



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Ignacio Andrés Sierra Sanfurgo

Preparación de experimentos para pruebas de localización acústica usando HRTF

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Electrónico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 09 de noviembre de 2018



Preparación de experimentos para pruebas de localización acústica usando HRTF

Ignacio Andres Sierra Sanfurgo

Informe Final para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Facultad de Ingeniería de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann
Profesor Guía

Sr. Gabriel Hermosilla Vigneau
Segundo Revisor

Sr. Jorge Mendoza Baeza
Director de Escuela

Valparaíso, 09 de noviembre de 2018

Este trabajo va dedicado a las personas que más amo en el mundo, ellos son mi hijo Benjamín, mi mujer Xenia y mis padres Carola y Guillermo.

Agradecimientos

Esta etapa de mi vida ha tenido todo tipo de momentos inolvidables, muchos alegres y algunos momentos difíciles, por lo que quiero agradecer a las siguientes personas:

Primero a mis amados Padres Carola Sanfurgo y Guillermo, le quiero decir que estoy muy orgulloso de ser su hijo y estoy tremendamente agradecido por todo el apoyo y animo incondicional que me han entregado.

También quiero agradecer profundamente al amor de mi vida, mi mujer Xenia Álvarez, que ha sido fundamental en esta etapa, por su apoyo, ayuda y compromiso entregado hasta hoy.

Otra persona muy importante y fundamental para mí a la que quiero agradecer, es a mi hijo Benjamín Sierra, que me ha dado las fuerzas y energía necesaria para seguir adelante.

Y de igual manera, quiero agradecer a mi profesor guía Sebastián Fingerhuth, por toda la ayuda y disponibilidad entregada. Así también, a mi profesor correferente Gabriel Hermosilla gracias por sus correcciones y consejos.

Por último, reconocer y retribuir al proyecto de investigación FONDECYT 11150388 por su aporte e interés. Así también, a los establecimientos educacionales, como la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM) y la Universidad Austral de Chile (UACH) por la disponibilidad de sus intermediaciones.

Valparaíso, 8 de octubre de 2018

Ignacio Sierra

Resumen

Este proyecto está asociado al proyecto de investigación FONDECYT 11150388 sobre simulación de localización audio 3D, y tiene como propósito preparar experimentos de localización acústica 3D usando HRTF personalizadas y comparar métodos para replicar pinnas para obtener las HRTF's de cada persona. Para llevar a cabo este proyecto se inicia con el estudio e investigación de los conceptos básicos y fundamentales, donde posteriormente se enfrenta la problemática e se implementa su solución.

Luego se prosigue con el desarrollo del proyecto que se enfoca primeramente en garantizar los requerimientos adecuados para efectuar experimentos de localización de audio 3D utilizando fuentes sonoras. Este proceso consta en la construcción de una estructura, sus fuentes sonoras (altavoces) y el sistema para ejecutar el experimento, después se realiza una caracterización de las fuentes, para conocer su comportamiento y posteriormente diseñar los estímulos acústicos, donde se utiliza un ruido blanco filtrado de diferentes banda de frecuencias distintas. Por último, se corrobora que los altavoces y los estímulos acústicos funcionan correctamente para implementar el experimento de localización de audio.

El segundo proceso experimental tiene como propósito comparar las réplicas de pinnas obtenida mediante la técnica hibridad de moldes (alginato-yeso) y la fotogrametría para luego imprimirlas en 3D (material de impresión es filamento PLA). Para este proceso se construye una estructura que permite añadir las diferentes pinnas, el micrófono y el parlante, luego se realizan pruebas para conocer si la estructura genera alteraciones en las mediciones. A continuación, se procede a realizar mediciones utilizando barridos de frecuencia (sweep) con el fin de obtener la respuesta impulsiva de cada pinna. Al final se analiza los resultados y se determina si los métodos de replicar pinnas son adecuados para obtener las HRTF's personalizadas.

Finalmente luego del análisis de estas mediciones se concluye si la preparación de experimento logra obtener resultados confiables para seguir avanzando en la localización de audio tridimensional individual.

Palabras claves: experimentos de localización, pinnas, HRTF, respuesta impulsiva, ruido blanco, mediciones acústicas.

Abstract

This project is associated with the research project FONDECYT 11150388 on simulation of 3D audio localization, and its purpose is to prepare 3D acoustic localization experiments using personalized HRTF and compare methods to replicate pinna to obtain the HRTF's of each individual person. To carry out this project begins with the study and investigation of basic and fundamental concepts, where subsequently the problems is faced and implement its solution.

The development of the project focuses on first guaranteeing the adequate requirements to carry out 3D audio localization experiments using sound sources. This process consists in the construction of a structure, its sound sources (loudspeakers) and the system to execute the experiment, then a characterization of the sources is made, to know their behavior and then design the acoustic stimuli, where a white noise is used filtering different band of different frequencies, and finally corroborating that the speakers and acoustic stimuli work correctly to implement the audio localization experiment.

The second experimental process has the purpose of comparing the pinna replicas obtained by means of the alginate-gypsum technique and photogrammetry and then printing them in 3D (printing material is PLA filament). For this process, a structure is constructed that allows adding the different pins, the microphone and the speaker, then tests are performed to know if the structure generates alterations in the measurements. Next, we proceed to make measurements using sweep frequency (sweep) in order to obtain the impulsive response of each pinna. At the end, the results are analyzed and it is determined if the methods of replicating pinna are suitable to obtain the personalized HRTF's.

Finally, after the analysis of these measurements, it is concluded whether the experiment preparation achieves reliable results to continue advancing in the location of individual three-dimensional audio.

Key words: localization experiments, pinnas, HRTF, impulsive response, white noise, acoustic measurements.

Índice general

Introducción	1
1 Antecedes generales y propuestas.....	3
1.1 Descripción de la problemática	3
1.2 Contextualización del trabajo	4
1.2.1 Percepción acústica	4
1.2.2 Sistema auditivo	4
1.2.3 Localización sonora	6
1.2.4 Audición binaural	6
1.2.5 Diferencias de tiempo interaural (ITD)	7
1.2.6 Diferencias de intensidad interaural (ILD)	8
1.2.7 Función de transferencia relacionado con la cabeza (HRTF)	8
1.2.8 Reverberación.....	9
1.3 Sistema de reproducción de audio tridimensional.....	10
1.3.1 Sistema Estereofónico	10
1.3.2 Sistema reproducción Binaural.....	11
1.3.3 Síntesis de Campo de Onda (WFS).....	13
1.3.4 Sistema Ambisónico	14
1.4 Solución propuesta en base al contexto.....	15
1.5 Objetivos generales y específicos.....	16
2 Marco teórico y solución.....	17
2.1 Marco teórico	17
2.1.1 Señal impulsiva	17
2.1.2 Utilización de barrido de frecuencia (sweep)	17
2.1.3 Respuesta en frecuencia del altavoz	18
2.1.4 Ruido blanco.....	18
2.2 Solución propuesta.....	19
2.2.1 Medición de Función de Transferencia Relacionada con la Oreja (ERTF).....	19
2.2.2 Requerimientos para experimentos de localización acustica	19
2.2.3 Procedimiento para medir estímulos acústicos	20

3 Implementación del proyecto	21
3.1 Implementación de localización fuentes reales.....	21
3.1.1 Construcción de parlantes	21
3.1.2 Estructura para experimento de localización de audio.....	22
3.1.3 Método de medición de los parlantes	23
3.1.4 Procedimiento previo al análisis de resultados	24
3.1.5 Diseño de estímulo acústico.....	25
3.2 Implementación del experimento para estudiar y comparar pinnas	26
3.2.1 Métodos de réplicas.....	26
3.2.2 Estructura para medición de pinnas.....	27
3.2.3 Método de medición de pinnas.....	28
4 Mediciones y resultados.....	30
4.1 Mediciones para la compensación de parlantes.....	30
4.1.1 Respuesta al impulso de los parlantes.....	30
4.1.2 Compensación de los parlantes	31
4.1.3 Resultado de la compensación.....	33
4.2 Identificación de parámetros generadores de variabilidad para estudiar y comparar las pinnas.....	33
4.2.1 Mediciones para rotación de mesa giratoria	34
4.2.2 Mediciones con distintas profundidades del micrófono	35
4.2.3 Mediciones sobre el procedimiento de instalación de pinnas	36
4.2.4 Mediciones sobre densidad de la réplica PLA	39
4.2.5 Mediciones en caja fabricada	40
4.2.6 Mediciones realizada cámara anecoica UACH.....	42
4.2.7 Mediciones realizada cámara anecoica UTFSM	44
Discusión y conclusiones.....	52
Bibliografía.....	54

Introducción

La percepción del sonido en los seres humanos es muy importante para mantener el equilibrio, asimilar el entorno tridimensional en el cual se interactúa, ubicar la posición a la que se encuentra cualquier fuente que genere una onda sonora y además, es indispensable para la comunicación entre las personas.

A medida que transcurre el tiempo, el hombre ha estudiado e investigado como el sistema auditivo permite localizar de donde proviene el sonido en un espacio tridimensional, en el cual se ha aprendido que los humanos pueden percibir el entorno acústico tridimensional que los rodea [1], debido a que cuentan con un sistema de audición binaural, es decir, con dos receptores acústicos (los oídos) y a la separación de estos receptores de onda de sonidos. Para profundizar en la comprensión de la localización acústica es necesario estudiar algunos conceptos importantes, los cuales serán descritos en el informe, como los tres planos referentes a la cabeza, la diferencia de tiempo interaural (ITD), la diferencia de intensidad interaural (IID) y las alteraciones que realiza el sistema auditivo a las señales acústicas denominadas Funciones de Transferencias Relacionadas con la Cabeza (Head Related Transfer Function (HRTF)) [2]. Las HRTF son muy importante para ubicar el grado de elevación (plano medio) de la fuente sonora, ya que sin ellas solo se logra localizar la posición de las fuentes sonoras de forma precisa respecto a la posición lateral (plano horizontal).

El avance de la tecnología y la inevitable curiosidad del hombre, busca simular el audio tridimensional, tratando de transmitir la misma sensación de encontrarse en un entorno acústico de la vida real, tanto para soluciones medicinales, de investigación y entretenimiento. En la actualidad, se pueden encontrar algunos métodos principales de simulación de audio 3D como, el sistema estereofónico (creado por Alan Blumlein en 1931), el sistema reproducción binaural y el de síntesis de Campo de Onda del inglés (Wave Field Synthesis) [3]. A través del conocimiento de estos métodos se logra diseñar los experimentos de inmersión acústicos tridimensional.

Uno de los sistemas más simple para los experimento de audio 3D es el método de grabación y reproducción binaural, el cual utiliza altavoces como fuente acústica y micrófonos dentro de los oídos para la grabación, luego auriculares para la reproducción. Utilizando el método de grabación de este sistema se puede obtener las HRTF's, es decir, captar y registrar las modificaciones o alteraciones que experimenta la señal acústica en el trayecto de la fuente al

oído. Estas modificaciones se originan por las reflexiones del torso, los hombros, la cabeza y las pinnas (orejas) de las personas. Al obtener o calcular algunas HRTF's se puede generar una inmersión de audio 3D mediante la reproducción en auriculares [4]. Esta simulación se puede realizar utilizando HRTF's estándar que se encuentran en el mercado, que es más sencilla y tiene un bajo costo, pero presentan un mayor porcentaje de error en la localización de audio que varía según el oyente o utilizando HRTF's personalizadas, que requiere de un mayor costo tanto de recurso y tiempo, pero la localización es de mayor calidad [5].

La principal razón de utilizar HRTF' personalizadas para realizar una simulación de audio 3D es que la fisiología de cada persona (altura, hombro, cabeza, orejas) es diferente, provocando que la percepción en la localización del sonido también sea distinta. Entonces, la calidad de inmersión de audio 3D utilizando HRTF's estándar variará entre un individuo y otro. Para las HRTF's personalizadas la pinna es de gran importancia [6] [7], ya que realiza las transformaciones más relevantes a las señales acústica que llegan al tímpano, estas modificaciones o alteraciones también son distintas según la posición de la fuente acústica respecto a una persona (arriba-abajo, frontal-atrás, izquierda-derecha).

En el mercado existen cabezas y orejas artificiales con diversas características y aplicaciones, algunas de estas son construidas de moldes de personas específicas y otras de medidas promedios de un grupo de gente o simplemente por estimaciones de la forma de la cabeza. A todas estas réplicas y moldes se les incorporan micrófonos en los canales auditivos que permiten realizar mediciones acústicas. En este proyecto se trabaja con réplicas de pinnas (orejas) obtenida mediante técnica mixta o híbrida de alginato y yeso [8] y la técnica de fotogrametría, donde se imprimen en 3D, cuyo material de impresión es filamento PLA. El propósito de estas réplicas es estudiar si su comportamiento y características acústicas son iguales o similares a una pinna real, y así posteriormente utilizarlas para obtener las HRTF's personalizadas

Para el análisis de una simulación de audio 3D utilizando HRTF's personalizadas, se requiere comparar los resultados de localización usando fuentes acústicas simuladas y fuentes acústicas reales. Por lo tanto, para la localización acústica con fuentes sonoras reales es necesario optimizar y perfeccionar todos los requerimientos del experimento, siendo el más importantes garantizar que el estímulo acústico (señal de audio) transmitido sea el adecuado, para así identificar si los errores de localización son generados por la simulación 3D o por la percepción acústica de la persona.

En los siguientes capítulos de este informe se abordan con profundidad los contenidos tratados en este apartado, con el propósito de permitir un íntegro entendimiento y comprensión de los conceptos más importantes en la localización acústica, los sistemas de simulación de audio 3D, la metodología y el procedimiento en el desarrollo de los experimentos de audio que contribuyen a implementar el proyecto de simulación de localización utilizando HRTF's personalizadas.

1 Antecedes generales y propuestas

Este capítulo se compone principalmente de una contextualización referente al área de la acústica y la localización del sonido tridimensional, luego se da a conocer la problemática presente, junto con las soluciones propuestas y por último, se describen sus objetivos correspondientes.

1.1 Descripción de la problemática

Dentro del Laboratorio de Acústica y Vibraciones de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, existe un proyecto de investigación, cuyo objetivo es realizar una simulación de localización de audio tridimensional, que permita comparar la percepción de las personas utilizando sus HRTF's personalizadas y las HRTF's estándar que existen en el mercado. Las etapas que se están trabajando en el proyecto están compuestas por, la construcción de modelos de orejas artificiales y la medición de sus características acústicas, fotogrametría de la cabeza y de las orejas 3D, el cálculo las HRTF's respecto a los moldes digitales de las cabezas, la implementación y simulación de audio 3D, y por último, con un experimento de localización de audio 3D con convolución de HRTF(s) en tiempo real.

Por lo tanto, algunas actividades del laboratorio están enfocadas en calcular o medir la representación geométrica de la cabeza y la oreja (pinna) de las personas para obtener las HRTF's personalizadas de cada persona. La obtención de las HRTF se ejecutan mediante dos procesos, el primero es calcular las HRTF's utilizando un programa llamado MESH2HRTF, y el segundo es obtener las HRTF's de forma análoga usando micrófonos y altavoces, a través de dos réplicas obtenida por medio de la técnica de fotogrametría para ser impresa en 3D y por alginato-yeso. Para finalizar, se está trabajando en un software que realice una convolución a tiempo real, entre las HRTF's conseguidas por los procesos anteriores y la posición de la rotación de la cabeza de los oyentes, para recrear una simulación acústica tridimensional.

Sin embargo, para desarrollar las diferentes etapas se requieren implementar procedimientos de medición que permitan obtener resultados fidedignos y confiables. Una de las etapas es el moldeado de la pinna, donde se necesita un procedimiento que facilite la comparación en la respuesta impulsiva, principalmente en frecuencia, entre los dos métodos para replicar la pinna. La otra etapa, es la simulación de localización de audio con el software de convolución a tiempo real, donde su objetivo es comparar la ubicación de las fuentes acústicas de manera

virtual, utilizando las HRTF personalizadas del oyente y las estándar. Para una correcta comparación se precisa contar con la información del error natural del oyente en la localización del sonido, utilizando fuentes reales, siendo importante la caracterización en la implementación de este experimento.

Por consiguiente, se establece que en el estudio de réplicas de pinnas y localización de audio 3D, requieren de procedimientos eficientes, de alta exactitud, minuciosidad, para obtener resultados confiables, logrando avanzar de forma segura en el desarrollo del proyecto de investigación del laboratorio de acústica y vibraciones.

1.2 Contextualización del trabajo

En la siguiente sección se explican los conceptos fundamentales para entender como las personas localizan el sonido, los diferentes sistemas de reproducción de audio, para facilitar la comprensión del desarrollo del experimento de localización utilizando HRTF's personalizadas.

1.2.1 Percepción acústica

El sonido se genera cuando una fuente produce vibraciones de amplitudes pequeñas a su alrededor, a causa de la compresión y descompresión de la masa del aire. Estas ondas se propagan y llegan al sistema auditivo. Gracias al mecanismo fisiológico auditivo (oído), se logra percibir estas ondas o vibraciones sonoras, es decir, percepción acústica. Esta posee dos características esenciales; el volumen, relacionado con la magnitud física denominada presión sonora, y el tono, relacionado con la frecuencia [Hz]. La audición de los seres humano está limitado a un rango aproximado de 20 [Hz] hasta 20 [kHz], siendo este rango distinto para todas las personas, determinado por su fisiología y edad [9].

El sistema auditivo es el encargado de procesar la información de las ondas que luego son emitidas a nuestro cerebro, pasando por varias etapas que permiten distinguir la localización de estas fuentes en un campo tridimensional. El oído es un órgano sensorial muy importante para entender la simulación de audio 3D, por ende, es fundamental estudiar su estructura para comprender su funcionamiento.

1.2.2 Sistema auditivo

El sistema auditivo es causante que los seres humanos logren percibir el sonido, aunque este sistema por sí solo no es capaz de localizar las fuentes en un espacio tridimensional, es necesario para cumplir ese objetivo. La estructura del sistema auditivo (ver Figura 1.2-1) es relevante, dado que recepta las ondas sonoras, procesa la información y luego la transmite al cerebro, donde este sintetiza la información de ambos oídos permitiendo ubicar el punto en el campo en donde se originan las ondas sonoras.

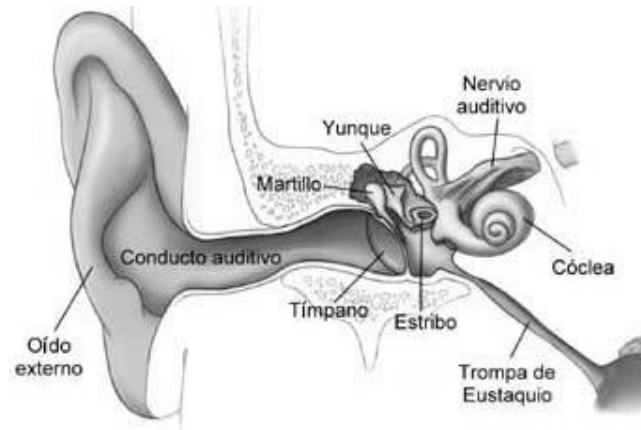


Figura 1.2-1 Sistema auditivo [10].

El sistema auditivo y sus componentes, que se observan en la Figura 1.2-2, se dividen en tres etapas. Estas son:

- **Oído Externo:** se compone por la pinna, que es la parte visible del oído externo (B de la Figura 1.2-2) y donde llega primero el sonido (A de la Figura 1.2-2), luego el pabellón auricular y el canal auditivo (C de la Figura 1.2-2), que conduce al oído medio. Siendo el encargado de captar las ondas sonoras, transformándolas en ondas planas, provocando vibraciones del tímpano.
- **Oído Medio:** consiste inicialmente en el tímpano (D de la Figura 1.2-2), que está conectado con una cadena de huesillos denominados “martillo-yunque-estribo” (E de la Figura 1.2-2). En esta etapa el sonido se transforma de energía acústica a energía mecánica, donde los huesillos convierten la energía mecánica en la presión del fluido dentro del oído interno (la cóclea) (G de la Figura 1.2-2) a través de movimiento en la ventana oval (F de la Figura 1.2-2). Además, protege el oído interno, modulando la cantidad de energía que recibe.
- **Oído Interno:** Se compone por la cóclea, donde la presión de fluido provocada genera, según la frecuencia, vibraciones en la membrana basilar (H) de la Figura 1.2-2. Este proceso origina impulsos eléctricos dentro de las neuronas del sistema auditivo.

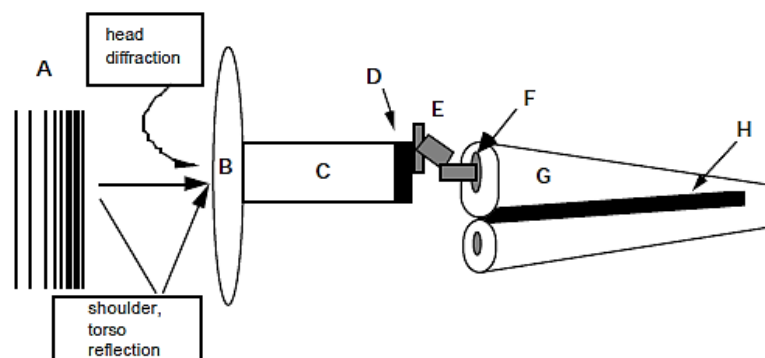


Figura 1.2-2 Esquema sistema auditivo [11].

