3Pi. Para lograr la detección y localización de una señal con monitoreo pasivo se determinó por DOA (Direction of arrival).

Ahora bien, la determinación del DOA se puede hacer de diferentes maneras, la más general es por medio de TDOA (time difference of arrival). El TDOA mide el retardo con el cual llega la señal bajo estudio a cada par de sensores. Una forma de medir este retardo es por medio de la correlación.

En este trabajo se desarrollaron pruebas de localización acústica con un arreglo circular de micrófonos el cual está disponible en una versión comercial. Se probaron diferentes algoritmos de localización como el algoritmo N-M máximo descenso, y MUSIC en la estimación de Dirección de arribo (DOA).

El trabajo presenta una propuesta de monitoreo acústico pasivo ante el problema de la contaminación acústica marina.

Aunque no se realizaron pruebas en agua debido al tiempo y la ubicación geográfica donde se realizó este trabajo, existe mucha información auxiliar para ampliar este tipo de investigaciones, que explican y demuestran el efecto catastrófico de estas tecnologías de rastreo a gran escala.

Este proyecto se enfoca en herramientas de software disponibles y gratuitas para encontrar la dirección de la fuente emisora nociva DOA para mamíferos marinos en coordenadas polares y cartesianas, con el uso de nuevos sistemas experimentales de hardware como Matrix Creator y Raspberry3Pi que tienen muchas ventajas para investigaciones académicas, para el desarrollo de nuevas tecnologías que sirvan para la concientización y mitigación acústica para el comienzo del restablecimiento de la vida acuática y sub acuática.



# Abstract

The following work is focused on the detection of unwanted acoustic sources using Passive Acoustic Monitoring (PAM) technology. Being the central part of the work the location of an acoustic source, it has been developed a system consisting of a circular array of eight sensors, the Matrix Creator development card on a Raspberry 3 pi platform. To achieve the detection and location of a signal with passive monitoring it was determined by DOA (Direction of arrival).

However, the determination of the DOA can be done in different ways, the most general is through TDOA (time difference of arrival). The TDOA measures the delay with which the signal under study reaches each pair of sensors. One way to measure this delay is through correlation.

In this work, acoustic location tests were developed with a circular array of microphones which is available in a commercial version. Different localization algorithms were tested such as the N-M algorithm maximum descent, and MUSIC in the Arrival Direction estimation (DOA).

The work presents a proposal for passive acoustic monitoring of the problem of marine acoustic pollution.

Although water testing was not performed due to the time and geographic location where this work was executed, there is much auxiliary information to expand this type of research, which explains and demonstrates the catastrophic effect of these large-scale tracking technologies.

This project focuses on available free software tools to find the address of the harmful emitting source DOA for marine mammals in polar and Cartesian coordinates, with the use of new experimental hardware systems such as Matrix Creator and Raspberry3Pi that have many advantages for academic research, in addition to their low cost for the development of new technologies that serve for awareness and acoustic mitigation for the beginning of the restoration of aquatic and sub aquatic life.

# Índice General

Abstract.....	vi
Índice General.....	vii
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tablas .....	xi
Capítulo 1. <b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1. Antecedentes.....	3
1.1.1. Monitoreo de señales acústicas.....	4
1.1.2. Localización y seguimiento con PAM.....	5
1.1.3. Aplicaciones de la monitorización acústica pasiva.....	6
1.1.4. Bioacústica y FFT (Fast Fourier Transform).....	8
1.2. Planteamiento del problema.....	9
1.3. Justificación del problema .....	10
1.4. Preguntas de Investigación .....	11
1.5. Objetivo General.....	11
1.6. Objetivos Particulares .....	11
1.7. Hipótesis .....	11
1.8. Alcance .....	11
1.9. Descripción del resto del documento y trabajo futuro .....	12
Capítulo 2. <b>Conceptos Teóricos del Posicionamiento Acústico.....</b>	<b>14</b>
2.1.1 Posicionamiento Mediante un Ángulo Azimutal.....	14
2.1.2 Posicionamiento en 3 dimensiones (x, y, z).....	15
2.2 Técnicas de posicionamiento mediante señales acústicas.....	16
2.2.3 Dirección de Llegada (DOA).....	19
2.2.4 MUSIC algoritmo (simulación en ángulo azimutal).....	22
2.4 Métodos de Optimización .....	27
2.4.1 Método Nelder-Mead.....	27
2.4.2 Método del gradiente o del descenso pronunciado.....	32
Capítulo 3. <b>Sistema de experimentación.....</b>	<b>34</b>
3.1. Raspberry 3 Pi.....	34
3.1.1. Sistema Operativo de Raspberry 3Pi.....	37

3.2.	Estado de compilación: MATRIX Hardware Abstraction Layer (HAL).....	37
3.3.	Placa de desarrollo Matrix Creator. ....	38
3.4.	Programación del arreglo de micrófonos Matrix Creator en Raspberry 3 Pi.....	40
3.5.	Modelo del sistema. ....	41
<b>Capítulo 4. Estimación de dirección de fuente acústica en coordenadas tridimensionales y azimutales. 43</b>		
4.1.	Configuración de medición.....	43
4.2.	Obtención de datos.....	43
4.3.	Simulación y cálculo de DOA (Direction Of Arrival) en un arreglo circular para una dimensión.....	45
4.4.	Algoritmo MUSIC para detección de fuente en una dimensión. ....	47
4.5.	Determinación de Dos fuentes en 2D, Azimuth y Elevación.....	49
<b>Capítulo 5. Determinación de una fuente emisora de sonido en posición x, y, y z..... 50</b>		
5.1.	Estimación de diferencia de tiempo de llegada.....	50
5.2.	Sistema de ecuaciones con la posición de la fuente emisora como incógnita en tres dimensiones. ....	52
5.3.	Datos para la aplicación del algoritmo.....	54
5.4.	Función de costo y el método del gradiente descendiente ....	57
<b>Capítulo 6. Resultados..... 59</b>		
6.1.	Diferencia de Tiempo de Llegada.....	58
6.2.	Ángulo azimutal.....	60
6.3.	Resultado del algoritmo MUSIC ....	61
6.4.	Diferencia en distancias de llegada con algoritmos de optimización. ....	63
<b>Capítulo 7. Conclusiones ..... 66</b>		

# Índice de Figuras

Figura 1. Marsopa con oídos reventados por traumatismo acústico[16].....	3
Figura 2. Espectro de Fourier del pulso de sonar .....	13
Figura 3. Orientación dimensional y angular humana [23].....	14
Figura 4. Configuración de geolocalización TDoA [20].....	17
Figura 5. Principio para la operación de un arreglo de micrófonos para la estimación del DOA [41] .....	19
Figura 6. Arreglo de ocho micrófonos UCA [50] .....	23
Figura 7. Problema en 2 Dimensiones, donde se muestra el reflejo triangular [55] .....	28
Figura 8. Expansión en 2-D [55].....	29
Figura 9. Una contradicción en 2 dimensiones [55].....	29
Figura 10. “Transformación retráctil ” en 2 dimensiones [55]. .....	30
Figura 11. Versión Raspberry 3Pi utilizada en los experimentos [57].....	33
Figura 12. En estas conexiones de usos múltiples es donde se conecta la tarjeta de desarrollo Matrix Creator [58] .....	35
Figura 13. Vista de la parte posterior de la tarjeta de desarrollo Matrix Creator conectada a Raspberry 3 Pi .....	37
Figura 14. Imagen anterior y posterior de la tarjeta de desarrollo Matrix Creator [59].....	38
Figura 15. Matrix Creator en Raspberry 3 pi ejecutando demo de audio recorder con el arreglo de 8 micrófonos simultáneamente durante ciclos de 10 segundos .....	40
Figura 16. Se colocó un tripode con coordenadas medidas a cada arreglo de micrófonos en las cajas A y B con respecto a la fuente emisora (tripode).....	41
Figura 17. Posición del primer experimento con un solo arreglo, la fuente receptora Matrix Creator tenía posición fija, mientras que la fuente emisora cambió de posicionamiento varias veces .....	43
Figura 18. Se emitió la señal y los 8 micrófonos fueron capaces de detectar y almacenar la señal simultáneamente en las diferentes posiciones en las que se posicionó la fuente emisora.....	44
Figura 19. Los círculos en color azul muestran las posiciones de los micrófonos. La marca X muestra la posición de la fuente y las marcas + muestran el DOA calculado.....	45
Figura 20. Receptor circular de un conjunto uniforme de M sensores [59] .....	47

Figura 21. Algoritmo MUSIC con dos fuentes en coordenadas polares de elevación en $0^\circ$ y azimuth $150^\circ$ .	48
Figura 22. Señal emitida por un altavoz.	50
Figura 23. Defazamiento en tiempo entre dos señales acústicas.	51
Figura 24. Obsérvese la geometría del arreglo de micrófonos se toma de punto de referencia el centro de la tarjeta	53
Figura 25. Pulso utilizado para simular la señal de sonar naval real.	55
Figura 26. Primeros 12 milisegundos del pulso utilizado para simular la señal de sonar naval real	55
Figura 27. Traslape de señales analizadas.	58
Figura 28. DOA calculado entre el par de sensores 0 y 1, distancia de 4.1 cm	59
Figura 29. DOA calculado entre sensores 0 y 6, distancia de 7cm	59
Figura 30. El algoritmo muestra un Azimut de $10^\circ$ , el ángulo medido en X de forma física fue de $15^\circ$	61
Figura 31. Gráfica en 3D de dos fuentes con grados azimuth y elevación con MUSIC.	62
Figura 32. Dos fuentes en vista plana donde se muestra elevación de $0^\circ$ y azimuth de $45^\circ$ de la primera fuente y $155^\circ$ de la segunda.	62

# Índice de Tablas

Tabla 1. Características de sensores inalámbricos disponibles en la placa Matrix Creator [59] .....	38
Tabla 2. Matriz de coordenadas en centímetros del arreglo de micrófonos de Matrix Creator tomando como punto de referencia el centro de la tarjeta.....	39
Tabla 3. Comparación de resultados físicos y usando el algoritmo .....	60
Tabla 4. Vectores correlacionados que conforman el arreglo de 16 x 1 con un error +/- de 0.081 a 0.79 cm .....	63
Tabla 5. Resultado comparativo de los algoritmos de optimización.....	64

# Capítulo 1. Introducción

Tenemos un ecosistema, el cual es como muchos ecosistemas, perturbado por actividades humanas. El ecosistema que tomamos en cuenta como justificación de este trabajo es el ecosistema marino. Debido a las actividades humanas, los seres vivos que habitan dicho ecosistema se ven afectados pues no sólo se perturba su hábitat, sino que sufren verdaderos casos de destrucción masiva, así que estamos hablando de una invasión fatal en la mayoría de los casos. Los tipos de invasión son varios, desde presenciales, desechos, derrames, ruido etc. producido por diferentes actividades humanas. El ruido puede provenir de las máquinas de las embarcaciones, así como de otro tipo de ruido como el de sonar el cual es muy utilizado para la navegación, pesca, exploración del fondo marino, ejercicios navales, etc. En nuestro caso nos concentramos en el ruido provocado por la señal de sonar activo ya que su uso en altas potencias es fatal para algunas especies animales, si no es que para todas.

Los efectos del ruido en los mamíferos marinos han sido un tema de sustancial preocupación para los investigadores, los legisladores y el público en general ya que diversos estudios biológicos, oceanográficos y bioacústicos han demostrado continuamente ecocidios marinos a causa de sonar activo en los últimos años. Esta preocupación proviene de estudios de varamientos de ballenas picudas a través de los años, los cuales fueron asociados con el sonar naval de gran amplitud [1 - 3]. El verdadero daño fisiológico inducido por el sonar, que tiene efectos de comportamiento en los animales varados, ha sido extensamente debatido [4 - 6]. Además, la realidad es que el ruido del océano es diverso, incluido el envío y el tráfico de embarcaciones, la construcción de parques eólicos, cañones de aire relacionados con la exploración sísmica, sonar naval y construcción.

Estos sonidos pueden agruparse ampliamente como ruido en tres categorías: (i) continuo (o casi continuo) como el envío de señales acústicas, (ii) sonidos de impulso como pistolas de aire sísmico o municiones militares, y (iii) ruido intermitente como construcción o sonar. Los

cambios de comportamiento en respuesta a las condiciones de ruido elevado de estas diversas fuentes causaron alarma [6]. En los mamíferos terrestres, una preocupación principal y bien establecida sobre la exposición al ruido es la pérdida de audición inducida. La sobre-exposición al ruido puede inducir tanto la pérdida de audición temporal como permanente, también conocida como cambios de umbral temporales o permanentes. En el caso de los mamíferos marinos, se necesita una amplia gama de datos para predecir los posibles impactos del ruido. Los esfuerzos de investigación necesarios para abordar los impactos del ruido en mamíferos marinos han sido abordados en cuatro informes del Consejo Nacional de Investigación. Un informe más reciente de Southall et al. establece una base científica en donde se concluye que la exposición al ruido es mortal [7 - 9].

Existen ya proyectos de sonar pasivo que pueden detectar diferentes especies de cetáceos y a su vez, la comunicación entre ellos para determinar su reacción al sonar y explotación petrolera ya que la constante contaminación acústica no les permite comunicarse, reproducirse, migrar, etc. Sin embargo, no se tiene conocimiento de un sonar pasivo que monitoree las señales nocivas que causan estos estragos en cetáceos. Se han detectado en el océano varias causas de impacto ambiental y alta tasa de mortalidad en la vida marina y subacuática debido a los efectos antropogénicos, como la contaminación, la explotación petrolera, la pesca masiva y el sonar activo, que este último en especial se caracteriza por tener consecuencias verdaderamente catastróficas.

En base a lo anterior se desarrolló un sistema en este proyecto capaz de detectar y localizar la fuente emisora tanto de una señal de sonar como de sonidos de cetáceos. A esto le llamamos DOA (Direction of arrival) que es la parte central del trabajo. En las siguientes secciones encontraremos los fundamentos teóricos como son el DOA, además se presenta cómo se calcula el ángulo azimutal, ya que también se utilizaron algoritmos de optimización como el Gradiente pronunciado o Nelder- Mead, por último, el algoritmo de Múltiple Clasificación de Señales MUSIC para la localización con PAM (Passive Acoustic Monitoring). Estos temas son de suma relevancia en el trabajo de investigación, ya que lo que haremos es un monitoreo pasivo utilizando técnicas de direccionamiento de señal para poder calcular las coordenadas de la fuente acústica nociva para ecosistemas, a menos en zonas protegidas.



## 1.1. Antecedentes

Para enfrentar las preocupaciones públicas mundiales sobre los efectos potenciales del ruido antropogénico en el medio marino [10 - 14], debe entenderse el impacto que la energía acústica puede tener en el medio acuático, especialmente en los mamíferos marinos, ya que ellos presentan una estructura imprescindible para su forma de vida, *el melón*, éste estructuralmente forma parte del aparato nasal y comprende la mayor parte del tejido entre el espiráculo y la punta de la nariz. Este órgano ovoide que se encuentra en la región facial de los odontocetos es utilizado para la ecolocalización. Éstos animales son capaces de detectar señales a considerables distancias y tiene efectos irreversibles de comportamiento y traumatismo, este hecho es conocido ampliamente por políticos y militares. Sin embargo, a lo contrario esperado por las autoridades, el Servicio de Pesca otorgó permiso a la Marina para matar o dañar 27 especies en Pacific Training el 11 de agosto de 2010 [14].

La Marina de los EE. UU obtuvo el visto bueno del Servicio Nacional de Pesca Marina para dañar hasta 27 especies diferentes del Océano Pacífico durante sus ejercicios de entrenamiento programados cerca de las Islas Marianas. La autorización incluye matar hasta 10 ballenas picudas en los próximos cinco años.



**Figura 1. Marsopa con oídos reventados y daño cerebral por traumatismo acústico [16].**

En la Figura 1 se muestra el daño cerebral y daño en el aparato auditivo causado por impacto en una marsopa común (*Phocoena phocoena*) por ejercicios de sonar naval.

Los ejercicios de entrenamiento se ocupan de la guerra antisubmarina e incluyen el uso de sonares de media y alta frecuencia y la detonación de explosivos. Numerosos estudios sobre zifios o la ballena Cuvier (*Ziphius cavirostris*) existen debido a que ésta es comúnmente encontrada en lugares de varamiento a causa de sonar [15].

Por otra parte, la población de ballenas asesinas (*Orcinus orca*) involucrada en el incidente del USS Shoup ha sido incluida en la lista de especies en peligro bajo la Ley Federal de Especies en Peligro de Extinción [17], lo que aumenta la importancia de establecer pautas seguras para las operaciones de sonar en el hábitat de las orcas, los zifios, marsopas y cachalotes por decir algunos enlistados en vías de extinción por traumatismo acústico.

Es por ello que el monitoreo acústico pasivo para detectar cetáceos, objetos, señales, explosivos sonar naval es por medio de la triangulación utilizando algoritmos de monitoreo de señales acústicas para mitigar el impacto intransigente por parte de los gobiernos en la contaminación acústica. Múltiples estudios demuestran que no es suficiente el intento de mitigación por parte de la marina, por lo que el monitoreo de señales debe ser controlado por medio de sistemas pasivos (insonoros). A continuación, se revisan diferentes algoritmos utilizando sonar pasivo para determinación de fuente emisora acústica.

### **1.1.1. Monitoreo de señales acústicas.**

Los avances tecnológicos y el desarrollo de software para facilitar análisis en el campo práctico de la ingeniería, conlleva a la creación de algoritmos como una herramienta importante para la detección y localización.

Para esto se lleva a cabo la identificación de un segmento de tiempo en el que ocurre un evento de interés. Esto puede hacerse manualmente obteniendo muestreo de señales grabadas con un arreglo de micrófonos para su análisis en función de cálculo de atrasos en el tiempo.

En un sentido muy general, los algoritmos DSP (Digital Signal Processing) utilizados en el sonar son similares a los empleados también en radar o telecomunicaciones. Algunos de los algoritmos implementados rutinariamente en sistemas de sonar pasivo utilizan principalmente las operaciones de vector lineales y no lineales.

Se deben proporcionar varios procesos de detección diferentes activados simultáneamente para asegurar más alta probabilidad de detectar una variedad de objetivos. Por lo general, para un sistema pasivo, se requiere audio de banda ancha, detección de energía, análisis espectral de banda estrecha, etc. Ejecutándose simultáneamente para una detección, clasificación y seguimiento fiable de objetivos, y esto conduce a sistemas con requisitos de rendimiento global

al menos comparables, y con frecuencia muy superiores, a los utilizados en otras aplicaciones de procesamiento de señales digitales.

En aplicaciones más realistas de áreas más grandes, estas cifras se inician en órdenes de magnitud y se necesita un aumento significativo en la sofisticación de algoritmos para las aplicaciones de próxima generación si el rendimiento del sonar va a la par con las mejoras percibidas en la capacidad de amenaza.

### **1.1.2. Localización y seguimiento con PAM.**

La capacidad de localizar y rastrear animales usando monitoreo acústico pasivo en el espacio es una función importante de PAM (Passive Acoustic Monitoring), ya que permite el análisis de comportamiento también por medios acústicos. Las técnicas bien conocidas para la estimación del rango pasivo son multi-hidrofónicos, triangulación, multi-trayectoria y formación de haces. El seguimiento desempeña un papel importante si uno no sólo trata de localizar cetáceos acústicamente activos, sino que también intenta entender su comportamiento. Para esto, es necesario determinar continuamente la ubicación de cada animal, es decir, rastrear a los individuos. La localización de fuentes de sonido requiere múltiples mediciones independientes. Estas mediciones pueden provenir de múltiples sensores que cubren grandes áreas y por lo tanto son adecuados para rangos de múltiples hidrófonos, o se basan en medidas cualitativamente diferentes, por ejemplo: la demora de tiempo de múltiples trayectorias y la estimación de ángulo de llegada, tal como se utiliza en la triangulación y el rango de trayectoria múltiple. En general, se puede decir que, para cualquier parámetro desconocido, por ejemplo: Rango, profundidad, rodamiento, se necesita al menos una medición independiente. Las mediciones múltiples, sin embargo, pueden o no ser independientes; Dependiendo de la geometría de los micrófonos en relación con el objeto acústicamente activo, los hidrófonos estrechamente espaciados tienden a proporcionar mediciones altamente dependientes y correlacionadas.

La implementación de cualquier sistema PAM depende en gran medida de los detalles de su funcionamiento. Hasta ahora, el monitoreo de la vida silvestre se ha hecho en gran medida por medio de la observación visual; En consecuencia, aún queda trabajo por hacer para desarrollar una teoría o metodología apropiada que sea específica para la acústica pasiva. La mayoría de

las actividades de PAM tratan de adaptar sus resultados a las técnicas de análisis estándar que han demostrado ser exitosas en el monitoreo visual. Puede ser que esto es todo lo que se requiere, por otro lado, sólo unas pocas actividades acústicas pasivas han sido analizadas con éxito con tales herramientas estándar [18]. Por lo tanto, intentamos abordar algunos métodos estándar sugeridos para aplicaciones PAM y las dificultades que uno puede encontrar durante el análisis de datos.

### 1.1.3. Aplicaciones de la monitorización acústica pasiva.

**La estimación de la abundancia:** Es una aplicación estándar en la ecología animal, en la que se intenta estimar el número total de animales en una zona determinada, o de forma equivalente para obtener una estimación de la densidad de las especies de interés. En general, definimos la densidad de una especie dividiendo el número de individuos por el área que ocupan.

Esta estimación de la densidad es muy general y puede requerir cierta adaptación con respecto al tipo de recopilación de datos. Sin embargo, primero consideremos la probabilidad de detectar un animal de una manera más abstracta para facilitar las modificaciones específicas de la investigación.

**Transecto<sup>1</sup> de rastreos:** Durante un transecto de línea el observador se mueve a través de un área de interés, cubriendo una franja de longitud total  $L$  y ancho  $2w$ , es decir, midiendo un área total. En los casos en los que el PAM puede expresarse en función de la distancia desde la línea del transecto, podemos escribir la probabilidad incondicional de detectar un objeto dentro del ancho de la banda.

Durante los llamados transectos puntuales, el observador no se mueve, sino que intenta detectar los objetos que rodean su posición fija, es decir, el área  $A$  se expresa como un disco con radio  $w$  alrededor del observador y  $A = \frac{1}{4} \pi w^2$ .

Como alternativa al recuento de las emisiones acústicas individuales y relacionando el recuento resultante con el número de animales, se podría intentar contar las actividades acústicas.

