

FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA
XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Prototipo de estación de monitoreo acústico binaural para obtención de indicadores acústicos

García, Alejandra.¹; Fonseca, Juan.¹; Acosta, Óscar.^{1 2}; Hermida, Luis.¹; Herrera, Marcelo.¹; Gaona, Elvis.²; Montenegro, Carlos.²; Bejarano, Mateo.¹

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad de San Buenaventura Bogotá, Bogotá, DC, Colombia, mherrera@usbog.edu.co, lhermida@usbog.edu.co, oacosta@usbog.edu.co

² Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, DC, Colombia, oacosta@correo.udistrital.edu.co, cemontenegro@udistrital.edu.co, egaona@udistrital.edu.co

Resumen

La densificación de la población mundial en conglomerados urbanos es cada vez mayor. Según datos del departamento de asuntos económicos y sociales de Naciones Unidas, el 55 % de la población mundial vive en centros urbanos, mientras que en América Latina y países del Caribe es del 81 %. Dicha densificación conlleva a un incremento de actividades urbanas y un incremento en la problemática de ruido. Tradicionalmente los estudios de ruido se desarrollan con mediciones discretas usando indicadores acústicos en decibeles. Bajo este enfoque, la gestión ambiental se centra en procesos de control de los niveles de emisión acústica. Sin embargo, considerando que la calidad de vida de las personas no solo está relacionada con el cuidado de aspectos físicos, sino considera aspectos psicológicos y del entorno, es evidente la necesidad de ampliar el enfoque de tal forma que se gestione la calidad sonora del entorno considerando una experiencia integral, adicionando indicadores que evalúen variaciones espaciales y energéticas de las fuentes acústicas e incluyan la percepción de las personas. Igualmente, los estudios acústicos tradicionales son realizados con mediciones en cortos periodos de tiempo por los altos costos asociados, dificultando obtener una visión global del ruido debido a su naturaleza estocástica. Por lo tanto, mediciones continuas basadas en estaciones de monitoreo surgen como alternativa para caracterizar el comportamiento del ruido. Así, en este artículo se presenta un prototipo de monitoreo acústico de tipo binaural capaz de obtener indicadores acústicos energéticos y espaciales para evaluar de forma integral paisajes sonoros urbanos.

Palabras claves: Ruido ambiental, ruido comunitario, audición binaural, instrumentación.

PACS: 43.20.Ye, 43.50.Rq, 43.66.Pn, 43.50.Yw.

Abstract

Densification of world population in urban conglomerates is increasing. According to data from the United Nations Department of Economic and Social Affairs, 55 % of the world's population lives in urban centers, while in Latin America and Caribbean countries it is 81 %. This densification leads to an increase in urban activities and an increase in noise problems. Traditionally, noise studies are developed with discrete measurements using acoustic indicators in decibels. Under this approach, environmental management focuses on control processes of noise emission levels. However, considering that the quality of life of people is not only related to the care of physical aspects, but also considers psychological and environmental aspects, it is evident the need to broaden the approach in such a way that the sound quality of the environment is managed considering an integral experience, adding indicators that evaluate spatial and temporal variations of the acoustic sources and include people perception. Likewise, traditional acoustic studies are carried out with measurements in short periods of time due to the high associated costs, making it difficult to obtain a global vision of the noise due to its stochastic nature. Therefore, continuous measurements based on monitoring stations emerge as an alternative to characterize noise behavior. Thus, this article presents a binaural-type acoustic monitoring prototype capable of obtaining energetic and spatial acoustic indicators to comprehensively evaluate urban soundscapes.

Keywords: Environmental noise, community noise, binaural hearing, instrumentation.



1. INTRODUCCIÓN

Con el paso del tiempo el ruido se ha convertido en una problemática cada vez mayor; sin embargo, cada vez existen más estudios y maneras de analizarlo [1], [2]. La principal forma siempre ha sido mediante indicadores de ruido y parámetros temporales de tipo energético como el nivel continuo equivalente, el nivel día tarde noche y los distintos percentiles. Los indicadores energéticos permiten observar el comportamiento y variación del ruido a través del tiempo. Esta no es la única manera en la que se comporta un sonido, ya que también tiene un comportamiento de tipo espacial en donde se puede analizar lo que pasa en un determinado entorno. Los diferentes análisis parten de la psicoacústica y del concepto de binauralidad. Al hacer uso del componente espacial del ruido se busca entender cómo se percibe realmente según las particularidades del sistema auditivo humano.