1.2.3 Localización sonora

La capacidad de localizar fuentes de sonido es sumamente importante para todos los seres vivos, ya que ayuda a orientarse dentro de un campo tridimensional. Según se mencionó anteriormente, el sistema auditivo es el conjunto de mecanismo en donde las ondas sonoras son modificadas. Gracias a eso, el cerebro del oyente logra localizar la ubicación de las fuentes, su dirección y distancia dentro de un espacio determinado. Las direcciones de las fuentes sonoras en el entorno se definen en relación a la cabeza de las personas, por lo tanto, como que se aprecia en la Figura 1.2-3 se establecen tres planos [12] , estos son:

- El plano horizontal pasa a través de superiores de las entradas de los canales auditivos y los márgenes inferiores de las cavidades oculares.
- El plano frontal está en ángulo recto con el plano horizontal y se cruza con los márgenes superiores de las entradas a los canales auditivos.
- El plano medio se encuentra perpendicular a los dos planos anteriores.

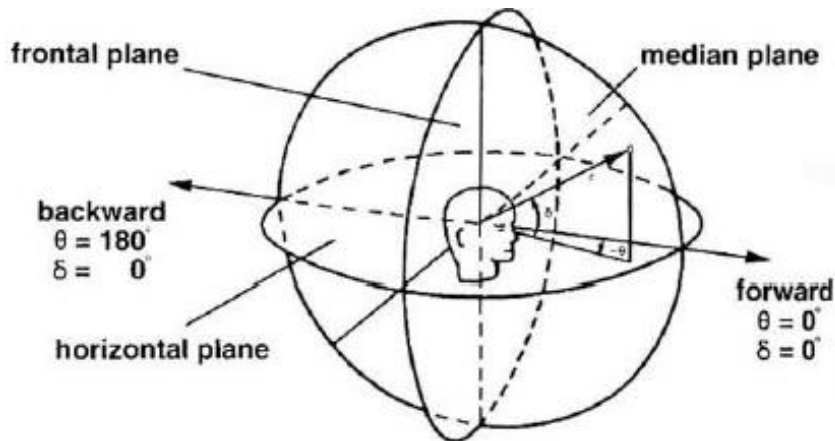


Figura 1.2-3 Sistema de coordenada para la ubicación de sonido respecto a la cabeza [2].

Los humanos logran ubicar el origen del sonido gracias a la audición binaural, debido que si solo se utiliza una audición monoaural no se podría localizar las fuentes en una posición fija.

1.2.4 Audición binaural

Las personas tienen una audición binaural, debido a que cuentan con dos receptores de señales sonoras (oídos) y ambos trabajan de forma independiente, como representa la Figura 1.2-4.

Cabe destacar, que a menos que la distancia de la fuente provenga del plano medio, la información que recibe cada oído es diferente, dado que los canales auditivos están separados a una cierta distancia, lo cual será diferente para cada persona según el tamaño de la cabeza.

Respecto a lo anterior, el cerebro realiza una comparación de la información aislada que proviene de cada oreja, permitiendo tener la sensación de estar en un entorno tridimensional, esta sensación es causada principalmente por diferencias de tiempo interaural, diferencias de intensidad interaural y la función de Transferencia de la Cabeza (HRTF) [13].

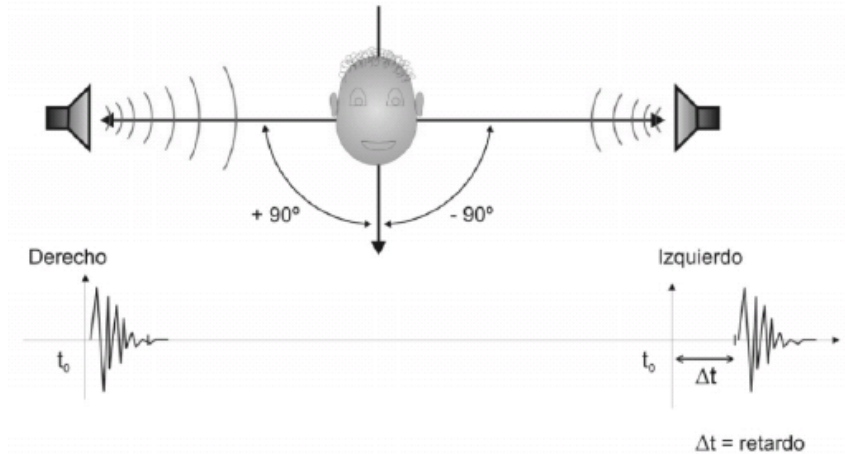


Figura 1.2-4 Representación de la audición binaural [14].

1.2.5 Diferencias de tiempo interaural (ITD)

Para lograr identificar la ubicación de origen de la fuente acústica, el sistema auditivo humano utiliza un mecanismo que se basa de las diferencias que deben recorrer las ondas hasta llegar a los oídos, es decir, la diferencia de tiempo de llegada de una señal acústica entre el oído izquierdo y el oído derecho, esto debido a la distancia que existe entre las orejas, que se aprecia en la Figura 1.2-5. Sirve para señales donde su longitud de onda no sea mayor al doble de la distancia entre las orejas y también en la lateralización, donde permite al oído determinar la localización del sonido en un ángulo horizontal 0° (derecha)- 180° (izquierda) en el plano azimutal [15].

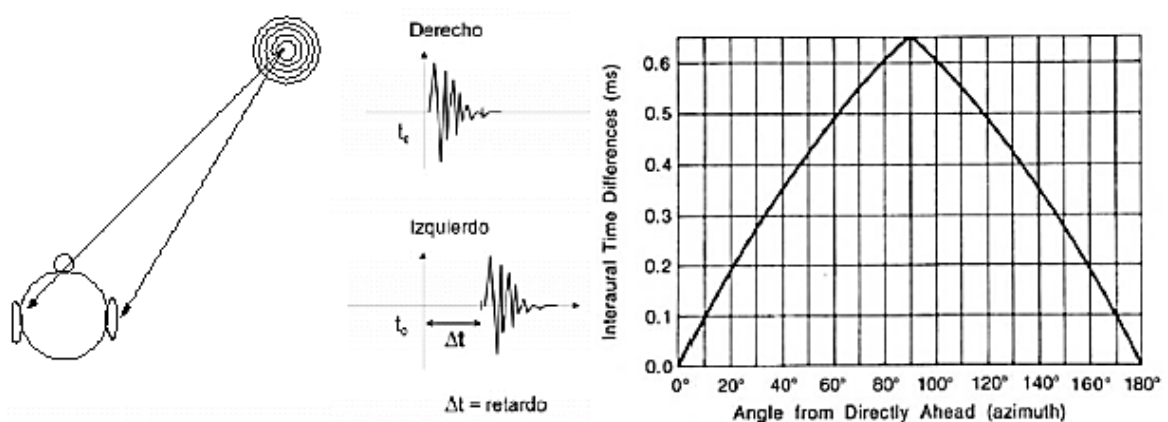


Figura 1.2-5 Representación Diferencia de tiempo interaural [16].

1.2.6 Diferencias de intensidad interaural (ILD)

Cuando uno de los oídos está a una posición más cercana de una fuente sonora, la señal acústica llegará con más energía con respecto al otro oído que se encuentra más lejos, esto se debe a que la cabeza actúa como una pantalla produciendo una sombra acústica. En realidad, lo que ocurre, es que el sonido es difractado alrededor de la cabeza para llegar al oído derecho y, por lo tanto, tendrá que viajar más y gastar más energía.

El ILD depende fuertemente de la frecuencia, como se observa en la Figura 1.2-6. A frecuencias bajas, donde la longitud de onda del sonido es más grande que el diámetro de la cabeza, hay poca diferencia de presión sonora en las dos orejas. Sin embargo, a altas frecuencias, donde la longitud de onda es pequeña, puede haber 20 [dB] o más de diferencia. También, es importante en la lateralización permitiendo al oído determinar la localización del sonido en un ángulo horizontal 0° (derecha)- 180° (izquierda) en el plano azimutal [15].

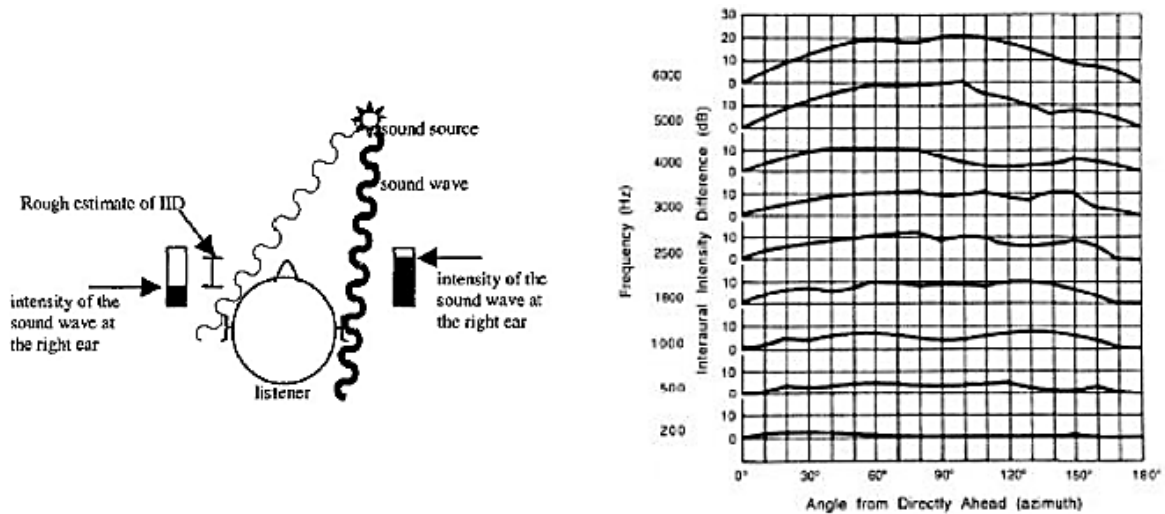


Figura 1.2-6 Representación Diferencia de intensidad interaural [16].

1.2.7 Función de transferencia relacionado con la cabeza (HRTF)

El espectro sonoro de las señales acústicas que llegan a los oídos es alterado por la cabeza, pero principalmente es modificado por el pabellón auditivo en relación al ángulo de incidencia con el cual el sonido llega a la cabeza, debido a la reflexión y difracción que este produce. Es decir, las diferencias espectrales entre el sonido original y el sonido que se escucha dan lugar a las funciones de transferencias relativas a la cabeza o HRFT (head-related transfer function) debido a todos los "obstáculos físicos humanos" que tendría ésta antes de llegar al sistema transductor dentro del pabellón auditivo, estos afectan a la forma de onda estableciendo así la ubicación de una fuente sonora. En los seres humanos el HRTF varía a causa de las diferencias físicas de cada persona volviendo así relativo el sentido de la escucha.

Esta función de transferencia depende de 4 variables que son tres espaciales y una frecuencial. Sin embargo, las mediciones para establecer el HRTF que se puede advertir en la Figura 1.2-7, se

realizan a campo lejano de audición aproximadamente a un metro de la ubicación del oyente de la fuente. De esta manera, las HRTF's dependerá fundamentalmente de la azimuth, elevación y frecuencia del sonido.

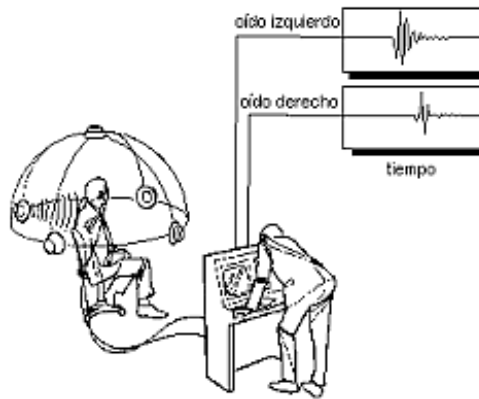


Figura 1.2-7 Medición de las HRTF [17].

Las HRTF son fundamentales a la hora de localizar las posiciones de las fuentes en el plano de elevación. Además, estas varían dependiendo de la posición de donde provenga el sonido, por lo tanto, aunque se han definido algunas HRTF estándar no implementa una inmersión en acústica 3D de alta calidad para todas las personas [17].

1.2.8 Reverberación

Al emitir un sonido dentro de un espacio cerrado, como una sala, se producen reflexiones a partir de la señal acústica original, estas se dividen en sonido directo (sin reflexión), reflexiones tempranas y las reflexiones tardías generadas a través de las primeras reflexiones. Por lo tanto, se van descomponiendo cada vez más, generando que el sonido siga permaneciendo aunque la emisión de audio de la fuente se detenga. A este efecto se le denomina (ver Figura 1.2-8). Este efecto se genera, a causa que una parte de las reflexiones del sonido es absorbida por la superficie, donde se puede transformar en una insignificante cantidad de calor y/o propagarse a otra dirección, y la otra parte es reflejada, pero manteniendo su carácter de sonido, viajando dentro del espacio hasta encontrarse con otra superficie, en la cual nuevamente una parte se absorberá y otra parte se reflejará. Este proceso se percibe así hasta que toda la señal sea absorbida o el sonido reflejado sea ya demasiado débil para ser audible, es decir, que el tiempo de reverberación depende de la “velocidad” de absorción de la energía sonora en una sala [11].

Este fenómeno es importante para percibir el entorno acústico en que está el oyente y la fuente sonora, permitiendo intuir de mejor forma las distancia entre ambos, por ejemplo, en un escenario donde existe poca reverberación la duración de la señal disminuirá en un tiempo más pequeño que en un escenario más reverberante.

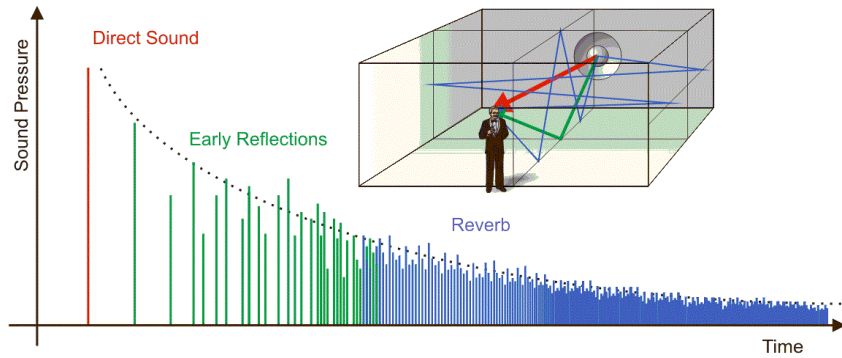


Figura 1.2-8 Amplitud reverberación respecto al tiempo [18].

1.3 Sistema de reproducción de audio tridimensional

Mientras se sigue investigando el funcionamiento del como las personas localizan una señal de audio en un campo tridimensional, también se estudian la manera de generar sistemas de reproducción de sonido 3D o sonido inmersivo, que permita percibir una señal acústica desde cualquier punto del espacio tridimensional. Algunos sistemas principales de reproducción de audio 3D son los siguientes:

1.3.1 Sistema Estereofónico

La configuración típica de un sistema de audio estéreo se compone de dos canales en el plano x-y (2D), donde los altavoces emiten sonido independiente desarrollando los canales izquierda y derecha representados en la Figura 1.3-1. A pesar de sus fundamentos, no siempre se explota este sistema por medio de técnicas de grabación estéreo, sino que es común que se utilicen fuentes monoaurales proyectadas a través de los dos canales del sistema. En parte, esta práctica perdura porque una fuente monoaural tiene mayor libertad de movimiento panorámico. Si se coloca a una persona en un punto simétrico entre los dos altavoces, podrá percibir la misma intensidad de la señal sonora por los dos oídos, generando la sensación de que el sonido proviene justo al frente al oyente, a este fenómeno se le denomina efecto fantasma. Ahora si crean variaciones en las señales emitidas como diferencias de amplitud, fase e intensidad, la sensación de localización de la fuente sonora se moverá dentro de un arco frontal llamado arco activo posicionado entre los altavoces [19].

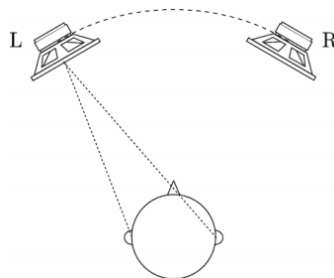


Figura 1.3-1 Reproducción estéreo con 2 canales [19].

Al transcurrir el tiempo, surge el sistema de 3 canales (L, R y C) en el plano horizontal o plano azimutal representando la lateralización y profundidad del campo sonoro deseado con una precisión aceptable.

Las limitaciones que tiene este sistema de reproducción es que el rango donde se percibe la simulación de audio 3D es muy restringido, descartando de forma inmediata el plano detrás de la cabeza y ángulos de elevación. Además, existen interferencia de señales, debido que al reproducir los sonidos mediante altavoces, una señal que va dirigida solo a un oído, inevitablemente un porcentaje de esa señal ira al otro oído. Una alternativa para disminuir estas limitaciones son la reproducción estéreo multi-canal (ver Figura 1.3-2), donde se evita que un mismo canal comparta la señal de otros, permitiendo que la fidelidad y se impresión de audio 3D de la grabación binaural se transfiera aceptablemente a sistemas multi-altavoz.

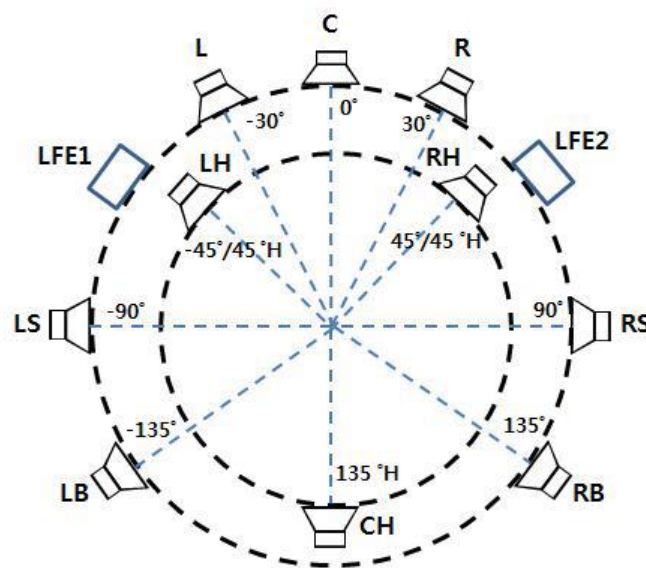


Figura 1.3-2 Sistema multi-canal 10.2 [20]

1.3.2 Sistema reproducción Binaural

Este método de reproducción binaural se realiza típicamente a través de auriculares. Además es muy simple de adaptar en la realidad, debido a que se cuenta con una reproducción independiente para ambos oídos. En este sistema la función de transferencia relacionada con la cabeza (HRTF) es muy importante y como se mencionó anteriormente se requieren contar con HRTF personalizadas, dependiendo del aspecto físico de la persona y posición de la fuente sonora en el entorno tridimensional.

En este sistema se realizan grabaciones de los sonidos en un entorno acústico, utilizando una cabeza artificial. El registro de señales que ingresan directamente por cada uno de los oídos por separado, se efectúa a través de dos micrófonos posicionados en la entrada de los canales auditivos, esta cabeza artificial es conocida por Dummy Head (ver Figura 1.3-3).



Figura 1.3-3 Prototipo maniquí Dummy Head Neumann KU 100 [21].

Por medio de esta grabación binaural, donde se registran las diferencias interaurales de intensidad y de tiempo, como así también las reflexiones que tienen lugar en las convoluciones de los pabellones auditivos, la cabeza y el torso. Todo esto brinda información al sistema perceptual para determinar la ubicación de las fuentes sonoras.

La reproducción binaural, que consiste en reproducir el audio grabado directamente en el oído con auriculares, asegurando que las señales no vuelvan a ser modificadas por las HRTF del oyente. Además, aunque se utilice audífonos la señal de igual manera sufrirá pequeñas modificaciones por el pasillo del canal auditivo generando la sensación de sentir las fuentes sonoras más cerca que en la grabación real. Ambos procesos (grabación y reproducción), se visualizan en la Figura 1.3-4.

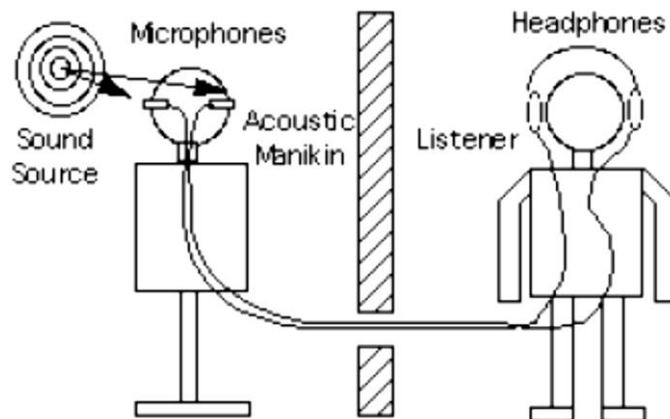


Figura 1.3-4 Esquema de reproducción binaural [22].