<sup>1</sup> En ecología un **transecto** es una técnica de observación y registro de datos. Donde hay una transición clara – o supuesta – de la flora y la fauna o de parámetros ambientales, se hace un estudio detallado a lo largo de una línea (real o imaginaria, que se denomina **transecto**) que cruce a través de la zona.

Por ejemplo, sabiendo que los odontocetos que bucean en profundidad se ecolocalizan principalmente durante las inmersiones de búsqueda de alimento profundo, podríamos considerar la estimación de la abundancia, detección acústica de una inmersión de forrajeo como señal de la presencia de una ballena. Esto equivaldría a contar sólo los golpes de suerte característicos de los cachalotes para la estimación de la abundancia, y no los golpes individuales.

**Estimación de la densidad de objetos agrupados:** Como la detección de grandes grupos de animales es a veces más fácil que la detección de un individuo aislado, cabe esperar que la función de detección más adecuada para los animales agrupados sea diferente de la función utilizada para los individuos. En particular, cabe esperar que las grandes poblaciones puedan ser detectadas a distancias mayores que las pequeñas o los individuos.

**Mitigación o estimación de ausencias:** La estimación de la ausencia de cetáceos es una pregunta típica para la mitigación de riesgos, donde se quiere minimizar el impacto de la actividad antropogénica sobre las ballenas y los delfines. Durante los estudios que tienen como objetivo las estimaciones de abundancia, se cubre alguna área en un momento dado, se cuentan los animales detectados y se estima la población  $N$  o densidad  $D$ . Cuanto mejor se diseñe el estudio, más preciso será el resultado. Sin embargo, la estimación de absentismo se enfrenta al siguiente problema. Si inspeccionamos un área durante un tiempo determinado y encontramos un animal, entonces sabemos que hay al menos un animal en el área. Sin embargo, si no detectamos un animal, no podemos concluir que no haya ningún animal en la zona. Es posible que no hayamos observado el tiempo suficiente para ver al animal. Esto se debe principalmente a que los animales pueden no ser detectados todo el tiempo.

**Análisis de hábitat y comportamiento:** Mientras que la estimación de abundancia y ausencia apunta a un solo número (abundancia, densidad, o probabilidad de ausencia), la investigación reciente de cetáceos apunta a entender por qué se detectan ballenas y delfines en ciertos lugares, pero no en otras partes del mundo. En este sentido, el análisis del hábitat se basa en la observación empírica de que los cetáceos no están distribuidos uniformemente en todo el mundo, pero su distribución muestra heterogeneidad espacial y temporal [18].

**Acústica y análisis de hábitat:** Dado que existe una relación entre la actividad acústica y el comportamiento de los animales, la acústica puede desempeñar un papel importante en el

establecimiento del estado de comportamiento de los animales en relación con la selección del hábitat. El uso de la acústica para diferenciar entre búsqueda de alimento y socialización es sencillo para la mayoría de las especies, especialmente para los **odontocetos**<sup>2</sup> [18], ya que la actividad acústica durante la búsqueda de alimento (clicks de ecolocalización) se diferencia fácilmente de los sonidos sociales (silbidos, clicks estereotipados, etc.)

**Monitoreo de especies raras y escurridizas:** En la mayoría de los métodos de encuesta, el análisis estadístico juega un papel importante en la inferencia de la presencia de objetos perdidos. Este puede ser el caso cuando el área habitada por la especie de interés es demasiado grande para ser inspeccionada completamente, o cuando la especie no está disponible para ser detectada (una ballena silenciosa no puede ser detectada escuchando), o cuando la detección del sistema de monitoreo no es perfecta cuando es pasiva.

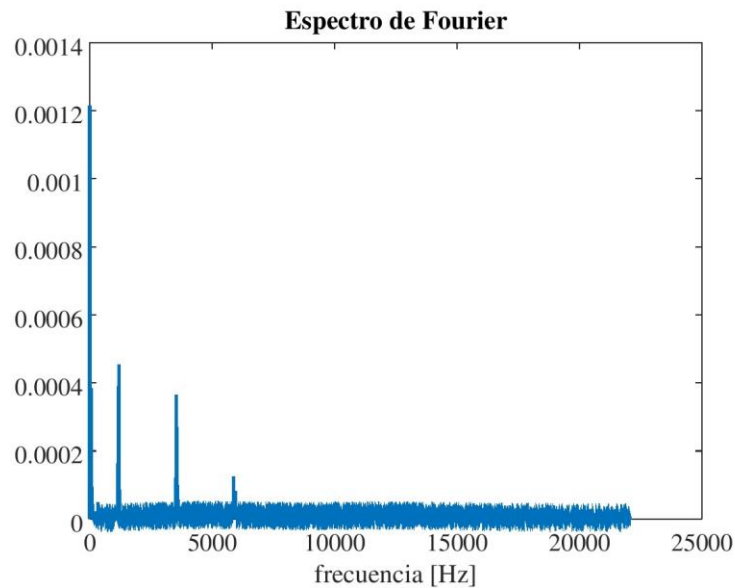
#### **1.1.4. Bioacústica y FFT (Fast Fourier Transform).**

La investigación bioacústica es necesaria para identificar el lenguaje de comunicación (comunicación acústica) en mamíferos. La bioacústica estudia el rango de frecuencias de los sonidos producidos por mamíferos, la intensidad de la amplitud del sonido, la fluctuación de la voz y la forma de los patrones de sonido de los mamíferos [60]. Aprender bioacústica es inseparable de la ciencia de la acústica submarina, la biología de los mamíferos en general y el estudio de su comportamiento. Generalmente la bioacústica incluye la fisiología de órganos de mamíferos que producen sonido, el mecanismo de ganancias de voz, las características de sonido, el mecanismo de enfoque de sonido por mamíferos, la capacidad auditiva de peces y la evolución del sistema auditivo, y para obtener el rango de frecuencia de cada sonido producido por los cetáceos. Las condiciones y los parámetros ambientales (salinidad y temperatura) afectarán en gran medida el valor de la intensidad y la frecuencia generadas por el objetivo, mientras más extremo sea el entorno, seguramente disminuirá el valor de la intensidad y frecuencia generada y para obtener el rango de frecuencia de cada sonido producido por los cetáceos.

<sup>2</sup> **Odontoceto** es un cetáceo con dientes en lugar de barbas como sucede con los misticetos como la ballena azul. (*Odontoceti*) son delfines, narvales, orcas, cachalotes etc.

Para obtener esto se utiliza el dominio de la frecuencia con FFT, que es la transformada rápida de Fourier. Sin embargo, aunque fue parte de la idea inicial en este proyecto queda como trabajo futuro del mismo, para así poder reconocer a las fuentes emisoras, si es un sonar naval, explotación petrolera o cetáceos.

Como parte del experimento se obtuvo el espectro de Fourier de las señales que corresponden al pulso de sonar citado durante este trabajo. Los resultados son los siguientes en la Figura 2:



**Figura 2. Espectro de Fourier del pulso de sonar.**

Este sería el patrón a detectar de un sonar naval con herramientas de análisis espectral.

## 1.2. Planteamiento del problema

En el océano, se han detectado varias causas de impacto ambiental y alta tasa de mortalidad en la vida marina y subacuática debido a los efectos antropogénicos, con consecuencias verdaderamente catastróficas.

Diversos estudios oceanográficos y bioacústicos han demostrado el constante ecocidio ignorado en los últimos casi 100 años, proyectos de sonar pasivo recientemente propuestos que pueden detectar diferentes especies de cetáceos y, a su vez, la comunicación entre ellos para determinar su reacción al sonar y la explotación del petróleo submarino. En este proyecto de

investigación, se utilizaron los principios del sonar pasivo con diferentes receptores, utilizando algoritmos de triangulación y detección que son capaces de determinar la fuente de la señal y su posición.

### **1.3. Justificación del problema**

Según la NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica) hubo más de 12 millones de muertes de ballenas, delfines, marsopas, leones marinos y focas en todo el Océano Pacífico Norte en 5 años (2011-2016) [19] por parte de la Marina de los EE. UU., uno de los países con mayor uso de sonar, que desde su invención en 1919 ha perfeccionado su capacidad alcanzando los 249 dB en la actualidad, tomando como ejemplo a la bomba atómica que llegó a una potencia de 200 dB se puede dar una idea de las exorbitantes consecuencias de un sonar activo en el océano, ya que no sólo los mamíferos marinos se ven afectados; un pulso de sonar activo tiene la capacidad de llegar a 11004 metros de profundidad [20], y expandir la onda acústica a 330 km a la redonda, lo que termina con innumerables bajas de especies animales, desde huevecillos y larvas hasta la zona abisal (4000 a 6000 metros de profundidad) donde la mayoría de las especies son aún desconocidas por el hombre.

En el presente proyecto se plantea el objetivo de diseñar un sonar pasivo que sea capaz de reconocer las coordenadas de la fuente de señales nocivas para cetáceos (sonar activo) el sistema puede ser capaz de prevenir nuevas catástrofes ecológicas, al menos en áreas protegidas si se aplica como una red de monitoreo. El diseño electrónico con tarjetas de desarrollo experimental fue de gran ayuda debido a la simultaneidad de grabación en su arreglo de ocho micrófonos separados y fijos radialmente por la misma distancia. Hasta el momento se realizó en aire y no en agua debido al ecosistema donde se encuentra, sin embargo, el principio de sonar es el mismo, el cambio significativo que se toma en cuenta para ello es la ganancia de propagación que se obtiene al cambiar de estado gaseoso a acuático que es mayor.



## **1.4. Pregunta de Investigación**

¿Es posible determinar coordenadas cartesianas (x, y, z) y polares (Azimuth y elevación) de una fuente emisora de sonido utilizando tecnología de monitoreo acústico pasivo por medio de un arreglo de micrófonos Matrix Creator y obtener un error menor a 5° o +/-5cm?

## **1.5. Objetivo General**

Realizar un sonar pasivo que permita conocer la posición u origen de una fuente emisora utilizando técnicas de Monitoreo acústico pasivo TDOA y DOA.

## **1.6. Objetivos Particulares**

- Uso y programación de un arreglo de micrófonos en distintas posiciones en un espacio delimitado y controlado.
- Diseño y uso de algoritmos de correlación y triangulación para determinar las coordenadas de la fuente de acústica.

## **1.7. Hipótesis**

El sonar pasivo usando Matrix Creator puede determinar la orientación del sonido, proporcionando las coordenadas cartesianas y polares buscando minimizar el error a 5°.

## **1.8. Alcance**

Al realizarse el proyecto en Zacatecas se limitó el sonar pasivo en ambiente terrestre con una temperatura de aproximadamente 22°C, sin embargo, el cambio relevante a causa de la diferencia del medio de un sonar submarino a uno terrestre es la velocidad del sonido, en aire +/- 340m/s y en agua +/- 1500m/s.

El arreglo de micrófonos propuesto (Matrix Creator) se utilizó por su ventaja de simultaneidad y geometría en su arreglo de micrófonos, pero utilizando este dispositivo no podría ser utilizado en agua debido a su configuración electrónica, esto tampoco es relevante porque existen hidrófonos en el mercado desde hace varios años y estos pueden ser utilizados para realizar la localización de fuentes no deseadas. En trabajo futuro se pretende la detección del emisor por medio de análisis espectral ya que el objetivo de esta propuesta es establecer el diseño de un sistema capaz de prevenir nuevas catástrofes ecológicas, al menos en áreas protegidas.

## **1.9. Descripción del resto del documento y trabajo futuro**

En el Capítulo 2 se brinda una breve descripción matemática de la extracción de datos en función de tiempo discretizado, donde la importancia radica en medir los grados de semejanza mínimos y máximos con lo que obtiene una mejor relación señal ruido. El retraso en ( $t$ ) indica la dirección de arribo de una señal, es decir la fuente de interés, que en este caso será la simulación de un pulso de sonar naval con una duración de  $0.2s$  por pulso, sin embargo se utilizan tan solo los primeros  $0.05s$  de una señal para tenerla “pura” y minimizar el error obtener la posición de la fuente de arribo como los seres vivos lo hacemos por órganos sensoriales como los oídos y los ocelos falsos en insectos y apéndices en acuáticos nerviosos de captación de onda.

En el 3er Capítulo se da a conocer las herramientas con las que fue creado el sistema para el análisis, así como también la posición de los mismos para lograr la triangulación deseada

En el 4to Capítulo hablaremos de lo experimentado para obtener las coordenadas polares, ángulos de azimuth y elevación con algoritmo MUSIC en una y dos dimensiones.

En el 5to Capítulo encontramos el modelo geométrico del experimento y el modelo de programación no lineal usando algoritmos específicos para la resolución de modelos no lineales, perteneciente a la categoría de algoritmos generales de descenso, donde la búsqueda de un mínimo está asociada con la resolución secuencial de una serie de problemas tridimensionales que tienen que correlacionarse entre sí para lograr una solución al considerar un punto inicial, escoger una dirección de descenso, para la optimización de modelos de programación no lineal utilizada.

En el Capítulo 6 se abordan los resultados imágenes de simulación de algoritmos, así como tablas que contienen la comparación entre las mediciones reales físicas y las mediciones estimadas con el algoritmo, así como una breve explicación de porqué se obtienen esos resultados.

Finalmente, en el Capítulo 7 se abordaron las conclusiones hasta el momento, incluyendo trabajo futuro.

# Capítulo 2. Conceptos Teóricos del Posicionamiento Acústico

## 2.1 Posicionamiento de Sensores y Fuentes de Señales Acústicas

Para el posicionamiento en una sala se miden los tiempos de llegada o la diferencia de tiempo de llegada de las señales a los sensores. Esas señales pueden llegar de forma directa o por medio de reflexiones. Esas reflexiones producen unos nuevos caminos para que las señales lleguen a los micrófonos. La suma de todos los caminos posibles se denomina multicamino. Y es bastante influyente el efecto del multicamino de la señal recibida, en los micrófonos también es aún más relevante. Por lo que es necesario tenerlo en cuenta para el posicionamiento y el análisis acústico [21].

La Figura 3 muestra la triangulación analizada por retardos, en los humanos, nos otorga la capacidad de orientación espacial para situar la fuente de sonido gracias a nuestro aparato auditivo este capítulo se dedica a la búsqueda de retardo de tiempo entre el arreglo A a la fuente con respecto al retardo B a la fuente, utilizando uno o más arreglos de micrófonos.

### 2.1.1 Posicionamiento Mediante un Ángulo Azimutal.

Para calcular el ángulo Azimutal es necesario contemplar tres características:

1. Referencia: Punto desde dónde se mide.
2. Amplitud: La magnitud medida del ángulo.
3. Sentido: A partir de la línea de referencia.

El azimut es el ángulo medido en sentido de rotación de las agujas de un reloj alrededor del espacio u horizonte según la posición del observador [22].

Por ejemplo, un objeto que se halla al Norte tiene un azimut de  $0^\circ$ , uno al Este  $90^\circ$ , uno al Sur  $180^\circ$  y al Oeste  $270^\circ$ .

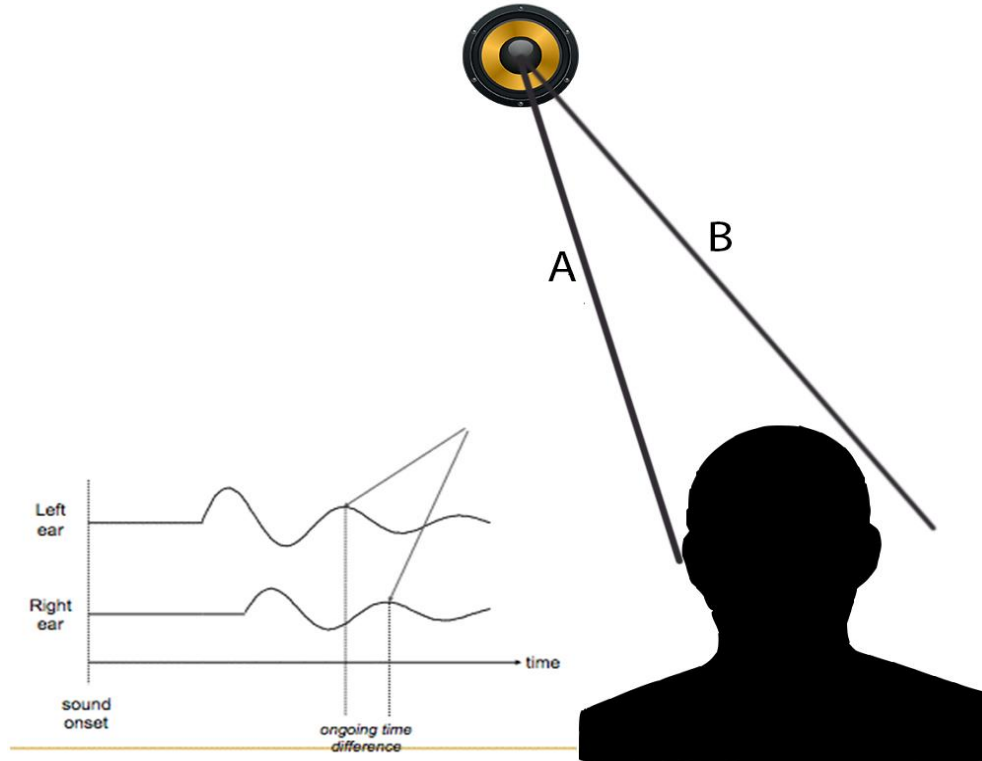


Figura 3. Orientación dimensional y angular humana simula los resultados del algoritmo [23].

### 2.1.2 Posicionamiento en 3D

Los métodos de *pseudo-espectros* o imágenes de una señal para la localización de fuentes de sonido utilizan arreglos de micrófonos. La calidad de los resultados está fuertemente influenciada por una determinación precisa de las posiciones de los micrófonos del arreglo. Para asegurar la precisión requerida en la determinación de coordenadas es únicamente por medio de un diseño de orientación exacta y la determinación del sensor geométrico que se coordina con los métodos clásicos que son una tarea que consume tiempo y a menudo no es aplicable en el campo.

Para la estimación se necesita la precisión en las posiciones y propone un algoritmo que pueda determinar las posiciones de origen desconocidas, así como el sensor desconocido en

posiciones simultáneamente. No hay necesidad de altavoces de referencia en este método, por lo que es útil para diseños de matriz flexible y su rápida calibración en el campo.

En principio es preciso generar una señal, esto se explica más adelante. Obteniendo datos de la señal generada por una fuente emisora fue posible hacer cálculos de estimación de tiempo de retardo y para poder obtener posteriormente con esos datos la estimación de distancias y dirección de llegada.

## 2.2 Técnicas de posicionamiento

### 2.2.1 Tiempo de Llegada (ToA)

Uno del método utilizados para determinar la posición de una fuente sonora es ToA (Time of Arrival) [21] que se basa en conocer la hora exacta en la que se envía una señal de interés a un punto donde se encuentra un micrófono, la señal viaja a la velocidad del sonido. Una vez que este parámetro es conocido la distancia entre la fuente emisora y el micrófono es calculado mediante la ecuación:

$$d = c (t_{llegada} - t_{envío}). \quad (1)$$

Donde:  $c$  es la velocidad a la que la señal viajó según el medio de propagación. Usando esta distancia, el conjunto de posibles ubicaciones del micrófono puede ser determinado mediante la siguiente ecuación:

$$d = \sqrt{(x_{ref} - x)^2 + (y_{ref} - y)^2}. \quad (2)$$

Donde:  $(x_{ref}, y_{ref})$  es la posición conocida de la fuente emisora, y  $(x, y)$  es la posición del micrófono a determinar. Una vez que se calcula este conjunto para suficientes puntos de emisión (al menos tres para dos dimensiones o al menos cuatro para tridimensional), la posición exacta del objetivo se puede calcular encontrando la intersección.

## 2.2.2 Diferencia de Tiempo de Llegada (TDOA)

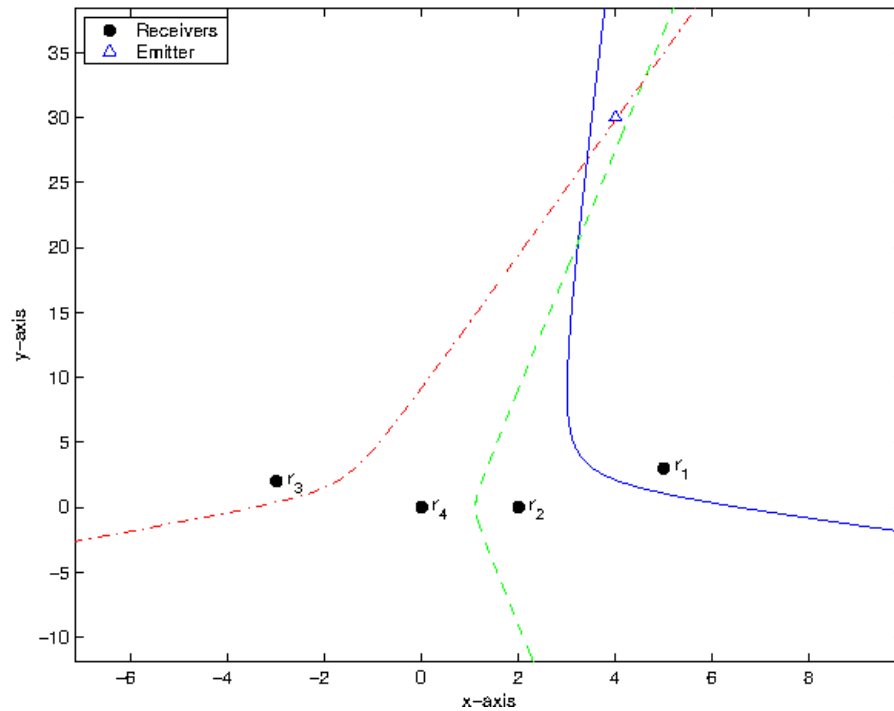
La diferencia de tiempo de llegada (TDOA) es la segunda técnica de medición más popular, y es algo más versátil que TOA. Este método no requiere el tiempo que la señal fue enviada desde el objetivo, solo el tiempo en el que se recibió la señal y la velocidad a la que la señal viaja. Una vez que la señal se recibe en dos puntos de referencia, la diferencia en el tiempo de llegada puede ser utilizado para calcular la diferencia en distancias entre el objetivo y los dos puntos de referencia. Esta la diferencia se puede calcular usando la ecuación:

$$\Delta d = c(\Delta t). \quad (3)$$

Donde  $c$  es la velocidad de la señal y  $\Delta t$  es la diferencia en tiempo de llegada en cada punto de referencia. En dos dimensiones, esto conduce a la siguiente ecuación:

$$\Delta d = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2}. \quad (4)$$

Donde  $(x_1, y_1)$  y  $(x_2, y_2)$  son las posiciones conocidas de los micrófonos en dos dimensiones. Usando regresión no lineal, esta ecuación se puede convertir a la forma de una hipérbola. Una vez que suficientes hipérbolas han sido calculadas, la posición del objetivo se puede calcular encontrando la intersección.



