

## **DETECCIÓN DE FUENTES EMISORAS ACÚSTICAS NOCIVAS UTILIZANDO MATRIX CREATOR ORIENTADO AL ECOSISTEMA MARINO.**

Miriam Carolina Zapata Cabral<sup>1</sup>, José Ismael De La Rosa Vargas<sup>1</sup>, Efrén González Ramírez<sup>1</sup>, Gerardo Miramontes de León<sup>2</sup>, e Ileri Aydeé Sustaita Torres<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Zacatecas, <sup>2</sup>Instituto Tecnológico Sanmiguelense de Estudios Superiores. [carolinazc34@gmail.com](mailto:carolinazc34@gmail.com); [31121918@uaz.edu.mx](mailto:31121918@uaz.edu.mx)

### **RESUMEN**

El siguiente trabajo está enfocado en detección de la fuente acústica deseada usando tecnología (Passive Acoustic Monitoring). El monitoreo acústico pasivo (PAM) es ampliamente utilizado en la comunidad científica para estudiar mamíferos marinos, especialmente cetáceos, muchos de los cuales son más fáciles de escuchar que de ver. El PAM también se utiliza para detectar actividades humanas con efectos potencialmente negativos en el ecosistema marino, como tráfico marítimo, sonar militar y civil, explotación petrolera, entre algunas de las aplicaciones. El presente trabajo de investigación representa un desafío debido a la ubicación geográfica en la que se lleva a cabo (Zacatecas, México), ya que va orientado al ecosistema marino; sin embargo, la propuesta que se presenta en este trabajo es pertinente debido a la importancia de disminuir masacres masivas en el océano por múltiples factores antropogénicos y además se inclina mayormente al diseño de un sistema electrónico. El sistema que se desarrolló involucra tareas de detección y posicionamiento de una fuente emisora acústica, mediante el uso de sensores (Matrix Creator) que cuenta con ocho micrófonos, en la placa de desarrollo Raspberry 3pi donde se programó en lenguaje C y Python para determinar la posición de una fuente acústica. La fuente emisora utilizada corresponde a una bocina alimentada con una señal generada en una computadora que corresponde a un impulso de sonar naval. El dispositivo detecta la señal y se almacena para ser posteriormente procesado mediante Octave. Hasta ahora se ha logrado conocer el posicionamiento de la fuente emisora por ángulo azimutal y se está trabajando para disminuir el error a +/- 5 cm en el posicionamiento. La finalidad del presente trabajo de investigación es proponer una red para monitoreo de señales nocivas para cetáceos.

### **INTRODUCCIÓN**

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 varamientos de ballenas picudas a través de los años, los cuales fueron asociados con el sonar naval de gran amplitud (Frantzis, 1998; Balcomb y Claridge, 2001; Evans et al., 2001). El verdadero daño fisiológico inducido por el sonar, que tiene efectos de comportamiento en los animales varados, ha sido extensamente debatido (Jepson et al., 2003; Fernandez et al., 2005; Cox et al., 2006; Southall et al., 2006; Brownell et al., 2009). 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, y construcción y encuestas científicas.

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 (ver, por ejemplo, Miller et al., 2000, Holt et al., 2009, Parks et al., 2009). En los mamíferos terrestres, una preocupación principal y bien establecida sobre la exposición al ruido es la pérdida de audición inducida (Ward et al., 1958; Kryter, 1994). 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 y un informe más reciente de Southall et al. establece una base científica en donde se concluye que la exposición al ruido es mortal (National Academy of Sciences,

1994, 2000, 2003, 2005; Southall et al., 2007). Las recomendaciones relacionadas con la audición incluyen establecer sensibilidades auditivas de referencia en un mayor número de especies e individuos, investigar los análisis de la escena auditiva con respecto a cómo los cetáceos procesan y evalúan múltiples señales acústicas simultáneamente, determinando los niveles y efectos del enmascaramiento auditivo, y los sonidos y condiciones que deben inducir cambios de umbral temporales y permanentes (es decir, pérdida de la audición temporal y permanente). Estos documentos previos brindan revisiones de este tema específico, abordando lo conductual, fisiológico e impactos del ruido; por lo tanto, sólo abordaremos brevemente la audición y las exposiciones al ruido para proporcionar una actualización de los datos desde estos informes y para colocar estos datos en el contexto de resultados y conclusiones anteriores. 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, este último se caracteriza por tener consecuencias verdaderamente catastróficas. De acuerdo con 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) 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 8.(NOAA.2001) 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 hasta el momento se ha hecho en aire y no en agua debido al ecosistema donde se encuentra el presente trabajo, sin embargo el principio de sonar es el mismo, se trabaja con tarjetas de desarrollo experimental Matrix Creator y computadoras Raspberry 3 pi, al momento se ha logrado determinar la posición en grados azimut sin embargo lo que se busca es tener las coordenadas X, Y, Z por lo que se está implementando una segunda tarjeta de desarrollo que también cuenta con un arreglo de ocho micrófonos circular, se lleva a cabo para los siguientes meses y se considera que resultará exitoso debido al éxito ya obtenido trabajando con sólo una tarjeta de desarrollo.