Este sistema logra satisfacer de gran manera la sensación inmersión, aunque tiene varias desventajas, por ejemplo:

- La percepción del campo acústico al momento de la reproducción binaural tendrá una posición fija sin importar si el oyente mueve la cabeza, ya que depende de la posición de grabación, lo que no permite una sensación real del entorno acústico.
- La grabación realizada con un tipo de pinna generara diferencias en la percepción acústica al reproducirla a diferentes personas
- La dependencia de audifonos para realizar esta simulación. Aunque existe el método Crosstalk Canceller (CTC) que permite reproducir en altavoces, solucionando el efecto denominado Crosstalk (ver en la Figura 1.3-5) que consiste en la interferencia de señales que causa cancelaciones de fase, dado que cada parlantes emite señales solo para un oído en particular, pero inevitablemente el otro oído recibe las señales dirigidas al hacia el otro.

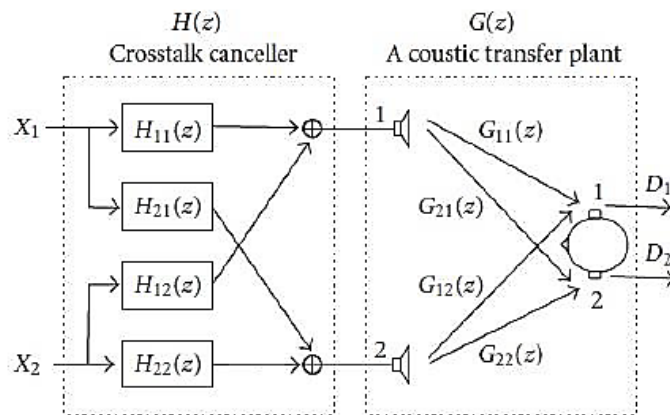


Figura 1.3-5 Efecto Crosstalk [23].

1.3.3 Síntesis de Campo de Onda (WFS)

WFS (Wavefield Synthesis) es una técnica para la reproducción de un campo sonoro en el espacio, que utiliza una gran cantidad de altavoces, permitiendo crear una escena auditiva virtual en un espacio amplio.

Cabe destacar que este sistema arregla los problemas que surgen de la reproducción estereofónica y también cubre un área mucho más amplia, debido a que elimina la limitación de la posición fija del oyente, es decir, que al no existir una zona preferente para la escucha, la persona puede percibir la misma sensación sonora en cualquier parte dentro del área de audición, siendo esta la ventaja más grande en comparación a los otros sistemas de reproducción.

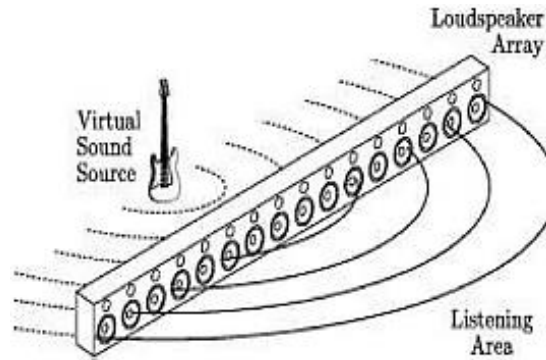


Figura 1.3-6 Reproducción Síntesis de Campo de Onda (WFS) [24].

Como se logra apreciar en la Figura 1.3-6 el sistema WFS está basada en el principio de Huygens, que define que la propagación de un frente de ondas puede ser descrita como la contribución de un número de fuentes secundarias puntuales distribuidas a lo largo del frente de ondas.

Esta técnica satisface de gran manera la sensación de situarse en un entorno acústico de alta calidad y envolvente, ya que, a mayor número de altavoces, lo cuales están alimentados según la posición de la fuente, mejor será impresión de la simulación.

1.3.4 Sistema Ambisónico

El nombre de este sistema surge del verbo “ambire” (significa rodear) y el sustantivo “sonus” (significado sonido), por lo tanto ambisonics representa sonido envolvente. Al igual que los sistemas anteriores permite grabar y reproducir las señales acústicas por medio de altavoces para simular un espacio acústico tridimensional.

Esta técnica consiste en representar el campo sonoro como una superposición de ondas planas, por lo tanto, su implementación se compone de crear un escenario de audio parecido a una esfera de sonido de 360 grados que proviene de distintas direcciones entorno a un punto central, es en ese punto donde se instala el micrófono (ver Figura 1.3-7), para registrar el audio, simulando la posición del oyente [25].

Para recrear un campo acústico tridimensional perfecto se requiere de infinitos altavoces, lo cual no es factible, sin embargo al colocar un gran número de altavoces en posicionados en forma de esfera se puede conseguir una buena aproximación al campo acústico real. Las ventajas de este sistema son:

- Que el área “sweet spot”, conocido generalmente como punto dulce, es mayor a los otros sistemas.
- La variación del campo sonoro en relación a la ubicación del oyente.
- Al aumentar los canales a transmitir, mayor será la precisión en la percepción del campo sonoro.



Figura 1.3-7 Micrófono de grabación ambisonics [26].

1.4 Solución propuesta en base al contexto

En base a lo planteado en la problemática, se debe planificar trabajar en la caracterización de dos procesos, comparar el comportamiento de las réplicas obtenidas por los métodos de moldeo y del experimento de localización de audio utilizando fuentes sonoras reales.

En primer lugar, al analizar algunos conceptos fundamentales de la acústica, se comprende que la pinna (la parte visible del oído) es sumamente importante para la localización del sonido. Es así, que para el primer proceso se utilizará la técnica de grabación binaural, advirtiendo que para crear una simulación de audio 3D se requiere de gran precisión en las mediciones, debido a que existen diversas variables que producen cambios en el proceso de ubicación de audio, como el tamaño y la posición de las orejas, la distancia entre sí y el tipo de audio que capta el sistema auditivo.

Es por esto, que para comparar el comportamiento de las réplicas de pinnas obtenidas por medio de las técnicas de alginato-yeso y fotogrametría para imprimir en 3D, se deben realizar las mediciones correspondientes para conocer sus características, a través de un procedimiento que garantice condiciones acústicas apropiadas para obtener resultados confiables. Por consiguiente, la solución que se propone para este consta en, determinar las características de la señal para llevar a cabo las mediciones, construir una plataforma con la finalidad de instalar las pinnas, instrumentos, dispositivos, disminuir las variables generadas por la manipulación humana y atenuar la mayor cantidad de reflexiones junto con el ruido ambiente.

Continuando, para el segundo proceso que corresponde a la localización de audio utilizando fuentes sonoras reales, se debe determinar el método de reproducción, la cantidad de altavoces, su respuesta en frecuencia, la distancia oyente-fuente, la señal de estímulo, etc. Se propone realizar una estructura que facilite la instalación de los altavoces, una distribución accesible a modificaciones de distancia y además, garantizar que la señal receptada por el oyente sea la deseada.

Para sintetizar se plantea como solución a la problemática, desarrollar un procedimiento eficiente que genere una base de datos confiable, para analizar y concluir resultados correctos, permitiendo avanzar con el objetivo del proyecto general del laboratorio, que es realizar experimentos de simulación de audio 3D utilizando HRTF's personalizadas.

1.5 Objetivos generales y específicos

Objetivo General

- Preparar experimentos de localización acústica 3D usando HRTF personalizadas y comparar la respuesta acústica de pinnas, a través del uso de réplicas obtenidas con distintos métodos y materiales.

Objetivos Específicos

- Investigar e interiorizarse en el área de la acústica.
- Estudiar las técnicas, métodos y experimentos de localización de audio.
- Implementar y ejecutar los experimentos de localización de audio y comparación de pinna.
- Perfeccionar procedimiento de medición de las réplicas de las pinnas y caracterización de altavoces.
- Analizar los resultados obtenidos en las mediciones efectuadas.

2 Marco teórico y solución

En este capítulo, se describen los conceptos más importantes que se utilizarán en el desarrollo del proyecto y la solución propuesta para el objetivo del proyecto. Detallando el diseño de las plataformas, los métodos o técnicas de mediciones, sus instrumentos correspondientes, los parámetros requeridos y la implementación de este proyecto.

Para el cumplimiento del objetivo, se realizan mediciones acústicas que permiten obtener la información necesaria para analizar, comparar y concluir.

2.1 Marco teórico

Para comprender el desarrollo de los procesos de este proyecto se debe conocer los conceptos más relevantes involucrados en los experimentos y mediciones.

2.1.1 Señal impulsiva

La respuesta impulsiva (IR, siglas en inglés) abarca la característica de transmisión de las ondas sonoras de un sistema, entre una fuente y un receptor, en este caso este sistema corresponde a las pinnas de las personas, asumiendo que es lineal e invariante en el tiempo. La IR es diferente para cada ubicación de la combinación fuente-receptor y varía según la geometría, densidad y material, de las pinnas reales o réplicas. En la actualidad, el conocimiento de la IR resulta imprescindible para el análisis y obtención de las HRTF personalizadas.

La identificación de algunas variaciones acústicas como atenuaciones, cancelaciones, resonancias, excesiva reverberación, entre las características de la pinna y del recinto de medición, se realiza a través del análisis de la IR [27]. Existe un norma internacional ISO 3382 [28], en el cual están definido los parámetros sobre la medición IR, aunque no es el único método de medición.

2.1.2 Utilización de barrido de frecuencia (sweep)

Hoy en día, se encuentran varios métodos para obtener la respuesta al impulso de un sistema y también existen varios problemas para llevarlos a la práctica, por ejemplo, cuando se mide un sistema electro-acústico es necesario interactuar con el campo acústico que rodea al sistema

como el ruido del ambiente, las reflexiones y las vibraciones propias del lugar en donde se está realizando la medición.

En este proyecto se utilizará un sine-sweep, que es un barrido en frecuencia (ver Figura 2.1-1), que a diferencia de otras señales, no contienen todas las frecuencias juntas, sino que una a la vez, comenzando de las frecuencias menor a mayor según el rango definido, entregando una energía uniforme a todo el rango de frecuencia. El sine-sweep es utilizado en varios estudios e investigaciones sobre las respuestas acústicas de los recintos y en la obtención de HRTF's debido a que la diferencia entre señal y ruido es grande [29].

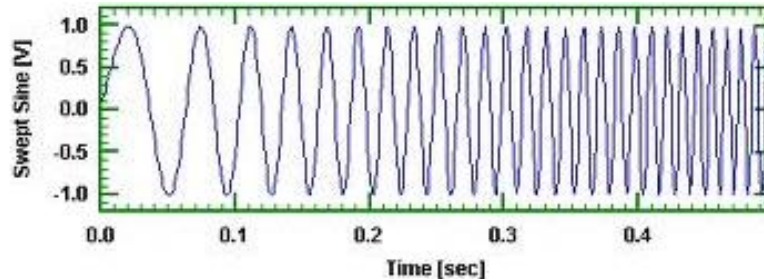


Figura 2.1-1 Barrido de frecuencia (sine sweep) [30].

2.1.3 Respuesta en frecuencia del altavoz

La respuesta en frecuencia indica la manera en que un dispositivo, en este caso los parlantes, reproducen una señal de audio. En otras palabras, se conocerá la alteración que causa el parlante a la señal a transmitir.

Cuando se dice que un altavoz tiene una respuesta plana, corresponde a que reproduce fidedignamente el audio que está pasando a través de él. Lo cual no es así en la realidad, así que posiblemente nunca se dispongan de un altavoz que tengan una respuesta en frecuencia 100% plana, ya que todos los equipos tienden a "colorear" el sonido, es decir, atenúan o realzan ciertas frecuencias. Sin embargo, en la práctica se suele aceptar como respuesta plana una respuesta de frecuencia con pocas variaciones que no sean muy bruscas (no mayor a ± 3 [dB]), a medida que la respuesta en frecuencia sea más plana, más fiel será la señal transmitida [31].

2.1.4 Ruido blanco

En los experimentos de localización de audio, tanto simulación o real se utilizan señales o estímulos acústicos de corta duración que generalmente son ruido blanco y algunas veces el ruido rosa. El ruido blanco, tiene como característica que todas las frecuencias poseen la misma probabilidad de ocurrir, además al examinar esta señal a través de un analizador de espectro, se observa que tiene la misma energía en todas las frecuencias, por lo que adquiere un espectro plano.

Por lo tanto, los estímulos que se utilizan en las pruebas de localización de este experimento también serán con ruidos blancos, sin embargo estos serán alterados en su ancho de banda de

frecuencia y tiempo de duración, es decir, se utilizarán ruidos blancos de varios rangos de frecuencia.

Para finalizar, el ruido blanco es una señal que permite caracterizar la respuesta de frecuencia de un sistema o dispositivo de audio, mientras que las ondas sinusoidales son molestas y difíciles de localizar en el plano horizontal [32].

2.2 Solución propuesta

La solución para este proyecto consta realizar mediciones para cumplir ambos objetivos definidos anteriormente.

2.2.1 Medición de Función de Transferencia Relacionada con la Oreja (ERTF)

En este proceso para medir los diferentes tipos de orejas (pinnas), se requiere obtener las ERTF's de cada oreja y así proceder a comparar que métodos de réplica, filamento PLA y/o alginato-yeso, presentan un comportamiento igual y/o similar respecto a la pinna original.

Como se ha mencionado, las HRTF's se le denomina a la alteración que producen los hombros, la cabeza y la pinna a la señal que ingresa a nuestro sistema auditivo, en este caso se medirán las ERTF's porque, las alteraciones serán causadas solo por la oreja. Para obtener estas ERTF's se realiza una medición acústica que está compuesta por una señal impulsiva generada por el software, transmitida por un parlante y receptada por un micrófono introducido dentro del canal auditivo de cada réplica, para registrar y analizar en los resultados la modificación efectuada a la señal acústica original.

Cuando la construcción de la plataforma para instalar y variar la posición de las pinnas esté terminada, se prosigue con la medición de las ERTF. En primer lugar, se define las características del sweep a utilizar en todas las mediciones que se realiza con el software. En segundo lugar, se implementa el sistema de medición compuesta por la conexión del software (PC), la tarjeta de audio, el amplificador, el parlante y por último el micrófono. Luego se realiza la medición, que consta en transmitir el barrido de frecuencia para conocer la respuesta al impulso de la pinna, es decir, obtener la ERTF's, para posteriormente analizar y comparar entre pinnas.

2.2.2 Requerimientos para experimentos de localización acustica

En el experimento para obtener el error de percepción en la localización del sonido en un campo tridimensional utilizando fuentes reales, los componentes más importantes son el software que permita trabajar con señales de audio, una tarjeta de audio, parlantes para emitir los estímulos acústicos y un sistema para determinar la apreciación de los oyentes.

Previamente a la realización del experimento, se construye una estructura, que permita instalar y modificar la posición de un altavoz. Luego, se fabrican 7 altavoces bajo las mismas características, materiales y dimensiones, debido a que se necesita que las respuestas de todos sean iguales. Para confirmar lo anterior, se requiere conocer la respuesta en frecuencia de todos

los altavoces, donde las mediciones necesarias son igual a la del proceso antes descrito, es decir, transmitir una señal impulsiva utilizando un sweep generado a través de cada parlante y analizando el resultado.

Luego de conocer el rendimiento de los altavoces, (idealmente respuesta plana), se determina que las señales o estímulos acústicos utilizados en la localización de audio son ruidos blancos intervenidos, los cuales son modificados en diferentes anchos de frecuencias y distintos tiempos de duración. Por lo tanto, se garantiza que el estímulo se transmita de forma completa.

2.2.3 Procedimiento para medir estímulos acústicos

Para corroborar que los estímulos se están transmitiendo adecuadamente, se realizaron los siguientes pasos:

- Armar la estructura que permita instalar los altavoces.
- Construir los altavoces bajos los mismos parámetros.
- Conocer la respuesta al impulso de todos los altavoces y verificar si existe diferencias entre ellos.
- Si su respuesta en frecuencia no es plana, realizar una compensación.
- Diseñar los estímulos (ruido blanco) con diferentes rangos de frecuencias.
- Confirmar, en la posición del oyente, si la potencia de los estímulos es constante en todo el rango de frecuencia.

3 Implementación del proyecto

Este capítulo abarca el diseño y construcción del experimento para comenzar a realizar las mediciones, incluyendo la descripción de los instrumentos, dispositivos, materiales y conexiones que se usaron.

3.1 Implementación de localización fuentes reales

3.1.1 Construcción de parlantes

Para su construcción se utiliza altavoces Bestamerica, modelo re383/40, donde sus características son 3 pulgadas de diámetro, 8 $[\Omega]$ de impedancia y 3 [w] de potencia.

Para una mejor emisión del sonido se decide fabricar un parlante con una pequeña caja acústica, que en este caso es de forma cilíndrica, necesaria para evitar que las ondas de la parte trasera de la membrana salgan hacia la parte delantera produciendo el denominado 'cortocircuito acústico' (ver en la Figura 3.1-1), que produce anulaciones de ondas a diferentes frecuencias (sobre todo graves).



Figura 3.1-1 Ilustración del funcionamiento de la caja acústica [33].

Para el armazón del parlante, se usa un tubo y tapa de PVC sanitario para cementar de 110 [mm] y para el largo se establecieron tres medidas diferentes, 10, 20, y 30 [cm], donde al comparar sus respuestas en frecuencias entre 200 [Hz] a 19 [kHz] se observa que las variaciones son pequeñas, como se ve en la Figura 3.1-2, por lo tanto, se determinó construir parlantes de largo de 20 [cm].

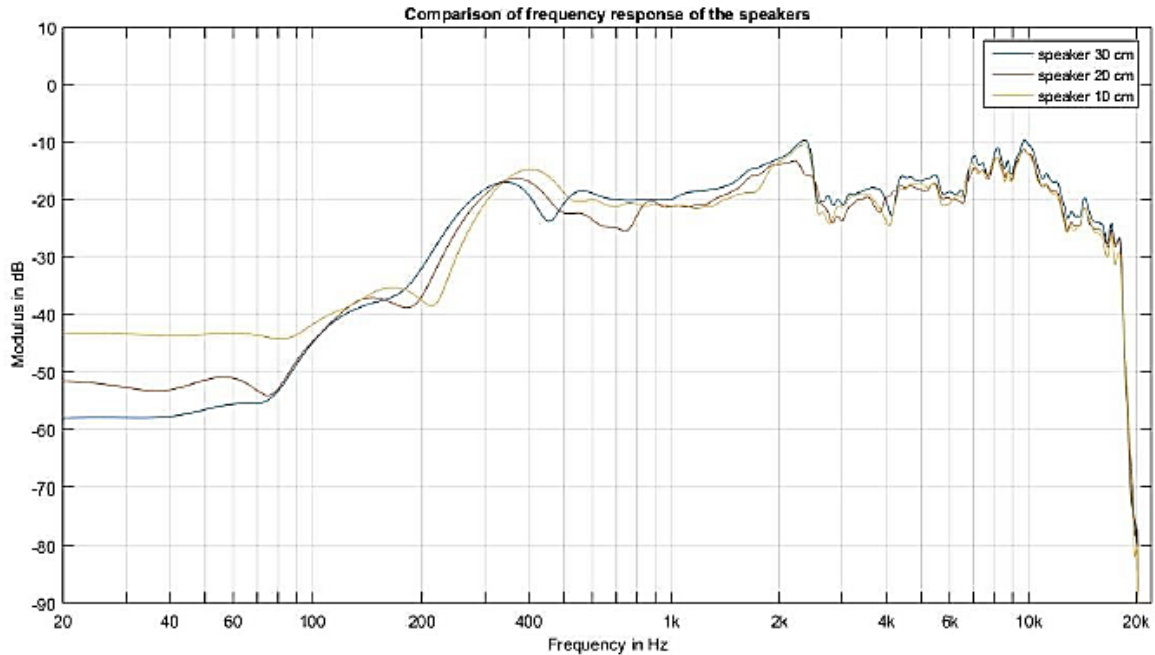


Figura 3.1-2 Comparación de respuesta en frecuencia entre los distintos largos.

Para su conexión se instalaron conectores bananas en la parte posterior y se acudió al taller de la Escuela de Ingeniería eléctrica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV), para aumentar la precisión de los cortes y el ensamble, dando como resultado los parlantes que se observan en la siguiente Figura 3.1-3.



Figura 3.1-3 Fotografía del parlante fabricado para el experimento de localización de audio.

3.1.2 Estructura para experimento de localización de audio

Para esta etapa se diseñó un pilar por cada altavoz que permite acoplar los parlantes fabricados, estos generan algunas ventajas, como la facilidad de variar la posición de elevación y el desplazamiento en el eje azimutal del parlante, el procedimiento de armar y desarmar la estructura, y de transportar a cualquier lugar.

Esta estructura consta de construir un pilar (ver figura 3.1-4) el cual está conformado por:

- Columna de perfiles de aluminio, compuesto por un perfil de 2 [m] de largo.
- Patas del pilar compuesta por 3 perfiles de aproximadamente 32 [cm] de largo.
- Pieza de unión entre columnas y patas.
- Soporte para instalar parlante al pilar.
- Parlantes.



Figura 3.1-4 Pilar compuesto por columna, patas, pieza de unión, soporte para parlante.

3.1.3 Método de medición de los parlantes

Para este método se cuenta con varios instrumentos y dispositivos de mediciones, estos se definen comenzando por la etapa inicial.

Software, se escoge trabajar con Matlab, que es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio y complementado con un código abierto denominado ITA – TOOLBOX [34].