**Figura 4. Configuración de geolocalización TDOA [20]**

En la Figura 4 se puede observar un análisis simulado donde una fuente emisora se encuentra en el punto de intersección entre cuatro micrófonos  $r$  [20]. Sin embargo, existe una desventaja en la línea de visión, ya que tanto las mediciones TOA como TDOA se basan en la suposición de que la señal que viaja desde la fuente emisora hasta el micrófono a lo largo de la trayectoria más corta o línea de visión. Cuando esta ruta está bloqueada, la señal llegará a lo largo de una ruta más larga, lo que resulta en un momento posterior y en una ubicación incorrecta del objetivo. Este problema es frecuente en los sistemas de navegación. Por ejemplo, los sistemas GPS pierden señal en túneles y áreas urbanas densas, mientras que los sistemas de posicionamiento en interiores a menudo pierden señal debido a paredes, muebles o personas. En el sistema de ubicación pasiva TDOA, las combinaciones falsas de TDOA que se presentan se ordenan, para extraer la combinación correcta de TDOA de las situaciones en la fuente emisora [21].



### **2.2.3 Dirección de Llegada (DOA)**

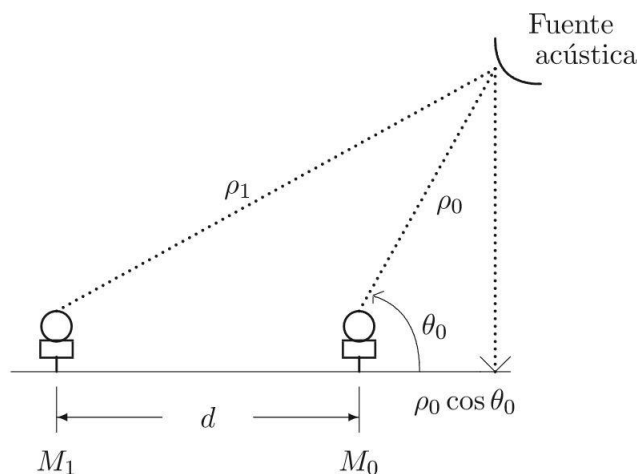
La tercera técnica es la estimación de la dirección de llegada (DOA) que es la base para la localización de objetivos subacuáticos y de rastreo usando dispositivos de sonar remolcados [23]. La estimación DOA es la figura prominente en el campo del procesamiento de señales de arreglo (Array Signal Processing) aplicado en radares, sonares, sísmica y sistemas de comunicación. Pueden extraerse varios tipos de información de una onda entrante que incide en el conjunto de antenas, que son las señales acopladas en diferentes puntos del espacio [24]. Hay dos tipos de datos involucrados, uno son los datos de entrenamiento a partir de los cuales se calculan las ponderaciones adaptativas y el otro son los datos primarios de los cuales se puede extraer varios tipos de información como la detección y la estimación de parámetros (ángulo, rango, estimación Doppler), incluyendo su dirección de llegada (DOA) [25]. Hay muchas aplicaciones en las que la estimación precisa de la dirección de llegada de una señal (DOA) es de particular interés. Los métodos DOA pueden utilizarse para diseñar y adaptar la directividad del arreglo de micrófonos; por ejemplo, un arreglo de micrófonos puede diseñarse para aceptar señales de alguna dirección específica, mientras que las señales rechazadas de todas las demás direcciones se declaran como interferencia [26 - 27].

La estimación pasiva de la dirección de un objetivo en la imagenología del sonar, también llamada dirección de llegada (DOA) no necesita transmitir señales y, por lo tanto, garantiza una buena ocultación para la entrega en una plataforma. Estos métodos de estimación utilizan la señal de ruido de la radiación objetivo para determinar la orientación del objetivo. Se ha prestado una atención considerable a la estimación de objetivos subacuáticos realizada por los Departamentos de Agricultura de algunos países, se han hecho esfuerzos a largo plazo tanto en la teoría como en la experimentación.

Los métodos típicos de estimación DOA incluyen los conformadores de haz convencionales [28 - 29] los conformadores de haz de respuesta sin distorsión de varianza mínima (MVDR)[30 - 31] y los conformadores de haz de caracterización de señales múltiples (MUSIC)[32, 33]. El conformador de haz convencional basado en el enfoque de retardo y suma tiene una baja resolución direccional.

La dirección de arribo (DOA) indica la dirección desde la cual generalmente llega una onda de propagación a un punto, donde normalmente se encuentra un conjunto de sensores [34]. Estos

conjuntos de sensores forman lo que se llama un arreglo de micrófonos. A menudo existe la técnica asociada de formación del haz que es la estimación de la señal desde una dirección dada [35]. Para aplicar casi todas las técnicas de formación de haces de matriz en una señal acústica, y dado que no se proporciona la ubicación de la fuente acústica, se necesita una forma de estimar el TDOA entre canales o la Dirección de Llegada (DOA) de la señal. La estimación DOA también se ha considerado menos adecuada que TDOA para señales de banda ancha. Se han propuesto muchas técnicas en el pasado para estimar la TDOA entre un par de sensores, como el uso de filtros adaptativos LMS utilizados en el sonar [36 - 37]. Sin embargo, los enfoques que se han vuelto más populares en los últimos años han sido aquellos basados en la correlación cruzada de las señales. Las operaciones que se pueden realizar con un arreglo de micrófonos, separados espacialmente, son ecuaciones de: realce, localización de fuente, separación de fuentes, entre otras. En el caso de una sola fuente, las operaciones de cambio de fase y suma de las señales de todos los micrófonos dan como resultado una mejora en la relación señal a ruido (SNR) [38]. En los casos de cancelación de fuentes de interferencia, la mejora depende del número de micrófonos en el arreglo. Con esta misma idea se puede usar el arreglo en aplicaciones de localización de fuente, en donde se usa la diferencia de tiempo en la llegada de la señal a cada micrófono, para estimar el ángulo de llegada en el caso de un plano [39]. La dirección de una fuente de sonido se puede obtener estimando el retardo de tiempo de arribo (TDOA) entre dos micrófonos, dando origen a DOA [40].



**Figura 5. Principio para la operación de un arreglo de micrófonos para la estimación del DOA [41].**

En la Figura 4 se muestra que los micrófonos  $m_0$  y  $m_1$  tienen una separación distinta con respecto a la fuente emisora, la distancia entre los micrófonos no debe exceder  $\frac{\lambda}{2}$  [4], así es que  $d_{max} \leq \frac{\lambda}{2}$ , donde  $\lambda$  es la mínima longitud de onda de la señal de sonido, y  $d_{max}$  es la máxima distancia entre los micrófonos, esto significa que el sistema debe obedecer la condición de campo lejano o difracción de Fraunhofer. El DOA desde la fuente hasta el primer micrófono  $m_0$ , está denotado por  $\theta_0$  a una distancia  $\rho_0$ ,  $d$  es la distancia, en metros, entre micrófonos. una distancia  $d$  de los micrófonos, da como resultado un ángulo  $\theta_0$  con respecto a la posición de la fuente emisora en grados, para el arreglo de la Figura 4, se obtiene una  $\theta_0$  con un ángulo de  $\cos \theta_0$ . Entonces,

$$\rho_1 = \sqrt{(\rho_0 \sin \theta_0)^2 + (d + \rho_0 \cos \theta_0)^2}. \quad (5)$$

La ecuación (5) da como resultado la distancia de dirección de la fuente en metros.

El retardo de tiempo de arribo de la señal entre los micrófonos está dado por:

$$\tau = \frac{\rho_1 - \rho_0}{c}. \quad (6)$$

Para estimar el retardo de tiempo es necesario calcular la correlación cruzada entre las señales recibidas en los dos micrófonos dividido entre la velocidad del sonido  $c$ , recordando que en aire es aproximadamente  $340 \text{ m/s}$ .

El índice del punto máximo en la correlación representa el retardo estimado [39].

En la práctica, se requiere medir el retardo  $\tau$  para estimar  $\theta_0$ , es decir el DOA. En la estimación del DOA, las señales recibidas por los micrófonos son versiones retrasadas de la misma señal [41], y ese retardo está en función del ángulo de incidencia y la separación  $d$ .

Si se suponen condiciones de campo lejano, el frente de onda es plano, y la diferencia de tiempo se puede aproximar por:

$$\tau \approx d \cos \theta / c. \quad (7)$$

Es entonces cuando se puede calcular la dirección de arribo DOA, por:

$$\theta = \cos^{-1}(\tau c / d), \text{ con } -\pi / 2 \leq \theta \leq \pi / 2. \quad (8)$$

## 2.2.4 MUSIC algoritmo (Ángulo azimutal).

El algoritmo de Clasificación de Señales Múltiples (MUSIC) fue propuesto por Schmidt y sus colegas en 1979 [42]. Ha creado una nueva era para los algoritmos de estimación del espectro espacial. La promoción del algoritmo de estructura caracterizó el aumento y el desarrollo, y se ha convertido en un algoritmo crucial para el sistema teórico del espectro espacial. Antes de que se presentara este algoritmo, algunos algoritmos relevantes procesaban directamente los datos recibidos de las matrices de covarianza de los arreglos. El enfoque básico de este algoritmo es la descomposición del valor propio de la matriz de covarianza de la señal recibida. Como este algoritmo tiene en cuenta el ruido no correlacionado, la matriz de covarianza generada es de naturaleza diagonal. Aquí la señal y los subespacios de ruido se calculan usando el álgebra de la matriz y se encuentran ortogonales entre sí. Por lo tanto, este algoritmo explota la propiedad de ortogonalidad para aislar los subespacios de señal y ruido [43].

Se pueden utilizar varios algoritmos de estimación para calcular el ángulo de llegada, pero aquí nos centramos en el algoritmo MUSIC más aceptado y ampliamente utilizado. La matriz de covarianza de datos forma la base del algoritmo MUSIC. Para encontrar la dirección de llegada necesitamos buscar a través de toda la matriz vectorial de dirección y luego sacar aquellos vectores de dirección que son exactamente ortogonales. La matriz de covarianza 'RJ' para los datos recibidos 'J' es la expectativa de la matriz con su equivalente hermitiano. La idea básica del algoritmo MUSIC es realizar la descomposición característica para la matriz de covarianza de cualquier dato de salida del arreglo de micrófonos, resultando en una señal subespacial ortogonal con un subespacio de ruido correspondiente a los componentes de la señal. Entonces estos dos subespacios ortogonales se utilizan para constituir una función de espectro, que se obtiene mediante la búsqueda de picos y la detección de señales DOA.

Debido a que el algoritmo MUSIC tiene una alta resolución, precisión y estabilidad bajo ciertas condiciones, atrae a un gran número de estudiosos para llevar a cabo investigaciones y análisis en profundidad. En general, tiene las siguientes ventajas cuando se utiliza para estimar el DOA de una señal.

- 1) La capacidad de medir simultáneamente múltiples señales.
- 2) Medición de alta precisión.
- 3) Alta resolución para señales de haces de antena.

4) Aplicable a circunstancias de datos cortos.

5) Puede lograr un procesamiento en tiempo real después de usar tecnología de procesamiento de alta velocidad.

#### **2.2.4.1 El principio e implementación del algoritmo MUSIC.**

El problema de la localización precisa de múltiples fuentes ha recibido un aumento de atención recientemente [44]. La idea básica es explotar el conocimiento previo sobre el esparcimiento presente en los datos que necesitan ser procesados para aplicaciones en identificación de sistemas, comunicaciones y señales de arreglo. Procesamiento [46] Detección de la compresión [47], que es una rápida área de expansión del procesamiento de la señal moderna se aproxima señales de la vida real por vectores dispersos, dadas algunas señales apropiadas y explotando la estructura de señal dispersa que reduce el coste de adquisición de la señal [45]. Mediante la optimización método descrito en este documento, la señal precisa se logra la reconstrucción. El problema de estimación de la DOA en los conjuntos de antenas ha sido principalmente que se ha limitado a matrices lineales uniformes (ULAs) y a matrices uniformes de matrices circulares (UCAs) [50].

Es importante resaltar que la diferencia entre el cálculo de ULAs y UCAs es al vector de dirección.

Este algoritmo se caracteriza por una serie de descomposición de covarianza, a continuación se da una descripción del método:

Los valores propios de la matriz  $R_x$  se clasifican de acuerdo con el tamaño y para conocer el número de señales incidentes se debe de conocer el número de eigenvalores ya que tienen una relación tal que, si el número de señales es  $D$  el número de eigenvalores y eigenvectores es  $D$  [51]. Y el número de eigenvalores y eigenvectores de ruido es  $M-D$ , donde  $M$  es el número de elementos.

Así el método MUSIC hace uso del subespacio de eigenvectores de ruido y en algunos casos es llamado método del subespacio [52].

La ecuación de autocorrelación del arreglo está dada por:

$$\hat{R}_{xx} = \hat{A} \hat{R}_{ss} \hat{A}^H + \sigma_n^2 \hat{I}. \quad (9)$$

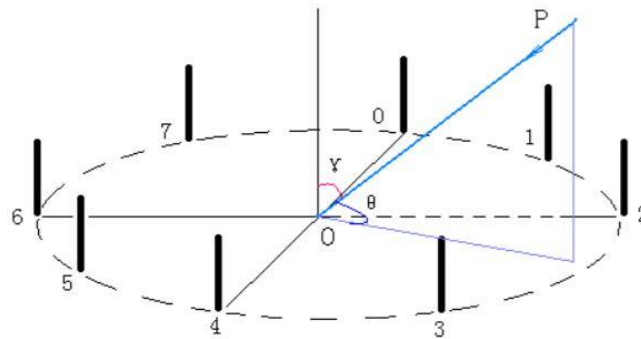
Se procede a encontrar los eigenvalores de ruido para  $\hat{R}_{xx}$ . Para señales no-correlacionadas los eigenvalores más pequeños son igual a la varianza del ruido. Se usan los valores más pequeños porque a este subespacio es el más reducido, lo que se puede traducir en mayor velocidad de procesamiento. Ahora se construye la matriz de  $M \times (M - D)$  con eigenvectores como el siguiente:

$$\bar{E}_N = [\bar{e}_1 \bar{e}_2 \bar{e}_3 \dots \bar{e}_{M-D}]. \quad (10)$$

Esta matriz de eigenvectores es ortogonal al vector de arreglo de direcciones en los ángulos de arribo  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_D$ . Visto en la función de pseudoespectro, es decir, del tiempo, en los ángulos arribo de las señales se producen ceros y esto se puede representar como máximos con la fórmula (11):

$$P_{MUSIC}(\theta) = \frac{1}{|\bar{a}(\theta)^H \bar{E}_N \bar{E}_N^H \bar{a}(\theta)|}. \quad (11)$$

Ese en este punto en el que el vector de direcciones para arreglo circular tiene lugar, pero al principio, consideramos el voltaje inducido de una señal en cada antena. Para simplificar, sólo encontramos el azimut, suponiendo que la elevación de la señal es de  $90^\circ$ .



**Figura 6. Arreglo de ocho micrófonos UCA [50].**

Dejando que la señal en el centro  $O$  del círculo sea  $s(t)$ . Conectando la  $O$  central con el  $i$ -ésimo micrófono y obtenga el valor de  $Oi$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, 7$ ).

El ángulo desde el vector de onda  $P$  a  $O_0$  es  $\theta$ . Marcando  $\theta^i$  como el ángulo de  $P$  a  $O_i$ , luego  $\theta^i = \theta - i \times 45^\circ$ . La diferencia de fase entre la señal recibida por la  $i$ -ésima y  $s(t)$  es:  $\varphi^i = (2\pi d/\lambda) \cos \theta^i$  ( $i=0, 1, \dots, 7$ ), como se muestra en la Figura 6 por lo que la señal recibida por la  $i$ -ésima antena es:

$$x_i(t) = s(t)e^{j\varphi^i} = s(t)e^{j\frac{2\pi d}{\lambda} \cos \theta^i} \quad (i = 0, 1, \dots, 7). \quad (12)$$

En general, supongamos que las señales  $K$  son ondas planas de banda estrecha que son mutuamente independientes, y marca  $\lambda$  la longitud de onda de las  $K$  señales  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K$ .

Las direcciones de  $K$  señales  $\theta_k^i = \theta_k - i \times 45^\circ (k = 1, 2, \dots, K; i = 0, 1, \dots, 7)$ . El ángulo desde  $O_i$  al vector de onda de la  $k$ -ésima señal,

$$\beta_k^i = (2\pi d/\lambda) \cos \theta_k^i \quad (13)$$

La diferencia en fase por la  $k$ -ésima señal entre la señal recibida y la  $i$ -ésima antena y  $s_k(t)$ ,

$$a(\theta_k) = (e^{j\beta_k^0}, e^{j\beta_k^1}, \dots, e^{j\beta_k^7})^T \quad (14)$$

La dirección de  $k$ -ésima señal,

$$A(\theta) = (a(\theta_1), \dots, a(\theta_K)) \quad (15)$$

Es la dirección de la matriz de  $K$  señales,

$$s(t) = (s_1(t), \dots, s_K(t))^T \quad (16)$$

Es la señal del vector de  $K$  señales en el centro  $O$  del círculo,

$$n_i(t) \quad (i = 0, 1, \dots, 7) \quad (17)$$

Es el ruido recibido por la  $i$ -ésima antena,

$$N(t) = (n_0(t), n_1(t), \dots, n_7(t))^T. \quad (18)$$

El vector de ruido recibido por el arreglo,

$$s(t) = a(\theta_1)s_1(t) + \dots + a(\theta_K)s_K(t) + N(t) = A(\theta)s(t) + N(t). \quad (19)$$

Los pasos de MUSIC basados en una matriz circular uniforme (UCA) son los siguientes:

Primero, realizar el registro de un vector de tensión de inducción de la matriz  $x(t)$  [51]; segundo, calcular la matriz de covarianza; tercero, descomponer la matriz de covarianzas basada en el valor propio o *eigenvalor*; cuarto, construcción de la función del espectro espacial o *pseudoespectro*; y finalmente, busque ángulos azimutales a lo largo del espectro espacial y obtenga las direcciones de las señales.

Estos pasos son exactamente los mismos que MUSIC basada en ULAs, por lo que no los relacionaremos más en el capítulo 5.

## 2.3 Función de Correlación Cruzada.

Para obtener un retraso en el tiempo entre dos señales para determinar la posición de una fuente emisora, generalmente se utiliza la correlación cruzada en los métodos de la sección anterior [53]. La correlación mide el grado de semejanza entre dos señales y extrae información según sea relevante.

Para dos señales reales de energía finita  $x(n)$  y  $y(n)$ , en tiempo discreto, la correlación cruzada es la ecuación:

$$R_{xy}(k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)y(n-k) \text{ con } k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm \dots \quad (20)$$

O su equivalente:

$$R_{xy}(k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n+k)y(n), \text{ con } k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm \dots$$

Donde  $k$ , es el desplazamiento, la suma es sobre  $n$  y el resultado es función de  $k$ .

La energía sólo puede estar en valores positivos donde  $R_{xx}(0) = E_x$ ,  $R_{yy}(0) = E_y$

Para el caso de la correlación cruzada, se deben satisfacer estas condiciones:

$$|R_{xy}(k)| \leq \sqrt{R_{xx}(0) + R_{yy}(0)} = \sqrt{E_x E_y}. \quad (21)$$

Donde  $E_x$  es la energía de  $x$  y  $E_y$  la energía de  $y$ .

Para dos señales  $x(n)$  y  $y(n)$ , donde  $y(n)$  es la señal  $x(n)$  recorrida en tiempo y la función de correlación definida como

$$R(k) = x(n)y(n-k) = R_{xy}(k). \quad (22)$$

entonces, el desplazamiento  $\tau$  de  $y(n)$  con respecto a  $x(n)$  está definido como:

$$\tau = \operatorname{argmax}(R(k)). \quad (23)$$



## 2.4 Métodos de Optimización

Existen numerosos libros sobre el tema de la optimización, atribuibles a una serie de razones. En primer lugar, el tema en sí es matemáticamente riguroso y hay una serie de métodos de solución que deben ser examinados y comprendidos. Ningún método de solución único puede aplicarse a todos los tipos de problemas de optimización. Por lo tanto, se requiere una comprensión clara del problema, así como de las técnicas de solución, para obtener una solución adecuada y significativa al problema de optimización. Con el paso del tiempo, los problemas de optimización también se han vuelto complejos. Es necesario no solo obtener la solución óptima global, sino también buscar óptimos locales [54].

### 2.4.1 Método Nelder-Mead.

El método de Nelder-Mead es una técnica de optimización heurística, al igual que los algoritmos genéticos o los enjambres de partículas. La optimización en este contexto se refiere al problema de encontrar un punto ( $s$ ) con el valor óptimo de una función objetivo en un espacio de búsqueda. Óptimo podría significar un valor máximo o mínimo.

Siempre que sea posible, tratamos de resolver un problema de optimización con un método analítico. Por ejemplo, si tiene la definición exacta de  $f(x)$  función diferenciable de  $x$ , puede usar derivadas simples para calcular el valor de  $x$  al cual  $f$  obtiene el valor óptimo. Sin embargo, en muchos problemas del mundo real, no tenemos una idea tan nítida de la función que estamos optimizando [55].

Las técnicas de optimización heurística intentan remediar esto teniendo un grado de aleatoriedad para ellas. Esto significa que el mismo algoritmo se ejecuta con el mismo problema y las mismas condiciones iniciales podrían arrojar resultados diferentes con cada ejecución. Los métodos heurísticos exploran el espacio de búsqueda de forma estocástica y mantienen una nota de los puntos "mejores" aquellos óptimos que encuentran en el camino. Por supuesto, el comportamiento no es totalmente aleatorio, sino que está guiado por un conjunto de reglas.

Lo más importante que debe recordar es que los métodos heurísticos nunca garantizan que encontrarán la solución más óptima. Dan como resultado el mejor punto que encontraron durante su búsqueda, que podría haber sido un óptimo local para todo lo que se sabe.

El método de Nelder-Mead usa una forma geométrica llamada simplex como su "vehículo" para buscar el dominio. Esta es la razón por la cual la técnica también se llama el método de búsqueda Simplex. En términos simples, un símplex es la versión  $n$ -dimensional de un 'triángulo'. Para una dimensión, es una línea, para dos dimensiones, un triángulo y para tres dimensiones un tetraedro.

