

RAE

1. TIPO DE DOCUMENTO: Trabajo de grado para optar por el título de INGENIERO DE SONIDO.

2. TÍTULO: Diseño y construcción de un Panel Multi-actuador para técnica de síntesis Ambisonics.

3. AUTORES: Mateo Gómez Osorio, Santiago Felipe Quintana Villegas.

4. LUGAR: Bogotá D.C.

5. FECHA: Octubre de 2019

6. PALABRAS CLAVE: Paneles multiactuadores, Ambisonics, Codificación B-Format, Excitadores, Espacialidad.

7. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO: El objetivo principal de este proyecto consistió en diseñar y construir un panel multiactuador el cual utilizó la técnica de síntesis de reproducción sonora Ambisonics; para esto se realizó una revisión bibliográfica en la cual se determinó la manera en la que se debía construir el panel nombrado. Adicionalmente, se implementó la codificación de la señal en B-Format de Ambisonics de primer orden haciendo uso de un Plug-in que cumplía con el proceso buscado, posteriormente se determinó el sistema de control (flujo de señal) el cual vincula estos dos procesos mencionados. Finalmente, en esta cadena de procesos se probaron diferentes audios en B-Format reproducidos a través del panel para comprobar la percepción de espacialidad sonora 3D en los oyentes de manera subjetiva.

8. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: Línea de investigación Acústica aplicada. Campo temático del programa: (2) Diseño de sistemas de sonido.

9. METODOLOGÍA: La metodología de este proyecto responde a el enfoque mixto, donde se tomaron elementos tanto cuantitativos (mediciones objetivas) como cualitativos (mediciones subjetivas), para el estudio del panel multiactuador (diseño y construcción) y codificación B-Format para la reproducción sonora envolvente a través del mismo.

10. CONCLUSIONES: Con la culminación de este proceso investigativo y de desarrollo se pudo evidenciar que el diseño y la construcción de paneles multiactuadores que trabajan de manera conjunta como un todo para la reproducción de sonido (creando de esta manera el concepto de panel multiactuador) lograron una respuesta en frecuencia de 125Hz a 16KHz. Además, al realizar el flujo de señal (sistema de control) correspondiente, haciendo uso del plugin de codificación para técnica de síntesis Ambisonics, se logró generar una óptima percepción sonora 3D en los oyentes, como lo demuestra la prueba subjetiva que arrojó los siguientes resultados: En el análisis cuantitativo, más del 80% de calificaciones estuvieron en el rango medio alto para cada uno de los parámetros subjetivos de los audios presentados; en el análisis cualitativo, las respuestas obtenidas a las preguntas abiertas fueron confrontadas con la finalidad que se le quería dar a los audios producidos para el proyecto. Esto responde

al objetivo general del proyecto que buscaba el diseño y la construcción de un panel multiactuador para técnica de síntesis Ambisonics que generara percepción de espacialidad sonora 3D en los oyentes.

**Diseño y Construcción de un Panel Multiactuador para Técnica de Síntesis
Ambisonics.**

Mateo Gómez Osorio

Santiago Felipe Quintana Villegas

Universidad de San Buenaventura, Sede Bogotá

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería de Sonido

Bogotá, Colombia

2019

**Diseño y Construcción de un Panel Multiactuador para Técnica de Síntesis
Ambisonics.**

Mateo Gómez Osorio

Santiago Felipe Quintana Villegas

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero de Sonido

Título y nombre del tutor

PhD. Marcelo Herrera Martínez

Universidad de San Buenaventura, Sede Bogotá

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería de Sonido

Bogotá, Colombia

2019

Notas de aceptación

Firma del presidente del Jurado

Firma de jurado

Firma de jurado

Bogotá D.C octubre 2019

Agradecimientos

Le agradezco a mi familia, especialmente a mis padres Héctor Julio Gómez López y Ángela María Osorio Arias por creer siempre en la labor de estudiar la carrera Ingeniería de sonido, por brindarme su apoyo tanto emocional como económico ya que sin ellos no hubiese sido posible cumplir esta etapa de la vida. A mis abuelos Adolfo Osorio Ruiz y Fabiola Arias de Osorio, por su simpatía y carisma al estar siempre en las situaciones más difíciles de la carrera, a mí tía Alba Lucia Osorio Arias como factor clave en la compra de los materiales para la implementación de este proyecto debido a que ella al estar radicada en los Estados Unidos nos generaba la compra y envió hacia Colombia, muchas gracias. Finalmente le agradezco a mi compañera de vida Sandra Marcela Paredes Estévez estudiante de psicología por sus excelentes críticas constructivas a la hora de redactar este documento, análisis cualitativos de la muestra y sus diferentes puntos de vistas en la ejecución del proyecto.

Mateo Gómez Osorio

El agradecimiento principal es para mis padres, Gervy Quintana y Bibiana Villegas, ellos y su decisión de apoyarme emocional y económicamente en la idea loca de devolverme a Colombia a estudiar una carrera que ni yo mismo sabia de que trataba pero que con el tiempo le fueron cogiendo el mismo cariño y respeto que en este momento le tengo, fueron fundamentales para lograr culminar esta etapa. Un agradecimiento especial a cada uno de mis amigos, personas que fueron fundamentales para sobrellevar los malos y por estar en tantos buenos momentos, sobretodo a mi compañero de tesis y amigo Mateo Gómez, todas las desveladas, discusiones momentos de estrés y demás valieron la pena, total respeto. Gracias a mi novia Laura Hoyos por llegar inesperadamente al inicio de este proceso de

trabajo de grado para hasta el día de hoy estar presente con sus consejos, regaños y sobretodo con su paciencia y tiempo para brindarme la motivación necesaria para terminarlo.

Una dedicatoria especial y gigante a mi abuela María Villegas, que por circunstancias que solo Dios y la vida entiende se fue inesperadamente días antes de entregar este proyecto sin lograr ver graduado "al primer Ingeniero de la familia " **GRACIAS.**

Santiago Felipe Quintana Villegas

Le agradecemos de corazón a Iván Claro Carrascal, por hacer parte en el proceso de construcción de los paneles multiactuadores, también al ser conocedor del mundo del sonido en vivo por brindarnos bastantes sugerencias para la creación del mismo. A nuestro tutor de tesis el Dr. Marcelo Herrera Martínez que nos dirigió de forma correcta con su conocimiento y apoyo a la hora de desarrollar el proyecto, por brindar la mayor cantidad de su tiempo a la hora de ejecutar el proyecto. Muchas gracias. Al profesor Manuel Fernando Torres Cifuentes por darnos la idea principal en su clase de transductores electroacústicos en la creación de sistemas de audio, creando una base rígida a la hora de innovar con nuevos sistemas. Al profesor Darío Páez por darnos a entender de manera practica en su clase de Refuerzo sonoro el flujo de señal de los sistemas pasivos implementados en el presente proyecto.

Mateo Gómez Osorio, Santiago Felipe Quintana Villegas

Tabla de Contenido

Resumen	11
Abstract	12
Lista de Figuras.	14
Lista de Fotografías.	16
Lista de Ecuaciones.	17
Lista de Tablas.	18
Introducción	19
Capítulo I: Problema de Investigación	21
1.1 Planteamiento del Problema.....	21
1.1.1 Antecedentes	21
1.1.2 Descripción y Formulación del Problema	22
1.2 Justificación.....	24
1.3 Objetivos	25
1.3.1 Objetivo General	25
1.3.2 Objetivos Específicos.....	25
1.4 Alcances y Limitaciones del Proyecto	26
1.4.1 Alcances.....	26
1.4.2 Limitaciones.....	26
Capitulo II: Marco de referencia	27
2.1 Marco Conceptual.	27
2.1.1 Excitadores, mediciones y características.....	27
2.1.2 Arreglo de altavoces y Panel multiactuador.	28
2.1.3 Formulación matemática de codificación y decodificación del sistema Ambisonics.	28

2.1.4 Señal en Formato B Ambisonics (Reproducción).....	30
2.1.5 Concepto de espacialidad.....	31
2.1.6 Percepción y sensación auditiva.	32
2.1.7 Pruebas estadísticas ANOVA & Shapiro-Wilks.	33
2.1.8 Conceptos psico acústicos / parámetros subjetivos.....	34
2.2 Marco Legislativo o Normativo.	35
2.2.1 Licencias y usos de plugins.....	35
2.2.2 Normativas de medición.	36
2.2.2.1 Norma UIT-R BS.1116-3.....	36
2.2.2.2 Norma UIT-R BS.1284-2.....	36
2.2.2.3 Norma IEC 60268-5.	36
Capítulo III: Diseño metodológico	38
3.1 Enfoque de la Investigación.	38
3.2 Participantes.	38
3.3 Variables.	40
3.3.1 Variables Independientes.....	40
3.3.2 Variables Dependientes	40
3.3.3 Variables Foráneas	40
3.4 Hipótesis.....	40
3.5 Técnicas de Recolección de Información.	41
Capítulo IV: Desarrollo Ingenieril.....	43
4.1 Diseño y Construcción del panel multiactuador	43
4.1.1 Introducción.....	43
4.1.2 Proceso de diseño	44
4.2 Mediciones Objetivas para la Caracterización del panel multiactuador	59