Tarjeta de Audio, para la distribución de las señales desde el software a los diferentes parlantes, es necesario utilizar una tarjeta de audio que actúa como una interfaz de audio, permitiendo controlar y gestionar todas las componentes de la salida de audio. Para este experimento se utiliza la Four Audio ROBO-3.

Amplificadores, para que los parlantes puedan transmitir la señal con una potencia deseada, es imprescindible amplificar la señal. En el laboratorio se cuenta con un Receptor DENON AVR 3805 que es un amplificador Receptor A/V de 7 canales.

Parlantes, son los dispositivos encargados de transmitir los estímulos acústicos a las personas que serán evaluadas en el experimento.

Cables, para la conexión del sistema se requieren diferentes tipos de cables y estos son:

- PC a tarjeta ROBO-3, se requiere un cable RME.
- Tarjeta ROBO-3 a amplificador, se requiere cables con terminales XLR y RCA.
- Amplificador a parlantes, se requieren 5 cables paralelos con terminales bananas.
- Tarjeta ROBO-3 a parlantes, se requieren 2 cables con terminales speakon y bananas.

La conexión de todas esta etapa se observa en la Figura 3.1-5



Figura 3.1-5 Proceso de medición localización acústicas.

3.1.4 Procedimiento previo al análisis de resultados

Si las mediciones acústicas no son realizadas dentro de una cámara anecoica, no es recomendado analizar de inmediato los resultados, debido a que contienen muchas reflexiones a causa de la reverberación del lugar de medición. Por lo tanto, las señales resultantes deben ser editadas para eliminar las reflexiones, esta acción se realiza por medio de una ventana de tiempo mediante el software.

Para definir la duración de la ventana de tiempo primero se debe identificar la primera reflexión luego de la señal directa, para esto se debe tener en cuenta la distancia del camino directo entre el emisor-receptor y la distancia de la primera reflexión, esta se reconoce como el camino más corto de la señal entre el emisor y receptor (sin contar el camino directo). Luego utilizar la siguiente formula:

$$t = \frac{d_r - d_d}{c} \quad (3-1)$$

Dónde:

- t = diferencia de tiempo entre la llegada de la señal directa y la primera reflexión.
- c = La velocidad del sonido en el aire es de aproximadamente 344 m/s a 20° [C].
- d_d = Distancia directa entre el emisor y receptor.
- d_r = Distancia de la primera reflexión entre el emisor y receptor

3.1.5 Diseño de estímulo acústico

Para realizar el experimento de localización utilizando fuentes acústicas reales, se debe diseñar el estímulo que será transmitido por los parlantes. Se efectuó una investigación de los estudios que existen actualmente de este mismo tema, que ayudan a definir las características principales para implementar el experimento, donde los parámetros más importantes se describen en la Tabla 3.1-1:

Tabla 3.1-1 Tabla comparativa de características de estímulo de otros estudios.

Estudio	Ancho de banda	Señal	Ruido ambiente	Intensidades	Reflexiones atenuadas	Duración
Estudio A [35]	200-20000 [Hz]	Ruido blanco	30 [dB]	60 [dB]	500 [Hz]	500 [ms]
	750-5000 [Hz]					150 [ms]
Estudio B [36]	200-20000 [Hz]	Ruido blanco	30 [dB]	50 y 60 [dB]	500 [Hz]	500 [ms]
	200-1500 [Hz]					
Estudio C [37]	1500-20000 [Hz]	Ruido blanco	0 [dB]	70 [dB]	-	150 [ms]
	300-14000 [Hz]					
Estudio D [38]	1000-20000 [Hz]	Ruido blanco	20 [dB]	30 Y 60 [dB]	500 [Hz]	150 [m]
	3000-20000 [Hz]					

Tras el análisis comparativo de los estímulos descritos en la Tabla 3.1-1, se procede a definir las características del estímulo a utilizar en este experimento, donde los puntos más importantes son:

- Anchos de bandas, donde se determinan 3 diferentes rangos de frecuencia para analizar e identificar las frecuencias que predominan en la localización del sonido.
- Ruido blanco, que es la señal más adecuada para los experimentos de localización.
- Intensidades, se definen dos intensidades superior al ruido ambiente cercano a los 40[dB].
- Duración, periodo adecuado para localización de fuentes reales.

Las características definidas están descritas en la Tabla 3.1-2.

Tabla 3.1-2 Características determinadas para el experimento de localización.

	Ancho de banda	Señal	Ruido ambiente	Intensidades	Reflexiones atenuadas	Duración
	300-19000 [Hz]					
Propuesta	300-3000 [Hz] 3000-19000 [Hz]	Ruido blanco	- [dB]	50 y 70 [dB]	- [Hz]	500 [ms]

3.2 Implementación del experimento para estudiar y comparar pinnas

Las diferentes tipos de pinnas se componen de una oreja de referencia denominada original y sus réplicas obtenidas por dos distintos métodos. Estas serán sometidas a las mismas mediciones para luego ser comparadas y analizadas.

3.2.1 Métodos de réplicas

Las orejas originales con las que se generaron las réplicas, son los modelos KB0090 y KB0091 (que simula la textura y forma de una oreja natural), la cuales se observan en la Figura 3.2.-1. Estas orejas artificiales están fabricadas de aleaciones de alta calidad de la empresa G.R.A.S.

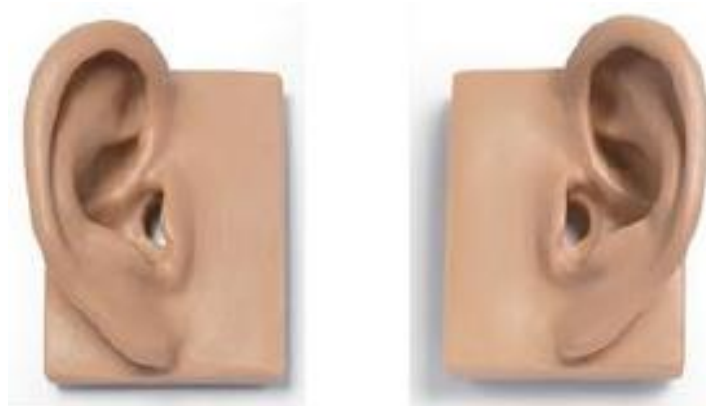


Figura 3.2-1 Modelos KB0090 y KB0091 de empresa G.R.A.S.

Las réplicas generadas de estos modelos se realizaron de dos materiales distintos y bajo dos métodos, estos son:

- Proceso de diseño asistido por computadora (CAD) e impresión 3D [8].
- Método mixto o híbrido de alginato y yeso [39].

Ambas réplicas se observan en la Figura 3.2-2

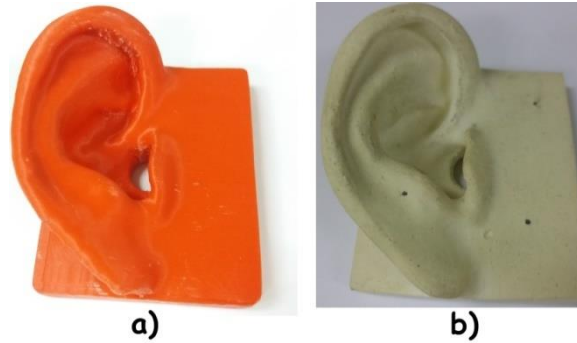


Figura 3.2-2. a) Réplica impresa con filamento PLA b) Réplica alginato y yeso.

3.2.2 Estructura para medición de pinnas

Como se menciona anteriormente, para la medición de las pinnas se requiere de una precisión en la posición de rotación de las orejas, por lo tanto se diseña una estructura donde los puntos más importantes son:

- **Soporte para las pinnas:** se construye un soporte que permite acoplar las diferentes pinnas y el micrófono de manera eficiente, este consta de una superficie circular con un sacado cuadrado que está centrado para encajar las orejas, un orificio vertical centrado para encajar el micrófono y marcas espaciadas de 10° en el contorno de la superficie circular, esta pieza se crea mediante una impresora 3D que se observa en la Figura 3.2-3.

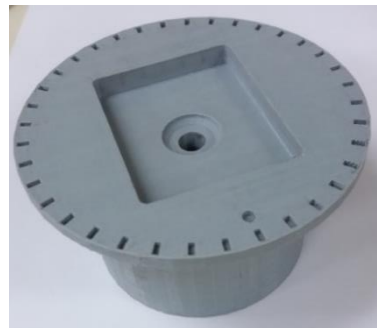


Figura 3.2-3 Soporte para las pinnas

- **Mesa giratoria:** esta incorporación es muy importante para las mediciones, debido a que la precisión de la rotación angular es alta y además ayuda a disminuir considerablemente la duración de las mediciones. Esta mesa fue facilitada por Laboratorio de Telecomunicaciones de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la PUCV y su funcionamiento se basa en un motor paso a paso, que permite rotar en el eje azimutal de forma precisa, un encoder que posibilita la lectura de la posición de rotación y la configuración de un arduino. Sin embargo, para acoplar el soporte de la pinna con la mesa giratoria, fue necesario construir una estructura de madera la cual se visualiza en la Figura 3.2-4.



Figura 3.2-4 Mesa giratoria y soporte de madera

- **Espacio de medición:** Otro punto importante, es el espacio donde se realizan las mediciones, debido a que el ruido externo y las reflexiones afectan los análisis de los resultados de las mediciones. Algunas alternativas son:
 - **Laboratorio Acústica y Vibraciones (LAV) de la EIE de la PUCV**, este lugar es requerido para realizar todas las mediciones de prueba y práctica, antes de realizar las mediciones definitivas de estudio de las pinnas.
 - **Cámara anecoica acústica de la UACH, Valdivia**, es el lugar con las condiciones ideales para realizar mediciones acústicas, debido a que elimina de manera eficaz el ruido externo y atenúa en un 100% todas las reflexiones de la señal emitida por la fuente.
 - **Cámara anecoica electromagnética**, esta cámara se ubica en la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM). Antes de utilizar esta cámara, se realizaron pruebas del comportamiento de la sala y de absorción de las espumas que cubre el contorno interno, el resultado de las mediciones fue positiva.

3.2.3 Método de medición de pinnas

El procedimiento para las mediciones de las pinnas se compone de algunos dispositivos que se ocupan en el procedimiento de medición de los parlantes. Sin embargo, algunos tienen características distintas, estas son:

- **Software**, Matlab específicamente la herramienta ITA-TOOLBOX.
- **Tarjera de audio**, ROBO3 de FOURAUDIO.
- **Parlante**, para transmitir el barrido de frecuencia, se cuenta con un parlante modelo HS8 de marca YAMAHA, como se muestra en la Figura 3.2-5, debido a su buena calidad, ya que cuenta con una respuesta en frecuencia plana ± 3 [dB].



Figura 3.2-5 Parlante Yamaha HS8

- **Micrófono**, para registrar todas las modificaciones de la señal emitida por el parlante generadas por las dimensiones de las pinnas, se dispone de un micrófono MM1 Beyerdynamic, como se muestra en la Figura 3.2-6. Es un micrófono de condensador electret, con una respuesta de frecuencia lineal, es omnidireccional, con un diseño tubular estrecho para reducir al mínimo la influencia sobre el campo de sonido, la cual se introduce dentro del soporte para las pinnas.



Figura 3.2-6 Micrófono Bayerdinamic modelo MM1

La conexión para esta medición se puede apreciar en la Figura 3.2-7.

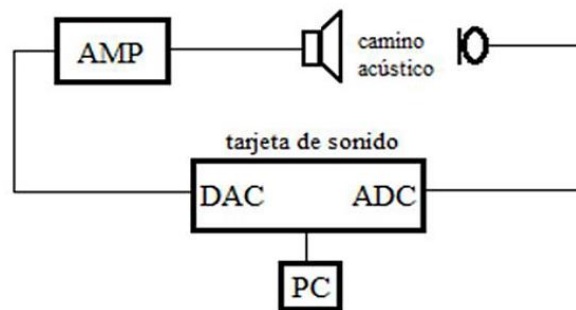


Figura 3.2-7 Diagrama de conexión del sistema de medición.

Igual que el procedimiento anterior, si las mediciones de pruebas no son realizadas dentro de una cámara anecoica, los resultados deben ser filtrados por una ventana de tiempo para eliminar las reflexiones del lugar de medición. Posteriormente, se procede a analizar los resultados.

4 Mediciones y resultados

En esta sección se describen y exponen todas las mediciones realizadas para implementar el experimento de localización acústica 3D usando HRTF personalizadas y también para comparar la respuesta acústica de pinnas y sus réplicas obtenidas con distintos métodos y materiales. Se presentan los resultados, junto con sus análisis correspondientes.

4.1 Mediciones para la compensación de parlantes

Estas mediciones se realizan para conocer la respuesta de los parlantes y garantizar que los estímulos sean transmitidos de manera adecuada.

4.1.1 Respuesta al impulso de los parlantes

Los parlantes fueron construidos, usando los mismos materiales, dimensiones y parámetros, por lo cual se espera que su respuesta o comportamiento sean iguales entre ellos. Para confirmar lo descrito anteriormente, se realizó una medición de respuesta al impulso por cada parlante.

Como se ha mencionado, para obtener la respuesta al impulso se realiza un barrido de frecuencia configurada por la herramienta ITA-TOOLBOX, donde la señal usada tiene las siguientes características descritas en la Tabla 4.1-1.

Tabla 4.1-1 Características señal barrido de frecuencia para experimento de localización de audio.

Tipo de señal	Duración	Frecuencia de muestreo	Repeticiones	Rango de frecuencia
Barrido frecuencia	2.972 [s]	44100 [Hz]	2	[300 - 19000] [Hz]

Se procede a realizar la medición a cada parlante, pero conservando la misma configuración del barrido de frecuencia, para conocer y comparar la respuesta en frecuencia de cada uno de ellos, donde los resultados se muestran en la Figura 4.1-1.

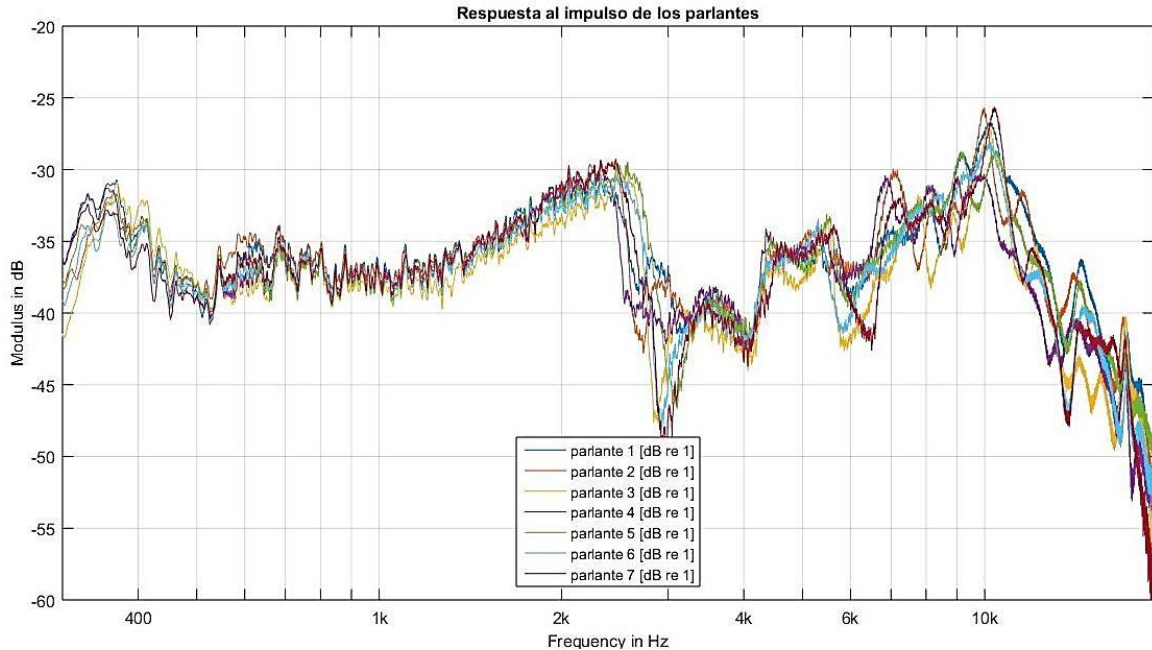


Figura 4.1-1 Respuesta en frecuencia de los diferentes parlantes.

Como se advierte en la Figura 4.1-1, las respuestas en frecuencia de cada parlante son distintas, este resultado no es el esperado, puesto que la construcción de lo parlante fue utilizando los mismos materiales y bajo las mismas condiciones. Estos resultados generan un problema, debido a que el estímulo a transmitir será diferente según la fuente.

Además, como se determina en el capítulo anterior, el estímulo que se utilizará es un ruido blanco filtrado a diferentes anchos de bandas, por lo que la fluctuación de la respuesta en frecuencia de los parlantes presentan un gran problema, debido a que se requiere que el ruido blanco que recibe el oyente sea constante en todo su ancho de frecuencia.

Es así que para garantizar una respuesta plana de los parlantes, se requiere de una compensación a la señal respecto a cada parlante.

4.1.2 Compensación de los parlantes

La compensación que se realiza a las señales, en este caso ruido blanco filtrado, consta en modificar la señal dependiendo de la respuesta al impulso de cada parlante, para que la señal que recibe y transmite sea igual, es decir, eliminar las alteraciones o cancelaciones que genera el parlante.

Para realizar esta compensación, se debe contar primero con la respuesta al impulso de parlante (ver Figura 4.1-1), un ruido blanco generado (ver Figura 4.1-2) y definir las características de los estímulos que se ocuparán en este experimento, lo cual están descritos en la Tabla 3.1-2.

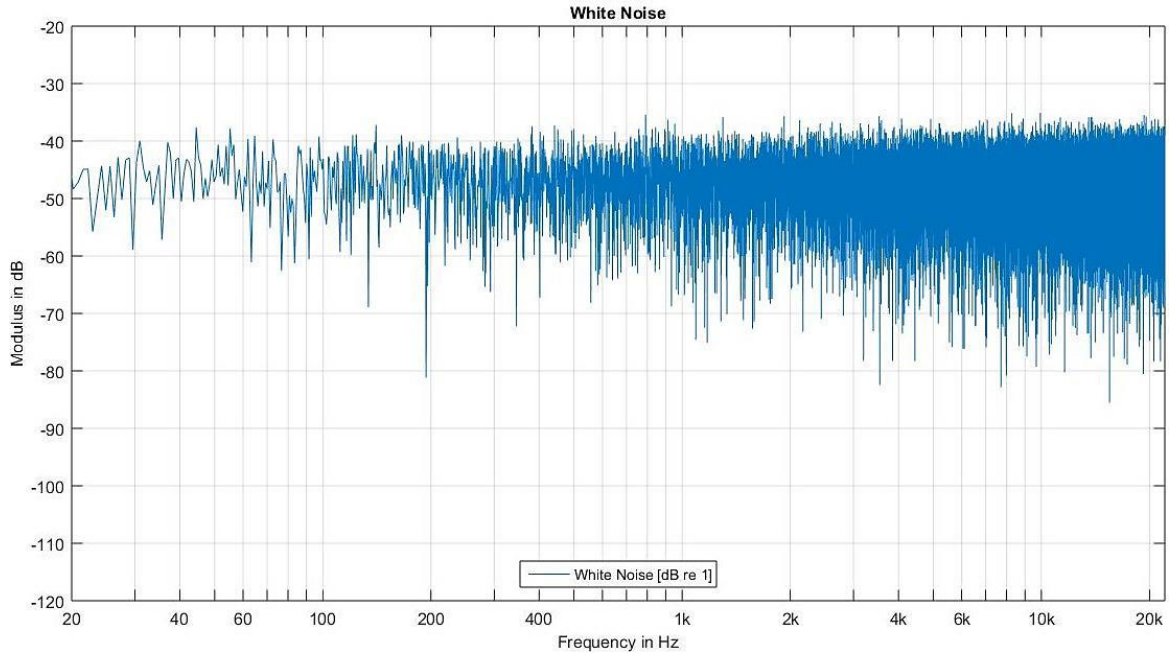


Figura 4.1-2 Ruido blanco ocupado como estímulo.

Antes de modificar cualquier señal es importante verificar que el ruido blanco generado tenga la misma duración que las mediciones de las respuestas de los parlantes.

Al obtener el ruido blanco, se modifica según el rango de frecuencia del estímulo y la respuesta al impulso del parlante correspondiente. En la Figura 4.1-3 se muestra la señal modificada y compensada para el parlante 1, para el rango de 300 a 19000 [Hz].