La forma no tiene que ser simétrica / equilátera de ninguna manera. Tenga en cuenta que un simplex  $n$ -dimensional tiene  $(n + 1)$  vértices.

El algoritmo Nelder-Mead comienza con un simplex generado al azar (discutiremos cómo, más adelante). En cada iteración, procede a remodelar / mover este simplex, *un vértice a la vez*, hacia una región óptima en el espacio de búsqueda [55]. Durante cada paso, básicamente prueba una o algunas modificaciones al símplex actual, y elige uno que lo desplaza hacia una región "mejor" del dominio. En un caso ideal, las últimas iteraciones de este algoritmo involucrarían al simplex encogiéndose hacia el interior hacia el mejor punto dentro de él. Al final, se devuelve el vértice del símplex que produce el valor objetivo más óptimo.

Supongamos que estamos tratando con un espacio  $n$  dimensional. El simplex actual consta de los siguientes  $n + 1$  puntos:  $x_1, x_2, \dots, x_{(n+1)}$ . La función que estamos tratando de optimizar (maximizar) es  $f(x)$ . El algoritmo realiza los siguientes pasos durante cada iteración.

1. Ordenar: Todos los puntos están ordenados, de modo que el valor de  $f$  para el primer punto es el más bajo, y el del último punto es el más alto. Permitiendo que los índices del primero (más bajo), segundo (segundo más bajo) y último (mayor) puntos sean  $h, s, l$  respectivamente.
2. Computando el centroide  $C$ : Considere todos los puntos excepto el peor ( $x_h$ ). Calcule su centroide (media) como la siguiente ecuación:

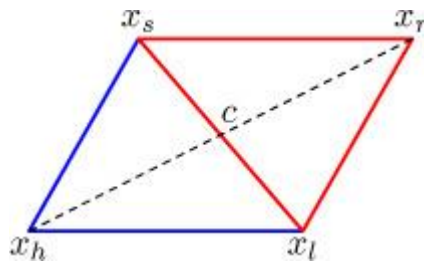
$$C = \frac{1}{n} \sum_{i \neq h} x_i. \quad (24)$$

3. Transformación: Esta es la parte más importante de todo el proceso: transformar el símplex. La transformación se lleva a cabo de una de las siguientes maneras:

- **Reflexión:** Este es el primer tipo de transformación que se prueba y se calcula el punto “reflejado” como:

$$x_r = c + \alpha (c - x_h), \quad (25)$$

donde  $\alpha$  se llama parámetro de reflexión, y generalmente es igual a 1.  $x_r$  es esencialmente un punto en la línea que une  $x_h$ , pero está ubicado lejos de  $x_h$ . Esto se hace en un intento de mover el simplex en una dirección que está lejos de la región como se muestra en la Figura 7 subóptima a su alrededor  $x_h$ . Para un problema en 2-D, aquí está el reflejo:



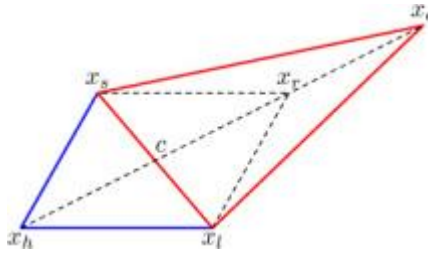
**Figura 7. Problema en 2 dimensiones, donde se muestra el reflejo triangular [55].**

Ahora, si  $f(x_s) < f(x_r) \leq f(x_l)$ , es decir,  $x_r$  es mayor que el segundo punto menor, pero no mayor que el mayor actual, simplemente reemplazamos  $x_h$  con  $x_r$  en el simplex, y pasamos a la siguiente iteración.

- **Expansión:** Si nuestra suerte es buena y el punto reflejado  $x_r$  es mejor que el mejor ( $f(x_r) > f(x_l)$ ) actual, tratamos de explorar más la posibilidad como se muestra en la Figura 8. En otras palabras, nos movemos un poco más en la dirección de  $x_r$  a partir  $c$ , con la esperanza de encontrar una mejor solución de  $r$ . El punto expandido se define como:

$$x_e = c + \gamma (x_r - c). \quad (26)$$

Donde:  $\gamma$  se llama parámetro de expansión, y su valor en la mayoría de las implementaciones es 2. Aquí está lo que parece la Expansión dos dimensiones como se muestra en la Figura 8:



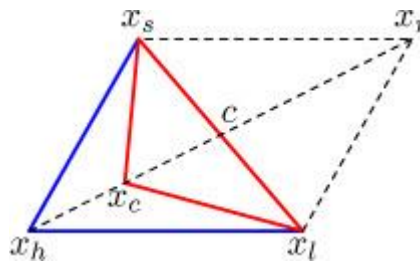
**Figura 8. Expansión en 2-D [55].**

Luego reemplazamos  $x_h$  con el mejor de los dos puntos:  $x_e$  y  $x_r$  en el símplex. Esto se llama “optimización codiciosa” hemos reemplazado el peor punto con la mejor de las dos opciones que teníamos. Hay otra variante llamada “expansión codiciosa”, que reemplaza  $x_h$  con  $x_e$ , siempre y cuando  $f(x_e) > f(x_l)$ . Esto se hace independientemente de si  $x_e$  es mejor o no  $x_r$ . La intuición para esto, proviene del hecho de que Expansión siempre conduce a un símplex más grande, lo que significa una mayor exploración del espacio de búsqueda.

- **Contracción:** Supongamos que nuestro punto de reflexión fuera peor que  $x_s$  (es decir, el segundo punto menor). En ese caso, debemos darnos cuenta de que la dirección definida por  $x_r$  puede no ser la ideal para moverse. Por lo tanto, terminamos contrayendo nuestro símplex. Donde el punto de contracción se define como:

$$x_c = C + \beta(x_h - C), \quad (27)$$

donde  $\beta$  se llama el parámetro de contracción, y generalmente es igual a 0.5. En esencia, tratamos de ir en contra de nuestra exploración con la que lo intentamos  $x_r$ , en lugar de contraer el símplex “hacia adentro”. Una contracción 2-D se ve así como en la Figura 9:



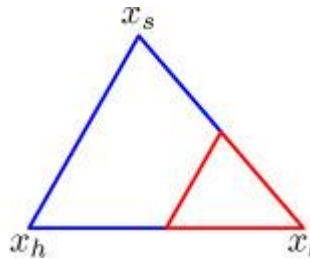
**Figura 9. Una contracción en 2 dimensiones [55].**

Si  $f(x_c) > f(x_h)$ , lo que significa que el punto contraído es mejor que el actual peor como se muestra en la Figura 8, entonces reemplazamos  $x_h$  con  $x_c$  en el símplex. Sin embargo, si este no es el caso, entonces vamos a nuestro último recurso: la contracción de contracción.

- **Reducir la contracción:** En este caso, redefinimos todo el símplex. Sólo conservamos el punto mayor ( $x_l$ ) y definimos todos los demás con respecto a él y los puntos anteriores. El nuevo punto  $j$ , ahora se definirá como:

$$x_j = x_l + \delta(x_j - x_l), \quad (28)$$

donde  $\delta$  se llama el parámetro de contracción, y es igual a 0.5 en la mayoría de las implementaciones. Lo que básicamente estamos haciendo con la definición anterior, es mover cada punto en el símplex hacia el mayor punto actual, con la esperanza de converger en el mejor vecino. Una transformación en 2-D se ve así:



**Figura 10. “Transformación retráctil” en 2 dimensiones [55].**

Es importante notar que esta transformación es la más costosa de todas las transformaciones como se muestra en la Figura 10, ya que tenemos que reemplazar múltiples (todos menos uno) puntos en el símplex. Sin embargo, se ha encontrado (después de múltiples experimentos) que la transformación de contracción rara vez ocurre en la práctica. Como resultado, muchas implementaciones de Nelder-Mead simplemente omiten este paso, haciendo la contracción en su lugar.

- **Terminación:** La terminación generalmente se alcanza cuando, i) Se cumple cuando un número dado de iteraciones, ii) El símplex alcanza un límite mínimo de “tamaño”, iii) La mejor solución actual alcanza algún límite favorable.

Por otra parte, está el simplex inicial que como en el caso de la mayoría de las técnicas heurísticas, no existe la "mejor" forma de realizar la inicialización aleatoria para la búsqueda

Simplex. Sin embargo, aquí hay uno que funciona bien (se usa en la implementación de OCTAVE de Nelder-Mead):

El punto inicial  $x_1$ , es proporcionado por el usuario si tiene alguna idea sobre una posible buena solución. Si no, se toma como un punto aleatorio. Esto se llama el vértice “adivinar”. Ahora, recordando que se tienen  $n$  dimensiones, y necesitamos  $(n + 1)$  puntos, de los cuales  $1$  ya se ha decidido. Los otros puntos finales se inicializan con respecto a  $x_1$ , a una pequeña distancia a lo largo de la dirección de cada dimensión.

El  $(i + 1)$  el punto  $x_{(i + 1)}$ , como se define utilizando el y/o vector unitario de la dimensión  $u_i$ , está dado por:

$$x_{(i+1)} = x_1 + h(x_1, i) * u_i. \quad (29)$$

Donde  $h(x_1, i) = 0.05$  si el coeficiente de  $u_i$  en definición de  $x_1$  es distinto de cero.

Donde  $h(x_1, i) = 0.00025$  si el coeficiente de  $u_i$  en la definición  $x_1$  es cero.

## 2.4.2 Método del gradiente o del descenso pronunciado.

El descenso de gradiente es un algoritmo de optimización iterativa de primer orden, es decir, mediante aproximaciones sucesivas a la solución [56], empezando desde una estimación inicial para encontrar el mínimo de una función. Para encontrar un mínimo local de una función que utiliza el descenso de gradiente, se dan pasos proporcionales al negativo del gradiente (o gradiente aproximado) de la función en el punto actual. Si, en cambio, uno toma pasos proporcionales al positivo del gradiente, uno se aproxima a un máximo local de esa función; el procedimiento se conoce como ascenso de gradiente.

El descenso gradual también se conoce como descenso más pronunciado. Sin embargo, el descenso de gradiente no debe confundirse con el método de descenso más pronunciado para aproximar integrales [54].

Este método utiliza la fórmula recursiva,  $x_f^{n+1} = x_f^n - \gamma \nabla F(x_f^n)$ . (30)

Donde sí:

$$G = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \vdots \\ G_m \end{bmatrix}, \quad (31)$$

y  $F = G^T G$ , entonces,

$$\nabla F(x_f) = J_G(x)^T G(X), \quad (32)$$

$$J_G = \begin{bmatrix} \frac{\partial G_1}{\partial x_s} & \frac{\partial G_1}{\partial y_s} & \frac{\partial G_1}{\partial z_s} \\ \frac{\partial G_2}{\partial x_s} & \frac{\partial G_2}{\partial y_s} & \frac{\partial G_2}{\partial z_s} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial G_m}{\partial x_s} & \frac{\partial G_m}{\partial y_s} & \frac{\partial G_m}{\partial z_s} \end{bmatrix}; \quad (33)$$

y  $m$  es el número de elementos de  $G$  y  $x_f$  para este caso en un vector de tres dimensiones con elementos  $(x_s, y_s, z_s)$  que es la posición de la fuente.

# Capítulo 3. Sistema de experimentación.

Para el experimento se implementó Raspberry 3Pi, que es un ordenador de tamaño de tarjeta de crédito, con unas dimensiones de placa de 8.5 x 5.3 cm que se conecta a un televisor y un teclado y un ratón para su dominio. Es una placa que soporta varios componentes necesarios en un ordenador común al que se le pueden añadir tarjetas de desarrollo para aumentar su capacidad de funciones que puede ser utilizado para muchas de las cosas que una PC hace.

## 3.1. Raspberry 3 Pi.



**Figura 11. Versión Raspberry 3Pi utilizada en los experimentos [57].**

Vista frontal superior de Raspberry 3Pi en la Figura 11, se muestra que su corazón se encuentra un chip integrado Broadcom BCM2835, que contiene un procesador ARM11 con varias frecuencias de funcionamiento y la posibilidad de subirla (overclocking) hasta 1 GHz, un procesador gráfico VideoCore IV, y distintas cantidades de memoria RAM según el modelo (entre 256MB y 1GB). Además, cuenta con una salida de vídeo y audio a través de un conector HDMI, una salida de vídeo compuesto y de audio a través de un minijack y una conexión ethernet 10/100. En los puertos USB de esta tarjeta se conectan los dispositivos como el teclado y el ratón. El tipo de memoria utilizada y donde se instala el sistema operativo (GPIO Raspbian) es en una memoria SD. Se conectaron en un display o monitor a través de HDMI.



Este sistema se expande continuamente con la conexión de una gran variedad de nuevos sensores, placas electrónicas, motores, servos, que no paran de salir al mercado. Raspberry Pi puede implementar múltiples aplicaciones como informática productiva o proyectos de informática lúdica y utilizarlo por ejemplo como un centro multimedia, conectándose a redes e Internet, instalar servidores, realizar proyectos de robótica conjuntamente con placas de desarrollo con Arduino, Matrix creator, etc.

Novedades:

- Procesador a 1,2 GHz de 64 bits con cuatro núcleos ARMv8.
- 1GB de Memoria.
- 802.11n Wireless LAN.
- Bluetooth 4.1.
- Bluetooth Low Energy (BLE).

Al igual que el modelo Raspberry Pi 2, también tiene:

- 4 puertos USB.
- 40 pines GPIO.
- Puerto Full HDMI.
- Puerto Ethernet.
- Conector combo compuesto de audio y vídeo de 3,5 mm.
- Interfaz de la cámara (CSI).
- Interfaz de pantalla (DSI).
- Ranura para tarjetas microSD (ahora push-pull en lugar de push-push).
- Núcleo de gráficos VideoCore IV 3D.
- Dimensiones de placa de 8.5 por 5.3 cm.

La Raspberry Pi 3 tiene un factor de forma idéntica a la anterior Pi 2 (1 y Pi Modelo B +) y tiene una compatibilidad completa con Frambuesa Pi 1 y 2.

**GPIO (General Purpose Input/Output):** Es, como su propio nombre indica, un sistema de E/S (Entrada/Salida) de propósito general, es decir, una serie de conexiones que se pueden usar como entradas o salidas para usos múltiples. Estos pines están incluidos en todos los modelos de Raspberry Pi, para que se puedan realizar proyectos interesantes como se haría con Arduino. Los GPIO representan la interfaz entre la Raspberry Pi y el mundo exterior. Y con ellos se pueden hacer multitud de proyectos, desde hacer titilar un LED hasta otros mucho más

sofisticados. Pero para eso se deben conocer sus características y cómo se programan. Lo primero variará en función de la revisión de placa que se tengan o del modelo.

**Todos los “pines” son de tipo “unbuffered”:** Es decir, no disponen de buffers de protección, así que se debe de tener cuidado con las magnitudes (voltajes, intensidad, etc.) cuando se conectan componentes a ellos para no dañar la placa.

**Pines de alimentación:** Tienen pines de 5v, 3v3 (limitados a 50mA) y tierra (GND o Ground), que aportan alimentación a estos voltajes para otros circuitos. Puede servir como una fuente de alimentación, aunque también se pueden utilizar otras fuentes (pilas, fuentes de alimentación externas, etc). Los pines son unbuffered y se debe de tener cuidado para no dañar la placa.

- **DNC (Do Not Connect):** Son pines que por el momento no tienen función, pero en futuras implementaciones son utilizados para otros fines. Por eso sólo se encuentran en modelos más primitivos de la Raspberry Pi. En las actuales placas han sido marcados como GND.
- **GPIO normales:** Son conexiones configurables que se pueden programar para infinidad de proyectos.
- **GPIO especiales:** Dentro de éstos se encuentran algunos pines destinados a una interfaz UART, con conexiones TXD y RXD que sirven para comunicaciones en serie, como por ejemplo, conectar con una placa Arduino. También hay otros como SDA, SCL, MOSI, MISO, SCLK, CE0, CE1, etc.



Figura12. En estas conexiones de usos múltiples es donde se conecta la tarjeta de desarrollo Matrix Creator [58].

### **3.1.1. Sistema Operativo de Raspberry 3Pi.**

La Raspberry Pi cuenta con muchas distribuciones Linux que ya han sido portadas para esta placa. Existe también una versión de Android. La versión más popular de Android para Raspberry Pi es Cyanogen 7.2. El Sistema Operativo usado por ser el más recomendable es Raspbian. También se disponen de varias aplicaciones como NOOBS que permiten instalar y probar varios Sistemas Operativos. NOOBS es un acrónimo de New Out Of Box Software y básicamente consiste en el instalador. El software se instala en cualquier tarjeta SD/microSD con un mínimo de 4GB de espacio y no necesita conexión a Internet para ser utilizado (las últimas versiones sí que lo requieren, así como la versión Lite. La elección que se haga se instalará automáticamente en el espacio libre de la tarjeta y ya sólo es cuestión de reiniciar y usar. Entre los Sistemas Operativos que se pueden elegir son Raspbian, Arch Linux, Risc OS, Fedora (Pidora) y un par de versiones del centro multimedia XBMC (OpenELEC y RspBMC). NOOBS incluye también un método de edición rápida de la configuración del nuevo sistema, un navegador web preinstalado y para consultar en el momento cualquier información en línea y, atención porque esto es lo más interesante, un modo de recuperación por línea de comandos a partir de una partición de rescate que se crea automáticamente.

### **3.2. Estado de compilación: MATRIX Hardware Abstraction Layer (HAL).**

MATRIX Hardware Abstraction Layer (HAL) es una biblioteca de código abierto para interactuar directamente con MATRIX Creator y MATRIX Voice [58]. MATRIX HAL consta de archivos de controladores escritos en C ++ que permiten al usuario escribir programas que se encuentran listos para su compilación siguiendo las instrucciones en la página web: <https://github.com/matrix-io/matrix-creator-hal>. En este trabajo se programó en lenguaje C.



**Figura 13. Vista de la parte posterior de la tarjeta de desarrollo Matrix Creator conectada a Raspberry 3 Pi.**

La primera vez que Raspberry 3Pi y Matrix Creator fueron conectados (Figura 13), después de seguir con las indicaciones estaba listo para la ejecución y distintas creaciones disponibles en el conjunto de sensores que se describirán a continuación.

### **3.3. Placa de desarrollo Matrix Creator.**

Con la tarjeta de desarrollo Matrix Creator se ha creado un sistema operativo basado en Raspbian, MATRIX OS, que permite a las personas comenzar a programar MATRIX directamente en JavaScript. MATRIX Creator es una gran herramienta de enseñanza y desarrollo, que apunta a la creación de cualquier proyecto de investigación gracias a la múltiple funcionalidad en proyectos de investigación,

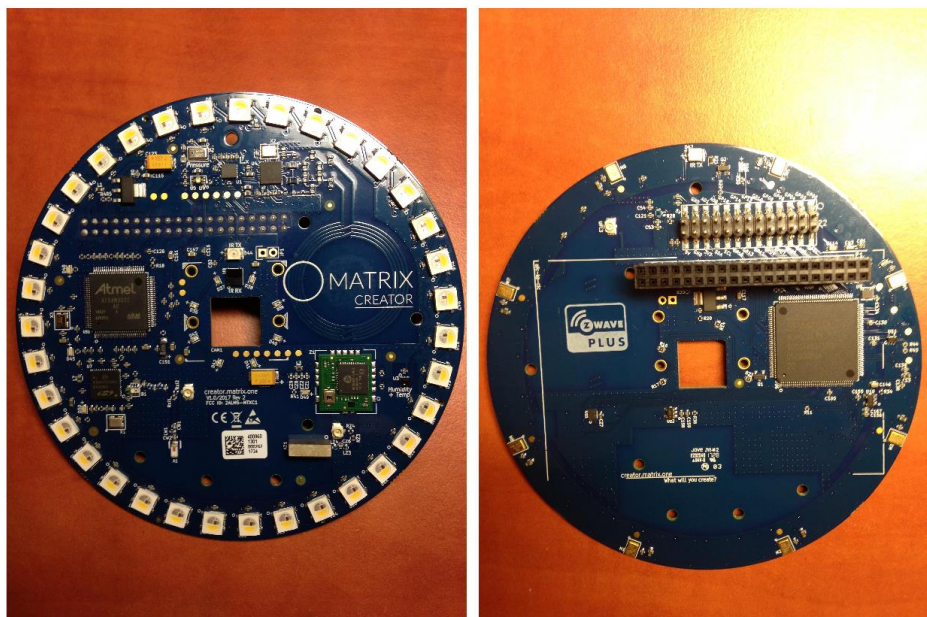


Figura 14. Imagen anterior y posterior de la tarjeta de desarrollo Matrix Creator [59].

MATRIX Creator es una placa de desarrollo con todas las funciones, que incluye sensores, comunicaciones inalámbricas y un FPGA. MATRIX Creator se creó con la misión de proporcionar a cada fabricante, instalador y desarrollador de todo el mundo una herramienta completa, asequible y fácil de usar para la creación de aplicaciones simples o complejas.

<b>Microcontrolador</b>	Amtel Cortex-M3 ATSAM3S2
<b>FPGA</b>	Xilinx Spartan 6 XC6SLX4
<b>Matriz de micrófono</b>	8 micrófonos digitales con sensor de audio MEMS MP34DB02
<b>IMU</b>	ST LSM9DS1 Acelerómetro 3D, giroscopio 3D, magnetómetro 3D
<b>Temperatura / Humedad</b>	Sensor digital capacitivo ST HTS221 para humedad relativa y temperatura
<b>Sensor de altitud</b>	Sensor de presión de precisión NXP MPL3115A2 con altimetría
<b>zigbee</b>	Silicon Labs EM358X - 2.4 GHz IEEE 802.15.4
<b>Z-Wave</b>	Sigma Designs ZM5202 - 868/908/921 MHz
<b>Receptor IR</b>	Vishay TSOP573 - portadora 38.0 kHz
<b>IR Blaster</b>	2 LED Vishay (frontal e inferior), ángulo de visión de 930nm, 100mA, 120 °
<b>Sensor ultravioleta</b>	Vishay VEML6070 sensor de luz UV
<b>NFC</b>	Lector NFC PN512 NFC
<b>Everloop</b>	35 LED RGBW

Tabla 1. Características de sensores inalámbricos disponibles en la placa Matrix Creator [59].