4.2.1 Medición de respuesta en frecuencia.	59
4.2.2 Medición de Sensibilidad.....	61
4.2.3 Medición de Directividad.	65
4.3 Mediciones Subjetivas para la evaluación de percepción de espacialidad sonora 3D en los oyentes	66
4.3.1 Protocolo de aplicación del instrumento.....	66
Capítulo V: Pruebas y resultados.....	76
5.1 Realización de pruebas.....	76
5.2 Análisis de los Resultados.....	76
5.2.1 Análisis cuantitativo (Estadístico).	76
5.2.2 Análisis cualitativo	85
Capítulo VI: Discusión y análisis de resultados.....	95
6.1 Análisis de la Respuesta en frecuencia de los paneles multiactuadores.	95
6.1.1 Respuesta en frecuencia sin ecualización.....	95
6.1.2 Filtrado de corrección.	96
6.2 Resultados medición de Sensibilidad de los paneles multiactuadores.....	103
6.3 Análisis de la directividad de los paneles multiactuadores.	103
Capítulo VII: Conclusiones y recomendaciones	108
7.1 Conclusiones.	108
7.2 Recomendaciones.....	111
Referencias	113
Anexos.....	117

Resumen

En este proyecto se expone el proceso mediante el cual se diseñó y construyó un panel multiactuador (formado por la unión de cuatro paneles actuando como un solo) el cual utiliza la técnica de síntesis de reproducción sonora Ambisonics. Para desarrollar este proyecto, se realizó una revisión bibliográfica en la cual se determinó la manera en la que se debía construir cada uno de los paneles, adicionalmente, se implementó la codificación de la señal en B-format de Ambisonics de **primer orden** haciendo uso de un plug-in que cumplía con el proceso buscado y posteriormente se determinó el sistema de control (flujo de señal) el cual vinculó estos dos procesos mencionados.

Para evaluar el panel multiactuador construido y con el fin de analizar el sistema e identificar su capacidad de generar percepción de espacialidad sonora 3D buscada en los oyentes, se realizaron dos tipos de mediciones, la primera de forma objetiva por medio de mediciones de respuesta en frecuencia, sensibilidad y directividad y la segunda en la cual participaron 37 sujetos de la aplicación del instrumento “*Encuesta Percepción Sonora 3D*” el cual evaluaba (A través de preguntas abiertas y cerradas) de manera subjetiva cuatro diferentes audios procesados en B-format y reproducidos a través del panel.

Las pruebas determinaron que el panel multiactuador haciendo uso de la técnica de síntesis Ambisonics para su reproducción, logró generar una percepción sonora 3D en los oyentes con más del 80% de calificaciones en el rango medio alto para cada uno de los parámetros subjetivos de los audios presentados (preguntas cerradas), y coherencia en las respuestas obtenidas a las preguntas abiertas respecto a la finalidad que se le quería dar a los cuatro audios producidos y procesados.

Palabras clave: Paneles multiactuadores, Ambisonics, Codificación B-format, Excitadores, Espacialidad Sonora 3D.

Abstract

This project describes the process by which a MAP (multiactuator panel) (formed by the union of four panels acting as a single) is designed and constructed using the Ambisonics Sound Reproduction Synthesis technique. To develop this project, a bibliographic review was carried out in which it was determined, the way in which each of the panels was to be built, in addition, the encoding of the signal in B-format of Ambisonics of first order was implemented making use of a Plug-in that complied with the wanted process and later the system of control (signal flow) was determined which linked these two processes.

To test the built-in Multi-actuator Panel and in order to analyze the system and identify its ability to generate perception of 3D sound spatiality sought in the listeners, two types of measurements were made, the first one objectively, performing frequency response, sensitivity and directivity measurements, and the second one, in which 37 subjects participated in the application of the " *Encuesta Percepción Sonora 3D* " instrument which evaluates (through open and closed questions) four different audios processed in B-format and subjectively reproduced through the panel.

The tests determined that the multiactuator panel using the Ambisonics synthesis technique for reproduction managed to generate an optimal 3D sound perception in the listeners getting more than 80% ratings in the high middle range for each of the subjective parameters of the

audios (Closed questions), and consistency in the answers to the open questions regarding the purpose to be given to the four audios produced and processed.

Key words: Multi-actuator panel, Ambisonics, Codification B-format, Exciters, Spatial audio sensation.

Lista de Figuras.

Figura 1. Excitador de audio y sus componentes. Recuperado de: Dayton Audio. (2019).	27
Figura 2. Panel Multiactuador arreglo de altavoces en una aplicación audiovisual. Recuperado de: (Ortega, B. 2008).	28
Figura 3. Señales captadas por las cápsulas Formato A Ambisonics. Recuperada de (Farrar, 1979).	30
Figura 4. Direccionalidad de las señales en formato B de Ambisonics de primer orden	31
Figura 5. Proceso lógico y fisiológico del sistema auditivo humano (Percepción y estimulación auditiva) Tomado de (Herrera, Rincón & Vargas 2013).	33
Figura 6. Prototipo Panel Multi-actuador desarrollado por IRCAM Paris & Sonic Emotion. Recuperado de: (Ortega, B. 2008).	44
Figura 7. Partes principales de un panel Multi-actuador. Recuperado de: (Ortega, B. 2008).	45
Figura 8. Cantidad de modos por frecuencia fundamental de la placa rectangular.	53
Figura 9. Cantidad de modos por frecuencia fundamental de la placa cuadrada.	55
Figura 10. Conexión serie-paralelo excitadores. Recuperado de PUI AUDIO. (2019).	57
Figura 11. Flujo de señal para la medición de respuesta en frecuencia.	60
Figura 12. Relación del nivel de presión sonora (SPL) a un vatio de potencia.	64
Figura 13. Flujo de conexión del panel multiactuador con técnica de síntesis Ambisonics.	67
Figura 14. Audio 1 implementado en software Reaper.	71
Figura 15. Audio 2 implementado en software Reaper.	72
Figura 16. Audio 3 implementado en software Reaper	73
Figura 17. Audios de la fase No. 2 implementados en software Reaper	74
Figura 18. Diagrama de barras ilustrativo sobre la cantidad de participantes encuestados enfocado a la favorabilidad a cada audio.	82
Figura 19. Gráfico circular 2d porcentual de las respuestas las cuales los participantes de la encuesta asignaron en la fase 2 del audio 1.	83

Figura 20. Gráfico circular 2d porcentual de las respuestas las cuales los participantes de la encuesta asignaron en la fase 2 del audio 2.	84
Figura 21. Gráfico circular 2d porcentual de las respuestas las cuales los participantes de la encuesta asignaron en la fase 2 del audio 3.	84
Figura 22. Red semántica ambiente Audio 1. Creado en software CmapTools.	86
Figura 23. Red semántica elementos Audio 1. Creado en CmapTools.	88
Figura 24. Red semántica Audio 2. Creado en CmapsTools.	90
Figura 25. Red semántica ambiente Audio 3. Creado en CmapsTools.	92
Figura 26. Red semántica elementos Audio 3. Creado en CmapsTools.	93
Figura 27. Respuesta en frecuencia Paneles Multi-actuadores sin ecualización.	95
Figura 28. Selección tipo de ecualizador software Room EQ wizard “EQ measurement”.	97
Figura 29. Configuración de la tarjeta software Room EQ wizard “EQ measurement”.	98
Figura 30. Herramientas del filtro seleccionado software Room EQ wizard “EQ measurement”.	98
Figura 31. Espectro frecuencial de un ruido rosa generado a través del Software Smaart 7.	99
Figura 32. Respuesta en frecuencia Panel Eins Vista Suavizado 1/2 (Línea rosa: Sin ecualización, Línea verde: Ecualizado).	101
Figura 33. Respuesta en frecuencia Panel Deux Vista Suavizado 1/2 (Línea verde militar: Sin ecualización, Línea azul: Ecualizado).	101
Figura 34. Respuesta en frecuencia Panel Harom Vista Suavizado 1/2 (Línea violeta: Sin ecualización, Línea verde: Ecualizado).	102
Figura 35. Respuesta en frecuencia Panel Vier Vista Suavizado 1/2 (Línea violeta: Sin ecualización, Línea verde: Ecualizado).	102
Figura 36. Patrón Polar del panel Eins.	104
Figura 37. Patrón Polar del panel Deux.	105
Figura 38. Patrón Polar del panel Harom.	106
Figura 39. Patrón Polar del panel Vier.	107

Lista de Fotografías.

Fotografía 1. Marco trasero con material absorbente.....	46
Fotografía 2. Marco frontal.	46
Fotografía 3. Cartón tipo colmena/honey board de 10mm.....	48
Fotografía 4. Vista interior del panel con los cuatro excitadores.....	56
Fotografía 5. Prototipo final Panel Multi-actuador.	58
Fotografía 6. Totalidad de los paneles actuando en conjunto como uno solo.....	58
Fotografía 7. Bases mecánicas para la sujeción de los paneles.....	59
Fotografía 8. Montaje para la medición de respuesta en frecuencia de cada panel	61
Fotografía 9. Montaje para la medición de directividad (Circunferencia polar posicionada en el suelo).....	66
Fotografía 10. Paneles ubicados dentro de la sala.....	68

Lista de Ecuaciones.