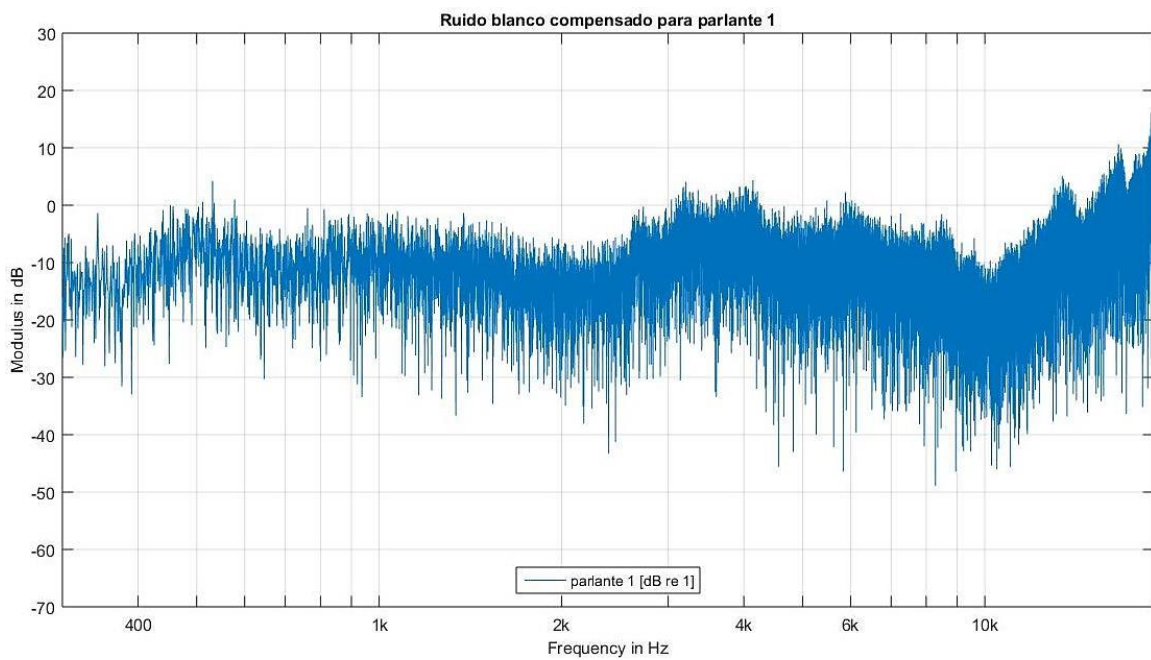


Figura 4.1-3 Estímulo compensado para parlante 1.

4.1.3 Resultado de la compensación

Luego de obtener el estímulo compensado, se realiza una medición para corroborar si las señales quedaron compensadas correctamente. Por consiguiente, como se muestra en la Figura 4.1-4, se transmite la señal compensada para el parlante 1, donde su rango es 300 a 19000 [Hz].

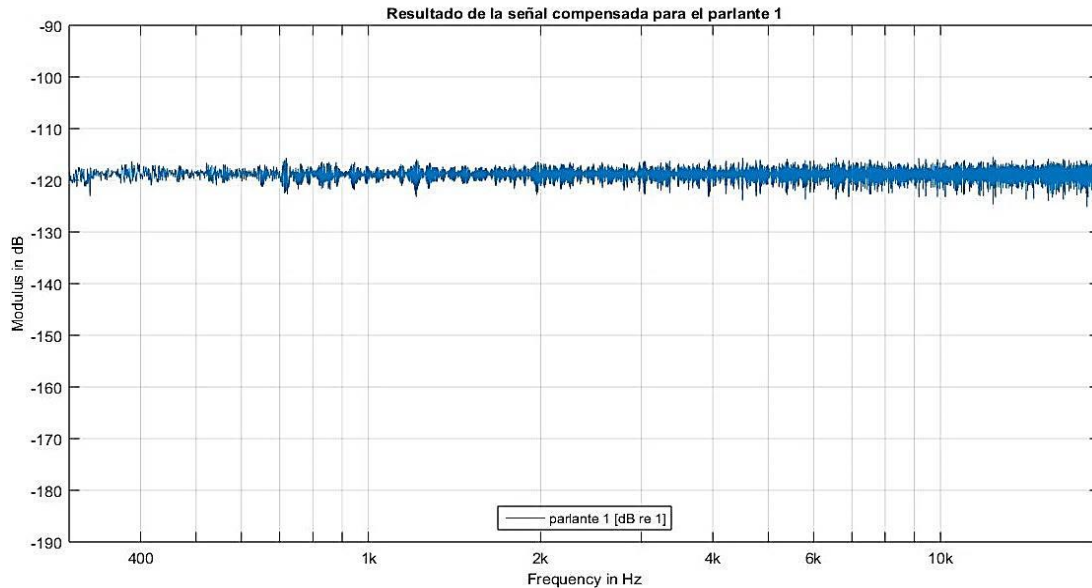


Figura 4.1-4 Resultado señal compensada para el parlante 1.

Como se observa en la Figura 4.1-4, los resultados de la compensación son positivos, debido a que se eliminan las modificaciones que genera los parlantes a la señal a lo largo de todo el rango de frecuencia definido para cada medición. Por lo tanto, los errores de localización de audio utilizando fuentes sonoras reales serán generados solo por la percepción de cada persona.

4.2 Identificación de parámetros generadores de variabilidad para estudiar y comparar las pinnas

Se efectúan varias mediciones en distintos lugares o establecimientos, todas con el objetivo de identificar el origen de las variaciones que se generan, para poder mejorar el procedimiento de medición y poder comparar los métodos de réplicas de pinna. Las características de los barridos de frecuencias ocupados en las mediciones se definen en la Tabla 4.2-1.

Tabla 4.2-1 Características señal barrido de frecuencia para experimento de localización de audio.

Tipo de señal	Duración	Frecuencia de muestreo	Repeticiones	Rango de frecuencia
Barrido frecuencia	1.486 [s]	44100 [Hz]	2	[100 - 19000] [Hz]

Para las mediciones en esta sección se utilizaron diferentes tipos de pinnas, las cuales se definen en la Tabla 4.2-2

Tabla 4.2-2 tipos de pinnas utilizadas para las mediciones.

Nombre asignado	Tipos de pinnas
NO_PINNA	Superficie plana
GRAS	Pinna de referencia
PLA V1	Replica impresa en 3D con 30% densidad
PLA V2	Replica impresa en 3D con 70% densidad
YESO V1	Replica con método de alginato-yeso

4.2.1 Mediciones para rotación de mesa giratoria

El objetivo de este primer experimento es analizar si la rotación de la mesa giratoria se encuentra bien centrada, por lo cual se realiza una medición sin pinna (NO PINNA, es decir, superficie plana), en 4 posiciones angulares, donde estos ángulos son 0° , 90° , 180° y 270° . En la Figura 4.2-1 se muestra la implementación de la medición.

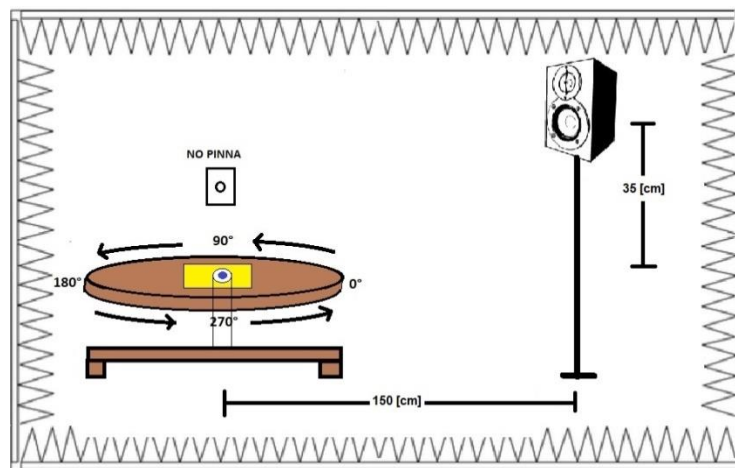


Figura 4.2-1 Ilustración de experimento de rotación mesa giratoria.

Al analizar los resultados presentados en la Figura 4.2-2, se observa que las 4 mediciones a distintos ángulos de rotación son muy similares, con una pequeña variaciones en algunas frecuencias, las cuales se pueden despreciar. Estas respuestas en frecuencia confirman que la rotación que realiza la mesa giratoria se encuentra centrada correctamente.

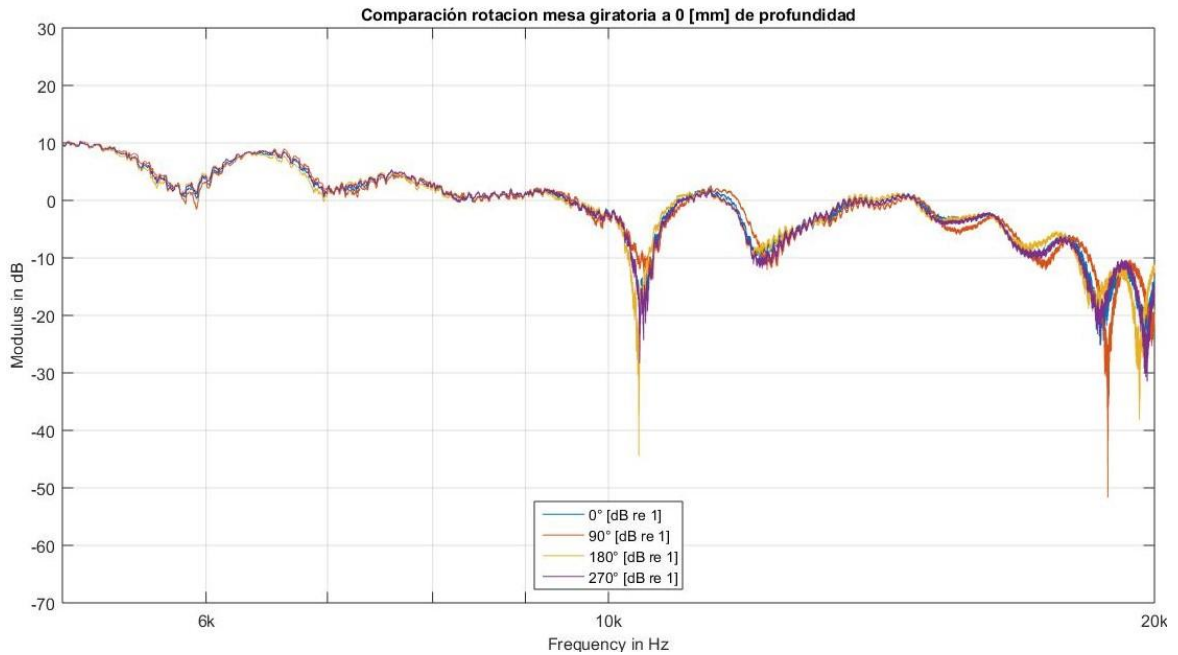


Figura 4.2-2 Comparación rotación de la mesa giratoria.

4.2.2 Mediciones con distintas profundidades del micrófono

Este experimento se realiza con la finalidad de detectar los cambios que provoca efectuar mediciones con diferencia de profundidad del micrófono en el canal auditivo de las distintas pinnas. Por lo tanto, se define medir a 0 [mm] y 2 [mm] de profundidad como se muestra en la Figura 4.2-3.

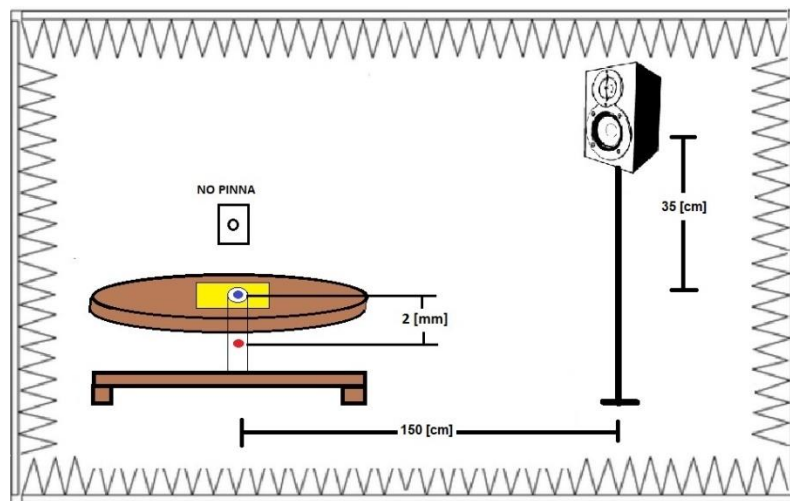


Figura 4.2-3 Ilustración de experimento de profundidad.

Donde los resultados se muestran en la Figura 4.2-4.

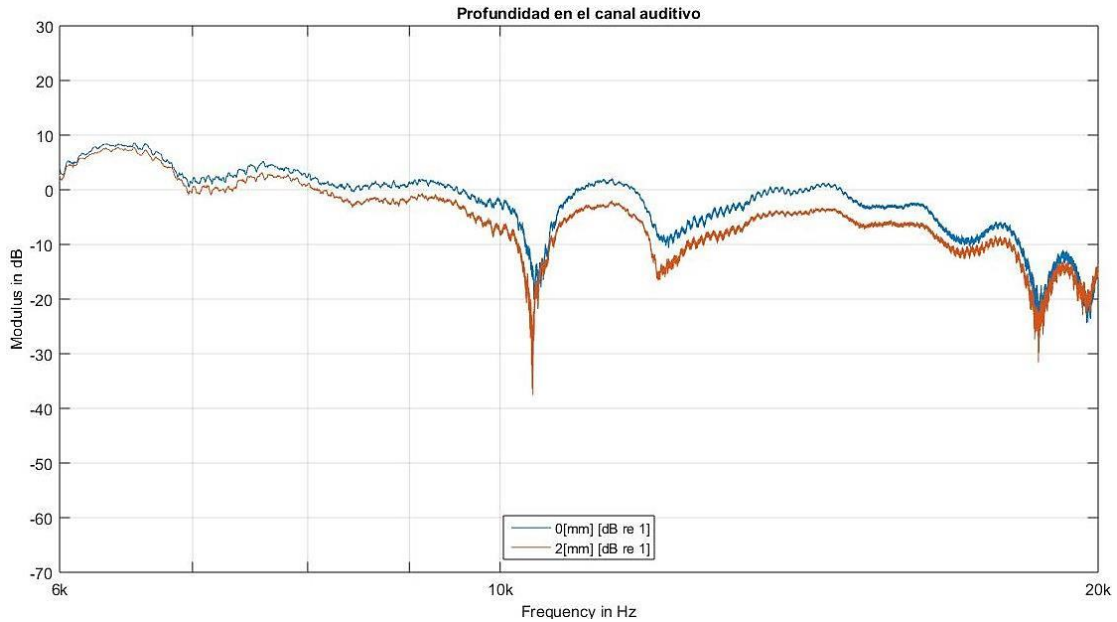


Figura 4.2-4 Comparación de profundidad del micrófono en el canal auditivo.

Al observar las mediciones de la Figura 4.2-4 se puede concluir que al variar la posición del micrófono a distintas profundidades del canal auditivo, en este caso 0 y 2 [mm], solo existe una diferencia de potencia acústica, es decir, mantiene su respuesta en frecuencia pero con una potencia menor. Por lo tanto, al aumentar la profundidad del micrófono en el canal auditivo disminuye la potencia acústica de la señal.

4.2.3 Mediciones sobre el procedimiento de instalación de pinnas

También se desea conocer si existe una variación en el resultado de medición con el procedimiento de instalación entre las mismas pinnas, es decir, que al volver a realizar las mediciones exista un desplazamiento en la posición de las pinnas. Por esta razón, se procede a medir quitando y volviendo a reubicar las pinnas entre cada medición. Este procedimiento (ver Figura 4.2-5) se realizó 5 veces por cada pinna.

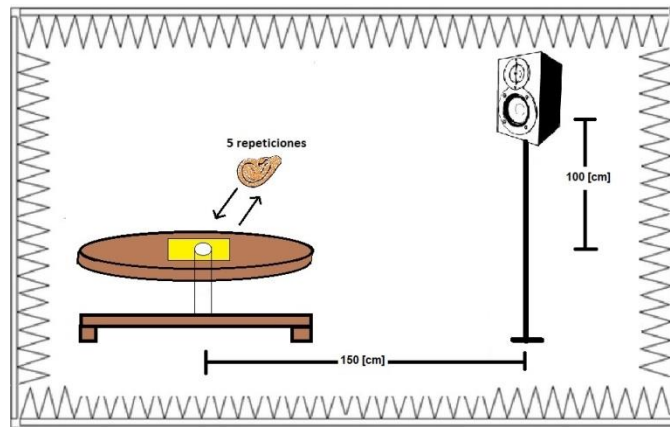


Figura 4.2-5 Ilustración experimento de procedimiento de instalación de pinnas.

Estas mediciones se realizaron en una sala de gran dimensión, esta sala se encuentra vacía garantizando que las condiciones del entorno para las mediciones son fijas. La desventaja de esta sala es que se origina una gran cantidad de reverberación, sin embargo, se utiliza una ventana de tiempo para eliminar las reflexiones y despejar solo la señal directa.

Estas repeticiones o intentos (“int” en la Figura 4.2-6) se realizan para todos los tipos de pinnas definidas en la Tabla 4.1-2.

Los resultados de las mediciones muestran un comportamiento similar en todos los tipos de pinnas, la cual se observa en la Figura 4.2-6 como representación de todas las mediciones.

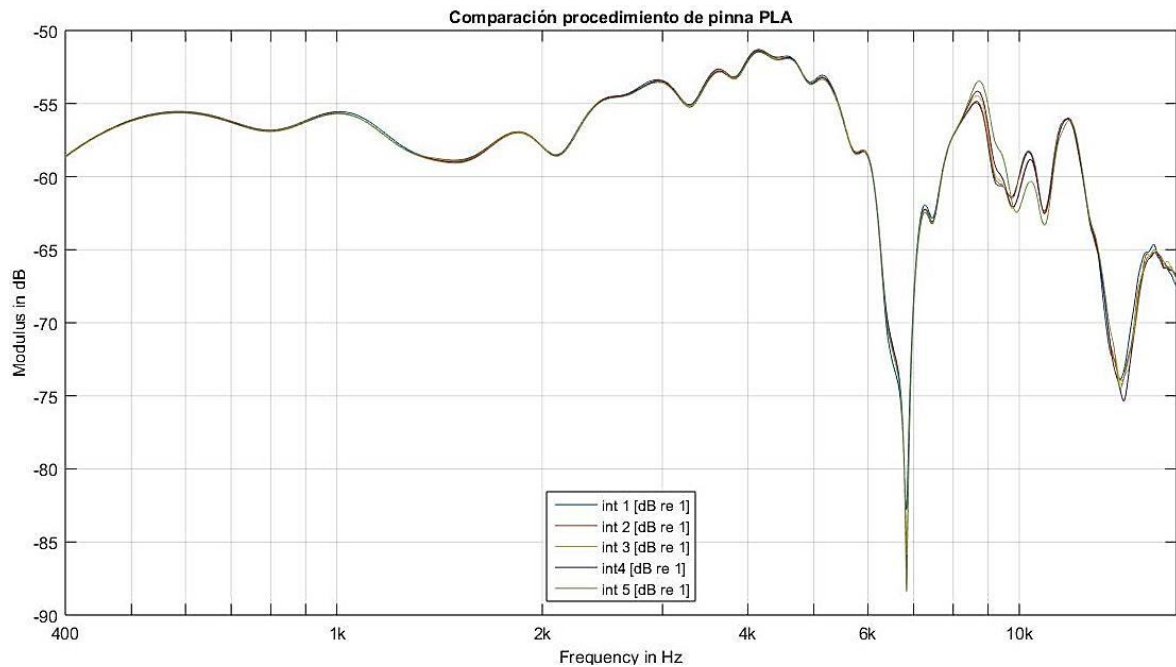


Figura 4.2-6 Comparación procedimiento de instalación de pinna PLA.

De la misma forma se realizan las mismas mediciones en el Laboratorio de Acústica y Vibraciones de la PUCV con el fin de confirmar si el montaje del experimento causa alguna variación o alteración en el procedimiento.

Las nuevas mediciones se realizaron con una configuración distinta en el barrido en frecuencia y sus resultados se observa en las Figuras 4.2-7 y 4.2-8.

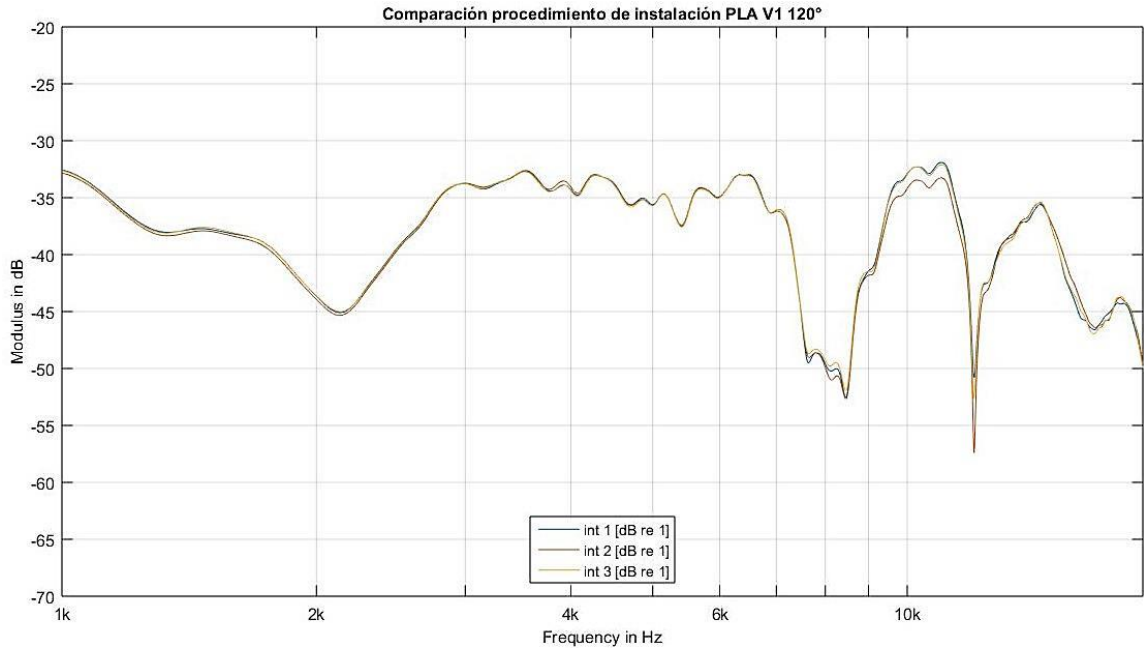


Figura 4.2-7 Comparación procedimiento de instalación de réplica pinna PLA inicial (30% densidad), donde su posición es de 120° de rotación.