La cualidad principal por la que Matrix Creator se utilizó en este proyecto fue por la ventaja de arreglo de ocho micrófonos con ejecución simultánea en cada uno de los micrófonos además de que son fijos, sus posiciones son fijas, con coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$  conocidas, mostradas en la siguiente tabla.

M1a (x, y, z)	0.0201	-0.485	0
M2a (x, y, z)	-0.0201	-0.485	0
M3a (x, y, z)	-0.485	-0.0201	0
M4a (x, y, z)	-0.485	0.0201	0
M5a (x, y, z)	-0.0201	0.485	0
M6a (x, y, z)	0.0201	0.485	0
M7a (x, y, z)	0.485	0.0201	0
M8a (x, y, z)	0.485	-0.0201	0

**Tabla 2. Matriz de coordenadas en centímetros del arreglo de micrófonos de Matrix Creator tomando como punto de referencia el centro de la tarjeta.**

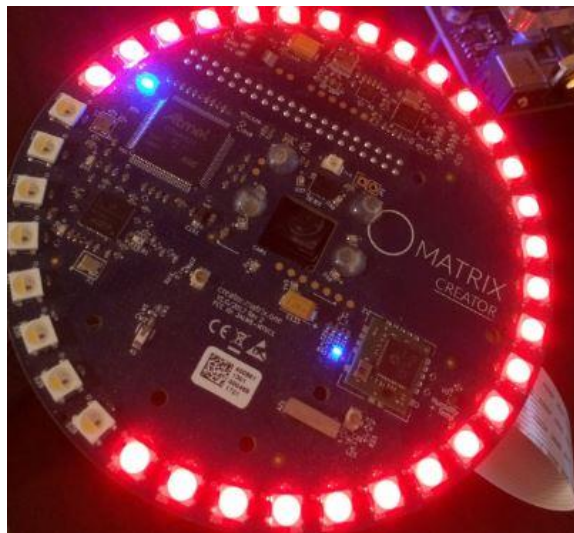
### **3.4. Programación del arreglo de micrófonos Matrix Creator en Raspberry 3 Pi**

En la dirección electrónica: [https://github.com/matrix-io/matrix-creator-hal/blob/master/demos/micarray\\_recorder\\_direct.cpp](https://github.com/matrix-io/matrix-creator-hal/blob/master/demos/micarray_recorder_direct.cpp) se encontró la fuente de información para ejecutar aplicaciones y programas en la tarjeta de desarrollo Matrix Creator. MATRIX Hardware Abstraction Layer (HAL) es una librería de código abierto para directamente interactuar con la tarjeta Matrix Creator y Matrix Voice. Matrix Hal consiste de drivers escritos en C++ que permiten al usuario escribir programas en bajo nivel en C++. Esta librería contiene funciones que permiten grabar y almacenar sonidos en los ocho micrófonos se forma simultánea. El código utilizado puede ser consultado en el apéndice de este documento.

### 3.5. Modelo del sistema.

El experimento se realizó utilizando los siguientes materiales.

1. Raspberry 3 Pi: Con software Rasbian en Linux
2. Dos tarjetas de desarrollo MATRIX CREATOR: Capacitada con un arreglo de 8 micrófonos MP34DB02 con una frecuencia de muestreo: 8 a 48 kHz a una profundidad de bit: 16 bit
3. Altavoz.
4. Soporte.
5. Flexómetro.
6. Trípode.



**Figura 15. Matrix Creator en Raspberry 3 pi ejecutando demo de audio recorder con el arreglo de 8 micrófonos simultáneamente durante ciclos de 10 segundos.**



**Figura 16. Se colocó un tripoide con coordenadas medidas a cada arreglo de micrófonos en las cajas A y B con respecto a la fuente emisora (tripoide).**

En la figura se muestra la ejecución sincronizada de dos ordenadores simultáneamente el demo “audio recorder” utilizando el programa VNC para establecer una conexión inalámbrica para acceder a raspbian desde un ordenador HP ajeno al sistema, utilizando la dirección IP de internet a la que todos los ordenadores están conectados, recordando usuario y contraseña de los ordenadores Raspberry.



# Capítulo 4. Estimación de dirección de fuente acústica en 2D y 3D

## 4.1. Configuración de medición

Las funciones de transferencia entre el arreglo de micrófonos y una dirección de fuente específica se obtienen generando una señal de medición a través de un altavoz colocado en una dirección determinada y grabación simultánea con dos arreglos de ocho micrófonos, pero antes de esto, debió medirse el espacio de propagación acústica, que en este caso era una alcoba.

Para una cuadrícula fina de muchas funciones de transferencia direccional, las matrices de micrófonos de prueba se colocaron espacialmente en 3D y 2D en coordenadas cartesianas y polares, esto fue medido manualmente antes de comenzar la captura de muestras.

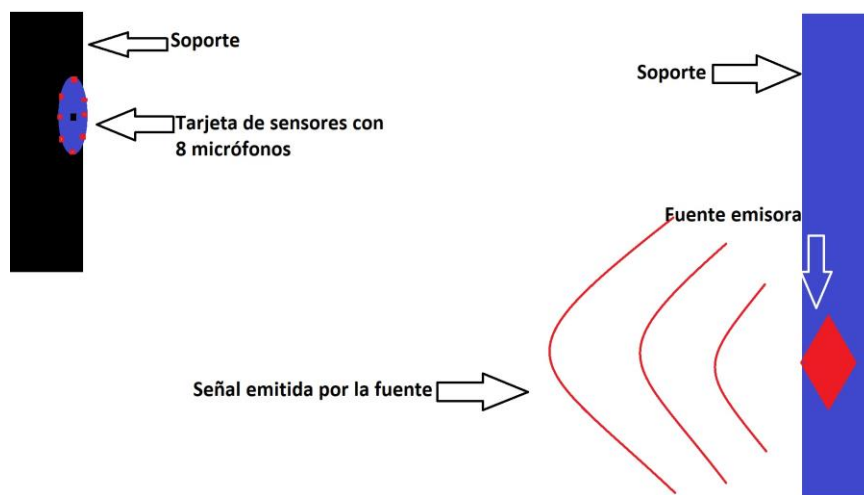
## 4.2. Obtención de datos.

Para proporcionarnos los datos necesarios para la estimación de ángulo de arribo y la ubicación de señal en 3D se utilizó Matrix Creator en Raspberry 3 pi, debido a sus características geométricas, fácil configuración y sobre todo su arreglo de 8 micrófonos separados espacialmente por  $0.041m$  a  $45^\circ$  con una distancia radial de  $0.10m$ , estos micrófonos ubicados  $45^\circ$  son fijos con la ventaja principal de grabación simultánea.

El espacio donde se realizaron los experimentos fue en un espacio con un material de (tablaroca), por este factor importante se atenúa la señal fuera del espacio de experimentación debido a la densidad en la tablaroca. Esta barrera hace que se generen ecos, lo que produce distintas señales en direcciones “aleatorias” al experimento. Para evitar un análisis de la señal contaminada, se utilizan los primeros 5 microsegundos de grabación para determinar el DOA. Manualmente se seleccionaron los tramos de la señal para análisis.

Se montó en una superficie plana, con ayuda de un soporte en posición vertical la tarjeta de desarrollo Matrix Creator conectada a la Raspberry 3 pi.

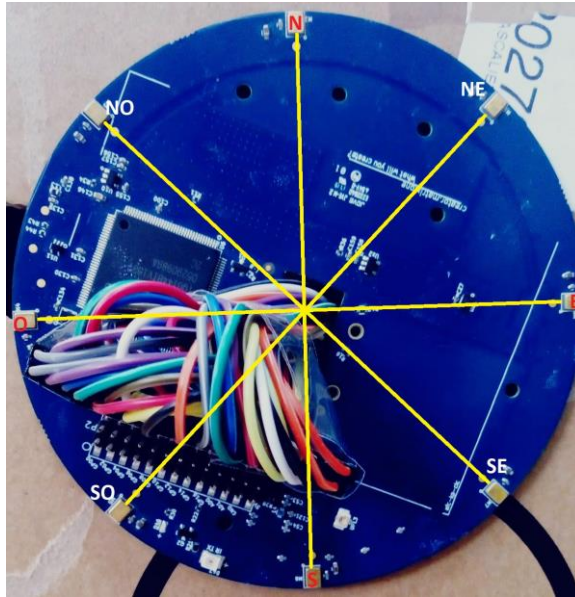
El software utilizado para generar un programa ejecutable para activar la grabación del arreglo como se muestra en la Figura 17 de un arreglo de 8 micrófonos grabando de forma simultánea fue proporcionado por Github de manera gratuita en la dirección web <https://github.com/matrix-io/matrix-creator-hal> en lenguaje de programación en C. Al tener los sensores listos para su ejecución, se midió con ayuda de un flexómetro de 5 m los parámetros para obtener las coordenadas Azimuth del arreglo de 8 micrófonos a la fuente emisora de señal (Bocina). La señal seleccionada para este experimento fue “Nuclear Submarine Sonar Ping Sound.flv wav” [61].



**Figura 17. Posición del primer experimento con un solo arreglo, la fuente receptora Matrix Creator tenía posición fija, mientras que la fuente emisora cambió de posicionamiento varias veces.**

Previamente las dimensiones fueron medidas para ser capaces de calcular el ángulo Azimut donde se contemplaron tres características distintas:

Se tomó en cuenta de la siguiente manera la medición de coordenadas Azimut donde el micrófono 2 es el Norte, el micrófono 6 es el Sur, micrófono 4 Oeste, micrófono 8 el Este, micrófono 3 Noroeste, micrófono 7 Sureste, micrófono 5 Suroeste y micrófono 1 Noreste como se muestra en la Figura 18.



**Figura 18. Se emitió la señal y los 8 micrófonos fueron capaces de detectar y almacenar la señal simultáneamente en las diferentes posiciones en las que se posicionó la fuente emisora.**

Posteriormente a la toma de muestras, estas fueron procesadas en Octave, con el código que se puede encontrar en el ANEXO I del apéndice, para poder determinar el ángulo Azimut y poder analizar la señal de la siguiente manera.

Se toman dos señales muestra (ejemplo: Micrófono 2 + Micrófono 6) donde el código ejecutó las siguientes muestras para poder observar el atraso de cada señal (se contempló también utilizar FFT -Fast Fourier Transform- para observar la señal en dominio de la frecuencia) en dominio del tiempo, en este espacio es dónde se calcula el DOA y el ángulo azimutal de cada una de las muestras usando el TDOA de referencia como el retardo en tiempo.

### **4.3. Simulación y cálculo de DOA (Direction Of Arrival) en un arreglo circular para una dimensión.**

Empleando las ecuaciones de retardo y del arreglo de sensores se hizo en GNU Octave se desarrolló el siguiente código encontrado en ANEXO I

Primero se toma en cuenta la velocidad del sonido, recordando que  $c = 340 \text{ m/s}$ , contemplando el radio del círculo  $r = \frac{0.105 \text{ m}}{2}$  del arreglo de ocho micrófonos, calculando la distancia de arco entre los micrófonos de la siguiente manera,  $(2 * \pi * r)$  dividido entre la cantidad total de micrófonos en el arreglo  $M = 8$ , por lo que sustituyendo queda:

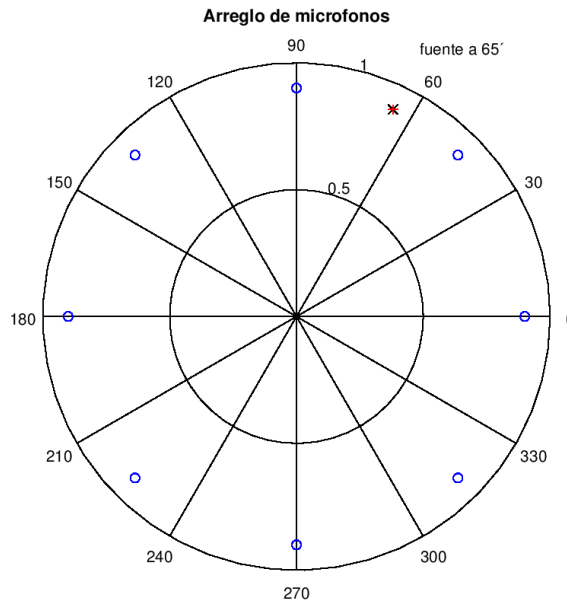
$$\frac{(2 * 3.1416 * 0.0525)}{8} = 0.0412. \quad (34)$$

Se calcula también la posición de micrófonos en radianes y la distancia recta entre los micrófonos utilizando seno del ángulo theta.

Para poder estimar el retardo esperado de la señal entre pares de micrófonos sólo puede funcionar con la condición  $-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}$ , si se obedece es posible calcular el DOA conociendo el retardo considerando la velocidad del sonido  $c$  y la distancia entre pares de micrófonos.

Aunque este cálculo es muy directo y obvio, se puede utilizar empleando las señales capturadas por el arreglo de sensores, es decir, se necesita conocer el retardo y éste puede ser obtenido en señales reales por medio de la correlación cruzada, conociendo las posiciones y por lo tanto las distancias entre micrófonos.

Suponiendo una posición de una fuente a  $65^\circ$  se tiene el siguiente resultado de la Figura 19:



**Figura 19. Los círculos en color azul muestran las posiciones de los micrófonos. La marca X muestra la posición de la fuente y las marcas + muestran el DOA calculado.**

Empleando este mismo principio se obtuvo el DOA con las señales obtenidas con el arreglo de sensores y calculando el retardo por medio de la correlación cruzada. Como se verá más adelante, el cálculo del DOA también se puede obtener por medio de otros algoritmos como MUSIC.

#### 4.4. Algoritmo MUSIC para detección de fuente en una dimensión

MUSIC (Multiple Signal Clasification) el uso de este algoritmo es para ampliar la posibilidad de una aplicación en el océano, ya que se enfoca en la localización de múltiples fuentes, puede ser de distintos mamíferos marinos, el monitoreo del lenguaje de una manada, explotación petrolera simultánea, tráfico marítimo etc.

Como ya fue explicado en el Capítulo 2 el algoritmo, recordando la ecuación (7) comienza calculando la matriz de covarianza, luego calcula los valores y vectores característicos o eigenvalores, eigenvectores. Luego los ordena de mayor a menor, los eigenvalues mayores son la señal, etc.

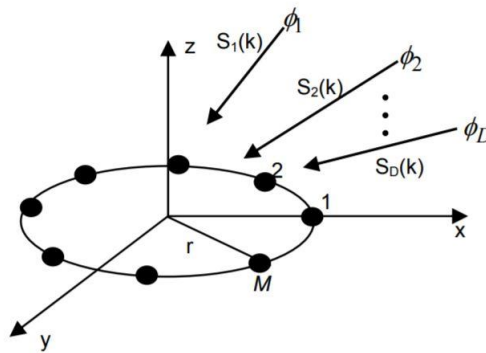


Figura 20. Receptor circular de un conjunto uniforme de M sensores [59].

El vector  $M \times 1$  recibido por el arreglo de 8 micrófonos se expresa por la siguiente ecuación

$$y(k) = \hat{A} \hat{C}(\phi) s(k) + n(k). \quad (35)$$

Donde:

$$A(\phi) = [a(\phi_1) \dots a(\phi_D)]. \quad (36)$$

es la matriz  $M \times D$  de los vectores de dirección,  $s(k) = [s_1(k), \dots, s_D(k)]^T$  es el vector señal  $D \times 1$ ,  $n(k) = [n_1(k), \dots, n_M(k)]^T$  es la  $M \times 1$  matriz de vector de ruido. La señal vector  $s(k)$  y el vector

$n(k)$  del aditivo y del ruido blanco espacial se supone que son estadísticamente independientes y cero y se presume gaussiano centrado en cero y de varianza constante representado por  $v_k[n]$ . La señal recibida está representada con  $s(t)$  para cada elemento del arreglo en instantes de tiempo diferentes según la posición de la fuente emisora.

$$\begin{bmatrix} x_0[n] \\ x_1[n] \\ \vdots \\ x_{L-1}[n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0[\theta_0] & a_0[\theta_1] & \dots & a_0[\theta_{r-1}] \\ a_1[\theta_0] & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & & & \\ a_{L-1}[\theta_0] & a_{L-1}[\theta_1] & \dots & a_{L-1}[\theta_{r-1}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0[n] \\ s_1[n] \\ \vdots \\ s_{L-1}[n] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_0[n] \\ v_1[n] \\ \vdots \\ v_{L-1}[n] \end{bmatrix} \quad (35)$$

En forma compacta es:

$$x_n = A s_n + v_n \quad (36)$$

A son vectores de dirección o steering vectors de las señales  $s_i(t)$

La descomposición en vectores y valores propios se expresa como:

$$R_{xx} = QDQ^H \quad (37)$$

donde  $Q$  es partida en dos  $Q = [Q_s \ Q_n]$  y  $D$  es una matriz diagonal cuyos elementos son los valores propios de  $R_{xx}$ . Para estimar el DOA se buscan, en el conjunto posible de vectores propios, los que sean ortogonales al subespacio de ruido. Si  $a(\theta)$  es un vector (de dirección) propio de una señal entrante, entonces a

$$H(\theta)Q_n = 0, \quad (38)$$

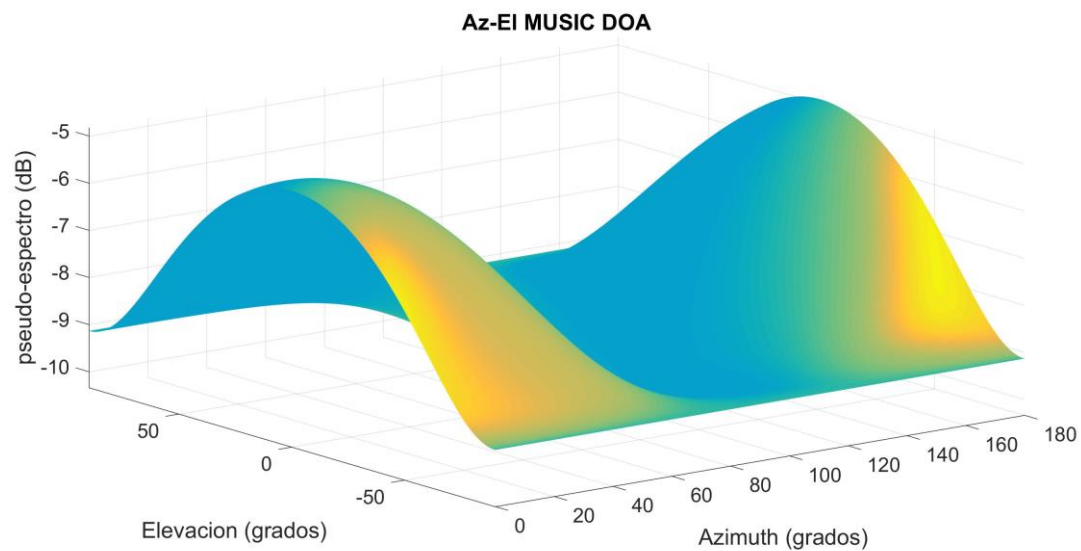
y

$$P_{MUSIC}(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta)Q_nQ_n^H a(\theta)} \quad (39)$$

## 4.5. Determinación de Dos fuentes en 2D, Azimuth y Elevación.

En la sección 4.2 se explicó el cómo se obtuvo el ángulo azimutal del algoritmo MUSIC, pero en este caso se obtendrá junto con el ángulo de elevación por medio de simulación el DOA con dos fuentes en diferentes posiciones. Esta prueba fue simulada debido a que no se posicionaron dos fuentes simultáneas, sino que fue una sola fuente por experimento, pero el algoritmo MUSIC funciona para el manejo de múltiples señales como su mismo nombre lo indica, el algoritmo se encuentra en el ANEXO IV.

Este algoritmo puede detectar múltiples fuentes siempre y cuando no estén correlacionadas.



**Figura 21. Algoritmo MUSIC con dos fuentes en coordenadas polares de elevación en  $0^\circ$  y azimuth  $150^\circ$ .**

Como observamos en la Figura 21 hay dos máximos, lo que indica que hay dos fuentes emisoras de sonido, con un ángulo de elevación de  $0^\circ$  y azimutales de  $150^\circ$ , lo que indica en un norte geográfico que la fuente emisora se encontraba el suroeste.

# Capítulo 5. Determinación 3D de la posición de una fuente emisora de sonido

En la aplicación de este experimento, se utilizó una señal nociva para cetáceos y para cualquier organismo (sonar naval) el sonar activo, en el ecosistema real puede alcanzar un pulso de 249 dB de potencia y tiene un poder de expansión de 330 km de radio de dispersión.

La señal utilizada es el sonido de un pulso de sonar con duración de 3 segundos, con 4 segundos de duración entre cada pulso. La frecuencia de muestreo,  $F_s$ , fue de 44100 donde  $T_s=1/F_s$  determina el periodo de muestreo, cada muestra tiene una duración de  $T_s = 2.26 \cdot 10^{-5}$  segundos, posteriormente se analizan las señales de los micrófonos para estimar el retardo de tiempo de llegada entre pares de micrófonos. La ecuación que relaciona la velocidad con la distancia y tiempo es  $v = \frac{d}{t}$ , o  $d = vt$ . Si la señal está desfasada  $n$  muestras entonces están desfasadas  $n T_s$  segundos. Después se puede pasar a la distancia, con su fórmula bien conocida,

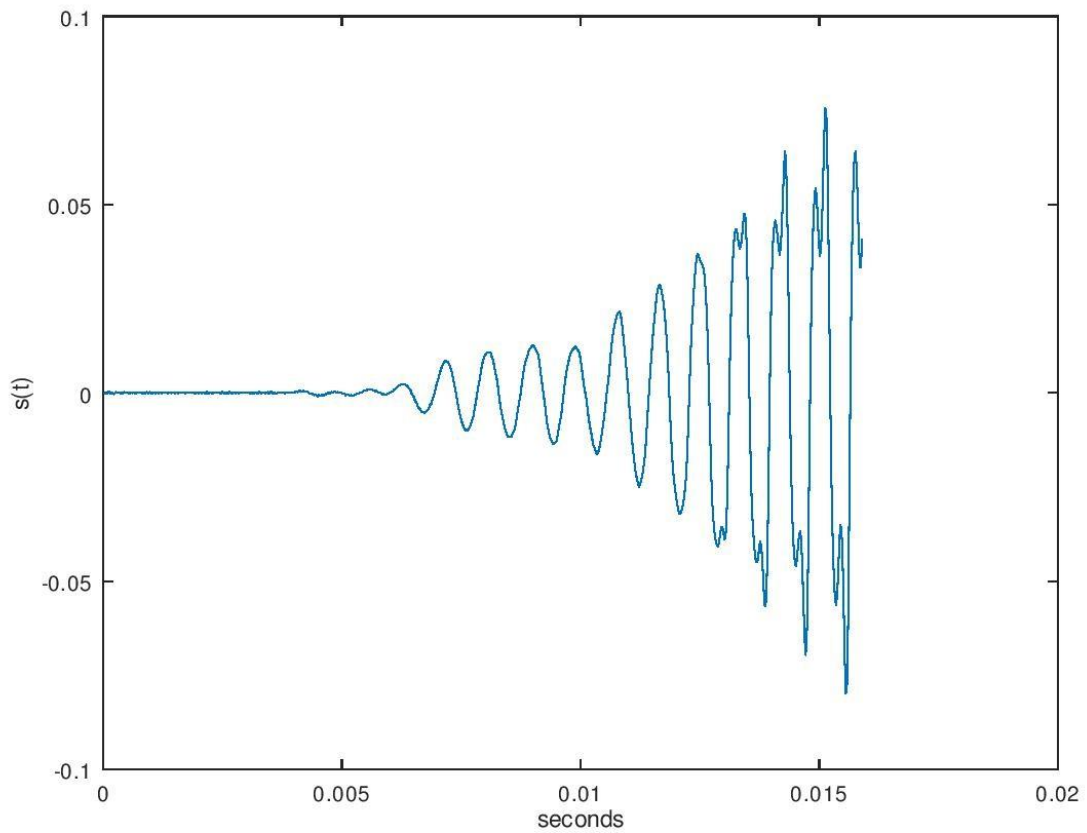
$$d = v (n T_s), \quad (40)$$

y así se podrá conocer una diferencia de distancias de llegada,  $\Delta d_{ij}$ , con las señales de los micrófonos.