En las siguientes secciones encontraremos los fundamentos teóricos como son el DOA (Direction Of Arrival), además se presenta cómo se calcula el ángulo azimutal y por último la localización y seguimiento usando 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. Posteriormente en la sección experimental cómo fue montado y realizado el experimento para obtener la detección acústica, obteniendo una comparación del algoritmo utilizado con las mediciones físicas realizadas durante el experimento. Por último, en conclusiones hablamos de la obtención hasta el momento y trabajo futuro para este proyecto.

## TEORÍA

DOA: 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. (Abeida, Habti; Zhang, Qilin; Li, Jian; Merabtine, Nadjim .2013) Este conjunto de sensores forma lo que se llama una matriz de sensores. A menudo existe la técnica asociada de formación del haz que es la estimación

de la señal desde una dirección dada (*Zhang, Qilin; Abeida, Habti; Xue, Ming; Rowe, William; Li, Jian .2012*).

Las operaciones que se pueden realizar con un arreglo de micrófonos, en general con un arreglo de sensores separados espacialmente, son: 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). 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.

La dirección de una fuente de sonido se puede obtener estimando el retardo de tiempo de arribo (TDOA) entre dos micrófonos. Un enfoque para estimar el retardo de tiempo es calcular la correlación cruzada entre las señales recibidas en los dos micrófonos. El índice del punto máximo en la correlación representa el retardo estimado. (Brandstein *et al.* 1997) La correlación cruzada se puede modelar por:

$$R(k) = \sum S_i(n)S_j(n-k)$$

donde

$$\tau = \text{argmax}(R(k))$$

Entonces la dirección de la fuente se encuentra por

$$\Theta = \cos^{-1}((c \tau / F_s) / d)$$

Donde  $d$  es la distancia entre micrófonos,  $F_s$  es la frecuencia de muestreo y  $c$  es la velocidad del sonido.

Angulo azimutal: Para calcular el ángulo Azimutal es necesario contemplar tres características:

- Referencia: Punto desde dónde se mide.
- Amplitud: La magnitud medida del ángulo.
- 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 en un espacio u horizonte según la posición observador.

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  $270^\circ$ .

Localización y seguimiento: La capacidad de localizar y rastrear animales en el espacio es una función importante de PAM, 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. Por último, el seguimiento desempeña un papel importante si uno no sólo trata de localizar cetáceos acústicamente activos, sino que también intenta controlar 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 hidrófonos en relación con el objeto acústicamente activo, los hidrófonos estrechamente espaciados tienden a proporcionar mediciones altamente dependientes y correlacionadas.

En principio, existen dos métodos complementarios para la localización, uno basado en la estimación de retrasos temporales, y el otro basado en la formación de haces. La localización basada en el retardo de tiempo utiliza retrasos en el tiempo de viaje que ocurren cuando se encuentran diferentes hidrófonos a diferentes distancias de la fuente de sonido y se usa comúnmente con hidrófonos ampliamente espaciados. Los retardos de tiempo pueden ser utilizados directamente o primero convertidos en ángulos para estimar la dirección de llegada del sonido. La formación de haces, por otra parte, es común con hidrófonos estrechamente espaciados, donde se correlacionan múltiples hidrófonos para obtener la dirección de llegada del sonido. Es importante tener siempre en mente

que la localización confiable requiere que la ubicación estimada del objeto esté cerca de hidrófonos reales o virtuales. Debe evitarse la extrapolación a gran escala, aunque matemáticamente posible, porque los errores de localización pueden aumentar significativamente.

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. Por lo tanto, intento abordar algunos métodos estándar sugeridos para aplicaciones PAM y las dificultades que uno puede encontrar durante el análisis de datos. (Walter M.X. Zimmer, Cambridge, 2011).

### PARTE EXPERIMENTAL

El experimento se realizó utilizando los siguientes materiales.

- Raspberry 3 Pi: Con software Rasbian en Linux
- Tarjeta de desarrollo MATRIX CREATOR: Capacitada con un arreglo de 8 micrófonos MP34DB02 con una frecuencia de muestreo: 8 a 48 kHz Profundidad de bit: 16 bit
- Altavoz.
- Soporte.
- Flexómetro.
- 40 conectores Dupont macho/hembra.