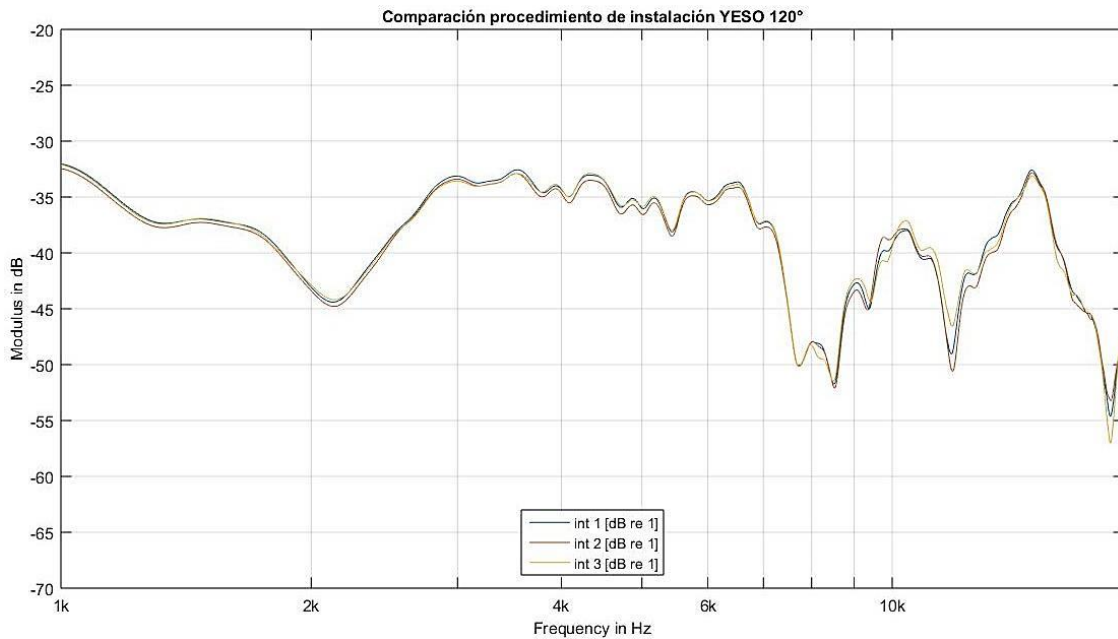


Figura 4.2-8 Comparación procedimiento de instalación de pinna yeso en 120° de rotación.

Como se observa en las primeras dos figuras, que representan el comportamiento de las pinnas, se evidencia que existe solo una pequeña variación en el procedimiento de instalación, permitiendo despreciar esta variable. Sin embargo, en una de las comparaciones se aprecia una gran diferencia a causa de un error de posición angular de la pinna, por lo tanto cabe destacar que se requiere ser minucioso y tener mucha precaución para que no exista un análisis erróneo.

4.2.4 Mediciones sobre densidad de la réplica PLA

Esta medición se realiza particularmente a la réplica de pinna generada la técnica de fotogrametría e impresa con filamento de PLA, pero con diferentes densidades 30, 70 y 100 %, como se presenta en la Figura 4.2-9.

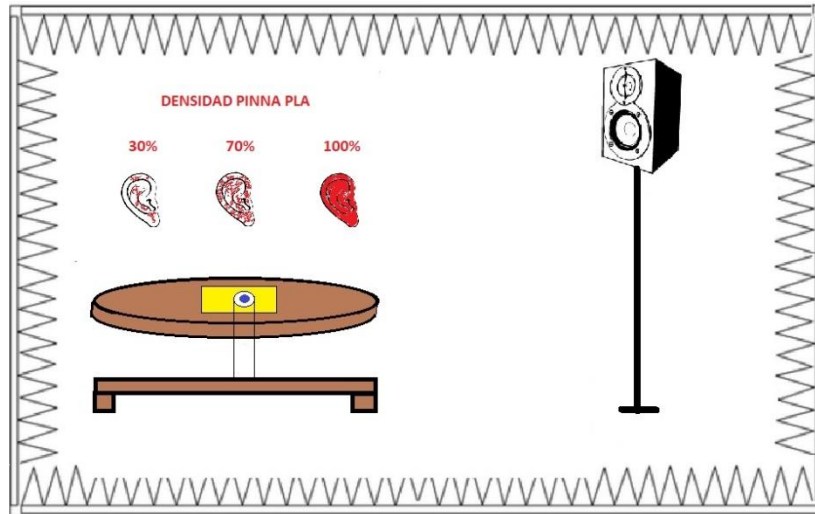


Figura 4.2-9 Ilustración experimento sobre densidades de la réplica PLA.

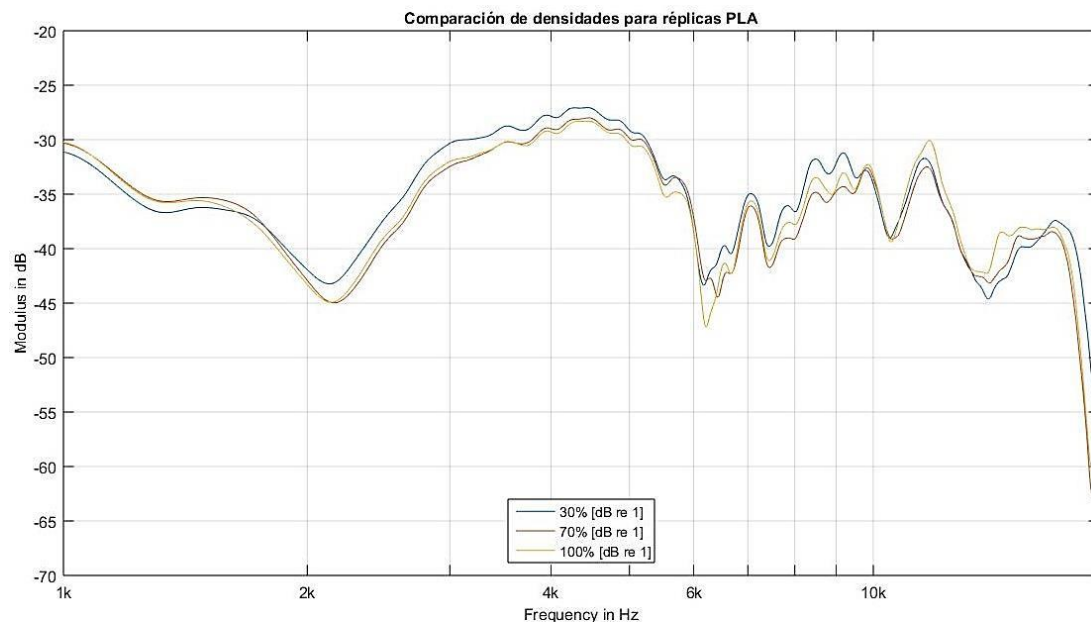


Figura 4.2-10 Comparación de densidades para réplicas impresa de filamento PLA.

Como se logra observar en la Figura 4.2-10 se evidencia que no existen diferencias sobre los ± 3 [dB] entre las mediciones de las réplicas impresas de filamento PLA, permitiendo despreciar la variable del cambio de densidades.

4.2.5 Mediciones en caja fabricada

En el laboratorio de acústica y vibraciones, se construye una estructura compuesta de perfiles de aluminio y esponjas acústicas de 3 [cm] de espesor, para simular una cámara anecoica acústica, teniendo en cuenta las proporciones entre ambas. Es así que se diseñó un área rectangular para aislar las mediciones, que se contempla en la Figura 4.2-11, con la finalidad de eliminar la mayor cantidad de ruido exterior y absorber un porcentaje de las reflexiones que se producen al transmitir una señal acústica.



Figura 4.2-11 Cámara construida para mediciones.

Luego, se procede a realizar las mediciones correspondientes a las diferentes tipos de pinnas del lado derecho, a distintos ángulos (30° entre cada medición), la cual se visualiza en la Figura 4.2-12.

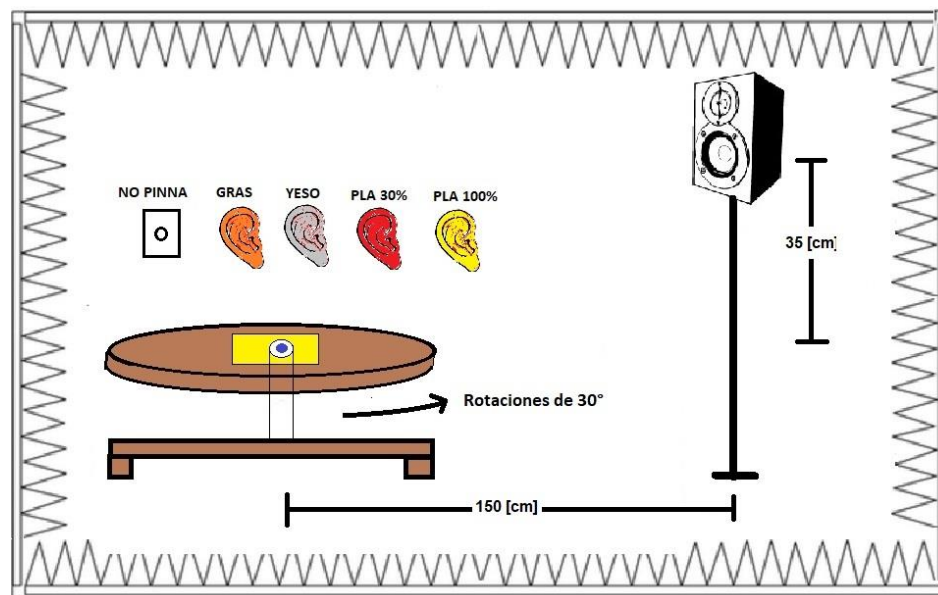


Figura 4.2-12 Ilustración de experimento para comparar y estudiar las diferentes pinnas.

Los resultados se presentan en la Figura 4.2-13.

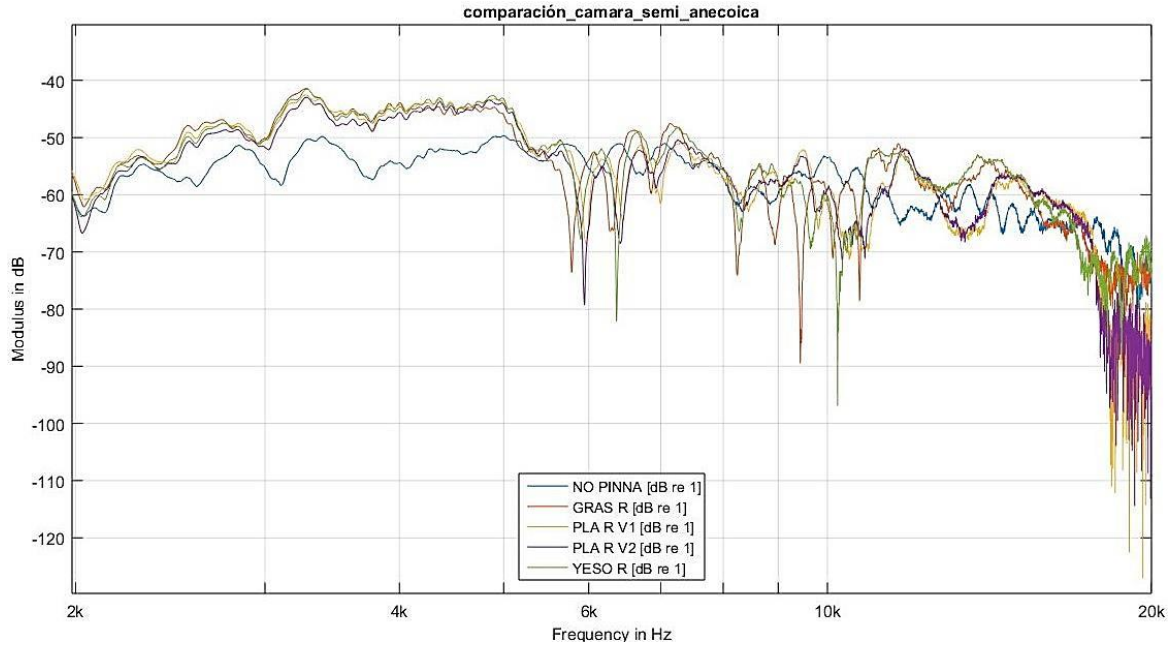


Figura 4.2-13 Comparación de mediciones entre pinnas en 0° dentro de la cámara construida.

Se observa en la Figura 4.2-13, que la caja absorbe un gran porcentaje de las reflexiones, sin embargo se presentan diversas anulaciones periódicas en todas las señales, lo cual se supone que se generaba por la cámara construida y por consiguiente, se realiza la medición fuera de dicha cámara, donde los resultados se muestran en la Figura 4.2-14.

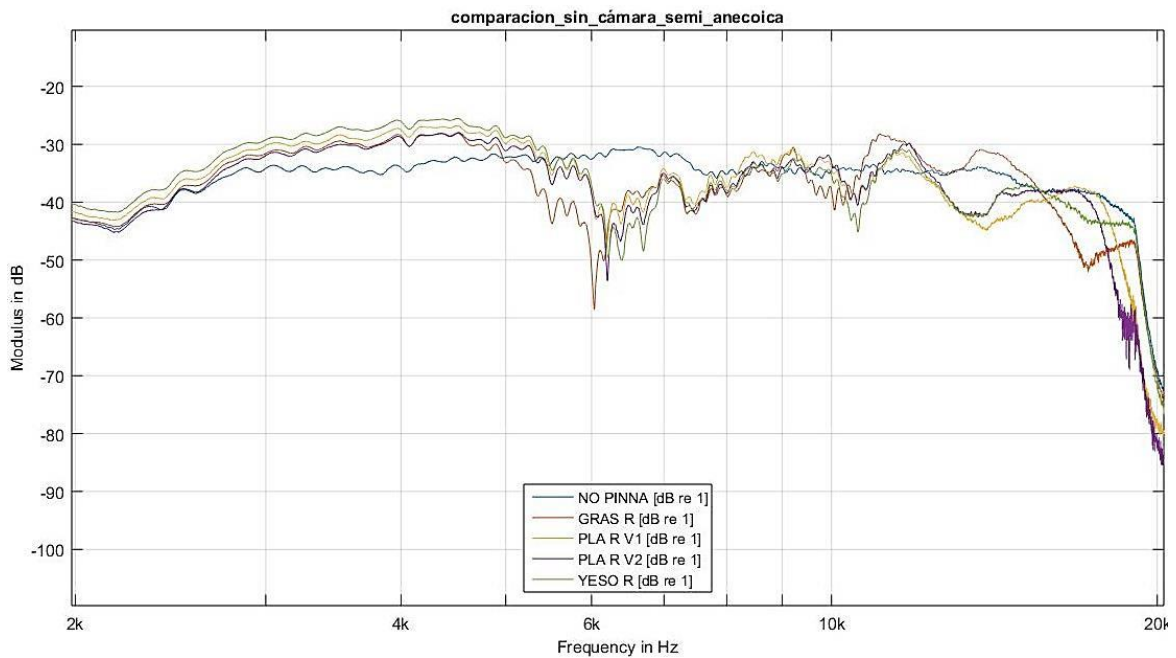


Figura 4.2-14 Comparación de mediciones entre pinnas en 0° fuera de la cámara construida.

Al comparar ambas figuras se advierte que no existen anulaciones en las mediciones fuera de la caja. Por lo tanto, se decide desarmar la construcción y no diseñar otro espacio acotado para realizar las mediciones.

4.2.6 Mediciones realizada cámara anecoica UACH

Estas mediciones se realizan en una cámara anecoica acústica, que es una habitación diseñada para absorber por completo las reflexiones de cualquier onda sonora, la cual está ubicada en la Universidad Austral de Chile (UACH) en la ciudad de Valdivia en Chile.



Figura 4.2-15 Cámara anecoica de la Universidad Austral de Chile.

Según lo descrito, se cuenta con condiciones ideales para realizar las mediciones con resultados sin reflexiones, ni ruido que produzcan alteraciones en las señales, es decir, que en los resultados solo se perciben las modificación causada con por las pinnas correspondiente. Su interior está cubierta por una gran cantidad de puntas de esponja acústica (se observan en la Figura 4.2-15), que es el principal causante de absorber y no reflejar las ondas acústicas.

Por consiguiente, se procede a realizar las mediciones de todas las pinnas definidas en la Tabla 4.1-2 con dos alturas distintas de elevación del parlante (86 [cm] y 106 [cm]) y 12 posiciones distintas en el plano azimutal con diferencia de 30° entre ellas, al igual que en la Figura 4.2-12.

Al analizar los resultados, se advierte una anulación cerca de los 3 [kHz] que aparece en todas las mediciones de cada pinna. Una representación de esta anulación frecuencial se expone en la Figura 4.2.16.

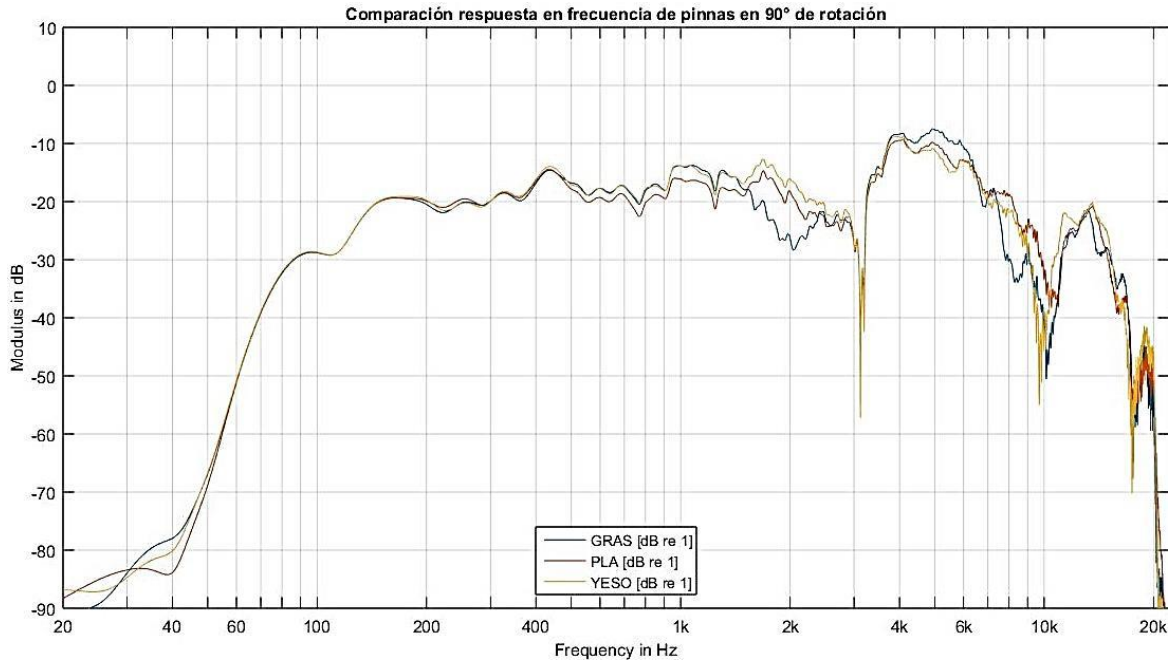


Figura 4.2-16 Comparación respuesta en frecuencia de pinnas en 90° de rotación.

Al analizar el comportamiento extraño que se encuentra en todas las mediciones, se presume que la causa se debe al funcionamiento del parlante, esta hipótesis surge ya que el parlante se compone de dos altavoces, uno especializado para bajas frecuencia y el otro para altas, además de los filtros pasa bajo y alto. Es así que existen tres posibles razones:

- Cancelación de señal en la frecuencia 3200 [Hz], como son dos fuentes existen direcciones donde existen cancelaciones el cual varían según la frecuencia, es decir, que las pinnas se encontraban en la dirección de cancelación.
- Cancelación por polarización inversa, suele aparecer cuando existe una mala conexión en la polaridad de una de los altavoces que componen el parlante, lo cual genera una cancelación en el cruce entre el altavoz que funciona en baja frecuencia y el altavoz de alta frecuencia, en este caso se calcula que se encuentra cercano a los 3000 [Hz]. Por lo tanto, esta cancelación aparece independiente de la posición del receptor.
- Los tipos de pinnas.

Una medición importante para determinar el origen del problema, es la respuesta de impulso sin pinna, la cual se muestra en la Figura 4.2-17.