## 5.1. Estimación de diferencia de tiempo de llegada

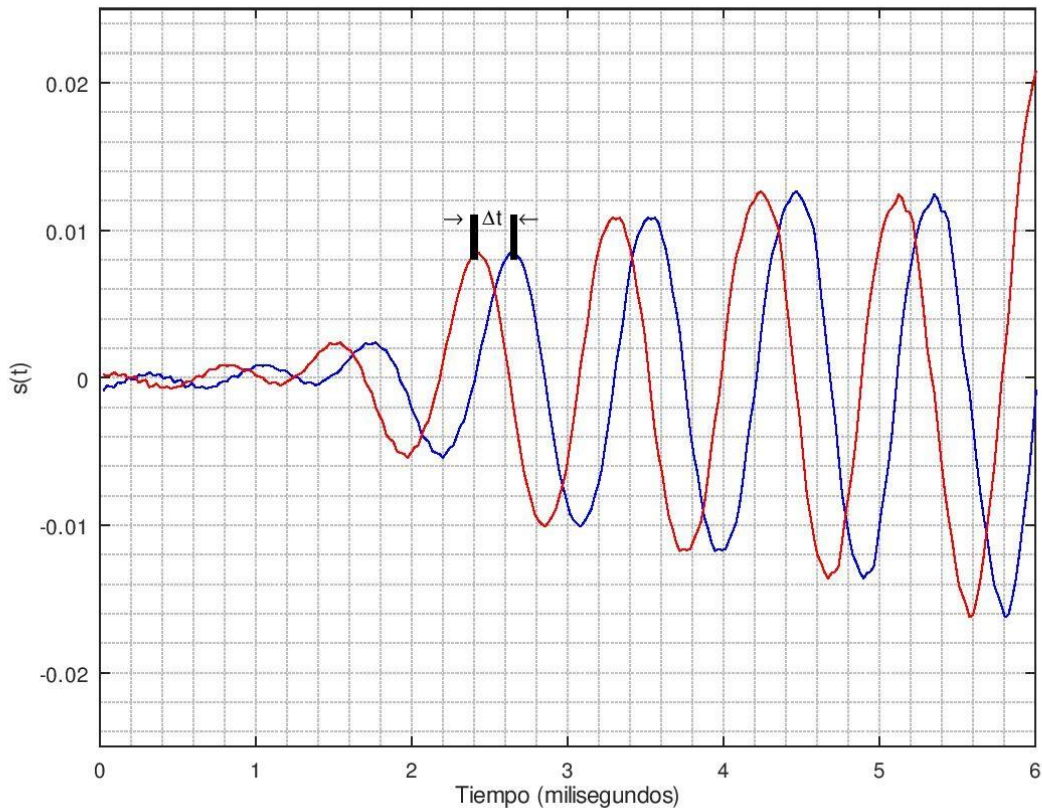
Para la estimación de la diferencia de tiempo de llegada de una señal de sonido entre dos micrófonos,  $i$  y  $j$ , es necesario conocer la señal emitida (por ejemplo la mostrada en la Figura 22) sincronizar el grabado de señales de sonido de todos los micrófonos, y comparar las señales en un mismo plano de referencia para poder determinar el tiempo de defazamiento,  $\Delta t$ , entre las señales (Figura 22).





**Figura 22. Señal emitida por un altavoz.**

La señal que se muestra en la Figura 22 corresponde al pulso de sonar naval [62] que fue utilizado para este experimento, pero tan solo un fragmento para posteriormente analizarlo junto con otra señal igual, pero de otro micrófono como se muestra en la Figura 23.



**Figura 23. Defazamiento en tiempo entre dos señales acústicas.**

Como se muestra en la Figura 23, contando el tiempo en milisegundos podemos obtener  $\Delta t$ .

## **5.2 Sistema de ecuaciones con la posición de la fuente emisora como incógnita en tres dimensiones.**

Para determinar la posición  $(x_s, y_s, z_s)$  de una fuente emisora de sonido,  $s$ , utilizando un arreglo de micrófonos en un patrón circular posicionados en los puntos  $(x_{mi}, y_{mi}, z_{mi})$  para  $i = \{1,2,3, \dots, 8\}$ , necesitamos establecer un sistema de ecuaciones que dependan de las coordenadas de la fuente,  $s$ . Las variables a determinar, que en este caso son las coordenadas

de la fuente, las vamos expresamos en forma vectorial  $x_s = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix}$  con el fin de representarlas en forma compacta.

El sistema de ecuaciones las establecemos asumiendo que podemos determinar la diferencia de tiempo que tarda en llegar una señal de sonido a dos diferentes micrófonos del arreglo,  $i$  y  $j$ . Si definimos:

$$d_{is} = \sqrt{(x_s - x_{mi})^2 + (y_s - y_{mi})^2 + (z_s - z_{mi})^2} \quad (41)$$

como la distancia entre el  $i$  –ésimo micrófono y la fuente, y,

$$d_{js} = \sqrt{(x_s - x_{mj})^2 + (y_s - y_{mj})^2 + (z_s - z_{mj})^2} \quad (42)$$

como la distancia entre el  $j$  –ésimo micrófono y la fuente, entonces, la diferencia de tiempo de llegada de la señal de sonido entre los micrófonos  $m_i$  y  $m_j$  es

$$\Delta t_{ij} = \frac{d_{is} - d_{js}}{v}, \quad (43)$$

donde  $v$  es la velocidad del sonido en el aire,  $i, j = \{1, 2, 3, \dots, 8\}$ , y  $i \neq j$ .

En teoría sólo necesitamos tres combinaciones  $i$  y  $j$  para establecer tres ecuaciones con tres incógnitas que nos pueden ayudar a encontrar los valores de  $x_f$ . En este trabajo utilizamos 16 combinaciones las cuales son  $\Delta t_{17}$ ,  $\Delta t_{18}$ ,  $\Delta t_{12}$ ,  $\Delta t_{13}$ ,  $\Delta t_{28}$ ,  $\Delta t_{23}$ ,  $\Delta t_{24}$ ,  $\Delta t_{34}$ ,  $\Delta t_{35}$ ,  $\Delta t_{45}$ ,  $\Delta t_{46}$ ,  $\Delta t_{56}$ ,  $\Delta t_{57}$ ,  $\Delta t_{67}$ ,  $\Delta t_{68}$ , y  $\Delta t_{78}$  para obtener dieciseis ecuaciones con tres incognitas; un sistema de ecuaciones no-lineales sobredeterminado:

$$\begin{bmatrix} \Delta t_{17} \\ \Delta t_{18} \\ \vdots \\ \Delta t_{78} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{(x_s - x_{m1})^2 + (y_s - y_{m1})^2 + (z_s - z_{m1})^2}}{v} - \frac{\sqrt{(x_s - x_{m7})^2 + (y_s - y_{m7})^2 + (z_s - z_{m7})^2}}{v} \\ \frac{\sqrt{(x_s - x_{m1})^2 + (y_s - y_{m1})^2 + (z_s - z_{m1})^2}}{v} - \frac{\sqrt{(x_s - x_{m8})^2 + (y_s - y_{m8})^2 + (z_s - z_{m8})^2}}{v} \\ \vdots \\ \frac{\sqrt{(x_s - x_{m7})^2 + (y_s - y_{m7})^2 + (z_s - z_{m7})^2}}{v} - \frac{\sqrt{(x_s - x_{m8})^2 + (y_s - y_{m8})^2 + (z_s - z_{m8})^2}}{v} \end{bmatrix} \quad (44)$$

Los valores de  $\Delta t_{ij}$  pueden ser estimados utilizando las señales de sonido de cada uno de los micrófonos.

## 5.2. Datos para la aplicación del algoritmo

Lo que ahora se muestra una descripción del algoritmo referenciando el mismo en ANEXO II donde se aplicaron las siguientes ecuaciones de optimización para obtener la distancia de retrasos en las señales entre micrófonos de las tarjetas **a** y **b**, utilizando una constante que determina las coordenadas en centímetros del arreglo de micrófonos con tiempo de muestreo  $\tau = 1/44100$ , siendo el origen de las coordenadas  $x, y, z$  en el centro de la tarjeta  $(0, 0, 0)$  después que se ha desplazado los datos en cada variable hacia adelante, se escribieron los valores restantes de las coordenadas en los vectores siguientes de las tarjeta a y b con las coordenadas  $x, y, z$  en centímetros para correlacionar los micrófonos entre ellos utilizando las combinaciones necesarias.

En la siguiente figura se muestran las 8 posiciones en coordenadas cartesianas para cada uno de los micrófonos en el arreglo de micrófonos para tomar las señales acústicas de ellos obtenidas.

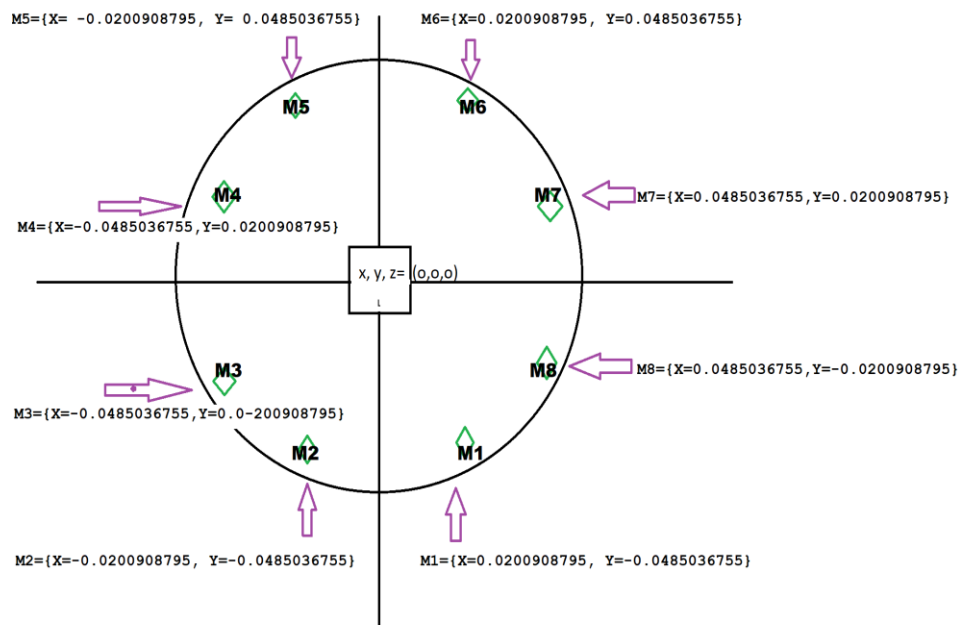


Figura 24. Obsérvese la geometría del arreglo de micrófonos se toma de punto de referencia el centro de la tarjeta.

La señal emitida en cuestión se muestra en la Figura 25 muestra los primeros 1.4 segundos y la 26 la misma señal de 12 milisegundos de duración. Para cada micrófono se tomó comparaciones en las muestras recibidas en cuatro micrófonos más cercanos para obtener la correlación entre micrófonos utilizando unas matrices 4 x 8 con las siguientes combinaciones:

M1 con {M2, M3, M7, M8};

M2 con {M3, M4, M1, M8};

M3 con {M4, M5, M2, M1};

M4 con {M5, M6, M3, M2};

M5 con {M6, M7, M4, M3};

M6 con {M7, M8, M5, M4};

M7 con {M8, M1, M6, M5};

M8 con {M7, M6, M1, M2};

y se descartaron las combinaciones que tienen los mismos micrófonos, pero en diferente orden.

Quedando:

M1 con {M2, M3, M7, M8};

M2 con {M3, M4, M8};

M3 con {M4, M5};

M4 con {M5, M6};

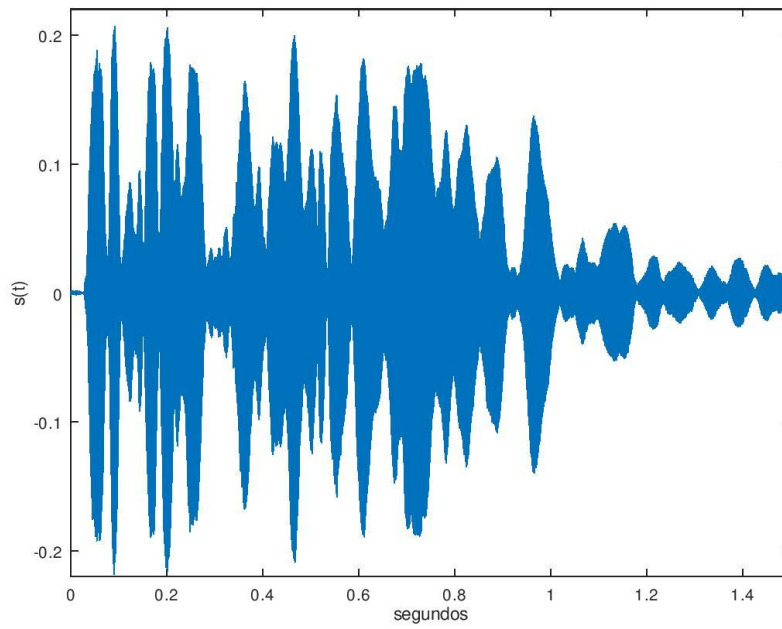
M5 con {M6, M7};

M6 con {M7, M8};

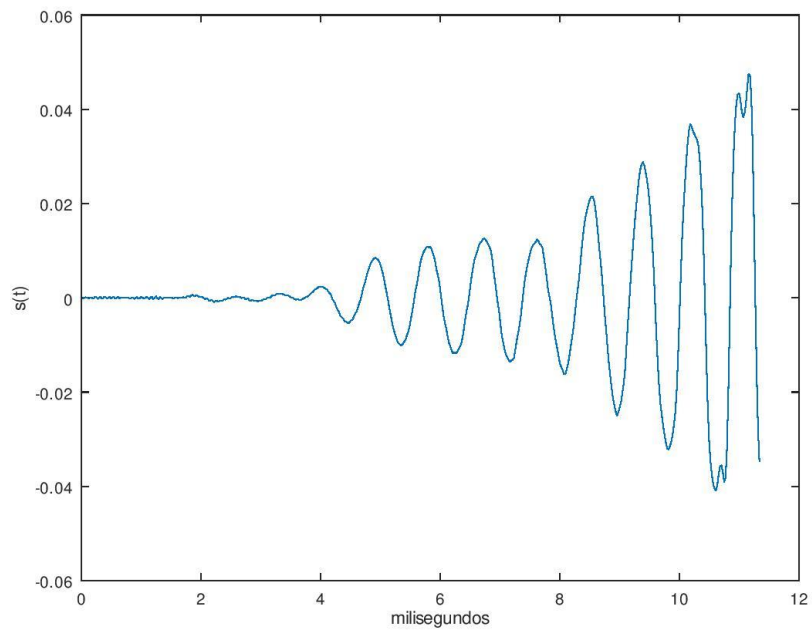
M7 con {M8};

Que marcan la pauta para las estimaciones de los diferentes  $\Delta t_{ij}$  que son utilizados en la función del costo para la determinación de la posición de la fuente emisora de sonido como se muestra en la Figura 25.

$$x_s = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix}. \quad (45)$$



**Figura 25. Pulso de sonar naval utilizado.**



**Figura 26. Primeros 12 milisegundos del pulso utilizado para simular la señal de sonar naval real.**

### 5.3 Función de costo

Re-escribiendo la ecuación (44) de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \Delta t_{17} \\ \Delta t_{18} \\ \vdots \\ \Delta t_{78} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{17}(x_f) \\ f_{18}(x_f) \\ \vdots \\ f_{78}(x_f) \end{bmatrix}.$$

Donde,

$$x_s = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} \text{ y } f_{ij}(x_f) = \frac{\sqrt{(x_s - x_{mi})^2 + (y_s - y_{mi})^2 + (z_s - z_{mi})^2}}{v} - \frac{\sqrt{(x_s - x_{mj})^2 + (y_s - y_{mj})^2 + (z_s - z_{mj})^2}}{v} \quad (45)$$

Los valores de  $f_{ij}(x_f)$  dependen del valor del vector  $x_f$  y el valor óptimo de  $x_f = x_f^*$  es aquel valor que minimice la función  $F$  expresada como:

$$F = (\Delta t_{17} - f_{17}(x_f))^2 + (\Delta t_{18} - f_{18}(x_f))^2 + \dots + (\Delta t_{78} - f_{78}(x_f))^2, \quad (46)$$

que es la suma de todos los cuadrados de la diferencia entre los valores estimados  $\Delta t_{ij}$  y  $f_{ij}(x_f)$  para un determinado valor de  $x_f$ .

La representación vectorial de la función de costo  $F$  es definida como:

$$F = G^T G. \quad (47)$$

Donde,

$$G = \begin{bmatrix} \Delta t_{17} - f_{17}(x_s) \\ \Delta t_{18} - f_{18}(x_s) \\ \vdots \\ \Delta t_{78} - f_{78}(x_s) \end{bmatrix}, \quad (48)$$

con 16 elementos y  $G^T$  es la traspuesta de  $G$ .

### 5.4 Método del gradiente o del descenso pronunciado

El valor óptimo de  $x_f$  es, entonces,  $x_f^* = \operatorname{argmin}_{x_f} [F = G^T G]. \quad (49)$

Como se mencionó con anterioridad este método utiliza la fórmula recursiva,

$$x_f^{n+1} = x_f^n - \gamma \nabla F(x_f^n). \quad (30)$$

Donde,

$$G = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \vdots \\ G_{16} \end{bmatrix}; \quad (31)$$

definida en la sección anterior como un vector de con 16 elementos;

$$\nabla F(x_f) = J_G(x)^T G(x) \quad (32)$$

Lo que generó la matriz  $J_G$ , que es la matriz *Jacobiana* que es la primera derivada entre los vectores de coordenadas  $x_s$ ,  $y_s$  y  $z_s$ .

$$J_G = \begin{bmatrix} \frac{\partial G_1}{\partial x_s} & \frac{\partial G_1}{\partial y_s} & \frac{\partial G_1}{\partial z_s} \\ \frac{\partial G_2}{\partial x_s} & \frac{\partial G_2}{\partial y_s} & \frac{\partial G_2}{\partial z_s} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial G_{16}}{\partial x_s} & \frac{\partial G_{16}}{\partial y_s} & \frac{\partial G_{16}}{\partial z_s} \end{bmatrix}. \quad (33)$$

Para poder obtener los resultados de la Tabla 6 del siguiente Capítulo.

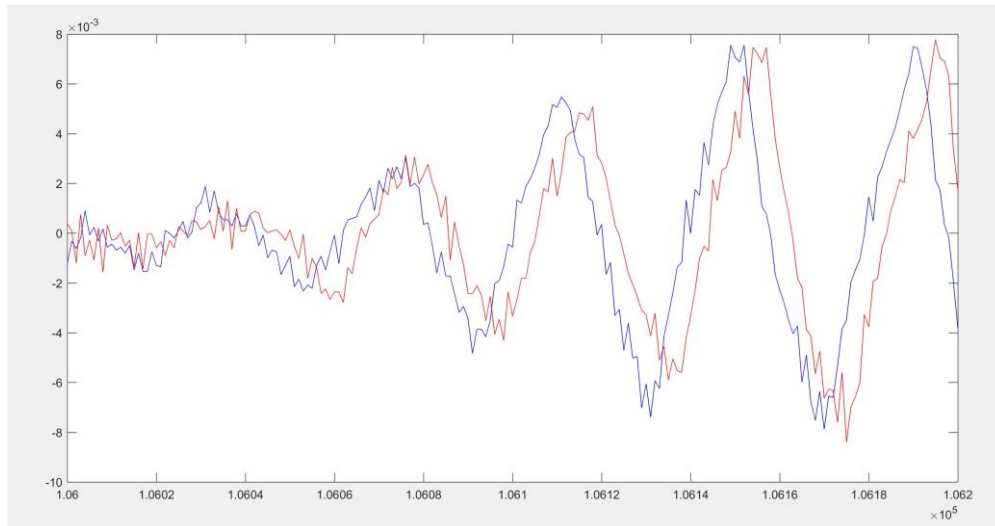


# Capítulo 6. Resultados

En este capítulo se muestran los resultados del experimento utilizando los algoritmos adjuntados en los ANEXOS y que corresponden a los métodos MUSIC, Nelder-Mead y descenso pronunciado.

El resultado final que arroja el programa muestra el ángulo azimut, el TDOA y muestran concordancia con el modelo físico que fue previamente medido durante el experimento. Las figuras mostradas a continuación son resultados del programa antes expuesto en el Capítulo 4 y 5.