Ecuación 1. W Señal asociada a la fuente omnidireccional.	29
Ecuación 2. X Señal asociada a la fuente delantera.....	29
Ecuación 3. Y señal asociada a la fuente izquierda.	29
Ecuación 4. Z señal asociada a la fuente superior.	29
Ecuación 5. Relación de los diferentes ejes en el formato B.	30
Ecuación 6. Distribución Gaussiana.	39
Ecuación 7. Ecuación de onda expresada de manera general.....	49
Ecuación 8. Ecuación de onda en dos dimensiones.....	49
Ecuación 9. Relación del modulo de young con la densidad superficial de un material.....	49
Ecuación 10. Posicionamiento del modo en una zona determinada del espacio.	49
Ecuación 11. Condiciones de contorno para una membrana rectangular.	49
Ecuación 12. Posicionamiento del modo con el componente real e imaginario.	50
Ecuación 13. Condiciones de contorno en dos ejes con soluciones sinusoidales.....	50
Ecuación 14. Ondas estacionarias en la membrana.	50
Ecuación 15. Ecuación general de modos.	50
Ecuación 16. Directividad del altavoz a partir de un piston plano en pantalla infinita.	62
Ecuación 17. Relación de la potencia eléctrica.	63
Ecuación 18. Resistencia eléctrica total.....	64
Ecuación 19. Sensibilidad a un vatio de potencia con un metro de distancia.	64
Ecuación 20. Relación voltaje, impedancia y potencia eléctrica.	64

Lista de Tablas.

Tabla 1. Listado de variables del proyecto.	40
Tabla 2. Distribución modal por bandas de tercio de octava de la placa rectangular.....	51
Tabla 3 Distribución modal por bandas de tercio de octava de un panel con dimensiones unitarias	53
Tabla 4. Proceso de desarrollo de las pruebas subjetivas.	69
Tabla 5. Género, duración, descripción e implementación del audio No. 1.....	70
Tabla 6. Género, duración, descripción e implementación del audio No. 2.....	71
Tabla 7. Género, duración, descripción e implementación del audio No. 3.....	72
Tabla 8. Género, duración, descripción e implementación de los audios de la fase No. 2..	74
Tabla 9. Distribución de la muestra por variables demográficas.....	76
Tabla 10. Frecuencia de calificación para el audio uno de la fase No. 1.....	77
Tabla 11. Frecuencia de calificación para el audio No. 2 de la fase No. 1.....	78
Tabla 12. Frecuencia de calificación para el audio No. 3 de la fase No. 1.....	78
Tabla 13. Medidas de distribución del audio uno de la fase uno.....	79
Tabla 14. Medidas de distribución del audio No. 2 de la fase No. 1.	79
Tabla 15. Medidas de distribución del audio tres de la fase uno.	80
Tabla 16. Análisis estadístico de Shapiro-Wilk para la normalidad de los audios.....	81
Tabla 17. Análisis estadístico de ANOVA entre los audios presentados a los oyentes en la fase uno.....	81
Tabla 18. Matriz de los ambientes del audio No. 1.	86
Tabla 19. Matriz de los elementos del audio No. 1.	87
Tabla 20. Matriz de los elementos y ambientes del audio dos.	89
Tabla 21. Matriz de los ambientes del audio tres.	91
Tabla 22. Matriz de los elementos del audio No. 3.	92
Tabla 23. Sensibilidad paneles multiactuadores.....	103

Introducción

Las técnicas de grabación y reproducción del sonido han evolucionado constantemente desde sus comienzos en 1877 con la invención del fonógrafo por Thomas Alva Edison, Eldridge R. Johnson y Emile Berliner y previamente del fonograma (Ortega, 2008), posicionando como tema principal de investigación en esta área la necesidad de preservar y recrear la espacialidad y naturalidad de lo que se graba sin limitar la zona de escucha a un solo punto, conocido como "sweet spot", debido a esto se han creado e implementando técnicas de reproducción sonora derivadas del sistema de dos canales estéreo conocidas como sistemas Surround, definidas por el número de canales con los que cuenta.

Estas, a pesar de ser comúnmente usadas por los consumidores e industrias de tecnología audiovisual no logran captar y por ende reproducir toda la información de manera correcta (Frank, Zotter, y Sontacchi, 2015) para generar una sensación de espacialidad óptima y brindar una mejor experiencia audiovisual al oyente; por esta razón se introducen técnicas basadas en el mismo principio de espacialidad como lo son Ambisonics, WFS y VBAP.

Estas técnicas, aunque presentan una experiencia 3D óptima para el usuario, tienen la limitación de ser de uso personal a través de aplicaciones o sistemas de reproducción sonora como el presentado por (Frank et al. , 2015), excluyéndolas para sistemas de reproducción caseros tipo teatros en casa, barras de sonido y demás.

Por su parte, la inclusión de estas técnicas sonoras nombradas en los nuevos dispositivos de sonido desarrollados actualmente, logran una percepción sonora espacial y natural como se puede evidenciar en el trabajo presentando por Ortega, en el cual desarrolla un panel multiactuador (localización de fuentes sonora sin discriminación por ubicación del oyente en la sala (Ortega,B. 2008)) con la técnica de WFS, además permiten su uso de

manera colectiva brindando así al o a los oyentes una experiencia audiovisual optima respecto a la brindada por los sistemas de sonido existentes con tecnología surround.

Capítulo I: Problema de Investigación

1.1 Planteamiento del Problema

1.1.1 Antecedentes

Desde 1877, año de la invención del fonógrafo y previamente del fonograma (gráfico resultante de la inscripción de las ondas sonoras en un fonógrafo), la grabación del sonido y las técnicas de reproducción del mismo han ido evolucionando continuamente. Una de las materias más importantes de investigación dentro de esta área ha sido la necesidad de preservar y recrear la espacialidad y la naturalidad de los eventos que se graban (Ortega, B. 2003).

Esto dio lugar a que, en 1960, se introdujera al público la técnica de reproducción sonora espacial a través de un sistema de dos canales estéreo. El siguiente gran avance presentado en esta técnica fue el intento de la reproducción del campo sonoro captado, intentando recrear los cambios de presión permitiendo al oyente posicionar las fuentes sonoras provenientes de diferentes locaciones en el espacio tridimensional (Ortega, B. 2008), la evolución de esta técnica ha permitido que en la actualidad se presenten diferentes tipos de sistemas surround comúnmente usados por los consumidores de tecnología audiovisual como el 5.1, 6.1 y sonido envolvente 7.1, llamados así por el número de canales en el sistema, al igual que Ambisonics, WFS (wave field synthesis) y VBAP (vector base amplitude panning) otros tipos de técnicas de sonido espacial existentes (Pueo & Tur, 2009).

En la evolución de la investigación alrededor de la reproducción sonora, diferentes sistemas han sido creados con fines no solo audiovisuales sino en desarrollo de otras áreas del conocimiento como lo es la medicina. A pesar de esto, a grandes rasgos se evidencia que predomina en los avances realizados y nuevos productos existentes en el mercado los

enfocados en el entretenimiento de personas, basados en satisfacer demandas cada vez más altas. El cine, el sistema inmersivo de los videojuegos y la llegada de equipos con alta tecnología audiovisual a los hogares es evidencia de esto, lo que incrementa la necesidad de crear nuevos y mejores sistemas en pro de la experiencia del usuario.

Una de las mejores maneras de contribuir a las experiencias de entretenimiento audiovisual para los usuarios es a través de nuestro órgano sensorial con más capacidad de percepción: el oído, utilizando el sonido como uno de los principales canales de comunicación dentro de los sistemas de realidad virtual (Ledo, 2013). Además, ha sido demostrado que usar sonido para proporcionar información alternativa o suplementaria a un usuario puede aumentar considerablemente la cantidad de información que puede asimilar (Smith, Perry, Lynellen & Yang, 1997).

1.1.2 Descripción y Formulación del Problema

Actualmente, como lo plantea (Mejía, 2012) los dispositivos de sonido e imagen existentes en el mercado destinados a la creación de sensación sonora envolvente, desarrollan diferentes técnicas de síntesis, dependiendo del uso para el cual son creados (sistemas de teatro en casa, video juegos, cascos de realidad virtual), generando experiencias significativas en los usuarios que los utilizan; sin embargo, como mencionan en su trabajo (Frank et al. , 2015), la típica tecnología de grabación usando arreglos de micrófonos para captar sistemas estéreo o 5.1 (tipos de surround más comunes con los que cuentan los actuales sistemas de sonido en el mercado) no logra capturar y por ende previamente reproducir toda la información de manera correcta.

En el mismo orden de ideas, usar muchos micrófonos direccionados a la fuente que se desea capturar generara un problema al querer representar aspectos de espacialidad y de

timbre (Frank, 2015), a pesar de esto, los grandes fabricantes siguen ofreciendo sistemas implementando este tipo de espacialidad sonora, variando e innovando únicamente su diseño pero no su técnica de síntesis, generando así limitaciones en cuanto a la reproducción espacial del sonido y a la experiencia en beneficio del usuario y su sistema auditivo.

Por otra parte, los dispositivos que usan la síntesis Ambisonics la cual brinda gran ventaja al momento de ofrecer sistemas de producción de audio 3D completo, con varias fuentes de sonido en movimiento por la forma en la que es capturado el sonido a través de varios arreglos principales de micrófonos, no son conocidos comercialmente y los pocos que existen ofrecen un sistema de entretenimiento personal a través de aplicaciones o sistemas de reproducción sonora como el presentado por (Frank et al. , 2015). Este se enfocaba en la idea de decodificar grabaciones Ambisonics para ser reproducidas en audífonos y previamente crear señales binaurales convolucionando las que se creaban a través de estos con HRTFs (Head Related Transfer Functions) o en español (Función de transferencia realizada con la cabeza), apropiadas para su posición en el espacio. Este tipo de sistema, aunque presenta una experiencia 3D óptima para el usuario, tiene la limitación de ser de uso personal, excluyendo Ambisonics para sistemas de reproducción caseros tipo teatros en casa, barras de sonido y demás.