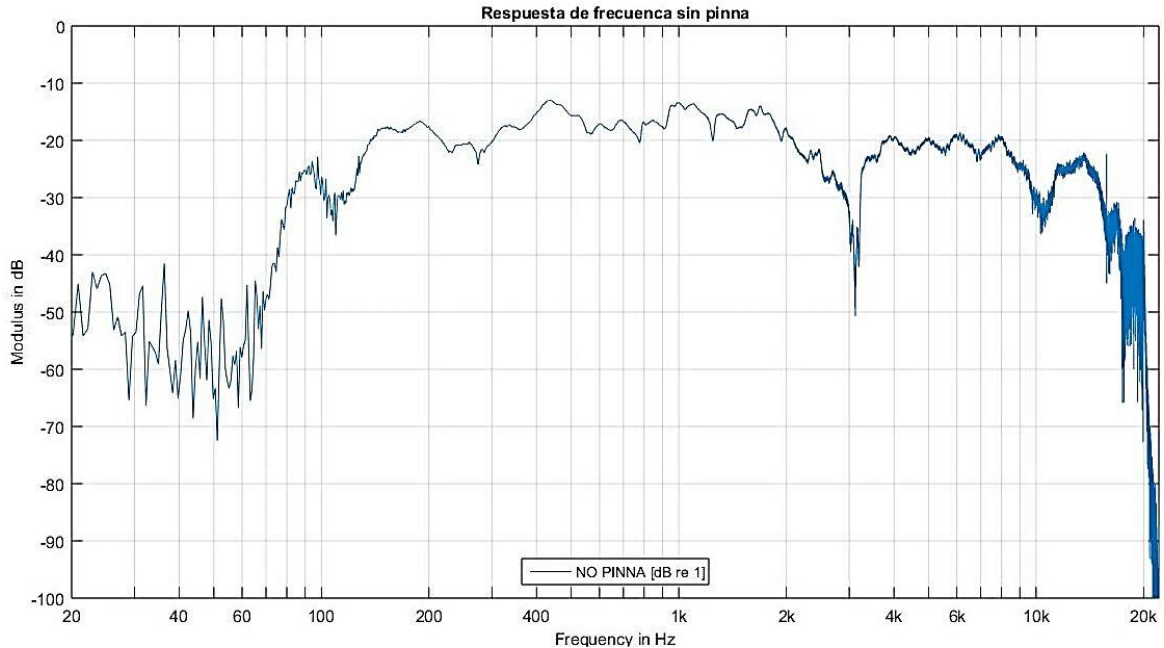


Figura 4.2-17 Respuesta de frecuencia del micrófono en una superficie plana.

Al observar la medición, también se presenta esta cancelación en la frecuencia de 3200 [Hz], en consecuencia, las pinnas no son causante del problema y como la posición de las mediciones son distintas, se determina que el origen de la cancelación se genera por el funcionamiento del parlante. Para confirmar el análisis, se contacta con los encargados de la cámara anecoica de la UACH, quienes confirman la hipótesis.

Debido al inconveniente antes descrito y a otras complicaciones manifestadas en la ejecución del experimento, se decide realizar nuevas mediciones, para considerar y juzgar, que método de réplica es recomendable para generar ERTF's personalizadas.

4.2.7 Mediciones realizada cámara anecoica UTFSM

Otra opción para realizar mediciones es utilizar una sala anecoica electromagnética, ubicada en la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM de Valparaíso), la elección de esta sala corresponde a que su estructura interna es muy similar a la acústica, ya que está compuesta por puntas de espumas para absorber señales.

Como esta cámara anecoica no es acústica, se procede a estudiar su comportamiento acústico al emitir señales de audio, por lo cual la primera medición es para conocer el tiempo de reverberación, el cual comparará con la de una cámara anecoica acústica y la del laboratorio LAV de la PUCV. Para esto se realiza una simple respuesta al impulso entre un parlante y un micrófono dentro de la cámara electromagnética de la UTFSM, de la cámara acústica de la UACH y del área del LAV de la PUCV, donde los resultados se muestran en la Figura 4.2-18.

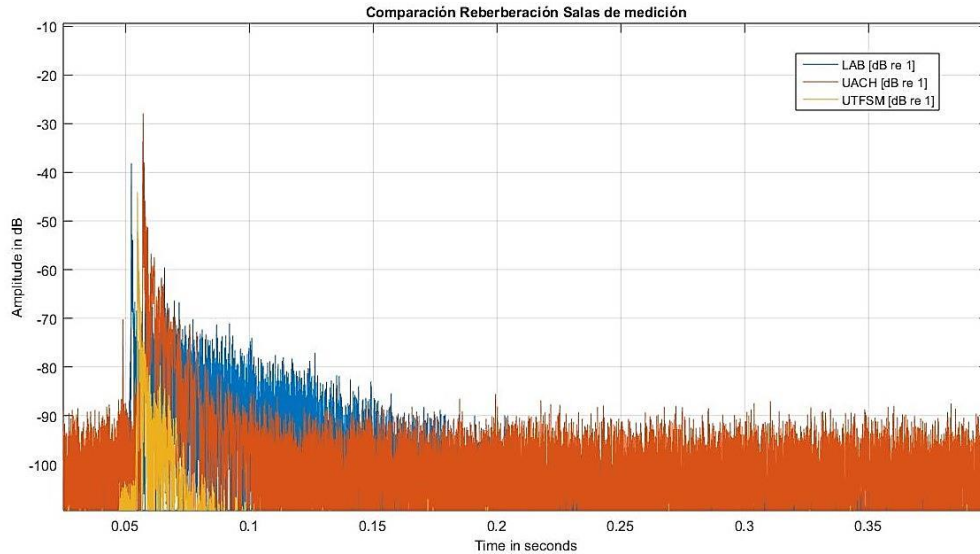


Figura 4.2-18 Comparación de reverberación en tiempo y potencia [dB].

Al observar, la reverberación de la cámara anecoica magnética es similar a la de acústica, debido a que la duración de ambas es cercano a los 0.05 [s] en comparación con los 0.13 [s] de la reverberación del LAV de la PUCV.

Además, se efectúa otra medición con el objetivo de analizar la absorción acústica de la esponja, es decir, el porcentaje de la señal acústica que absorbe o refleja la esponja de la sala electromagnética. Para lo cual, primero se realiza una medición sobre una superficie sólida, que permite identificar la reflexión principal, luego se cubre la superficie plana con la misma esponja que está cubierta la cámara y se procede a realizar la medición bajo las mismas condiciones que la anterior, finalizando con una comparación entre ellas, como se muestra en la Figura 4.2-19.

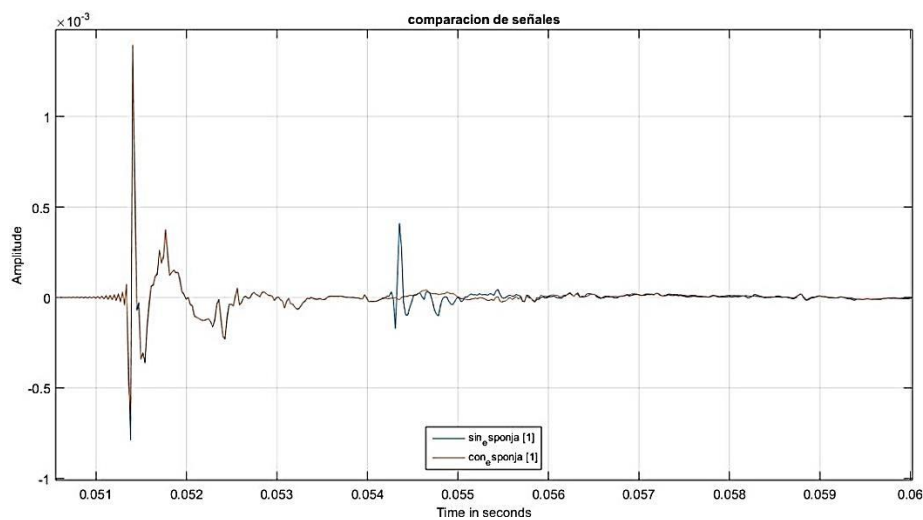


Figura 4.2-19 Comparación de señales con y sin esponja de absorción.

Se aprecia claramente en la Figura 4.2-19, la atenuación de la reflexión principal de la señal, por lo tanto, al analizar los resultados anteriores, se determina que esta cámara anecoica electromagnética tiene condiciones favorables para el desarrollo de este experimento acústico. Por consiguiente, se procede a realizar las mediciones definitivas para poder analizar y comparar los métodos de réplicas de la pinna. Estas mediciones serán realizadas cada 30° de rotación.

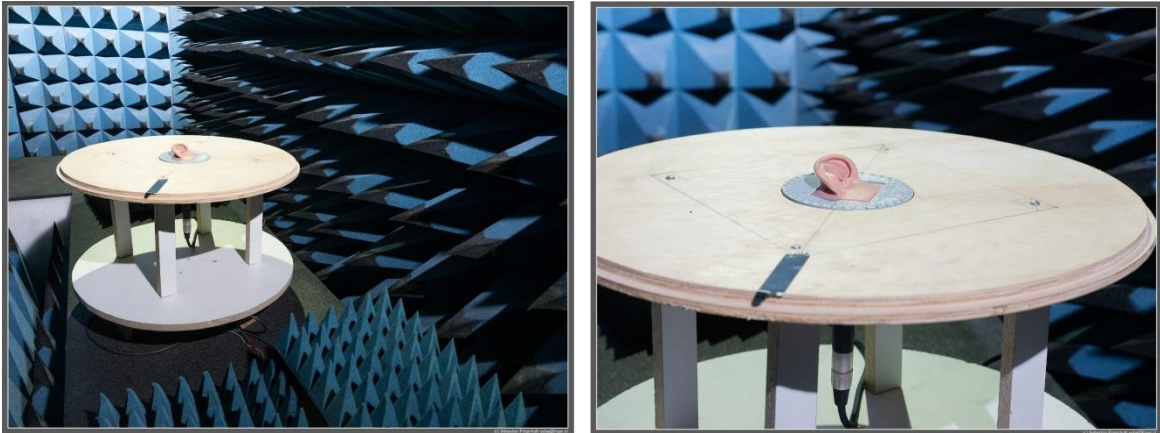


Figura 4.2-20 Mediciones en UTFSM.

La pinnas que se midieron fue la oreja original GRAS, dos réplicas bajo el método de impresión con filamento PLA de 30[%] y 100 [%] de densidad, la réplica bajo el método de yeso-alginato y además de una medición de referencia, que consta de una superficie plana (denominada NO PINNA), al igual que en la Figura 4.2-12, dando inicio a las mediciones dentro de la cámara anecoica (ver Figura 4.2-20). Algunos resultados se muestran en las Figuras 4.2-21 y 4.2-22.

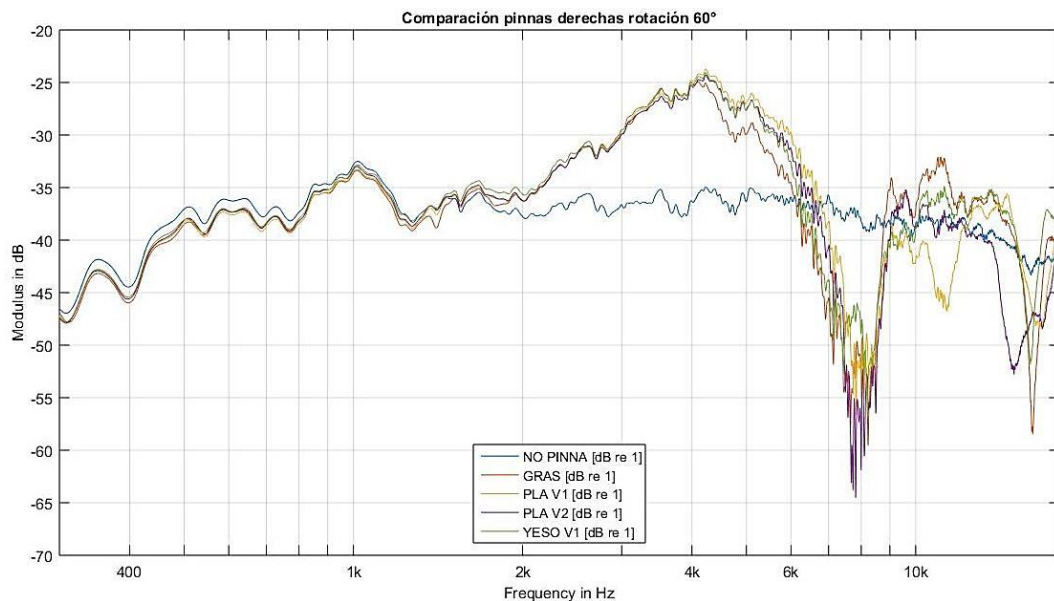


Figura 4.2-21 Comparación pinnas derechas rotación 60° .

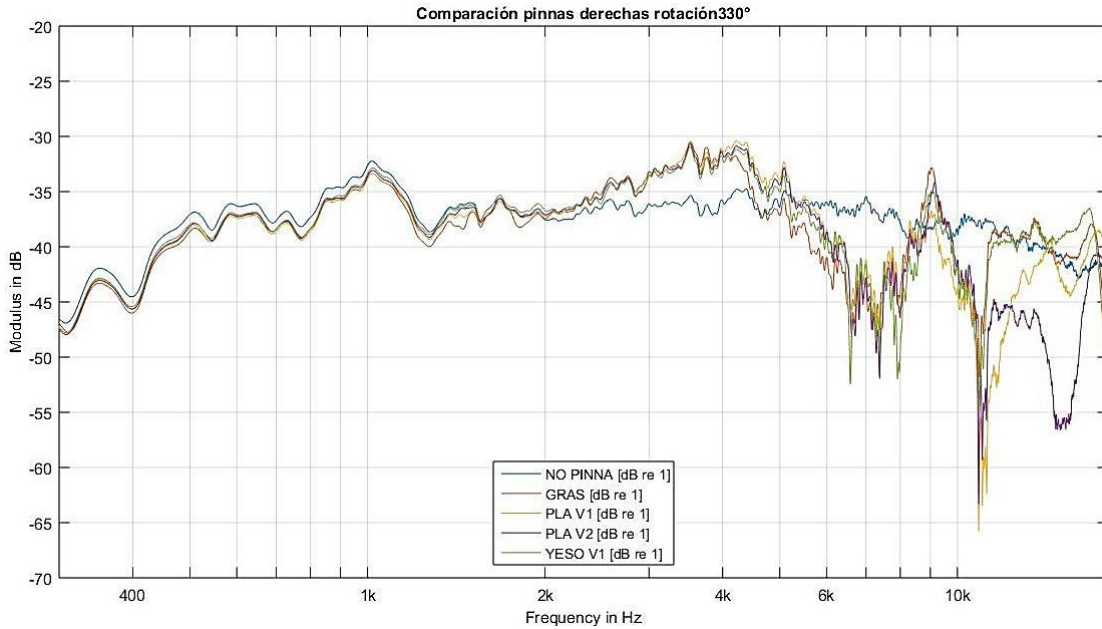


Figura 4.2-22 Comparación pinnas derechas rotación 330 °

Al fijarse en las dos últimas figuras, se determina que las pinnas comienzan a modificar la señal a frecuencias mayores de 2000 [Hz], por lo tanto, se determina analizar solo las altas frecuencias donde se decide restar la señal de referencia (NO_PINNA) para observar solo variación originada por las estructuras y los materiales de las pinnas, las cuales se muestran en la Figura 4.2-23.

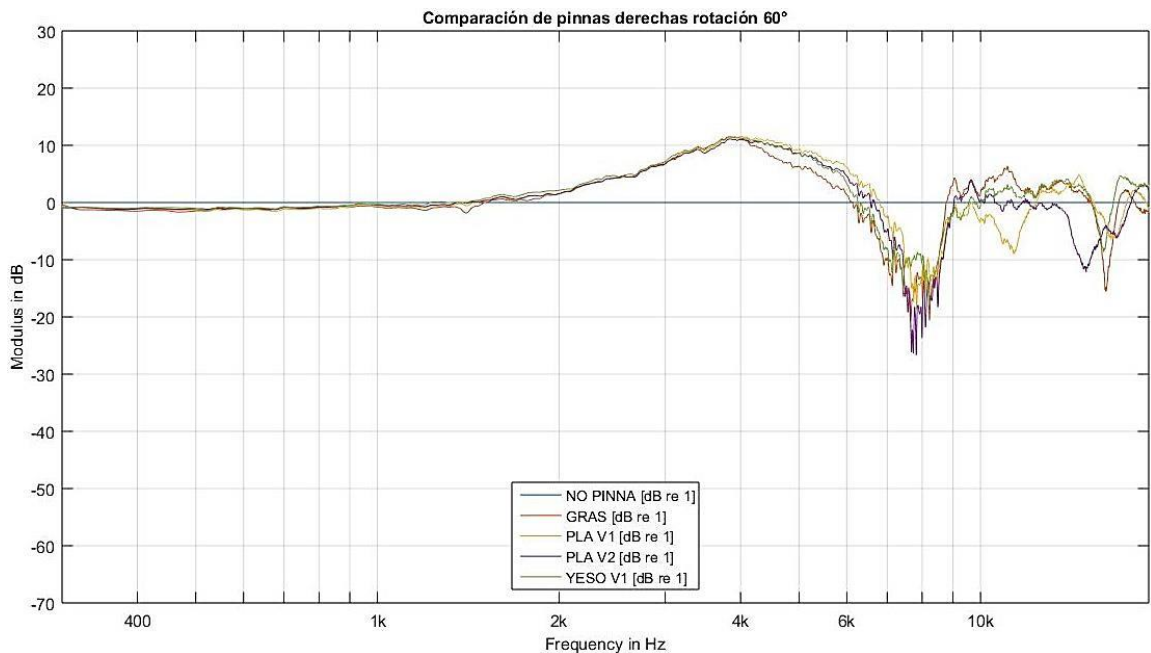


Figura 4.2-23 Comparación pinnas derechas rotación 60 ° eliminando la referencia.

Al analizar la figura 4.2-23 se detecta que las estructuras de las diferentes pinnas comienzan a producir alteraciones en la señal acústica alrededor de los 2 [kHz].

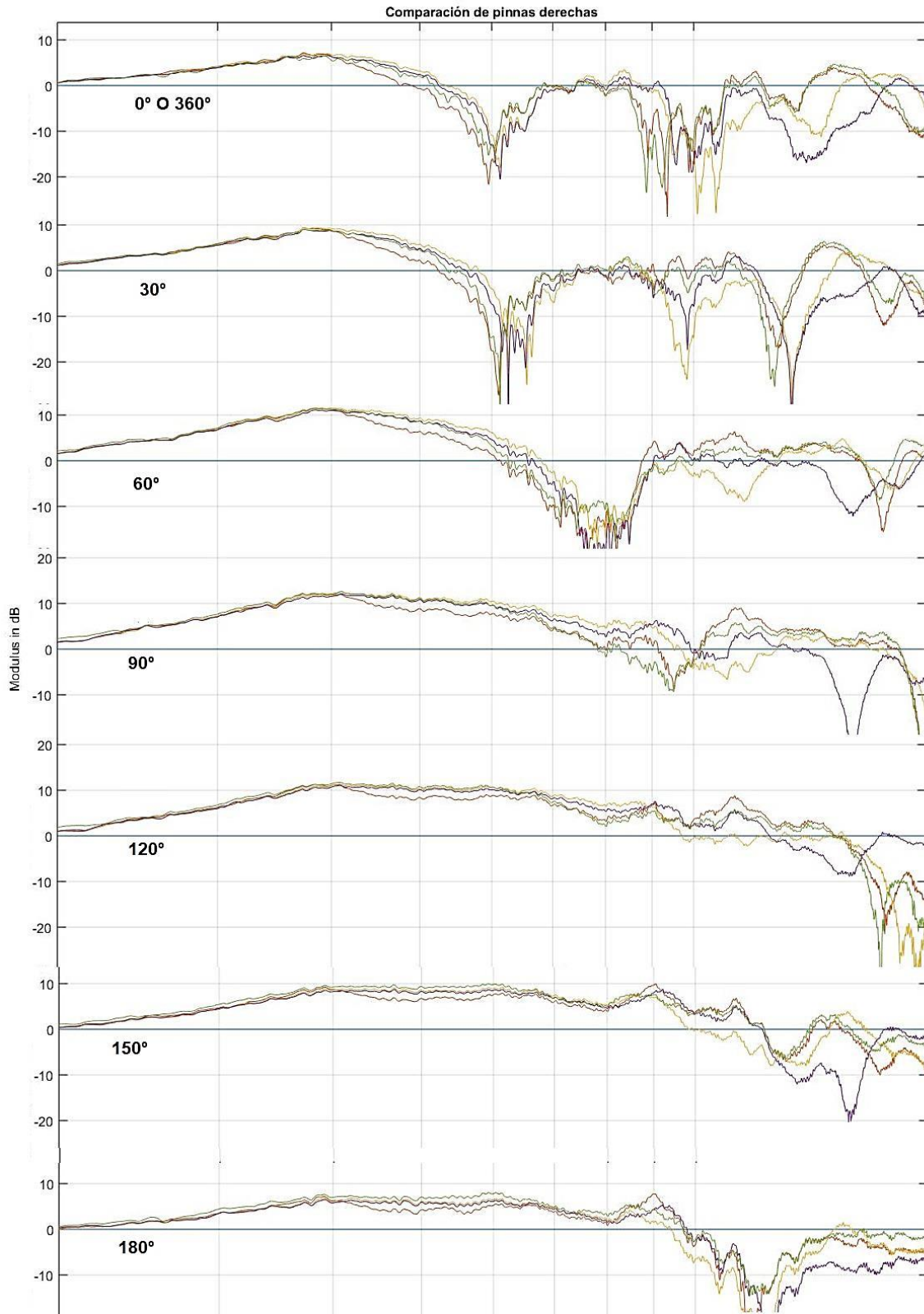


Figura 4.2-24 Resultados de las mediciones de ERTF's obtenidas en UTFSM de 0° a 180°.