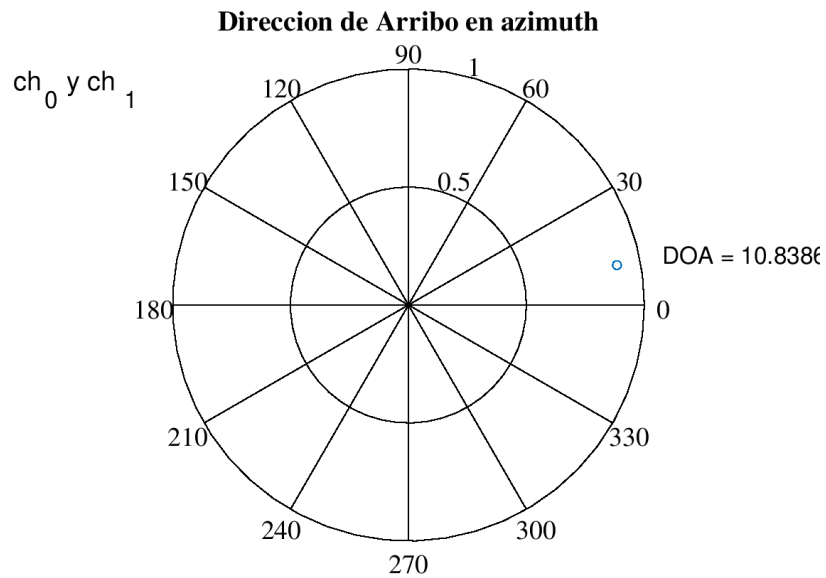
## 6.1 Diferencia de tiempo de llegada.



**Figura 27. Traslape de señales analizadas**

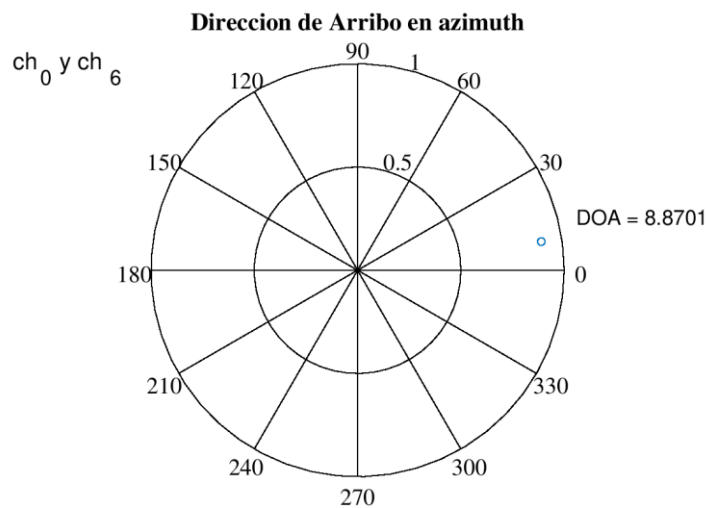
Se tomó un fragmento de las primeras muestras de la señal en la Figura 27 para ser comparado a ojo con la señal de referencia y con el micrófono con la referencia por el desfazamiento entre muestras. En esta figura se puede notar el traslape entre las dos señales que corresponden al desfase en diferencia en tiempo  $2.2 \mu s$ .

Empleando las señales de los canales 0 y 1 se obtiene el siguiente resultado en la Figura 28.



**Figura 28. DOA calculado entre el par de sensores 0 y 1, distancia de 4.1 cm.**

Después se tomaron los datos del canal 0 y 6, tomando en cuenta la distancia entre ellos de 10 cm y se obtuvo un DOA de 8.87°, es decir hay un pequeño error que se puede reducir al promediar todos los cálculos del arreglo como se muestra en la Figura 29.



**Figura 29. DOA calculado entre sensores 0 y 6, distancia de 7cm.**

## 6.2 Ángulo Azimutal

En esta sección se presentan los resultados del algoritmo para la obtención del ángulo azimutal. El retardo de tiempo de arribo de la señal entre los micrófonos está dado por:

$$\tau = (\rho_1 - \rho_0) / c = 32.09 \text{ milisegundos.}$$

En donde se ha empleado el valor de  $c = 340 \text{ m/s}$  que es la velocidad del sonido en el aire a una temperatura de  $22^\circ\text{C}$ .

El valor de  $\tau$  es el retardo de arribo de la señal.

$$R(k) = \sum s_i(n) s_j(n-k). \quad (54)$$

Donde, como ya conocemos  $\tau = \text{argmax}(R(k))$  y la dirección de la fuente se encuentra mediante  $\theta = \cos^{-1}((c \tau / Fs) / d)$ ,  $d$  es la distancia en metros entre micrófonos que en este caso en particular es de  $0.04\text{m}$ .

A continuación, se muestra en la Tabla 3, una comparación entre los resultados físicos del experimento y los resultados usando el algoritmo:

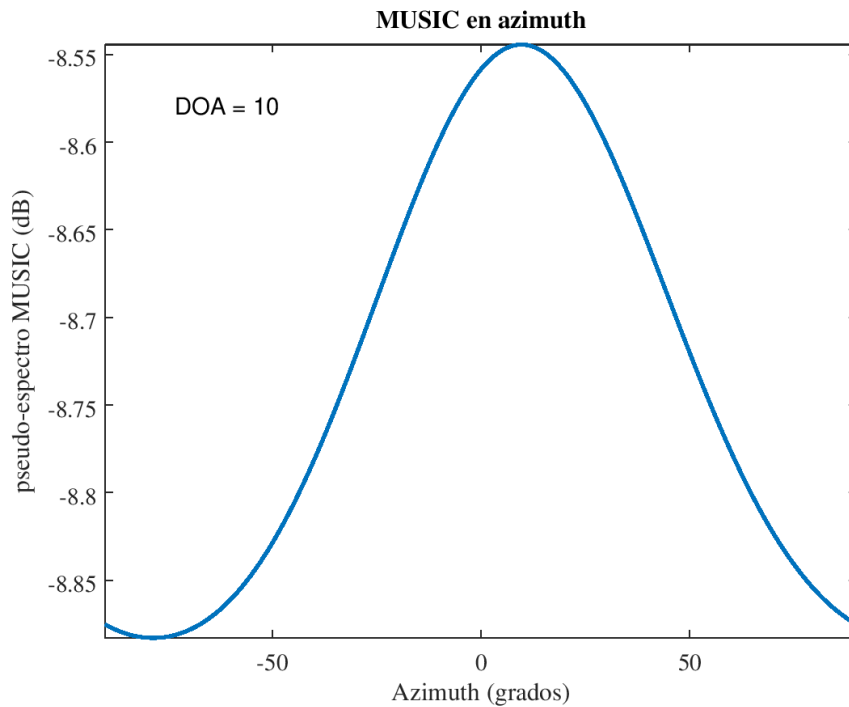
ÁNGULO DE ARRIBO AZIMUTAL MEDICIÓN FÍSICA	ÁNGULO DE ARRIBO AZIMUTAL RESULTADOS EN EL PROGRAMA
Experimento 1. 30°	Resultado 1. 33°
Experimento 2. 0°	Resultado 2. 0°
Experimento 3. 15°	Resultado 3. 10°

**Tabla 3. Comparación de resultados físicos y usando el algoritmo.**

Como se puede observar, se tiene un margen de error entre  $5^\circ$  y  $3^\circ$  por muestra, este algoritmo funciona bastante bien si se requiere tan solo encontrar una dimensión en ángulo azimutal.

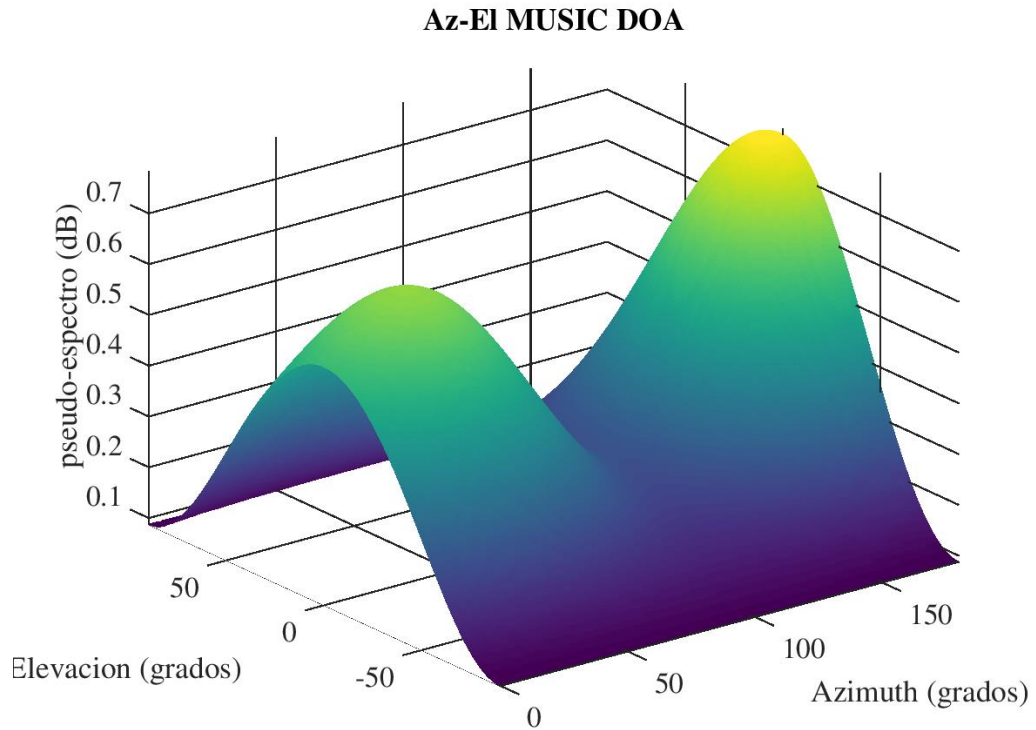
### 6.3 Resultados del algoritmo MUSIC

En cuanto al algoritmo MUSIC utilizando un arreglo UCA cuando la fuente se encontraba a un ángulo de  $15^\circ$  en la Figura 29. La imagen muestra una medición del ángulo en el que se encuentra la fuente emisora de sonido relacionada con la intensidad de llegada. El punto máximo de intensidad se encontró a  $10^\circ$ .

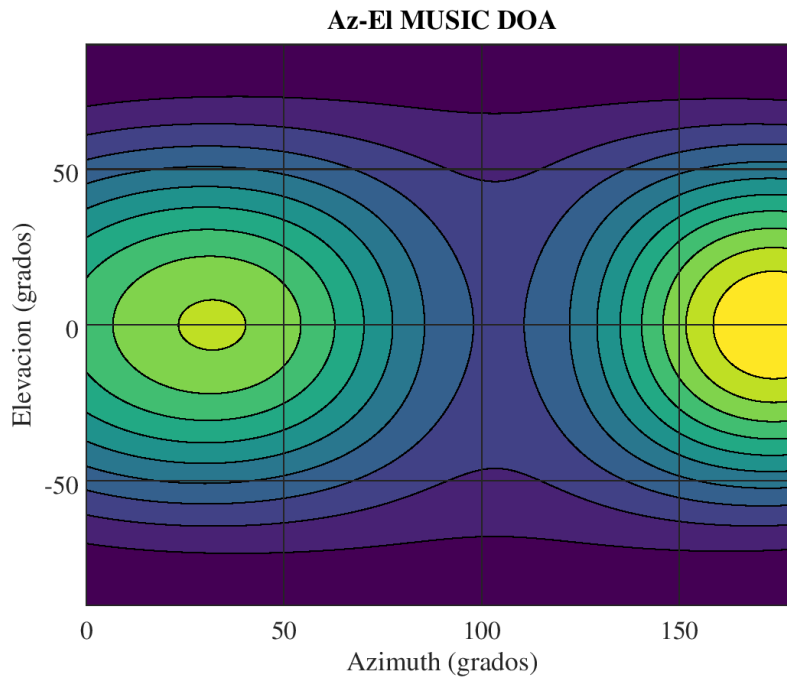


**Figura 30.** El algoritmo muestra un Azimut de  $10^\circ$ , el ángulo medido en X de forma física fue de  $15^\circ$ .

La Figura 30 muestra el DOA en una dimensión con ayuda del algoritmo MUSIC para la detección de una fuente emisora en ángulo azimutal, en la Figura 31 y 32 se muestran los resultados obtenidos del DOA con el algoritmo MUSIC en 2D, la primera imagen es en vista tridimensional y la segunda, es una gráfica de contorno.



**Figura 31. Gráfica en 3D de dos fuentes con grados azimuth y elevación con MUSIC.**



**Figura 32. Dos fuentes en vista plana donde se muestra elevación de 0° y azimuth de 45° de la primera fuente y 155° de la segunda.**

## 6.4 Diferencia en distancias de llegada con algoritmos de optimización.

Los resultados obtenidos del algoritmo de optimización para cálculo de llegada en diferencia de distancias en coordenadas cartesianas explicado en Capítulo 5 de Determinación de la fuente emisora de sonido x, y y z. Se muestra la Tabla 4 de mediciones calculadas cuando se conoce la posición real de la fuente emisora de sonido y la estimada por el algoritmo se observan diferencias de *cm* del micrófono 1 con sus micrófonos más cercanos con el algoritmo de autocorrelación.

MICRÓFONOS CORRELACIONADOS	MEDIDA REAL EN cm	MEDIDA ESTIMADA CON EL ALGORITMO EN cm
1-7	3.68	4.47
1-8	3.48	4.02
1-2	-4.72	-5.103
1-3	-7.95	-8.3262
2-7	9.13	8.67
2-3	-3.14	-3.221
2-4	-3.10	-2.81
3-4	-0.0009	0.41
3-5	3.66	4.23
4-5	3.58	3.83
4-6	8.48	8.96
5-6	4.69	5.14
5-7	8.41	8.56
6-7	3.53	3.42
6-8	3.10	2.98
7-8	-0.15	0.44

**Tabla 4. Vectores correlacionados que conforman el arreglo de 16 x 1 con entre 0.081cm a 0.79 cm.**

En la tabla 4 se muestra el resto de interacciones entre los micrófonos correlacionados.

La fuente emisora se encontraba a  $x= 1.20 \text{ cm}$ ,  $y = 10 \text{ cm}$ ,  $z = 20 \text{ cm}$ .

Así como se pudo observar en la Figura 27 el desfazamiento en tiempo entre las dos señales tomadas como muestra, en esta imagen fue el  $m1$  con  $m6$ . Después de correr el algoritmo de optimización se obtuvo la posición siguiente con el algoritmo de Descenso Pronunciado.

Resultados de algoritmo de optimización:

<b>POSICIÓN REAL</b>	<b>NELDER – MEAD</b>	<b>DESCENDIENTE PRONUNCIADO</b>
$x: 120 \text{ cm}$	$-7.38 \text{ cm}$	$107 \text{ cm}$
$y: 10 \text{ cm}$	$225 \text{ cm}$	$9.39 \text{ cm}$
$z: 20 \text{ cm}$	$583 \text{ cm}$	$80 \text{ cm}$

**Tabla 5. Resultado comparativo de los algoritmos de optimización.**

En la tabla 5 se puede observar que el algoritmo de Nelder - Mead tiene muy bajo desempeño y la posición de estimación varía dependiendo de los puntos iniciales con que es alimentado el algoritmo, mientras que el algoritmo del gradiente descendiente se aproxima más al punto real de la posición de la fuente en  $x$  y en  $y$ , mientras que en  $z$  tiene un mal desempeño, pero no tanto como en el método de Nelder - Mead. El método del gradiente descendiente a diferencia del método de Nelder - Mead siempre converge al mismo punto sin importar el punto inicial.

## Capítulo 7. Conclusiones

Cuando se busca cubrir un área de interés para una red de monitoreo en el agua se piensa en un diseño que utiliza múltiples micrófonos que estén sincronizados en la toma de datos. La adquisición de micrófonos por separado para insertarlos en un arreglo con capacidad de adquirir señales de forma sincronizada puede ser muy costoso de implementar. Como alternativa se puede utilizar un sistema similar al Matrix creator por sus ventajas sobre otros arreglos de micrófonos en el monitoreo pasivo, principalmente por su arreglo de ocho micrófonos que capturan datos simultáneamente, no se ha calculado la desventaja hasta el momento con la implementación del equipamiento necesario para sellar el arreglo herméticamente para el agua, sin embargo ese no es problema ya existe tecnología de hidrófonos para monitoreo acústico pasivo ya muy eficientes y la única variación consiste en la ganancia en la velocidad del sonido. Sin importar si se utiliza un arreglo lineal o circular, lo importante de este proyecto es la experiencia en la programación de algoritmos que permiten la obtención y procesamiento de datos para determinar las coordenadas polares en 2D y coordenadas cartesianas en 3D.

Lo que hay que resaltar de la fuente emisora es que en este trabajo se tomó en una posición fija, cosa que muy rara vez será posible porque su uso para detectar submarinos (en el sistema sonar) o cetáceos que no se encuentran fijos mientras emiten sus pulsaciones. Sin embargo, ya sea en agua o aire, esto depende de la velocidad del sonido. El objetivo en aire tendría que avanzar a una velocidad mucho mayor de 340mts por segundo para no poder ser localizado adecuadamente, mientras que en el agua el objetivo acústico tendría que avanzar 1,500mts por segundo para no poder ser localizado.

Se logró determinar el ángulo azimuth y de elevación y localización en tres dimensiones usando el arreglo de micrófonos circulares.



Se debe además añadir un error en la sincronización del tiempo de toma de datos de las dos tarjetas de desarrollo Matrix Creator dispuestos en dos planos diferentes para lograr minimizar el error de dirección de arribo de la señal.

Hasta el momento se ha obtenido un error mayor a  $5cm$  en coordenadas cartesianas, sin embargo, en coordenadas polares se cumplió la hipótesis de lograr  $5^\circ$  de error de la posición de la fuente de sonido, pero se puede mejorar mediante el uso de más arreglo de micrófonos y una adecuada sincronización de tiempo en las computadoras que pueden ser utilizadas en la toma de señales.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Franztzis, A. Does acoustic testing strans in whales? *Nature*, 1998, vol. 392, p. 29.
2. Balcomb, K.C.I., & Claridge, D.E. A mass stranding of cetacean by naval sonar in the Bahamas. *Bahamas journal of science*, 2001, vol. 2, pp. 2-12.
3. Evans D.L. & England, G.R. Join interim report Bahamas Marine Mammal Stradings Events in 15-16 March 2001.
4. Jepson, P.D., Arbelo, M., Deaville, R., Patterson I.A.P., Castro, P., Baker, J.R et al. Gas-bubble lesions in stranded cetaceans: Was sonar responsible for a spate of whale deaths after Atlantic military exercise? *Nature*, 2003, vol. 425, pp. 575-576.
5. Fernández, A, Pathological findings in stranded beaked whales during the naval military manoeuvres near the Canary Islands, P. Evans & L Miller, 2004, pp. 37-40.
6. Brownell R., Yamada T., J. G. Mead, and A. L. van Helden, Mass stranding of Cuvier's beaked whales in Japan: U.S. Naval acoustic link?, *Int. Whal. Commisson, Sci. Committee, SC56E37*, 2004.
7. Southall, B. L. Shipping Noise and Marine Mammals: A Forum for Science, Management, and Technology. Final Report of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), NOAA Fisheries Acoustics Program, 2005.
8. Southall, B. L., A. E. Bowles, W. T. Ellison, J. J. Finneran, R. L. Gentry, C. R. Greene Jr., D. Kastak, D. R. Ketten, J. H. Miller, P. E. Nachtigall, W. J. Richardson, J. A. Thomas, and P. L. Tyack, Marine mammal noise exposure criteria: Initial scientific recommendations. *Aquatic Mammals*, 2007.
9. Southall, B., Berkson J., Bowen D., Brake R., Eckman J., Field J., Gisinier R., Gregerson S., Lang W., Lewandoski J., Wilson J., and Winokur R., Addressing the Effects of Human-Generated Sound on Marine Life: National Geophysical Data Center. 2009.
10. Richardson W. J., C. R. Greene, C. I. Malme, and D. H. Thomson, *Marine Mammals and Noise*, Academic Press, 1995.
11. Richardson W. J. and Würsig B., Influences of man-made noise and other actions on cetacean behavior, *Mar. Fresh. Behav. Physiol.*, 1997, vol. 29, pp. 183–209.
12. National Research Council, *Low Frequency Sound and Marine Mam- mals*, Washington, DC: National Academy Press, 1994.
13. *Marine Mammals and Low Frequency Sound, Progress Since 1994*. Washington, DC:

- National Academy Press, 2000.
14. <http://www.allgov.com/news/controversies/fisheries-service-gives-navy-permission-to-kill-or-harm-27-species-in-pacific-training?news=841272>
  15. 1. RLJ Brownell, T. Yamada, JG. Mead, AL van Helden, varada masiva de los zifios de Cuvier en Japón: enlace acústico naval de EE. UU. Comisión Internacional de Caza de Ballenas, Comité Científico, SC56E37 (2004)
  16. Fotografía de Photo © Center for Whale Research - 5 de mayo de 2003
  17. P. Miller, “Cetaceans and Naval Sonar : Behavioral Response as a Function of Sonar Frequency,” no. Fig 1, pp. 1–7, 2007.
  18. Zimmer. W.A Passive Acoustic Monitoring of Ceteaceans . 2011. Pp.227-231.
  19. Baker, K., Epperson, D., Gitschlag, G., Goldstein, H., Lewandowski, J., Skrupky, K., Smith, B., and Turk, T. (2013).National Standards for a Protected Species Observer and Data Management Program: A Model Using Geological and Geophysical Surveys. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-49, November 2013
  20. Ellison et al (in review) Assessing aggregated exposure and responses of marine mammals to multiple sources of anthropogenic underwater sound. Arctic.
  21. Ren W. J., Hu D. H., and Ding C. B., “An improved method to sort and pair TDOA based on the correlation between TDOAs,” in *Proceedings of 2011 IEEE CIE International Conference on Radar, RADAR 2011*, 2011, vol. 2, pp. 1041–1044.
  22. “INACAP – Sonido y acústica” IEEE Communication Letters, vol. V, no. 6, pp. , octubre 2008.
  23. 4. Stoica, P.; Moses, R. Spectral Analysis of Signals; Prentice-Hall: Upper Saddle River, NJ, USA, 2005.
  24. Marzetta, T.L. A new interpretation of Capon’s maximum likelihood method of frequency-wavenumber spectral estimation. IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. 1983, 31, 445–449.
  25. Aubry, A.; Carotenuto, V.; Maio, A.D. A New Optimality Property of the Capon Estimator. IEEE Signal Process. Lett. 2017, 24, 1706–1708.