Lo dicho previamente hace relucir dos grandes limitaciones en cuanto al uso que se le da a el tipo de técnica de síntesis Ambisonics, basados ambos en el hecho de que esta no tenga un auge comercial en cuanto a sistemas de sonido se refiere: El primero es la no existencia de sistemas de entretenimiento caseros como teatros en casa, equipos de sonido, barras de sonido y demás con este tipo de síntesis de audio, y el segundo es la inclusión de este tipo de síntesis solo en sistemas personales de realidad virtual y en aplicaciones móviles

que no son pensadas en el uso y entretenimiento común “estilo cine”, sino de entretenimiento personal.

El panorama presentando en los párrafos anteriores en donde se exponen las grandes limitaciones existentes al momento de realizar la investigación y que conllevan a desarrollar el presente proyecto, permite proponer la siguiente pregunta a partir de la cual se estructura la propuesta de investigación: ¿Cómo a través de la creación de un panel multiactuador con un plug-in de codificación para técnica de síntesis Ambisonics se puede generar percepción de espacialidad sonora 3D en los oyentes?

1.2 Justificación

Los sistemas de sonido existentes, los cuales usan tecnología surround destinados a generar percepción de espacialidad sonora y colectiva (estilo cinema), no logran reproducir toda la información que se ha captado previamente y por ende impiden lograr una inmersión total del oyente en la realidad virtual que se pretende recrear, basado en aspectos de naturalidad y espacialidad, esto debido a las técnicas de reproducción usadas en los mismos (estéreo, 5.1, 7.2). Además de esto, las técnicas de síntesis sonoras tales como WFS, VBAP o Ambisonics, a pesar de lograr una mejor reproducción y características óptimas buscadas al momento de la espacialidad sonora ya mencionada, no se encuentran implementadas en este tipo de sistemas, solo se encuentran en sistemas sonoros de entretenimiento personal limitando la experiencia sonora colectiva a los usuarios.

Por su parte, al diseñar, construir e implementar el sistema propuesto, se lograría crear una percepción sonora espacial y natural debido a la técnica de síntesis que será utilizada en los audios que se reproduzcan a través de este, además permitiría su uso de manera colectiva

brindando así al o a los oyentes una experiencia audiovisual óptima respecto a la brindada por los sistemas de sonido existentes con tecnología surround típica utilizada en estos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar y construir un panel multiactuador con un plug-in de codificación para técnica de síntesis Ambisonics generando percepción de espacialidad sonora 3D en los oyentes.

1.3.2 Objetivos Específicos

Diseñar e implementar un panel multiactuador con técnica de síntesis Ambisonics para generar percepción de espacialidad sonora 3D en los oyentes.

Establecer el sistema de control para el panel multiactuador referenciado a la técnica de síntesis Ambisonics.

Evaluar la percepción de espacialidad sonora 3D en los oyentes producida por panel multiactuador, por medio de encuestas subjetivas¹.

¹ Parámetros subjetivos. (Naturalidad, Profundidad, Presencia/Realismo, Localización, Claridad, Percepción de altura).

1.4 Alcances y Limitaciones del Proyecto

1.4.1 Alcances.

Se desarrollará un prototipo que a futuro será adaptado para entrar al campo comercial de los sistemas surround.

El sistema logrará generar una eficiente percepción sonora 3D, al escuchar productos (audiovisuales y musicales) en formato B en el sistema con técnica Ambisonics.

1.4.2 Limitaciones.

El sistema de audio solo logra su reproducción (por la decodificación) en formato B, impidiendo transformarlo a otro tipo de formato o su captura en formato A.

Para lograr la optimización del sistema será necesario recurrir a la señal de manera independiente por lo que se necesitará implementar sistemas activos logrando la independencia de la señal.

El plugin de codificación a usar será adquirido a partir de ciertos parámetros objetivos², este no será desarrollado por los autores.

² Precio, plataforma en la cual se puede usar el plug-in, código abierto/cerrado, algoritmo enfocado a la técnica de síntesis Ambisonics de primer orden, método de codificación en el Formato B (reproducción), compatibilidad del número de canales emitidos igual al número de arreglos de excitadores a reproducir.

Capítulo II: Marco de referencia

2.1 Marco Conceptual.

2.1.1 Excitadores, mediciones y características.

Los excitadores son transductores electrodinámicos sin marco y sin cono, los cuales reemplazan estos dos componentes con superficies rígidas que por medio del proceso de vibraciones pueden recrear un espectro en frecuencia determinado por el material sobre el cual actúan. Se componen de tres partes como se puede observar en la Figura 1, la primera es la parte trasera donde se encuentra una placa de acoplamiento (coupling plate) en la cual se identifican el motor del excitador y la bobina, la segunda parte es el sistema de suspensión y la última parte son los terminales de conexión eléctrica (Dayton Audio, 2019). Según (Pueo, López, Scolano y Horchen, 2010) los excitadores distribuidos en superficies planas sirven para potenciar en el usuario la percepción de una respuesta en frecuencia similar o mejor a la producida por los altavoces convencionales, así mismo permiten la optimización de espacios mejorando la estética en la ubicación y la experiencia audible de los usuarios.



VISTA TRASERA

Figura 1. Excitador de audio y sus componentes. Recuperado de: Dayton Audio. (2019).

2.1.2 Arreglo de altavoces y Panel multiactuador.

Los arreglos de altavoces, empleados con el fin de tener la reproducción del audio a gran escala sin tener en cuenta requisitos estéticos, dan paso a la aparición y construcción de un panel multiactuador, estos son paneles delgados y ligeros accionados por un conjunto de excitadores. Debido a estas características se pueden transportar fácilmente al interior de una sala y ser utilizados al mismo tiempo en proyección de aplicaciones multimedia (Kuster, De Vries, Beer & Brix, 2006), como se puede observar en la Figura 2:

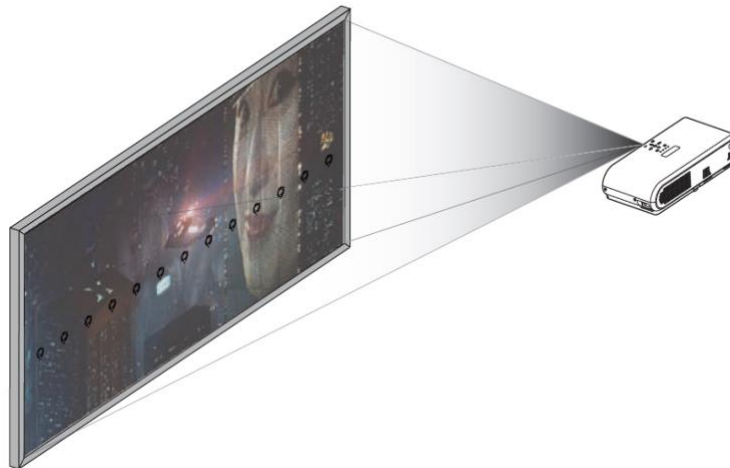


Figura 2. Panel Multiactuador arreglo de altavoces en una aplicación audiovisual.

Recuperado de: (Ortega, B. 2008).

2.1.3 Formulación matemática de codificación y decodificación del sistema Ambisonics.

Para la reproducción del audio en el panel multiactuador se hizo uso de la técnica de síntesis Ambisonics, convirtiendo la señal del Formato A (captura) a Formato B (reproducción) en primer orden (cuatro canales), este tipo de codificación, consiste en una matriz invariable en el tiempo llamado módulo A-B, que se muestra en las ecuaciones 1, 2,

3 y 4 respectivamente, donde cada una de las variables corresponde a un posicionamiento de captura de un micrófono de la siguiente manera: La señal W es la señal asociada a la fuente omnidireccional, la señal X es la parte delantera, la señal Y es la cara izquierda y la señal Z la sección superior, completando así la información necesaria para tener una localización en el espacio y reproducir previamente lo que se ha grabado a través de estos.

$$W = \frac{1}{2}(Lb + LF + Rf + Rb) \quad \text{Ecuación 1}$$

$$X = \frac{1}{2}(-Lb + LF + Rf - Rb) \quad \text{Ecuación 2}$$

$$Y = \frac{1}{2}(Lb + LF - Rf - Rb) \quad \text{Ecuación 3}$$

$$Z = \frac{1}{2}(-Lb + LF - Rf - Rb) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde: $Lb + LF + Rf + Rb$, expresan las señales que capturan el audio en cada una de las cápsulas (Gerzon, 1975) como se puede observar en la Figura 3 la cual representa un micrófono que captura la señal en formato A de Ambisonics.

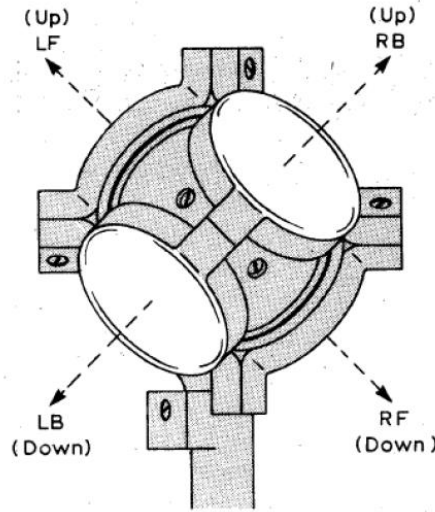


Figura 3. Señales captadas por las cápsulas Formato A Ambisonics. Recuperada de (Farrar, 1979).