Se montó en una superficie plana, con ayuda de un soporte en posición vertical la tarjeta de desarrollo matrix creator conectada por medio de cables dupont a la raspberry 3 pi.

El software utilizado para generar un programa ejecutable para activar el arreglo de 8 micrófonos 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 3 metros 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".

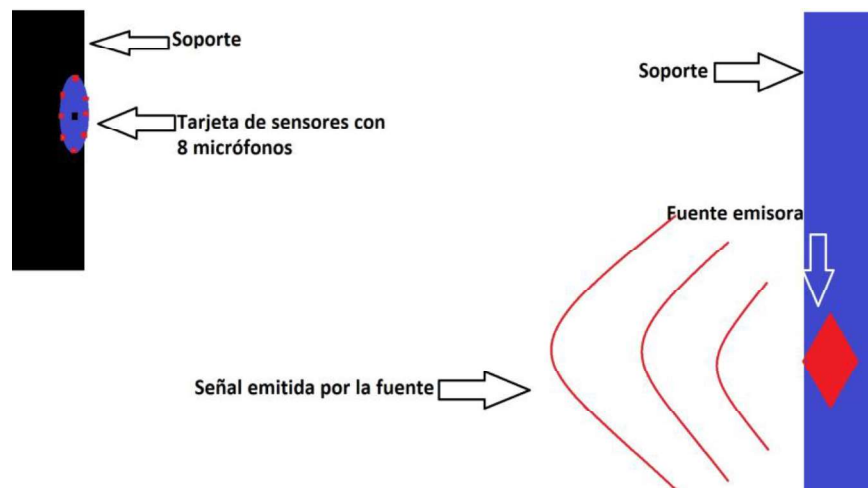


Fig1. Posición en la que se realizó el primer experimento, la fuente receptora (tarjeta de sensores Matrix Creator) tenía posición fija, mientras que la fuente emisora cambió de posicionamiento.

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.

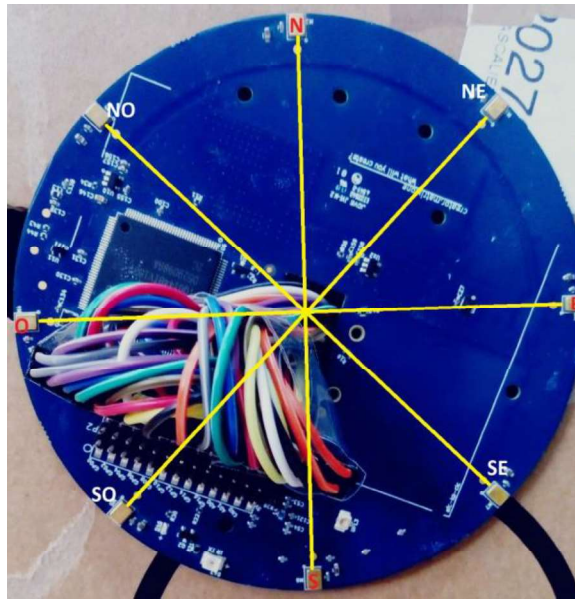


Fig2. Se emitió la señal y los 8 micrófonos fueron capaces de detectar y almacenar la señal simultáneamente en las diferentes posiciones en las que se posicionó la fuente emisora.

Posteriormente a la toma de muestras fueron procesadas en Octave con el siguiente código 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)

El código ejecutará las siguientes muestras para poder observar el atraso de cada señal, se contempla también utilizando FFT (Faster Fourier Transform) para observar la señal en dominio de la frecuencia, a su vez que en dominio del tiempo, en ésta última es donde se calcula el DOA y por último el ángulo azimutal de cada una de las muestras usando el TDOA de referencia como el retardo en tiempo.

- A continuación, el código utilizado para dicho análisis:

```
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; % retardo en segs
DOArr=asin(retardo*c/d); %*180/pi % direccion de llegada (angulo grados)
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

```

## RESULTADOS

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.