26. Ying Zhang, Boon Poh Ng, MUSIC-Like DOA Estimation without Estimating the Number of Sources. *Signal Processing, IEEE Transactions on*. 2010; 58(3): 1668,1676. doi: 10.1109/TSP.2009.2037074
27. Ahmed Magdy, KR Mahmoud, SG Abdel-Gawad, II Ibrahim. Direction of Arrival Estimation Based on Maximum Likelihood Criteria Using Gravitational Search Algorithm, *PIERS Proceedings, Taipei*. 2013; 25(28).
28. Nickel U. Principles of Adaptive Array Processing. In *Advanced Radar Signal and Data Processing* (pp. 5-1 – 5-20). Educational Notes RTO-EN-SET-086, Paper 5. Neuilly-sur-Seine, France: RTO. Available from: <http://www.rto.nato.int/abstracts.asp>. 2006.
29. Jeffrey Foutz, Andreas Spanias, Mahesh K Banavar. *Narrowband Direction of Arrival Estimation for Antenna Arrays*, Morgan & Claypool Publishers. 2008.
30. Bienvenu, G.; Kopp, L. Decreasing high resolution method sensitivity by conventional beamformer preprocessing. In *Proceedings of the IEEE International Conference on ICASSP '84, San Diego, CA, USA, 19–21 March 1984*; pp. 714–717. [CrossRef]
31. Pirkl, R.J.; Aughenbaugh, J.M. Bayesian passive sonar tracking with conventional beamformer-level data. In *Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Information Fusion, Washington, DC, USA, 6–9 July 2015*; pp. 621–628.
32. Capon J,. High resolution frequency-wavenumber spectral analysis. *Proceedings of the IEEE*. 1969; 57: 1408–1518.
33. Guo, Z.; Wang, X.; Wei, H. Millimeter-Wave channel estimation based on two-dimensional beamspace MUSIC method. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2017.
34. 18. Vasylyshyn, V. Removing the outliers in root-MUSIC via pseudo-noise resampling and conventional beamformer. *Signal Process.* 2013, 93, 3423–3429. [CrossRef]
35. Abeida, Habti; Zhang, Qilin; Li, Jian; Merabtine, Nadjim. "Enfoques basados en la variación mínima asintótica dispersa iterativa para el procesamiento de matrices". 2013.
36. Zhang, Qilin; Abeida, Habti; Xue, Ming; Rowe, William; Li, Jian. "Implementación rápida de estimaciones basadas en covarianzas iterativas dispersas para la localización de fuentes". 2012. p.131
37. F. Reed, P. Feintuch and N. Bershad, "Time delay estimation using the LMS adaptive filter-Static behavior," in *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol.

- 29, no. 3, pp. 561-571, June 1981.
38. Schmidt, R, Multiple emitter location and signal parameter estimation, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* . 1986
  39. MUSIC Algorithm by Brian L. Evans, 211-105 Cory Hall, Berkeley, CA 94720-1772.
  40. A.Majdoubi., M.Essaaidi, “The Estimation of DOA in Smart Antenna System”, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, Vol.1, Issue6, Nov.2013.
  41. M. Brandstein, J. Adcock, and H. Silverman, “Microphone array localization error estimation with application to sensor placement,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 99, no. 6, pp. 3807–3816, 1996.
  42. G. Miramontes de L., E. García D., I. de la Rosa V. and y A. H. F. J. J. Villa H., C. Sifuentes G., S. Mandujano S., “Localización de Fuente Acústica por ERT,” *Encuentro Investig. en Ing. Eléctrica*, 2005.
  43. P. Gupta and S. P. Kar, “MUSIC and improved MUSIC algorithm to estimate direction of arrival,” 2015 Int. Conf. Commun. Signal Process. ICCSP 2015, pp. 757–761, 2015.
  44. Michael S. Brandstein and Harvey F. Silverman “A practical methodology for speech source localization with microphone arrays”, 1997. vol 11, pp.91-126.
  45. T. Basikolo, K. Ichige, and H. Arai, “Underdetermined DOA estimation for uniform circular array based on sparse signal reconstruction,” *ISAP 2016 - Int. Symp. Antennas Propag.*, pp. 1012–1013, 2017.
  46. I. Rish and G.Y. Grabarnik, *Sparse Modeling: Theory, Algorithms, and Applications*. CRC Press, 2015.
  47. Lamare R. C. and Sampaio-Neto R., “Sparsity-Aware Adaptive Algorithms Based on Alternating Optimization and Shrinkage,” *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 21, no. 2, pp. 225–229,
  48. Donoho D. L., “Compressed sensing,” *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 52, no. 4, pp. 1289–1306, Apr. 2006.
  49. D. Malioutov, M. Cetin, and A. Willsky, “A sparse signal reconstruction perspective for source localization with sensor arrays,” *IEEE Trans. Signal Proc.*, vol. 53, no. 8, pp. 3010–3022, Aug. 2005.
  50. Van Trees H. L., *Optimum Array Processing, Detection, Estimation and Modulation Part*

IV. John Wiley and Sons, 2002

51. J. H. DiBiase, H.F. Silverman, and M. Brandstein, “Robust Localization in Reverberant Rooms,” *Microphone Arrays*, Springer Verlag, 2001
52. S. Vazques, A & Garcia, “Estimación de la Dirección de Arribo de Señales a Arreglos de Antenas de Fase” Instituto Politécnico Nacional ‘,’ pp. 1–98, 2016.
53. B. Gross, Frank. *Smart Antennas for Wireless Communications, with Matlab*, McGraw-Hill, 2005.
54. Knapp C. H. and Carter G. C., “The Generalized Correlation Method for Estimation of Time delay,” *IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Proc.*, Vol. ASSP-24, No. 4, AUG, 1976.
55. Rangaraj N., *Nonsmooth Optimization: Algorithms and Applications*. 1990.
56. J. Heaton. *Artificial Intelligence for Humans, Volume 2: Nature Inspired Algorithms*. 2014. ISBN = 1499720572.
57. Figura 11. Raspberry 3Pi. <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>
58. <https://www.matrix.one/products/creator>. 26 agosto 2018.
59. A. Vesa, “Direction-of-Arrival Estimation in case of Uniform Sensor Array using the MUSIC Algorithm,” vol. 56, no. 2, pp. 40–43, 2011.
60. Zainuddin Lubis M., Manik H., Wulandari P. ” *SIGNAL PROCESSING WITH PASSIVE ACOUSTIC IN FISHERIES AND MARINE SCIENCE.*” Chapter 4 42-52. 2016.
61. <https://www.youtube.com/watch?v=MSHEixOVxTY> Sonar Naval real pulse. Wav. 15 febrero. 2018.

## ANEXO I

### Cálculo de DOA por medio de TDOA

```
FT1=fft(Pulso1);
FT2=fft(Pulso2);
N1=length(FT1);
N2=length(FT2);
escfreq1=(0:N1-1)*Fs/N1;
escfreq2=(0:N2-1)*Fs/N2;
figure
L1=N1/2;
L2=N2/2;
Amplitud1=1/L1*abs(FT1(1:L1));
Amplitud2=1/L2*abs(FT2(1:L2));
plot(escfreq1(1:L1),Amplitud1,'linewidth',2)
figure
plot(escfreq2(1:L2),Amplitud2,'linewidth',2)
set(gca, 'FontName','Times-Roman',...
    'FontSize',18);
title('Espectro de Fourier')
xlabel('frecuencia [Hz]')
figure
subplot(2,1,1);
plot(t(1:length(Pulso1)),Pulso1(1:length(Pulso1)), 'b')
subplot(2,1,2);
plot(t(1:length(Pulso2)),Pulso2(1:length(Pulso2)), 'r', 'linewidth',2)
set(gca, 'FontName','Times-Roman',...
    'FontSize',18);
xlabel('tiempo [s]')
grid
figure;
```

```
plot(t(1:length(Pulso1)),Pulso1(1:length(Pulso1)), 'b', t(1:length(Pulso2)),Pulso2(1:length(Pulso2)), 'r', 'linewidth', 2)
```

```
[R,lag]=xcorr(Pulso1,Pulso2);
```

```
[ValorPico,PosPico]=max(R);
```

```
pico=length(Pulso1)-PosPico;
```

```
retardo=pico/Fs;
```

```
DOArr=asin(retardo*c/d);
```

```
figure
```

```
polar(DOArr,0.9,'o');
```

```
set(gca, 'FontName','Times-Roman',...
```

```
 'FontSize',18);
```

```
title('Angulo de Arribo')
```

```
title('Direccion de Arribo en azimuth')
```

```
hold on
```



## ANEXO II

### Método de optimización del Gradiente pronunciado.

```
constpa=.0200908795;
constpb=.0485036755;
lag=1000;
T=1/44100;xt=0;yt=0;zt=0;
m1a=[xt+constpa;yt-constpb;zt];
m2a=[xt-constpa;yt-constpb;zt];
m3a=[xt-constpb;yt-constpa;zt];
m4a=[xt-constpb;yt+constpa;zt];
m5a=[xt-constpa;yt+constpb;zt];
m6a=[xt+constpa;yt+constpb;zt];
m7a=[xt+constpb;yt+constpa;zt];
m8a=[xt+constpb;yt-constpa;zt];
c1=audioread('channel_0.wav');
c2=audioread('channel_1.wav');
c3=audioread('channel_2.wav');
c4=audioread('channel_3.wav');
c5=audioread('channel_4.wav');
c6=audioread('channel_5.wav');
c7=audioread('channel_6.wav');
c8=audioread('channel_7.wav');
c9=audioread('channel_8.wav');

in=106000;en=106200;
```

```
plot(in:en,c1(in:en)-mean(c1(in:en)), 'b', in:en, c2(in:en)-mean(c2(in:en)), 'r');
```

```
x=27;i=0;
```

```
while(x==121)
```

```
if(x==109)
```

```
i=i+1;
```

```
else if(x==110)
```

```
i=i-1;
```

```
end
```

```
end
```

```
r1=c1(in+i:en+i);
```

```
r2=c3(in:en);
```

```
[ds,ls]=xcorr(r1-mean(r1),r2-mean(r2),1);
```

```
plot(1:wid,r1(1:wid)-mean(r1(1:wid)), 'r', 1:wid, r2(1:wid)-mean(r2(1:wid)), 'b');
```

```
title(i);xlabel(ds(2));
```

```
x = kbhit ();
```

```
end
```

```
ran1=106000:106200+500;
```

```
ran2=1:200;
```

```
r1=c1(ran1);r1=r1(ran2)-mean(r1(ran2));
```

```
r2=c7(ran1);r2=r2(ran2)-mean(r2(ran2));
```

```
MD(1)=getshift(r1,r2);
```

```
r1=c1(ran1);r1=r1(ran2)-mean(r1(ran2));  
r2=c8(ran1);r2=r2(ran2)-mean(r2(ran2));  
MD(2)=getshift(r1,r2);
```

```
r1=c1(ran1);r1=r1(ran2)-mean(r1(ran2));  
r2=c2(ran1);r2=r2(ran2)-mean(r2(ran2));  
MD(3)=getshift(r1,r2);
```

```
r1=c1(ran1);r1=r1(ran2)-mean(r1(ran2));  
r2=c3(ran1);r2=r2(ran2)-mean(r2(ran2));  
MD(4)=getshift(r1,r2);
```

```
r1=c2(ran1);r1=r1(ran2)-mean(r1(ran2));  
r2=c8(ran1);r2=r2(ran2)-mean(r2(ran2));  
MD(5)=getshift(r1,r2);
```

```
r1=c2(ran1);r1=r1(ran2)-mean(r1(ran2));  
r2=c3(ran1);r2=r2(ran2)-mean(r2(ran2));  
MD(6)=getshift(r1,r2);
```

```
r1=c2(ran1);r1=r1(ran2)-mean(r1(ran2));  
r2=c4(ran1);r2=r2(ran2)-mean(r2(ran2));  
MD(7)=getshift(r1,r2);
```

$r1=c3(\text{ran1});r1=r1(\text{ran2})-\text{mean}(r1(\text{ran2}));$   
 $r2=c4(\text{ran1});r2=r2(\text{ran2})-\text{mean}(r2(\text{ran2}));$   
 $\text{MD}(8)=\text{getshift}(r1,r2);$

$r1=c3(\text{ran1});r1=r1(\text{ran2})-\text{mean}(r1(\text{ran2}));$   
 $r2=c5(\text{ran1});r2=r2(\text{ran2})-\text{mean}(r2(\text{ran2}));$   
 $\text{MD}(9)=\text{getshift}(r1,r2);$

$r1=c4(\text{ran1});r1=r1(\text{ran2})-\text{mean}(r1(\text{ran2}));$   
 $r2=c5(\text{ran1});r2=r2(\text{ran2})-\text{mean}(r2(\text{ran2}));$   
 $\text{MD}(10)=\text{getshift}(r1,r2);$

$r1=c4(\text{ran1});r1=r1(\text{ran2})-\text{mean}(r1(\text{ran2}));$   
 $r2=c6(\text{ran1});r2=r2(\text{ran2})-\text{mean}(r2(\text{ran2}));$   
 $\text{MD}(11)=\text{getshift}(r1,r2);$

$r1=c5(\text{ran1});r1=r1(\text{ran2})-\text{mean}(r1(\text{ran2}));$   
 $r2=c6(\text{ran1});r2=r2(\text{ran2})-\text{mean}(r2(\text{ran2}));$   
 $\text{MD}(12)=\text{getshift}(r1,r2);$

$r1=c5(\text{ran1});r1=r1(\text{ran2})-\text{mean}(r1(\text{ran2}));$   
 $r2=c7(\text{ran1});r2=r2(\text{ran2})-\text{mean}(r2(\text{ran2}));$   
 $\text{MD}(13)=\text{getshift}(r1,r2);$

$r1=c6(\text{ran1});r1=r1(\text{ran2})-\text{mean}(r1(\text{ran2}));$

```
r2=c7(ran1);r2=r2(ran2)-mean(r2(ran2));  
MD(14)=getshift(r1,r2);
```

```
r1=c6(ran1);r1=r1(ran2)-mean(r1(ran2));  
r2=c8(ran1);r2=r2(ran2)-mean(r2(ran2));  
MD(15)=getshift(r1,r2);
```

```
r1=c7(ran1);r1=r1(ran2)-mean(r1(ran2));  
r2=c8(ran1);r2=r2(ran2)-mean(r2(ran2));  
MD(16)=getshift(r1,r2);  
MDT11=(MD/44100)*355;
```

```
MD=MDT11';
```

```
constpa=.0200908795;  
constpb=.0485036755;  
m1a=[ constpa;-constpb;0];  
m2a=[-constpa;-constpb;0];  
m3a=[-constpb;-constpa;0];  
m4a=[-constpb; constpa;0];  
m5a=[-constpa; constpb;0];  
m6a=[ constpa; constpb;0];  
m7a=[ constpb; constpa;0];  
m8a=[ constpb;-constpa;0];
```

```

%%%%%%%%%%
x=[0.771;-0.2515;0.20];
x=[-1.344874;0.027077;0.127723]
%x=[0.2837340111926828;-0.0868925139637423;0.1413428894184147];
%x=x+0.1*rand(3,1);
gamma=.1;
epsilon= 6.58473566437483e-26
Fa=1000000;
Fu=[];
ERRO=[];
erro=[1000000];
while(erro<epsilon)
dt1m1=sqrt((m1a(1)-x(1))^2+(m1a(2)-x(2))^2+(m1a(3)-x(3))^2);
dt1m2=sqrt((m2a(1)-x(1))^2+(m2a(2)-x(2))^2+(m2a(3)-x(3))^2);
dt1m3=sqrt((m3a(1)-x(1))^2+(m3a(2)-x(2))^2+(m3a(3)-x(3))^2);
dt1m4=sqrt((m4a(1)-x(1))^2+(m4a(2)-x(2))^2+(m4a(3)-x(3))^2);
dt1m5=sqrt((m5a(1)-x(1))^2+(m5a(2)-x(2))^2+(m5a(3)-x(3))^2);
dt1m6=sqrt((m6a(1)-x(1))^2+(m6a(2)-x(2))^2+(m6a(3)-x(3))^2);
dt1m7=sqrt((m7a(1)-x(1))^2+(m7a(2)-x(2))^2+(m7a(3)-x(3))^2);
dt1m8=sqrt((m8a(1)-x(1))^2+(m8a(2)-x(2))^2+(m8a(3)-x(3))^2);

dt117=dt1m1-dt1m7;dt118=dt1m1-dt1m8;dt112=dt1m1-dt1m2;dt113=dt1m1-dt1m3;
dt128=dt1m2-dt1m8;dt123=dt1m2-dt1m3;dt124=dt1m2-dt1m4;
dt134=dt1m3-dt1m4;dt135=dt1m3-dt1m5;
dt145=dt1m4-dt1m5;dt146=dt1m4-dt1m6;

```

$$dt156=dt1m5-dt1m6;dt157=dt1m5-dt1m7;$$

$$dt167=dt1m6-dt1m7;dt168=dt1m6-dt1m8;$$

$$dt178=dt1m7-dt1m8;$$

$$Ga=[dt117 dt118 dt112 dt113 dt128 dt123 dt124 dt134 dt135 dt145 dt146 dt156 dt157 dt167 dt168 dt178];$$

$$G=[Ga];G=G';$$

$$dif1xa= m1a(1)-x(1); dif1ya= m1a(2)-x(2); dif1za= m1a(3)-x(3);$$

$$dif2xa= m2a(1)-x(1); dif2ya= m2a(2)-x(2); dif2za= m2a(3)-x(3);$$

$$dif3xa= m3a(1)-x(1); dif3ya= m3a(2)-x(2); dif3za= m3a(3)-x(3);$$

$$dif4xa= m4a(1)-x(1); dif4ya= m4a(2)-x(2); dif4za= m4a(3)-x(3);$$

$$dif5xa= m5a(1)-x(1); dif5ya= m5a(2)-x(2); dif5za= m5a(3)-x(3);$$

$$dif6xa= m6a(1)-x(1); dif6ya= m6a(2)-x(2); dif6za= m6a(3)-x(3);$$

$$dif7xa= m7a(1)-x(1); dif7ya= m7a(2)-x(2); dif7za= m7a(3)-x(3);$$

$$dif8xa= m8a(1)-x(1); dif8ya= m8a(2)-x(2); dif8za= m8a(3)-x(3);$$

$$Ja1=[dif1xa/dt1m1 dif1ya/dt1m1 dif1za/dt1m1];$$

$$Ja2=[dif2xa/dt1m2 dif2ya/dt1m2 dif2za/dt1m2];$$

$$Ja3=[dif3xa/dt1m3 dif3ya/dt1m3 dif3za/dt1m3];$$

$$Ja4=[dif4xa/dt1m4 dif4ya/dt1m4 dif4za/dt1m4];$$

$$Ja5=[dif5xa/dt1m5 dif5ya/dt1m5 dif5za/dt1m5];$$

$$Ja6=[dif6xa/dt1m6 dif6ya/dt1m6 dif6za/dt1m6];$$

$$Ja7=[dif7xa/dt1m7 dif7ya/dt1m7 dif7za/dt1m7];$$

$$Ja8=[dif8xa/dt1m8 dif8ya/dt1m8 dif8za/dt1m8];$$

```
J=[ Ja7-Ja1; Ja8-Ja1; Ja2-Ja1; Ja3-Ja1];
```

```
J=[J;Ja8-Ja2; Ja3-Ja2; Ja4-Ja2];
```

```
J=[J;Ja4-Ja3; Ja5-Ja3];
```

```
J=[J;Ja5-Ja4; Ja6-Ja4];
```

```
J=[J;Ja6-Ja5; Ja7-Ja5];
```

```
J=[J;Ja7-Ja6; Ja8-Ja6];
```

```
J=[J;Ja8-Ja7];
```

```
G=G-MD;
```

```
GraF=J'*G;
```

```
F=G'*G;
```

```
erro=abs(Fa-F);%ERRO=[ERRO erro];
```

```
x=x-gamma*GraF;
```

```
if(x(3)<0)
```

```
%x(3)=x(3)*(-1)+(.1)*rand(1);
```

```
end
```

```
%x(1)=1.2;
```

```
%X=[X x];
```

```
%Fu=[Fu F];
```

```
Fa=F;
```

```
end
```



## ANEXO III

### Algoritmo MUSIC con arreglo circular UCA.

```
[c1,Fs]=audioread('channel_0.wav');
c2=audioread('channel_1.wav');
c3=audioread('channel_2.wav');
c4=audioread('channel_3.wav');
c5=audioread('channel_4.wav');
c6=audioread('channel_5.wav');
c7=audioread('channel_6.wav');
c8=audioread('channel_7.wav');

in=106000; % Muestra inicial
Dt=127;    % Numero de muestras

en=in+Dt*13; % Muestra final

c1=c1(in:en)-mean(c1(in:en));
c2=c2(in:en)-mean(c2(in:en));
c3=c3(in:en)-mean(c3(in:en));
c4=c4(in:en)-mean(c4(in:en));
c5=c5(in:en)-mean(c5(in:en));
c6=c6(in:en)-mean(c6(in:en));
c7=c7(in:en)-mean(c7(in:en));
c8=c8(in:en)-mean(c8(in:en));

figure(1)
plot(in:en,c1,'b',in:en,c2,'r');
M=1; % Numero de fuentes a buscar
L=length(c1); % Numero de datos recibidos
```

```

N = 8;
radius = 0.09/sind(180/N);
rx = radius*cosd(360*(0:N-1)./N);
ry = radius*sind(360*(0:N-1)./N);
r = [rx, ry, zeros(N,1)];

x=[c1'; c2'; c3'; c4'; c5'; c6'; c7'; c8'];

% ===== ALGORITMO MUSIC ===== %

Rxx = x*x'/L;

[E,D] = eig(Rxx);
[lambda,idx] = sort(diag(D)); % Vector de eigen valores reordenados
E = E(:,idx); % Extrae los eigen valores
En = E(:,1:end-M); % Eigen-vectores de ruido
AzSearch = (0:1:180).'; % valores a buscar en Azimuth
ElSearch = zeros(size(AzSearch)); % Supone elevacion es cero para 1D

kSearch = pi*[cosd(AzSearch).*cosd(ElSearch), ...
sind(AzSearch).*cosd(ElSearch), sind(ElSearch)].';
ASearch = exp(-1j*r*kSearch);

Z = sum(abs(ASearch'*En).^2,2);
figure();
plot(AzSearch,10*log10(Z),'linewidth',2);
set(gca, 'FontName','Times-Roman',...
'FontSize',18);
title('MUSIC en 1D');
xlabel('Azimuth (grados)');
ylabel('pseudo-espectro MUSIC (dB)');

```