2.1.4 Señal en Formato B Ambisonics (Reproducción)

El formato B de Ambisonics es un derivado del formato A que se utiliza para la reproducción del sonido, esta señal usa un vector de cuatro canales como se muestra en la ecuación 5 y cuenta con algunas variaciones en su estándar siendo las más importantes el orden de canales y su normalización, en el presente trabajo se utilizó el primer orden de Ambisonics:

$$B_s = (X_s \ Y_s \ Z_s \ W_s) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde W_s representa el canal que transporta la señal de amplitud con características omnidireccionales y los canales restantes $X_s \ Y_s \ Z_s$ representan la direccionalidad en una esfera a través de relaciones de fase con gradientes de presión sonora (Kolundzija & Faller, 2018) como se muestra en la Figura 4.

Dado que la reproducción en formato Ambisonics solo se puede lograr mediante la combinación entre los canales anteriormente mencionados, es importante que:

Los canales sigan un orden conocido y que el nivel relativo entre el canal de amplitud y los canales de dirección sea conocido para combinarlos adecuadamente y así mismo saber la ubicación de las fuentes en la esfera creada.

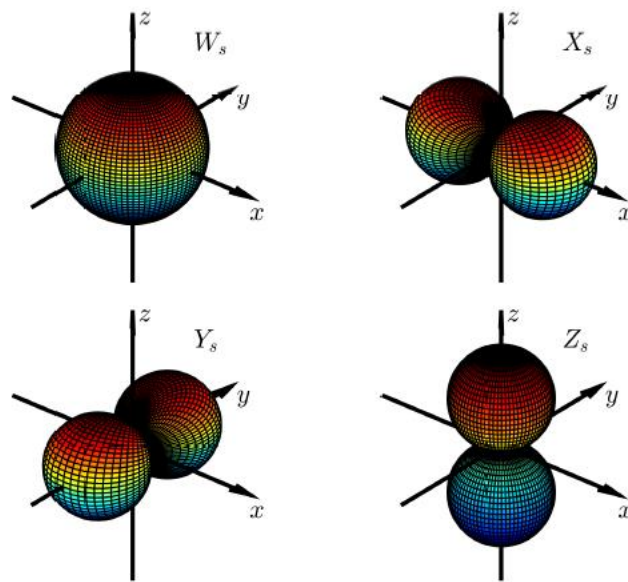


Figura 4. Direccionalidad de las señales en formato B de Ambisonics de primer orden.
Recuperada de (Kolundzija & Faller, 2018)

2.1.5 Concepto de espacialidad.

(Romero, 2000) en su trabajo define el espacio desde un punto de vista físico como “el lugar que ocupa una cosa o la extensión donde se sitúan los cuerpos físicos”. Así pues, la espacialidad se puede definir como: “la percepción, el conocimiento, y el control que el sujeto

tiene de su situación en el espacio, de sus posibilidades de desplazamiento y situaciones en el entorno con respecto a los objetos y las demás personas que en él se encuentran”.

2.1.6 *Percepción y sensación auditiva.*

Para realizar la evaluación de los parámetros subjetivos nombrados, se debe mencionar la diferencia existente entre los dos conceptos a definir, la Universidad de Buenos Aires en su facultad de Psicología realiza un trabajo en el cual nombran estos y los ponen en un orden lógico de entendimiento y proceso fisiológico que desarrolla el ser humano de la siguiente manera:

Primero el *Estímulo*, definido como “la energía física que produce una actividad nerviosa en un receptor específico (sonido que activa el oído)”, segundo el *Receptor*, que sería el órgano que recibe el estímulo, en este caso el sistema auditivo humano; como tercer punto, tenemos la *Sensación*, lo que experimenta el receptor cuando recibe el estímulo, y como último punto en esta cadena tenemos la *Percepción* definida como la interpretación significativa de las sensaciones como representante de los objetos externos (lo que está afuera) (Giuliano y Aranda, 2013), además, siguiendo metodologías usadas por la psicoacústica se podrá obtener la manera correcta de aplicar pruebas y previo análisis para los estímulos sonoros que serán presentados más adelante. La Figura 5 muestra el proceso descrito anteriormente:

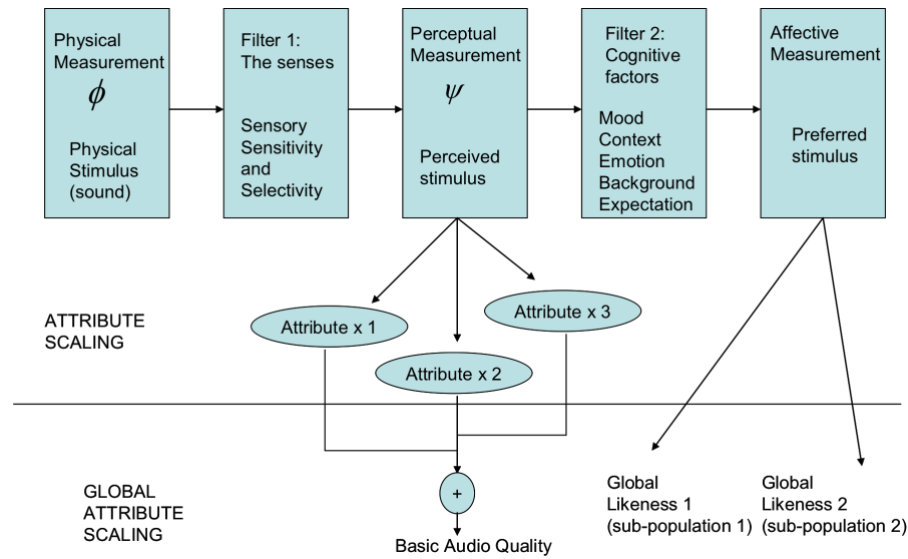


Figura 5. Proceso lógico y fisiológico del sistema auditivo humano (Percepción y estimulación auditiva) Tomado de (Herrera, Rincón & Vargas 2013).

2.1.7 Pruebas estadísticas ANOVA & Shapiro-Wilks.

Un análisis de varianza (ANOVA), prueba la hipótesis de que el valor de las medias³ de dos o mas poblaciones⁴ son iguales. Esta prueba evalúa la importancia de uno o mas factores (si existen), cuando se compara la media de variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores.

Por otra parte, la prueba de Shapiro-Wilks plantea la hipótesis nula de que una muestra proviene de una distribución normal. Para definir si se rechaza o se acepta la

³ La media de un conjunto de datos representa el promedio entre estos, se halla sumando cada uno de los datos y dividiendo en el número total de datos. Real Academia Español (2019).

⁴ Una población es un conjunto de sujetos o elementos que comparten características comunes. Real Academia Español (2019).

hipótesis de igualdad de medias se evalúa un nivel de significancia⁵ (menor o igual que 0.05 se rechaza) (Romero-Saldaña, 2016).

2.1.8 Conceptos psico acústicos / parámetros subjetivos

En la realización de las pruebas se incluyen ciertos conceptos psicoacústicos los cuales representan los parámetros subjetivos para evaluar la percepción de espacialidad sonora 3D en los oyentes, estos parámetros son:

Naturalidad: La naturalidad del sonido que escucha. El sonido no debe sentirse artificial o sobrepuesto en el ambiente.

Profundidad: La distancia espacial aparente de la fuente de sonido al oyente. Que tan cercana o lejana siente las diferentes fuentes sonoras.

Presencia/Realismo: La impresión de estar inmerso en el lugar. Que tan real es la sensación del ambiente sonoro.

Localización: La ubicación aparente de las diferentes fuentes de sonido. Que tan fácil es la ubicación de los diferentes sonidos dentro del Ambiente.

Claridad: Grado de separación entre sonidos individuales percibidos dentro del ambiente. Que tan fácil es identificar cada uno de los sonidos individualmente.

Percepción de altura: Percepción de sonidos el eje vertical del oyente. Percibe las fuentes sonoras arriba y debajo de usted.

⁵ Valor asociado a la verificación de una hipótesis o en pocas palabras la probabilidad de tomar la decisión o no de rechazar la hipótesis nula cuando esta es verdadera. Real Academia Español (2019).

2.2 Marco Legislativo o Normativo.

2.2.1 Licencias y usos de plugins.

Para el desarrollo del proyecto, como se mencionó, se hizo uso de una serie de plugins de codificación los cuales logran realizar la reproducción sonora en el formato buscado de manera óptima, en este caso, Ambisonics. Para esto, se consideró necesario hacer la búsqueda de los mismos basada en varios parámetros objetivos de diferentes softwares y considerar las características de estos para poder trabajar efectivamente sin contar con problemas de licencias o programas que no se logren utilizar.

En este orden de ideas, se hizo uso de la suite de waves (usando específicamente el plugin B360 Ambisonics), vitalicia con su respectiva licencia, que incluye la decodificación adicional a las herramientas que dejan manipular la señal enfocada a la técnica de síntesis Ambisonics, usando la estación de trabajo de audio digital (DAW) *Reaper* que es de acceso libre. Así mismo para el uso de los audios capturados en formatos multipista, que son reproducidos en el panel multiactuador para el desarrollo de las pruebas subjetivas, fue necesario presentar una explicación del fin académico del uso de los audios al proyecto *Omnitone*⁶, debido a que se debía tener en consideración la autorización de los respectivos autores sobre el uso de su producto y adicionalmente se tuvo un apoyo de descarga de audios de uso libre por la organización *Freesound*⁷

En el análisis de datos estadísticos se usó el paquete estadístico SPSS Statistics 25, para generar los datos estadísticos del Anova y los descriptivos de frecuencias y de distribución de la población muestral, contando con la licencia de la Universidad de San

⁶ (<https://googlechrome.github.io/omnitone/>)

⁷ (<https://freesound.org/>).