Se han implementado diferentes métodos de medición o monitorización para regular los niveles de presión sonora. Una de las principales alternativas es el desarrollo de sistemas de monitoreo de bajo costo basados en WSN (Sensor de redes inalámbricas), permitiendo así la reducción en costos para la adquisición de equipos como de personal operativo para los mismos [3]. Estas estaciones de monitoreo también permiten hacer una adquisición de datos de manera continua lo cual soluciona los problemas de los sistemas de predicción utilizados para la elaboración de mapas de ruido que presentan notables diferencias entre los valores calculados y las mediciones in situ al no tener en cuenta la naturaleza dinámica del ruido [4]. Los sistemas comunes para el análisis de niveles de ruido usan un análisis netamente temporal. La forma en que se percibe el ruido es mucho más compleja, ya que, los seres humanos no captan el sonido con ponderación lineal, esto se debe a que su sistema de audición produce diferentes efectos en la forma de análisis del ruido.

Por esta razón es necesario realizar un estudio sonoro que complemente los indicadores típicos que suelen analizarse comúnmente. De esta manera es posible encontrar una relación entre el comportamiento temporal y el espacial, el cual

se desprende del concepto de binauralidad que poseemos los seres humanos. Al unir estos dos tipos de análisis se puede obtener un estudio más cercano a como las personas perciben el ruido. De esta manera sería posible entender y estudiar de manera más detallada los comportamientos dinámicos del ruido desde diferentes puntos de vista.

Debido a esto se plantea como alternativa un sistema que permita abrir paso al análisis de parámetros energéticos y espaciales de ruido, con el fin de entender mejor que pasa con los diferentes sonidos que se presentan en un determinado entorno sonoro tanto en ubicación y caracterización de las distintas fuentes generadoras de ruido y su comportamiento a través del tiempo de manera continua.

2. PROTOTIPO DE ESTACIÓN

El desarrollo realizado consta de dos partes principales. La primera reúne el diseño del prototipo en donde se detallan las dimensiones físicas, aproximación y tipo de micrófonos utilizados. La segunda se enfoca en la programación realizada para la obtención de los indicadores de ruido energéticos tradicionales tales, así como la exploración hacia los indicadores espaciales donde mediante dos canales de audio se obtienen IACC y τ IACC. A continuación, se describe cada una de estas etapas.

2.1 Diseño físico de la estación

El diseño físico de la estación es de vital importancia, ya que es el primer paso en la cadena para el correcto funcionamiento del sistema: En la presente aproximación los micrófonos están separados de 17 a 18 cm entre sí con el fin de emular la distancia física de los oídos humanos. Es bien conocido que las cabezas binaurales son el sistema físico más adecuados para realizar este tipo de captura; sin embargo, como primera aproximación se tomó como base el sistema de grabación binaural 3DIO [5]. Ese sistema de grabación es mucho más compacto, tiene unas circunferencias que ayudan a generar la sombra acústica que produce la cabeza de un ser humano, de igual manera tienen unas orejas que permiten emular el comportamiento acústico de la pinna.

Tomando como base ese modelo se realizó la primera aproximación del sistema físico de la estación (Fig. 1).

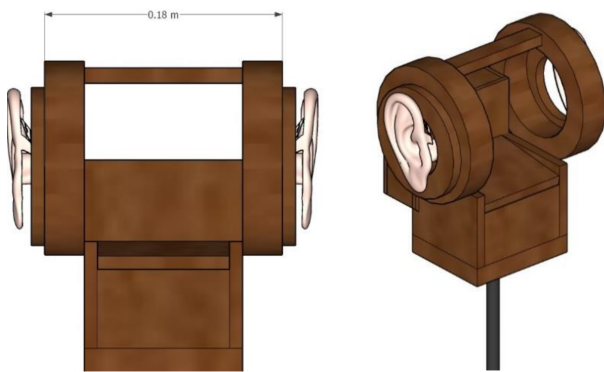


Figura 1: Diseño del primer prototipo para registro de audio binaural

Como se puede observar en la figura anterior, las cápsulas de los micrófonos se encuentran separados 18 cm entre sí, la distancia real entre los oídos teniendo en cuenta la circunferencia de la cabeza humana, es aproximadamente de 32 cm (este dato se obtuvo midiendo la longitud real entre las pinnas de una cabeza binaural comercial). Con este valor se diseñaron las circunferencias externas las cuales tienen un diámetro de 15 cm. Asimismo los círculos pequeños en el sistema se tienen con la finalidad de sostener la pinna de silicona, a continuación se presenta el sistema real implementado (Fig. 2).