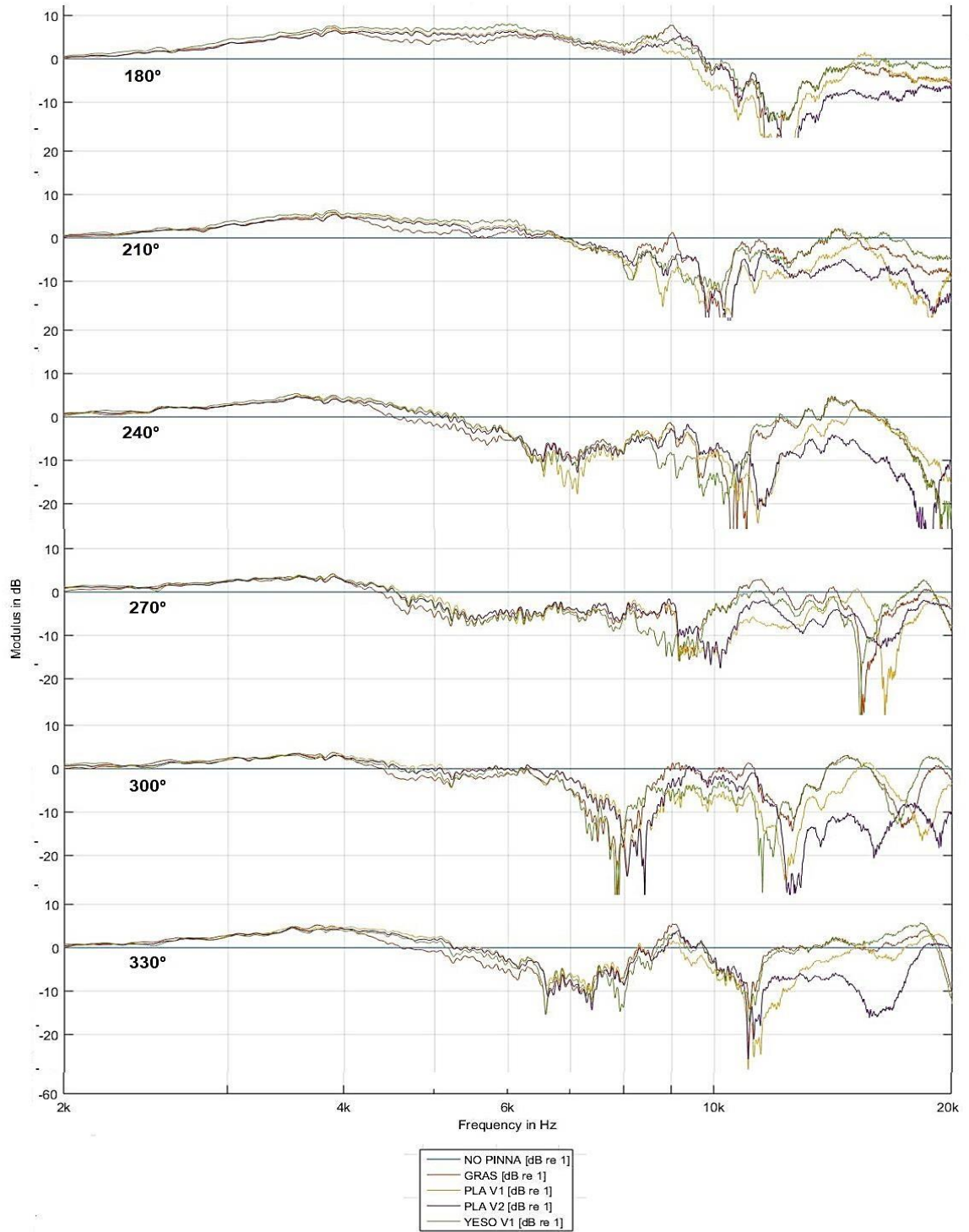


Figura 4.2-25 Resultados de las mediciones de ERTF's obtenidas en UTFSM de 210° a 330°.

Al examinar todas las mediciones realizadas en la cámara anecoica electromagnética de la UTFSM se determina que se origina cancelaciones en algunos pequeños rangos de frecuencia, donde su amplitud y la frecuencia donde se desplazan, varían según la rotación angular entre la fuente acústica y la pinna.

También, tras analizar los resultados de las mediciones (ver Figura 4.2-24 y Figura 4.2-25) se aprecia que las ERTF's de las réplicas de la pinna de referencia, mantienen un comportamiento similar y con pequeñas diferencias de potencia acústica hasta llegar alrededor de los 11000 [Hz], sin embargo a medida que supera esa frecuencia comienzan a surgir algunas diferencias entre los métodos de réplicas. Es así que se decide despejar o acotar para observar de mejor manera los cambios que se producen, los cuales se observan en la Figura 4.2-26.

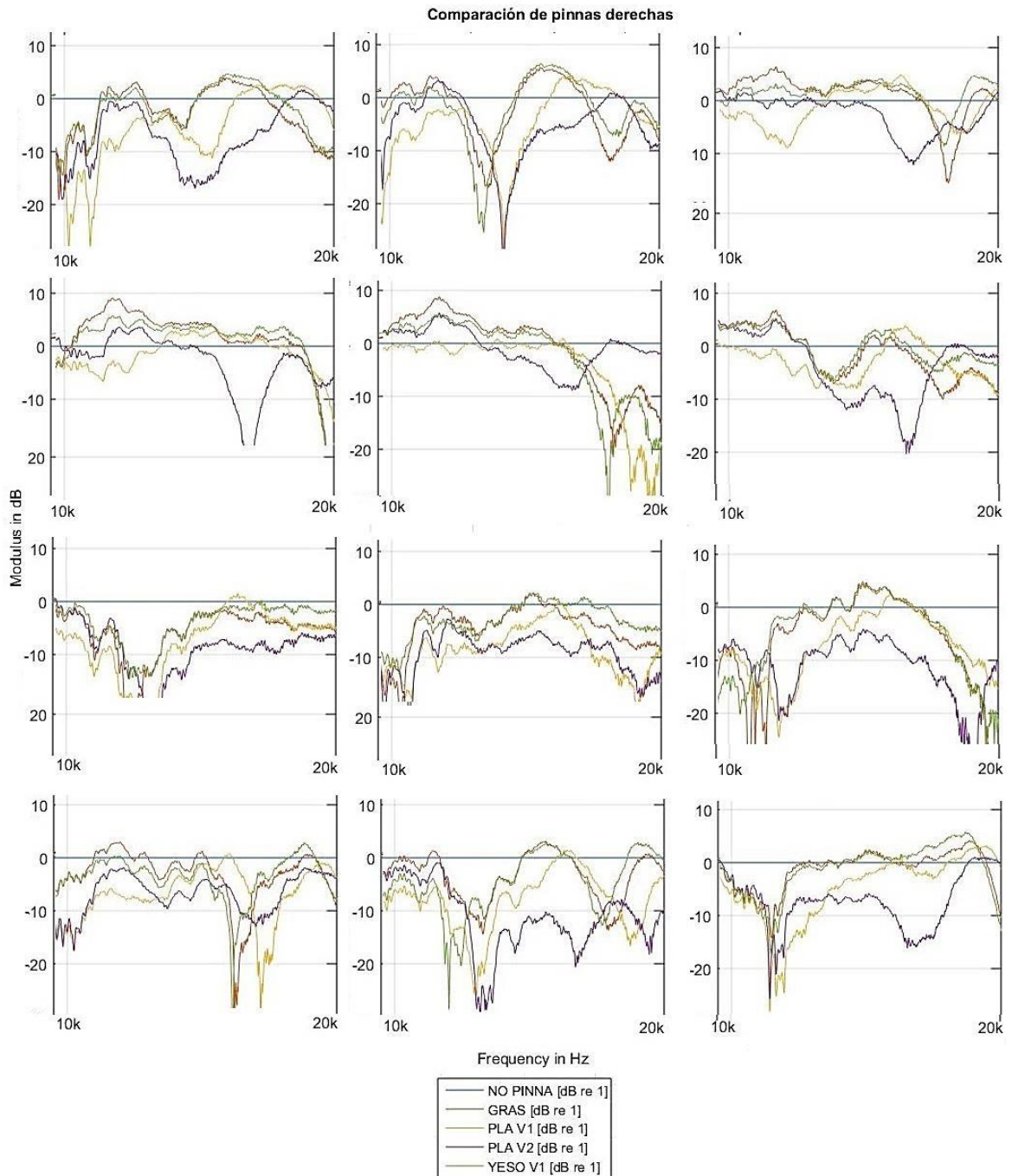


Figura 4.2-26 Resultados de las mediciones de ERTF's sobre los 10 [kHz] obtenidas en UTFSM.

Al examinar las altas frecuencias de las ERTF's en la Figura 4.2-25, se advierte que en las mediciones de las pinnas producidas por el método de impresión de filamento PLA (PLA V1 y PLA V2) las diferencias comienzan a aumentar considerablemente y aparecen comportamientos extraños.

Por otro lado, al comparar los resultados obtenidos de las medidas de la réplica creadas mediante el método de yeso y alginato (YESO), con la pinna de referencias (GRAS), se aprecia que mantiene un comportamiento similar en todo el ancho de banda y en pequeños rangos de frecuencia existe una diferencia de potencia acústica importante.

Entonces, para obtener las HRTF's personalizadas de cualquier individuo, se debe instalar, en un maniquí de cabeza estándar o personalizadas, las pinnas del oyente replicadas por el método de alginato-yeso, ya que los resultados de las últimas mediciones (ver Figura 4.2-24, Figura 4.2-25 y Figura 4.2-26) demuestra que la pinna de yeso tiene un comportamiento semejante y comparable, en los distintos ángulos de rotación, a la pinna de referencia GRAS.

Discusión y conclusiones

Tras terminar el desarrollo del proyecto y finalizar las mediciones de las ERTF's de los diferentes tipos de pinnas, se procede a examinar y analizar los resultados, los cuales generaron varias conclusiones respecto a la problemática y el objetivo definido al inicio.

Respecto a la primera parte del objetivo que es preparar experimentos de localización acústica 3D usando HRTF personalizadas y tras analizar las mediciones de los parlantes, se logra apreciar que aunque los componentes, las dimensiones y la construcción de los parlantes fueron elaborados bajo las mismas condiciones, las respuestas en frecuencias eran distintas. Lo cual demuestra que antes de realizar cualquier medición es necesario comprobar si las diferentes etapas del proyecto generan alteraciones en las mediciones acústicas.

También, se aprecia que la compensación realizada respecto a las respuestas en frecuencias de los parlantes, garantiza una emisión fidedigna de la señal de audio a utilizar en el experimento de localización de audio tridimensional. Por lo tanto, los parlantes y los estímulos están ajustados para implementar el experimento de localización de audio utilizando fuentes reales.

En relación a la segunda parte del objetivo que es comparar la respuesta acústica de pinnas y sus réplicas obtenidas con distintos métodos y materiales, surgieron varias conclusiones respecto al desarrollo y al análisis de las mediciones. En primer lugar, se debe realizar un estudio de los componentes que se utilizarán en el desarrollo del experimento y confirmar sus características antes de realizar cualquier tipo de medición, ya que la construcción de la cámara fabricada en el laboratorio generaba alteraciones a las mediciones, las cuales se producían porque las esponjas no absorbía el 100% de la señal, sino que reflejaba un porcentaje de ella.

En segundo lugar, se confirma que el procedimiento de instalación de pinnas no genera mayores variaciones en las mediciones, las cuales se pueden despreciar sin problema. También, se demuestra que la variación de profundidad solo genera una diferencia de potencia, la que a medida que aumenta la profundidad del micrófono en el canal auditivo, disminuye la potencia acústica.

De igual manera, al evaluar la densidad de las réplicas de pinna PLA, en este caso las de 30%, 70% y 100%, se demuestra que la variación de la densidad no afecta el comportamiento de su respuesta acústica, sino que existe pequeñas diferencias de potencias que son despreciables.

Luego de realizar las mediciones en la cámara anecoica de la UACH se corrobora que no es adecuado analizar de manera objetiva sus resultados, es decir que los resultados no son confiables, debido a que existía un mal funcionamiento del parlante.

Otro punto destacado, es que las condiciones de la cámara anecoica electromagnética son favorables para realizar mediciones acústicas. Por lo tanto, las intervenciones de las mediciones acústicas serán mínimas.

Tras analizar las últimas mediciones de ERTF's de todas las pinnas se concluye, que sus estructuras comienzan a realizar modificaciones o alteraciones a las señales acústicas entre 2 a 3 [kHz], lo cual confirman que las orejas son importantes para localizar la posición en el eje de elevación de diferentes señales de audio que contienen frecuencias altas.

Al comparar las respuestas al impulso o ERTF's de las diferentes pinnas, se determina que las réplicas elaboradas mediante el método de yeso-alginato, tienen un comportamiento similar y comparable con la pinna de referencia (GRAS) en toda la banda de frecuencia, donde solo en algunos rangos de frecuencia varía pequeñas potencias acústicas. No así, la réplica generada por el método de fotogrametría e impresión 3D de filamento PLA, ya que aunque son muy similares hasta los 11000 [Hz], luego de esta frecuencia las diferencias comienzan a aumentar y además aparecen comportamientos anómalos no acorde a la pinna de referencia.

Dado que en la actualidad es complejo obtener las HRTF's personalizadas exactas y tras el análisis anterior sobre la comparación de las ERTF's, se permite afirmar que es viable obtener las HRTF personalizadas de las pinnas replicadas mediante el método de moldeado mixto o híbrido de yeso-alginato, para luego realizar una simulación de localización acústica.

Sin embargo, no es posible confirmar que la diferencia entre la réplica de yeso y PLA sólo se genera por el tipo de material, ya que existe una desigualdad entre la precisión geométrica de las réplicas, dado que la pinna de yeso tiene una terminación fina y la pinna PLA contiene pequeñas irregularidades en la parte exterior y algunas imperfecciones en el interior. Por lo tanto, hasta no perfeccionar la técnica de fotogrametría o la definición en la impresión 3D, no será factible la comparación respecto al análisis del tipo de réplicas.

Bibliografía

- [1] S. Carlile, «Virtual auditory space: Generation and applications,» Chapman and Hal, New York, 1996.
- [2] Blauert, Jens & A. Butler, Robert, Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization, Journal of The Acoustical Society of America, 1985.
- [3] S. Moreau, «Further Investigations of High Order Ambisonics and Wave Field Synthesis for Holophonic Sound Imaging,» 2003.
- [4] Corey I. Cheng, Gregory H. Wakefield, «Introduction to head-related transfer functions (HRTFs): Representations of hrtfs in time, frequency, and space,» *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 4, nº 49, pp. 231-249, 2001.
- [5] H. Møller, M. F. Sørensen, C. B. Jensen, and D. Hammershøi, «Binaural technique: Do we need individual recordings?,» *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 44, pp. 451-464, 1996.
- [6] V. Ralph Algazi, Carlos Avendano, Richard O. Duda, «Elevation localization and head-related transfer function analysis at low frequencies,» Acoustical Society of America, California, 2001.
- [7] R. O. Duda, «"Elevation dependence of the interaural transfer function", Binaural and spatial hearing in real and virtual environments,» Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey, 1997.
- [8] D. S. A. Azúa, «Obtención y verificación de modelos 3D CAD de cabezas y orejas para aplicaciones acústicas,» Valparaíso, 2017.
- [9] Jesús Mariano Merino y Loida Muñoz-Repiso, «La percepción acústica: Física de la audición,» *Revista de Ciencias*, vol. 2, pp. 19-26, 2013.

-
- [10] [En línea]. Available: <http://www.sabiask.com/sabiasque/ciencia/estribo-hueso.html>. [Último acceso: 05 noviembre 2018].
- [11] D. R. Begault, 3-D Sound for Virtual Reality and Multimedia, California: National Aeronautics and Space Administration, 2000.
- [12] Brian C. J. Moore, An Introduction to the Psychology of Hearing, Leiden - Boston: Brill, 2013.
- [13] Y. M. Romero, «Sonido Binaural Evolución Histórica y Nuevas Perspectivas con los Paisajes Sonoros,» Porto, 2011.
- [14] Mercedes Ximena Hüg, Claudia Arias, «Estudios sobre localización auditiva en etapas tempranas del desarrollo infantil,» *Revista Latinoamericana de Psicología*, vol. 41, n° 2, pp. 225-242, 2009.
- [15] J. Huopaniemi, «Virtual Acoustics And 3-D Sound in Multimedia Signal Processing,» Helsinki University of Technology Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing, Espoo, 1999.
- [16] W. E. Feddersen, T. T. Sandel, D. C. Teas, and L. A. Jeffress, «Localization of high-frequency tones,» *J. Acoust. Soc. Am*, vol. 9, n° 29, p. 988–991, 1957.
- [17] J. Huopaniemi and M. Karjalainen, «HRTF filter design based,» ' *Proc. Nordic Acoustical Meeting (NAM'96)*, p. 323–330, 1996.
- [18] Luis Alberto, Teyssier Ramírez, «Reverberación por convolución utilizando un fpga,» Cholula, 2009.
- [19] M. L. Hernansanz, «Tecnología de registro y reproducción sonora para entornos de realidad virtual,» Madrid, 2013.
- [20] J. P. Jaén, «Parallax3D,» Blogger, [En línea]. Available: <http://parallax3d.blogspot.com/2014/07/sonido-3d-3-parte-15-el-sonido.html>. [Último acceso: 05 noviembre 2018].
- [21] G. Neumann, «Neumann.Berlin,» [En línea]. Available: <https://en-de.neumann.com/ku-100>. [Último acceso: 05 noviembre 2018].
- [22] J. C. H. Carvajal, «Diseño y producción de un banco de ambientes 3D implementando la HRTF (Head Related Transfer Function),» Bogota, 2010.
- [23] J. M. Sastre, «Desarrollo de herramientas de procesado y visualización para audio 3D con

- auriculares,» Madrid, 2016.
- [24] P. G. Cepeda, «El Sistema de Grabación y Reproducción Sonora Ambiofónico,» Madrid, 2013.
- [25] David G., Malham, Anthony Myatt, «3-D Sound Spatialization using Ambisonic Techniques,» Computer Music Journal, York, 1995.
- [26] Stéphanie Bertet, Jérôme Daniel, Etienne Parizet, Laëtitia Gros Y Olivier Warusfel, «Investigation of the perceived spatial resolution of higher order ambisonics sound fields: A subjective evaluation involving virtual and real 3D microphones,» International Conference, Saariselkä, 2007.
- [27] Sebastián P. Ferreyra, Oscar A. Ramos, «Análisis físico-acústico-espacial de respuestas impulsivas de un recinto con alta dispersión sonora obtenidas por métodos indirectos,» Mecánica Computacional, Cordoba, 2007.
- [28] I. 3382, «Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters,» Acoustics, 1997.
- [29] Swen Müller and Paulo Massarani, «Journal of the Audio Engineering Society,» *JAES*, vol. 49, nº 6, pp. 443-471, 2001.
- [30] «Equaphon University,» [En línea]. Available: <http://www.equaphon-university.net/barrido-senoidal-sine-sweep/>.
- [31] Odín Moreno Amezcua, Santiago. J. Pérez Ruiz, Antonio Pérez López, «Respuesta en frecuencia de altavoces sin utilizar cámara anecoica,» Simposio de Metrología, 2006.
- [32] Oana Bălan, Florica Moldoveanu, Anca Morar, Victor Asavei, «Experiments on training the sound localization abilities: A systematic review,» The 10th International Scientific Conference eLearning and software for Education, Bucharest, 2014.
- [33] «<https://www.xataka.com/audio/anatomia-del-altavoz-factores-que-influyen-en-la-calidad-del-sonido>,» [En línea].
- [34] Marco Berzborn, Ramona Bomhardt, Johannes Klein, Jan-Gerrit Richter, Michael Vorländer, «The ITA-Toolbox: An Open Source MATLAB Toolbox for Acoustic Measurements and Signal Processing,» 43th Annual German Congress on Acoustics, Kiel, 2017.
- [35] Two-dimensional sound-localization behavior of early-blind humans, «M. P. Zwiers · A. J. Van Opstal · J. R. M. Cruysberg,» Springer-Verlag, Nijmegen, 2001.

- [36] Craig T. Jin, Anna Corderoy, Simon Carlile, Andre van Schaik, «Spectral Cues in Human Sound Localization,» Sydney, 2006.
- [37] P. M. Hofman · A. J. Van Opstal, «Binaural weighting of pinna cues in human sound localization,» Springer-Verlag, Nijmegen, 2002.
- [38] Marc M. Van Wanrooij and A. John Van Opstal, «Contribution of Head Shadow and Pinna Cues to Chronic Monaural Sound Localization,» Society for Neuroscience, Nijmegen, 2004.
- [39] J. L. B. Caro, «Construcción de modelo de oreja artificial de silicona y medición de características acústicas,» Valparaíso, 2015.