Buenaventura sede Bogotá. Adicionalmente, para corroborar los datos obtenidos se usó el software libre JASP, un proyecto de código abierto apoyado por la Universidad de Ámsterdam, enfocado al análisis estadístico.

2.2.2 Normativas de medición.

2.2.2.1 Norma UIT-R BS.1116-3.

La norma se usó para la medición subjetiva que se implementó a la población de Ingeniería de Sonido que cursaba de octavo a décimo semestre, debido a que tomaba en consideración los sistemas multicanal, como lo es el panel multiactuador con técnica de síntesis Ambisonics del presente proyecto.

La recomendación UIT-R BS.1116-1 estandariza este método como método adecuado para la evaluación de las deficiencias pequeñas. Tres estímulos se presentan al oyente, A, B, y C, en el caso del presente proyecto: Audio 1, Audio 2 y Audio 3 para la fase 1 y 2 respectivamente, en la segunda fase y siguiendo la norma, uno de los audios se conoce como la señal de referencia, y los otros dos son una vez más la referencia, pero en versión modificada, el oyente no es consciente de cuál es cuál.

2.2.2.2 Norma UIT-R BS.1284-2.

La calidad sonora emitida por el panel multiactuador se evaluó subjetivamente con la norma Bs.1284-1 teniendo parámetros de calidad, degradación y una comparación.

2.2.2.3 Norma IEC 60268-5.

Esta norma se refiere a los parámetros de medición objetiva de sistemas de sonido, donde el apartado cinco determina todo el aspecto de altavoces tratados completamente como

elementos pasivos, excluyendo altavoces con amplificadores incorporados. Enfocado en las mediciones que utilizan señales de ruido o impulsos sinusoidales.

Capítulo III: Diseño metodológico

3.1 Enfoque de la Investigación.

El enfoque metodológico de este proyecto fue mixto, es decir contó con un enfoque tanto cuantitativo como cualitativo (Hernández, Fernández & Baptista, 2003), el proceso realizado pretendía el diseño (donde se tuvieron en cuenta variables independientes como: dimensiones del panel, número y características de los altavoces, características del plug-in de codificación, número de paneles y características de los mismos) y la construcción de un dispositivo de sonido envolvente conocido como panel multiactuador que lograra realizar reproducción sonora a través de un plug-in de codificación para una técnica de síntesis sonora llamada Ambisonics.

La unión de los dos aspectos mencionados anteriormente junto con las características propias de cada uno, logró una percepción sonora 3D inmersiva en el usuario, la cual fue evaluada tanto a través de parámetros subjetivos (naturalidad, profundidad, presencia/realismo, localización, claridad, percepción de altura) generados al momento de la reproducción sonora, como a través de mediciones objetivas específicas (realizadas en salas acústicamente tratadas tales como los estudios de grabación o estudio de sonido en vivo dentro de la Universidad De San Buenaventura sede Bogotá) que pretendían lograr una óptima caracterización del sistema (medición de la fase, directividad, sensibilidad y respuesta en frecuencia).

3.2 Participantes.

La población participante en este estudio se distribuyó, para el análisis realizado en grupos de edad (jóvenes y adultos con un criterio de inclusión hasta los 50 años debido a las

limitaciones auditivas que se pueden presentar) (NIDCD, 2018) y experiencia auditiva de los mismos (en este caso el criterio de inclusión fue el semestre de los estudiantes. Se realizó la prueba con docentes del programa de Ingeniería de Sonido y estudiantes del programa cursando octavo, noveno y décimo semestre, esto debido a las materias cursadas hasta ese momento).

Para escoger la muestra, basándonos en el enfoque mixto escogido para este proyecto, se siguió la técnica descrita por Hernández, Fernández y Baptista (2003), donde exponen las muestras no probabilísticas o dirigidas, más en concreto el "muestreo no probabilístico por participantes voluntarios" (p.396), que consistió en la respuesta activa de los estudiantes y los profesores a una invitación hecha de forma verbal al cumplir los criterios de inclusión.

De esta forma teniendo en cuenta que el número total de estudiantes y profesores del programa son 102 (88 estudiantes y 14 profesores) y la cantidad de personas para ser representativa la muestra son 37 según la distribución gaussiana (Ecuación 6) (UTCI,2011), teniendo un 87 % de grado de confianza y un 10 % de margen de error.

$$n = \frac{N * Z^2 * p * (1-p)}{e^2 * (N-1) + Z^2 * p * (1-p)} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

n = Tamaño de la muestra.

N = Tamaño de la población.

Z = Puntuación en el área central bajo la curva normal gaussiana (nivel de confianza deseado).

p = Valor de maximización del producto (Ej. 0.5).

e = Porcentaje de error.

3.3 Variables.

Para el presente estudio se trabajó con variables independientes, variables dependientes y variables foráneas las cuales se plantean en la Tabla 1.

Tabla 1. Listado de variables del proyecto.

3.3.1 Variables Independientes.	3.3.2 Variables Dependientes
-Dimensiones del panel multiactuador.	-Número de canales a reproducir para generar espacialidad con la técnica de síntesis Ambisonics.
-Características de los altavoces.	-Costos para la construcción del Panel Multi-actuador.
-Características del Plug-in de codificación.	-Archivo de audio a reproducir.
-Número de amplificadores.	-Materiales a utilizar para construcción del Panel Multi-actuador (Madera, cartón nido de abeja, pegante especial, material absorbente)
-Cantidad de altavoces.	-Ubicación del Panel Multi-actuador
-Condiciones de la sala en la cual se implementa sistema del Panel Multi-actuador.	-Frecuencia inferior a reproducir cada panel Multi-actuador
-Limitaciones auditivas del oyente.	
-Experiencia auditiva del oyente.	
-Voltaje de alimentación al panel Multi-actuador.	
-Ubicación de las personas durante la prueba.	
-Número y características de los paneles individuales.	
3.3.3 Variables Foráneas	
-Limitaciones auditivas del oyente. (criterio de inclusión: edad)	

3.4 Hipótesis.

El desarrollo y construcción de un panel multiactuador con un plug-in de codificación para técnica de síntesis Ambisonics logrará una percepción sonora inmersiva en el usuario, permitiendo preservar aspectos de espacialidad y naturalidad en el sonido reproducido a través de este, generando una experiencia auditiva óptima comparada con otros sistemas de sonido existentes.

3.5 Técnicas de Recolección de Información.

En el proceso de recolección de información, se realizaron las mediciones acústicas ya mencionadas para las cuales se necesitaron ciertos instrumentos de medición básicos (micrófonos de medición , sonómetro, interfaz, software de medición) en salas con características acústicas especiales, preferiblemente la sala de grabación de alguno de los estudios de la Universidad de San Buenaventura, donde se desarrollaron encuestas encaminadas a la evaluación de parámetros subjetivos los cuales ya han sido definidos y mencionados del sistema de reproducción Ambisonics implementado con el panel multiactuador, o por el contrario, al aire libre, donde se realizan las mediciones y análisis de los parámetros objetivos.

El instrumento con el que se trabajó es la “*Encuesta Percepción Sonora 3D*” (Ver Anexo F), la cual fue adaptada por los investigadores ya que no se encontró un instrumento para evaluar la percepción de espacialidad, esta encuesta se dividió en dos fases las cuales tuvieron una duración aproximada de 16 a 20 minutos, la primera respondía a la guía aportada por (Aguacía, Pardo y Lozano, 2014), en su trabajo de grado denominado: “Diseño de Atmósferas Sonoras Tridimensionales utilizando Sistemas Ambisonics”, estos parámetros fueron medidos en una escala de intervalo de 1 a 10, siendo 1 el valor mínimo y 10 el valor máximo, la persona tenía que marcar con una “X” el número que cree el que representaba ese parámetro, esto se realizó para tres diferentes audios previamente seleccionados y creados.

La segunda fase consistió en presentar al oyente un audio diferente a los de la fase uno, este audio se presentó tres veces, en cada una de las presentaciones se identificó un sonido discriminativo el cual estaba posicionado en diferentes lugares del espacio auditivo

permitiendo determinar los ejes de exposición sonora donde el oyente percibe el sonido, esto creado con los plugins Ambisonics de la suite de Waves.

Capítulo IV: Desarrollo Ingenieril

4.1 Diseño y Construcción del panel multiactuador

4.1.1 Introducción

En la tesis doctoral realizada por (Ortega, 2008), se propone el diseño y la previa construcción de un panel multiactuador a gran escala, esto basado en el enfoque audiovisual que él le dio al mismo. Para este fin Ortega (2008) afirma que:

El tamaño de los paneles debe ser grande para proyectar imágenes en movimiento o fijas para grandes audiencias. Además, con respecto a la calidad de la radiación de sonido, se recomiendan paneles grandes ya que los modos de excitación más bajos pueden ser excitados, lo que determina el ancho de banda útil a bajas frecuencias. (p.117).