Figura 2: Prototipo para registro de audio binaural implementado

Como micrófono de registro se utilizó el UMIK-1 el cual al disponer de puerto USB facilita la

conexión con sistemas electrónicos embebidos. Adicionalmente, al contar con archivo de calibración la corrección de la respuesta en frecuencia que debe realizarse en este transductor es mucho menor en comparación con micrófonos MEMS o lavalier.

2.2 Software de procesamiento

El dispositivo que realiza la grabación de audio es una Raspberry Pi en la que se encuentran conectados los 2 micrófonos encargados de la captura. Al manejar un sistema operativo basado en Linux se realiza la grabación mediante un código programado en el lenguaje interpretado Python. Los parámetros utilizados para las grabaciones son: frecuencia de muestreo de 48kHz y profundidad de 24 bits.

Una vez realizada la captura del archivo de audio se automatizó el envío de los archivos hacia una nube de almacenamiento con el fin de evitar que la memoria del dispositivo de hardware se llene debido a las características del audio mencionadas anteriormente. El cliente al que se envían los archivos de audio es OneDrive y, posteriormente, de ahí son tomados para el procesamiento de la señal y la obtención de los diferentes parámetros de ruido. De igual forma, es mucho más óptimo tener los archivos en la nube con el fin de tener respaldo y acceso desde cualquier dispositivo en caso de que sea requerido. Finalmente, los audios fueron procesados en Matlab en donde se programaron los indicadores acústicos Leq, L10, L90, Lden, Ldn con ponderación A y Z.

Con respecto a los parámetros espaciales (IACC, τ IACC) se aplicó la teoría descrita por Soeta, Y. Ando [6]. En este caso particular al ser una estación de monitoreo de ruido constante es necesario aplicar las funciones de autocorrelación y correlación cruzada interaural haciendo un análisis de largo término, por lo que es necesario realizar una segmentación del audio que lleva a un análisis de los eventos sonoros mucho más asertivo, para así conseguir el comportamiento transitorio y dinámico del ruido. Cabe resaltar que los audio del canal izquierdo y derecho se deben convolucionar con una curva de ponderación A, la cual se aproxima a la sensibilidad del oído humano [6].



Para este caso se debe tomar en consideración la duración total del audio, ya que esta ayuda a definir la duración de cada segmento y el desplazamiento de análisis de este. Como tiempo de captura se estableció 5 minutos, por lo cual se opta por tener ventanas de análisis de 1 minuto (Integration Time) con un desplazamiento de 1 segundo (Running step), este valor se determina según trabajos previos que indican que los fragmentos de audio a analizar deben estar entre 6 y 60 segundos [7]. En la Figura 3 se observa la representación gráfica de este proceso.

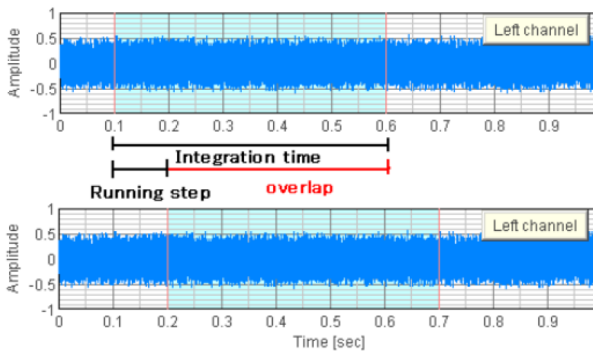


Figura 3: Ventana de integración y valor de desplazamiento. [8]