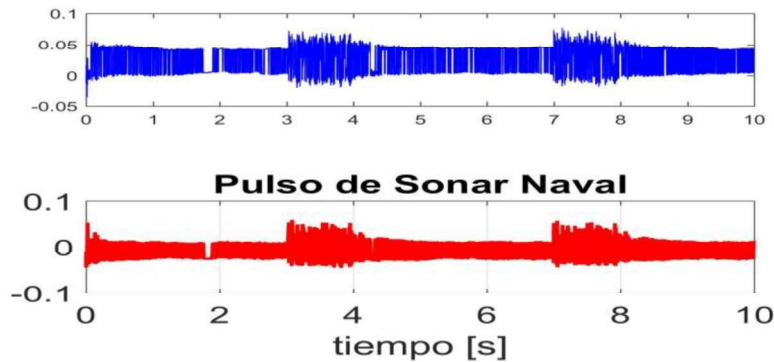


Fig3. En esta figura se muestran ambas señales analizadas que fueron posteriormente comparadas para medir el retardo.

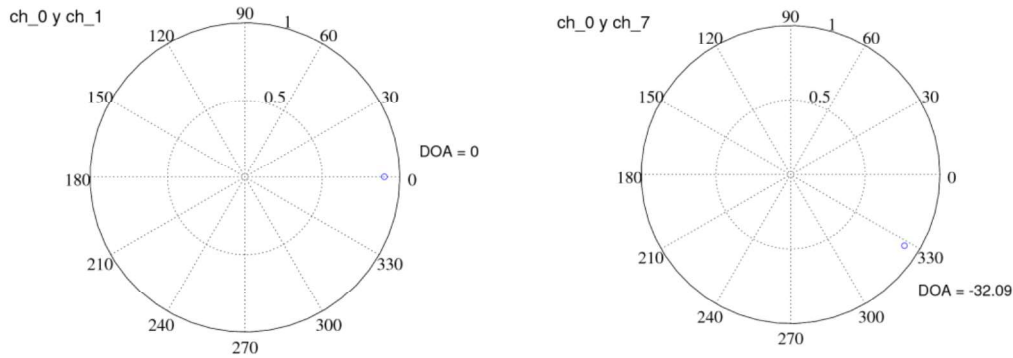


Fig4. En esta figura se muestra la dirección de arriba la señal en coordenadas azimut dada como resultado del DOA.

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

$$\text{Eq.1 } \tau = \frac{\rho^1 - \rho^0}{c} = 32.09 \text{ milisegundos}$$

En donde se ha empleado el valor de  $C = 340$  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.

$$\text{Eq 2. } R(k) = \sum S_i(n) S_j(n-k)$$

donde

$$\tau = \text{argmax}(R(k))$$

Entonces la dirección de la fuente se encuentra por

$$\Theta = \cos^{-1}((c \tau / F_s) / d)$$

$d$  es la distancia, en metros, entre micrófonos, que en este caso en particular es de 0.04m.

A continuación, se muestra en la tabla, 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. $30^\circ$	Resultado 1. $33^\circ$
Experimento 2. $0^\circ$	Resultado 2. $0^\circ$
Experimento 3. $45^\circ$	Resultado 3. $49^\circ$

Tabla1.comparación de resultados físicos y usando el algoritmo.

## CONCLUSIONES

Se logró determinar el ángulo azimutal usando el arreglo de micrófonos circulares. Se está trabajando en la sincronización del tiempo de toma de datos de las dos tarjetas de desarrollo Matrix Creator y así trabajar en dos planos diferentes para lograr minimizar el error de dirección de arribo de la señal.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Abeida, Haptj; Zhang, Qilin; Li, Jian; Merabtine, Nadjim. "Enfoques basados en la variación mínima asintótica dispersa iterativa para el procesamiento de matrices". 2013.

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 Strandings Events in 15-16 March 2001. 2011.
4. Fernández, A. (2004). Pathological findings in stranded beaked whales during the naval military manoeuvres near the Canary Islands. In P. Evans & L Miller., 2004, pp. 37-40.
5. Franztzis, A.. Does acoustic testing strans in whales? *Nature*, 1998.vol. 392, p. 29.
6. Jepson, P.D., Arbelo, M., Deaville, R., Patterson I.A.P., Castro, P., Baker, J.R et al (2003). 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.
7. Michael S. Brandstein and Harvey F. Silverman "A practical methodology for speech source localization with microphone arrays", 1997. vol 11, pp.91-126.
8. National Research Council (NRC). *Marine Mammal Populations and Ocean Noise: Determining When Noise Causes Biologically Significant Effects*. 2005.
9. 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.
10. 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.
11. Southall, B., Berkson J., Bowen D., Brake R., Eckman J., Field J., Gisiner R., Gregerson S., Lang W., Lewandoski J., Wilson J., and Winokur R. (2009). *Addressing the Effects of Human-Generated Sound on Marine Life: National Geophysical Data Center*. 2001.
12. Walter A. Zimmer. *Passive Acoustic Monitoring*. 2011. Pp.227-231.
13. 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.