En este proyecto, el enfoque de la realización del proyecto omitió lo visual y se centró netamente en la construcción de un sistema de audio el cual logra una sensación de reproducción sonora espacial óptima en el usuario. Debido a esto y recordando la definición que propone (Romero, 2000) del concepto de espacialidad, se decidió que el ancho de banda útil a bajas frecuencias propuesto en el prototipo desarrollado por (Pueo, 2008) no era del todo necesario en este estudio. Esto, debido a que a través de la técnica de reproducción Ambisonics usada, se buscó reconstruir espacios sonoros que escucha cotidianamente el ser humano: espacios que carecen de una discriminación real en frecuencias bajas (Merino & Muñoz 2007); por otra parte, como ya se mencionó, al tratarse de un sistema de audio que omite lo visual, el tamaño de los paneles no debe ser grande.

Basado en estos dos aspectos y realizando la revisión bibliográfica correspondiente y tomando como referencia principal el trabajo realizado por (Pueo, 2008), donde se exponen

diferentes y actuales prototipos de paneles multiactuadores, se decidió emular uno de los prototipos desarrollados por IRCAM Paris & Sonic Emotion AG creado en 2007 (Figura 6); esto debido a que uno de los principales requerimientos para el presente proyecto fue el tamaño del panel buscando aparte de economía, similitud en cuanto a esta característica en los sistemas de sonido caseros actuales, adaptándose además a los requerimientos en cuando al ancho de banda buscado (presencia principal de frecuencias medias-altas sin omitir completamente la frecuencia baja) y al material del panel vibrante utilizado.

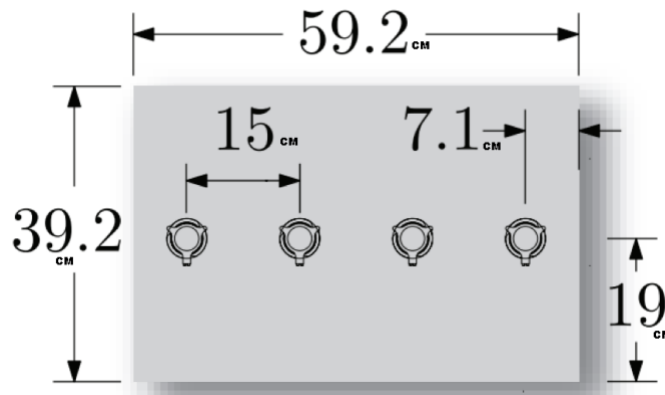


Figura 6. Prototipo Panel Multi-actuador desarrollado por IRCAM Paris & Sonic Emotion.

Recuperado de: (Ortega, B. 2008).

4.1.2 Proceso de diseño

Como punto de partida de este proceso, al realizar la búsqueda bibliográfica se pudo determinar que no existe realmente una guía de diseño y construcción para los paneles multiactuadores; es por esto, que se decidió en este capítulo desglosar el paso a paso para la construcción del mismo. Lo primero a resaltar, es que un panel consta de cuatro partes principales que al ser unidas actúan como un solo, la primera es el marco frontal, la segunda es el panel vibrante seguido de los excitadores y, por último, el marco trasero (Figura 7).

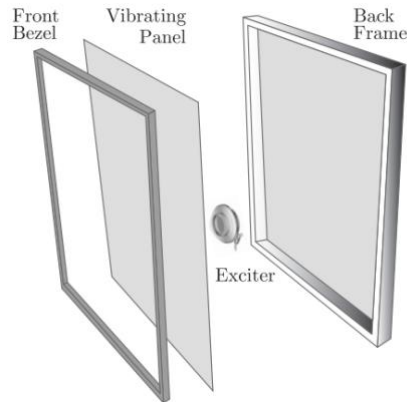


Figura 7. Partes principales de un panel Multi-actuador. Recuperado de: (Ortega, B. 2008).

Teniendo claro esto y como se mencionó anteriormente, se emuló el prototipo mostrado en la Figura 6, estableciendo el largo del marco frontal y el marco trasero a 62,5 cm, la altura del panel a 42,5 cm, manteniendo la relación de 20,0 cm presentada en el prototipo de (IRCAM & Sonic, 2007). El marco trasero, tenía un fondo de 5,00 cm para emular el espacio mostrado en la Figura 6 (back frame) y contaba con material absorbente en su cara trasera (Fotografía 1), esto con el fin de evitar la formación de ondas estacionarias dentro de la caja (Ortega, B. 2008), por su parte, el marco frontal tenía 2,00 cm de ancho como se muestra en la Fotografía 2.



Fotografía 1. Marco trasero con material absorbente.



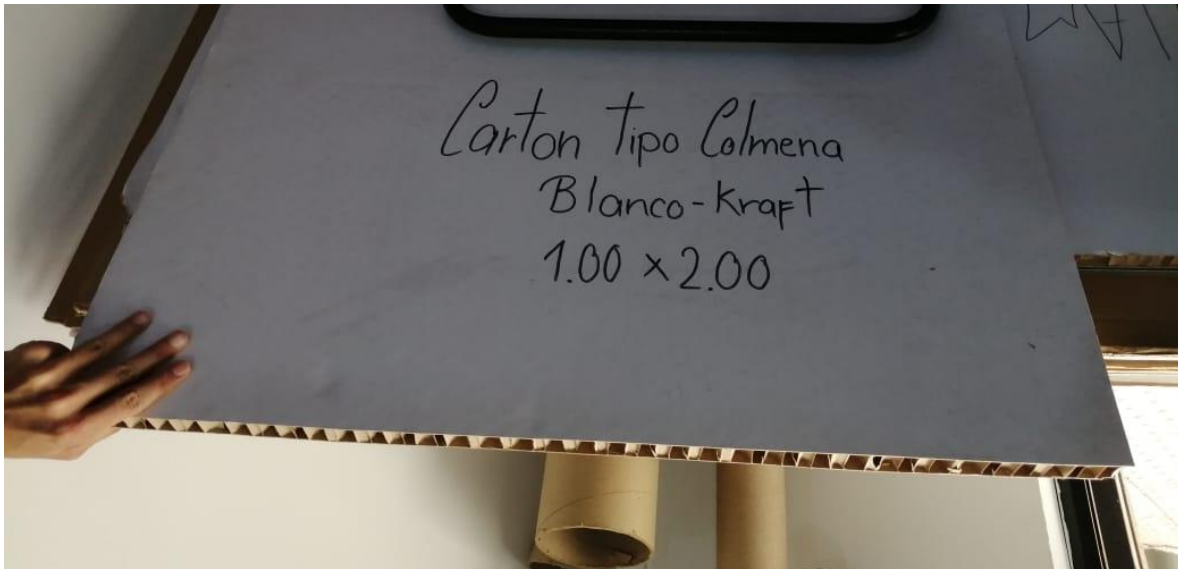
Fotografía 2. Marco frontal.

Siguiendo la guía de los prototipos más pequeños mostrados en el trabajo realizado por (Pueo, 2008) el material utilizado para los marcos frontal y trasero fue madera tipo

(MDF) de 9,00 mm y 12,00 mm respectivamente, la densidad de la madera hizo que la realización de los marcos en este material fuera adecuada debido a sus dimensiones y su peso final, contrario al prototipo realizado por (Pueo, 2008) el cual contaba con dimensiones más grandes y buscaba mayor resistencia del panel.

El panel vibrante fue seleccionado de acuerdo al trabajo realizado por (Kuster, De Vries, Beer & Brix, 2006), quienes planteaban un modelado del cartón nido de abeja, además de la presencia de un modelado idéntico al material a utilizar presente en el trabajo de Pueo (2008) y los prototipos descritos en el mismo, sumado a la presencia de la guía para compradores de Dayton Audio en donde se sugerían materiales a usar para el montaje de excitadores de audio, en la cual nombraban la "plancha de cartón corrugado o en forma de panal" (Dayton Audio, 2019). Por su parte, en el prototipo usado por Pueo (2008) e IRCAM & Sonic se utilizó un "sanduche" de película de poliéster adherida a un papel impregnado tipo panal que precisamente se nombra dentro de los materiales sugeridos por Dayton Audio.

El material del panel vibrante se trató de una lámina de cartón conglomerado de 10,00 mm tipo colmena/honey board, el cual contaba con dos coberturas de cartón y un interior en forma de nido de abeja de 4,00 mm aproximadamente, con densidad superficial de $0,14 \text{ kg/m}^2$, datos que son proporcionados por el fabricante (Fotografía 3).



Fotografía 3. Cartón tipo colmena/honey board de 10mm.

Las dimensiones del panel vibrante fueron: 60,00 cm de largo, 40,00 cm de alto y se encontraba soportado sobre un marco interno de 9,00 mm de espesor y de ancho del mismo material utilizado para los marcos nombrados; esto se puede observar en la Fotografía 4.

Las dimensiones del panel mencionadas anteriormente se escogieron después de realizar una comparación de análisis de distribución modal entre dos placas con diferentes dimensiones, la primera un cuadrado perfecto y la segunda una membrana rectangular (La cual contaba con las medidas mencionadas anteriormente y fue justamente la placa utilizada), ambas con condiciones de contorno de extremos fijos para comprobar la no presencia de repeticiones modales, este proceso se desarrolla siguiendo la explicación presentada por (Kinsler, Frey, Coppens & Sander, 2000) en su libro *Fundamentals of Acoustics* (pp. 91-94).