Una vez realizada la segmentación se correlacionan la señal del oído izquierdo y derecho para buscar semejanzas entre ellas. De esta forma se puede determinar hacia que lado se encuentra ubicada la señal sonora, si a la izquierda o derecha. Esta correlación se realiza en el software MATLAB mediante la sentencia `xcorr`. Después de llevar a cabo la comparación de las señales se deben calcular los parámetros espaciales de ruido (IACC, τ IACC). El IACC se obtiene sacando el valor máximo de la correlación, por otro lado, se normalizan los valores de tiempo, ya que el τ IACC es un valor que se encuentra entre 1 y -1. Después de eso se relacionan los valores de la correlación con los valores entre dicho rango, y donde se encuentre el valor de mayor amplitud (IACC), se obtiene el valor de τ . Este valor es de vital importancia ya que es el encargado de dar la ubicación de la fuente en el plano horizontal. A continuación, en la Tabla 1 se muestran los valores más importantes que se pueden presentar en esta variable.

Por último, se realiza una gráfica que permite visualizar y analizar los resultados obtenidos de

Tabla 1: Valores importantes de τ IACC.

Valor	Ubicación Plano
-1	Izquierda
0	Centro
1	Derecha

la correlación, de esta manera se puede observar la ubicación de la fuente visualmente.

A modo de ejemplo para la Figura 4 en el eje horizontal se encuentran los valores de τ entre -1 y 1 (en el rango de 0 a -1 se toma como la señal sonora en el oído izquierdo y entre 0 a 1 la del oído derecho). En el eje vertical se tienen los valores de la correlación, los cuales tienen valores lógicos de 0 a 1, cuando el valor es 1 la correlación entre las señales es máxima, cuando el valor es de 0, la correlación es nula. El IACC es el mayor valor en la correlación de las señales, este valor demarca la ubicación de la fuente en el plano horizontal, este valor siempre se relaciona con τ , por último se puede encontrar un parámetro w IACC, el cual muestra el ancho que se tiene en el IACC.

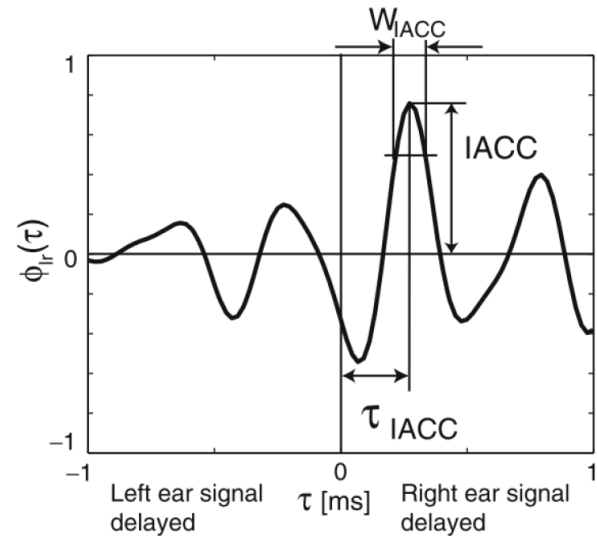


Figura 4: Gráfica de la función de correlación cruzada interaural. [6]

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección son presentados los resultados principales para la obtención de los parámetros energéticos y espaciales.

3.1 Parámetros energéticos

Los parámetros energéticos de ruido fueron validados y programados con respecto a un sonómetro integrador tipo 1 usando el micrófono USB en campo libre. Sin embargo al unir el sistema (micrófonos + estructura) para la estación de monitoreo se presentaron variaciones en los indicadores de ruido producto de la pinna que tienen los micrófonos para emular el sistema de captura binaural. Por esta razón fue necesario ajustar la respuesta en frecuencia de los micrófonos mediante la aplicación de un filtro inverso para tener una respuesta cercana al sonómetro.

La medición se realizó generando diferentes niveles de presión sonora con una fuente sonora emitiendo ruido rosa en variaciones de 5 decibeles. Para cada caso se realizaron 3 mediciones por cada nivel con el objetivo de obtener las diferencias entre ambos sistemas (sonómetro vs prototipo) y evaluar la respuesta con respecto a la norma IEC 61672 - 1 [9], la cual establece los requerimientos para los instrumentos de medición acústica clase 1 y 2. En la Figura 5 se puede observar el montaje experimental. Vale la pena destacar que las mediciones se hicieron en espacio abierto al no disponer de una cámara anecoica.



Figura 5: Dispositivo final en medición in-situ.

Los resultados obtenidos (Fig. 6) hicieron notable la necesidad de usar un filtro para corregir la respuesta del sistema, ya que se tienen diferencias en el rango de 1.25 KHz a 20 KHz con respecto al sonómetro, siendo las bandas de 5000 y 6300 Hz las más afectadas con variaciones de hasta 15dB. Lo anterior tiene sentido por el efec-

to de la pinna sobre los micrófonos a la hora de hacer el registro sonoro.

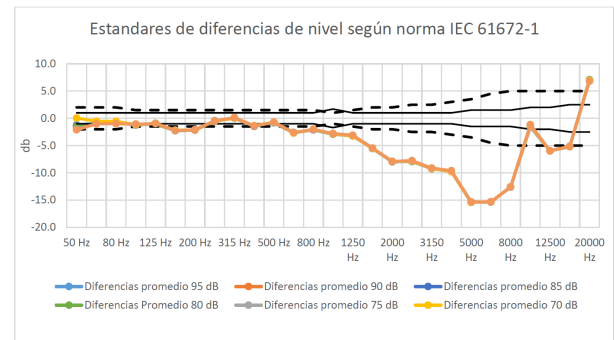


Figura 6: Diferencias de nivel óptimas según norma IEC 61672 - 1 (Sonómetro vs Estación).

De esta manera se procedió a aplicar un filtro inverso (Fig. 6 línea naranja) para cada banda de frecuencia con el fin de ajustar los resultados de los parámetros energéticos de ruido. Para este procedimiento se toma como frecuencia inicial la banda de 50 Hz, ya que la fuente con la que fueron realizadas las pruebas inicia su operación desde este valor. A continuación, se muestran los resultados obtenidos al aplicar la corrección mencionada (Fig. 7).

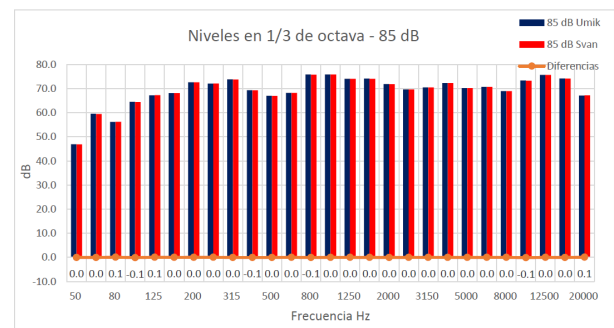


Figura 7: Resultados medición 85 dB Sonómetro vs Estación Banda de tercio de octava.

Como se puede observar en la figura anterior, se evidencia que las diferencias entre el sonómetro y la estación se reducen, siendo el valor mayor 0.3 dB. De esta manera se rectifica el funcionamiento del filtro mostrado anteriormente y se muestra la fiabilidad de la estación para obtener parámetros temporales de ruido aun cuando tiene implementada una pinna humana. Lo anterior será válido cuando la fuente acústica se encuentre al frente tal como se hizo el experimento, ya que la aplicación de filtros para cada ángulo no resultaría práctico y el alcance principal de proyecto



se enfoca en alternativas a sistemas tradicionales de monitoreo.

3.2 Parámetros espaciales

A continuación, en la Figura 8 se muestra el montaje de medición realizado para corroborar el funcionamiento del software implementado para la estación. Consta de una una fuente sonora direccionada hacia el centro de la estación de monitoreo (0°), hacia el oído izquierdo (90°) y el derecho (270°). Esta medición se realizó reproduciendo ruido rosa y una grabación de tráfico rodado.

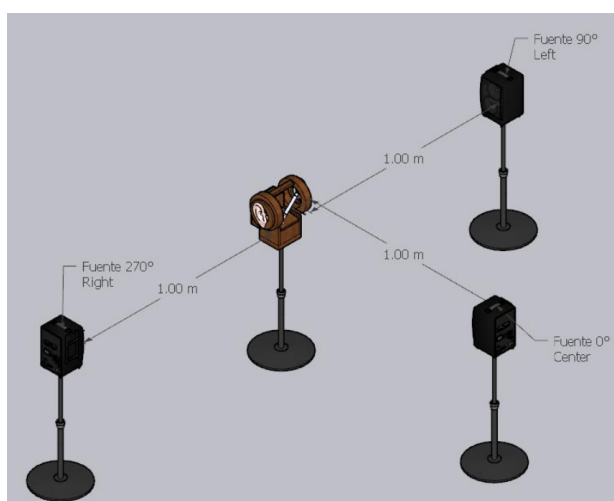


Figura 8: Ubicación de fuentes para medición de parámetros espaciales.

La programación del software con una ventana de integración de 5 segundos y un running step de 1 segundo (Ver Fig. 3), fue la que presentó mejores resultados a la hora de ubicar espacialmente la fuente acústica.

Bajo esta configuración en las Figura 9, 10 y 11 se presenta la función IACF. En el primer caso, 0° , el valor pico es muy cercano a cero ($\tau\text{IACC}=0.0039$) indicando que la fuente se encuentra en el centro con respecto al punto de captura. Al observar las Figuras 10 y 11 el τIACC registró -0.1255 y 0.1177 respectivamente, estas diferencias en signo y valores cercanos permiten localizar la fuente a izquierda y derecha.

Los resultados mostrados anteriormente, aunque permiten la ubicación correcta de la fuente, aún presentan valores bajos de amplitud en la función IACF. Dentro las posibles causas se puede

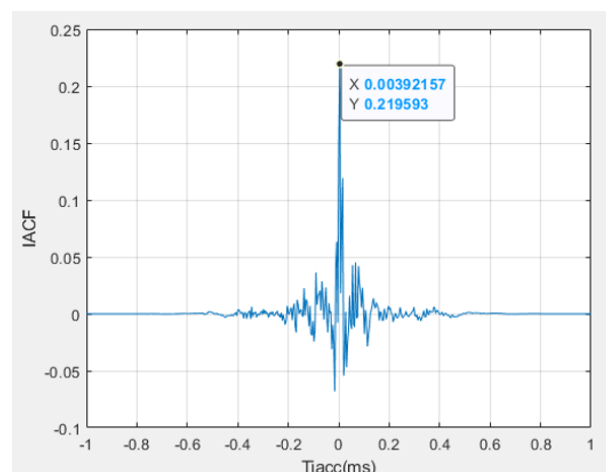


Figura 9: Gráfica IACF para 0° .

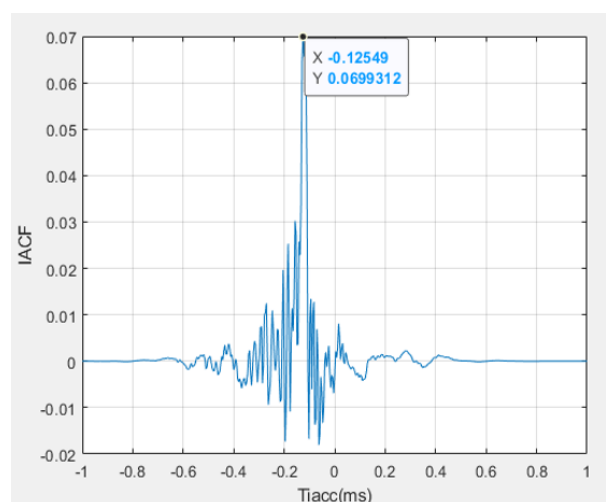


Figura 10: Gráfica IACF para 90° .

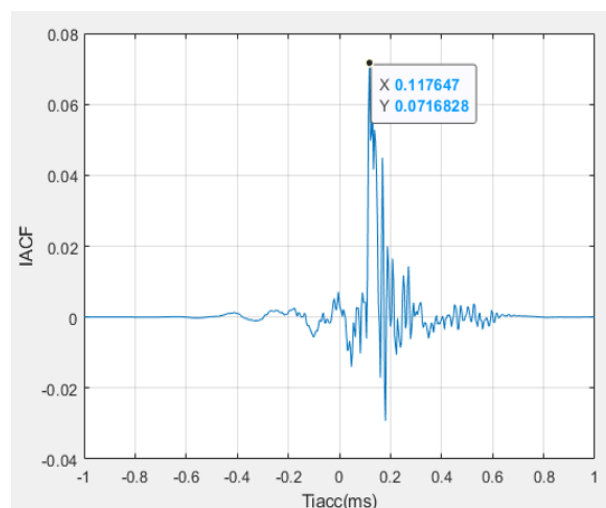


Figura 11: Gráfica IACF para 270° .

mencionar en primera medida el hecho del poco aislamiento acústico entre cada micrófono lo cual permite que se filtre información similar en los dos canales.

Por otro lado, durante el análisis de la forma de onda registrada, se pudo establecer que al manejar dos micrófonos USB existe un desfase entre ambos canales lo cual impacta los resultados al obtener la función IACF. Esto sucede porque el host USB, en este caso la Raspberry Pi, reconoce los micrófonos como dos interfaces independientes.

4. TRABAJO FUTURO

Con base en los resultados mencionados anteriormente y las limitaciones encontradas en el proyecto se está contemplando la posibilidad de manejar dos micrófonos de medición análogos conectados a una interfaz USB con el fin de evitar el desfase entre canales. De igual forma, el prototipo explicado al tener poco aislamiento entre los dos oídos se está actualizado hacia una forma antropomorfa impresa en 3D que incluya orejas de silicona y micrófono al interior de la cabeza artificial. Finalmente, se están realizando mediciones en una cámaras anecoica para validar resultados, así como el desarrollo del sistema de alimentación con energía renovable basado en paneles sonares.

5. CONCLUSIÓN

En el presente documento se ha descrito un prototipo para la captura y procesamiento de audio binaural con el objetivo de obtener indicadores de ruido ambiental energéticos y espaciales. Los resultados obtenidos permitieron determinar la correcta ubicación de la fuente acústica basada en el τ IACC, esto bajo condiciones controladas, sin embargo, el poco aislamiento acústico entre los dos canales y desfases en las señales por causa de usar micrófonos USB deben mejorarse en desarrollos futuros. Para el caso de los indicadores energéticos se aplicaron correcciones basadas en filtros inversos a las señales de ruido estudiadas permitiendo un buen acercamiento a los valores dados por equipos de medición tipo 1 y 2 según IEC 61672-1.

REFERENCIAS

[1] Mydlarz, Charlie; Sharma, Mohit; Lockerman, Yitzchak; Steers, Ben; Silva, Claudio e Bello, Juan Pablo. The life of a new york city noise sensor network. *Sensors*, 19(6):1415, 2019.

[2] Kivelä, Ilkka; Gao, Chao; Luomala, Jari; Ihalainen, Jukka e Hakala, Ismo. Design of networked low-cost wireless noise measurement sensors (issn 1726-5479). *International Journal on Sensors & Transducers*, 9: 171–190, 2010.

[3] Risojević, Vladimir; Rozman, Robert; Pilipović, Ratko; Češnovar, Rok e Bulić, Patricio. Accurate indoor sound level measurement on a low-power and low-cost wireless sensor node. *Sensors*, 18(7):2351, 2018.

[4] Mioduszewski, Piotr; Ejsmont, Jerzy A; Grabowski, Jan e Karpiński, Daniel. Noise map validation by continuous noise monitoring. *Applied Acoustics*, 72 (8):582–589, 2011.

[5] 3DIO. <https://3diosound.com/products/free-space-xlr-binaural-microphone>, 2022.

[6] Soeta, Yoshiharu e Ando, Yoichi. *Neurally based measurement and evaluation of environmental noise*. Springer, 2015.

[7] Cadena, Luis Fernando Hermida. *Desarrollo de un modelo de evaluación de paisajes sonoros según aspectos espaciales, temporales, subjetivos y de contexto*. Tese de doutorado, Universidad Politécnica de Madrid, 2019.

[8] Bidondo, Alejandro. Re-descubriendo la ventana de integración temporal del sistema auditivo: consecuencias en la ciencia acústica. *PRIMERAS JORNADAS REGIONALES DE ACÚSTICA AdAA*, 2009.

[9] Commission, International Electrotechnical *et al.* *Electroacoustics—sound level meters—part 1: Specifications (iec 61672-1)*. Geneva, Switzerland, 2013.