El proceso descrito anteriormente se desglosa a continuación:

En primer lugar, los autores, asumen que la membrana es delgada se estira uniformemente en todas las direcciones y vibra transversalmente con pequeñas amplitudes

de desplazamiento (Kinsler, Frey, Coppens & Sander, 2000). Presentando la ecuación de onda expresada de manera general dada en la Ecuación 7:

$$\nabla^2 y = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\delta^2 y}{\delta t^2} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde ∇^2 representa el operador Laplaciano para el caso del estudio en dos dimensiones apropiado para membranas rectangulares dando así la ecuación de onda general presentada en la Ecuación 8:

$$\frac{\delta^2 y}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\delta y}{\delta r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\delta^2 y}{\delta \theta^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\delta^2 y}{\delta t^2} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$\text{Donde } c = \sqrt{\frac{T \text{ (Modulo de Young de la membrana)}}{\rho \text{ (Densidad superficial)}}} \quad \text{Ecuación 9}$$

Para calcular los modos normales en membranas se asume que la solución tendrá la forma presentada en la Ecuación 10:

$$y = \psi e^{j\omega t} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde ψ es una función solo de posición en el espacio.

Luego se procede a aplicar las condiciones de contorno para una **membrana rectangular con extremos fijos** donde $x = 0, x = L_x, z = 0, z = L_z$ de esta manera se genera la Ecuación 11 que representa las condiciones de contorno para este tipo de placas.

$$y(0, z, t) = y(L_x, z, t) = y(x, 0, t) = y(x, L_z, t) = 0 \quad \text{Ecuación 11}$$

La solución de la Ecuación 11 se presenta de la siguiente manera en la Ecuación 12

$$y(x, z, t) = \psi(x, z) e^{j\omega t} \text{ Ecuación 12}$$

Debido a que la Ecuación 12 tiene un componente real e imaginario sus soluciones son sinusoides como se plantea en la Ecuación 13:

$$y(x, z, t) = A \sin(K_x x + \phi_x) \sin(K_z z + \phi_z) e^{j\omega t} \text{ Ecuación 13}$$

Donde K_x , K_z , ϕ_x y ϕ_z son determinadas por las condiciones de contorno.

Volviendo a la Ecuación 11 los autores determinan que para que $y(0, z, t) = 0$ y $y(x, 0, t) = 0$ se requiere que ϕ_x y ϕ_z sean iguales a 0 y las condiciones $y(L_x, z, t) = 0$ y $y(x, L_z, t) = 0$ requieren que los argumentos $K_x L_x$ y $K_z L_z$ sean múltiplos integrales de π (Kinsler, Frey, Coppens & Sander, 2000), por lo tanto las ondas estacionarias en la membrana están dadas por la Ecuación 14:

$$y(x, z, t) = A \sin(K_x x) \sin(K_z z) e^{j\omega t} \text{ Ecuación 14}$$

Donde $K_x = n\pi/L_x$; $n = 1, 2, 3, \dots$ & $K_z = m\pi/L_z$; $m = 1, 2, 3, \dots$

Sabiendo $|A|$ es la amplitud máxima de desplazamiento, n y m representara cada uno de los modos.

De esta manera se llega a la ecuación general de modos presentada en la Ecuación 15:

$$f_{nm} = \frac{\omega_{nm}}{2\pi} = \left(\frac{c}{2}\right) \left[\left(\frac{n}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_m}\right)^2\right]^{1/2} \text{ Ecuación 15}$$

Haciendo uso de la Ecuación 15 y tomando $c = 39,09$ con el modulo de young del material dado por el proveedor de 214,69 MPa y una densidad superficial de $0,14 \text{ kg/m}^2$ se realiza una comparación de distribución modal entre las dos placas mencionadas anteriormente la cual se muestra en el Anexo H, además, a continuación, se muestra en la Tabla 2 y Tabla 3 la distribución modal organizada por bandas de tercio de octava para las dos placas comparadas y en en las Figuras 8 y 9 se puede analizar de manera gráfica el proceso realizado.

Se observa en la Tabla 2 que en la placa rectangular no existen repeticiones modales en ninguna de las bandas respecto a la Tabla 3 correspondiente a placa cuadrada donde aparecen repeticiones modales en todas las bandas de tercio de octava. Por su parte, en las Figuras 8 y 9 se verifica de manera gráfica la cantidad de modos que existen en cada uno de los intervalos de las frecuencias fundamentales por tercio octava para las dos placas estudiadas y además se puede verificar un comportamiento ascendente en número de modos a medida en que se llega a la frecuencia de resonancia del sistema comprobando así un buen comportamiento modal para las medidas usadas, sustentando además de esta manera el porque se toman las dimensiones correspondientes a la placa rectangular para la creación del panel multiactuador y no las medidas de una placa cuadrada con valores iguales en su alto y largo.

Tabla 2. Distribución modal por bandas de tercio de octava de la placa rectangular

Frecuencia (Hz)	63	125	250	500
Modos / Intervalos (Hz)	44,19 a 88,39	88,39 a 176,8	176,8 a 353,6	353,6 a 707,1
1	55,54	96,96	181,42	357,28
2	77,61	104,51	186,07	368,39
3		111,08	186,18	372,05
4		131,29	193,32	372,14

PANEL MULTIACTUADOR AMBISONICS 52

5	133,34	193,91	372,36
6	141,16	206,16	378,88
7	151,21	208,42	387,82
8	155,23	209,02	388,79
9	163,09	222,17	399,03
10	166,63	223,85	407,25
11		231,54	412,31
12		232,84	427,48
13		237,54	444,33
14		237,80	499,88
15		241,20	
16		247,89	
17		254,57	
18		258,75	
19		261,35	
20		262,59	
21		266,69	
22		277,07	
23		277,71	
24		282,32	
25		285,74	
26		285,81	
27		290,87	
28		296,48	
29		302,43	
30		310,46	
31		316,67	
32		317,23	
33		322,70	
34		327,22	
35		333,25	
36		334,62	
37		339,60	
38		344,72	
39		351,84	

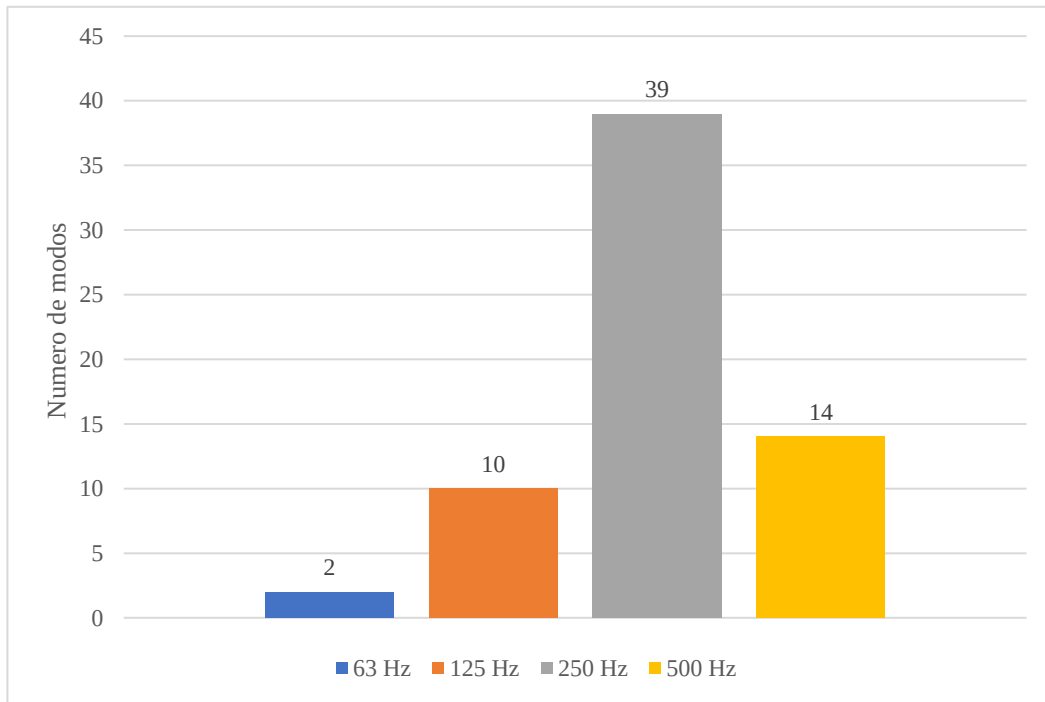


Figura 8. Cantidad de modos por frecuencia fundamental de la placa rectangular.

Tabla 3 Distribución modal por bandas de tercio de octava de un panel con dimensiones unitarias

Frecuencia (Hz)	31,5	63	125	250	500
Modos / Intervalos (Hz)	22,10 a 44,19	44,19 a 88,39	88,39 a 176,8	176,8-353,6	353,6-707,1
1	27,58	55,15	97,50	179,78	
2	43,60	61,66	97,50	179,78	
3	43,60	61,66	99,43	183,96	
4		70,31	99,43	183,96	
5		70,31	105,01	193,04	
6		80,40	105,01	195,00	
7		80,40	110,31	195,00	
8		82,73	113,70	207,29	
9		87,21	113,70	207,29	
10		87,21	118,61	220,62	
11			118,61	248,19	

PANEL MULTIACTUADOR AMBISONICS 54

12	123,33
13	123,33
14	124,86
15	124,86
16	130,81
17	130,81
18	137,89
19	137,89
20	137,89
21	140,62
22	140,62
23	141,96
24	141,96
25	148,51
26	148,51
27	152,30
28	152,30
29	157,21
30	157,21
31	157,21
32	157,21
33	160,80
34	160,80
35	165,46
36	166,61
37	166,61
38	167,75
39	167,75
40	174,41
41	174,41

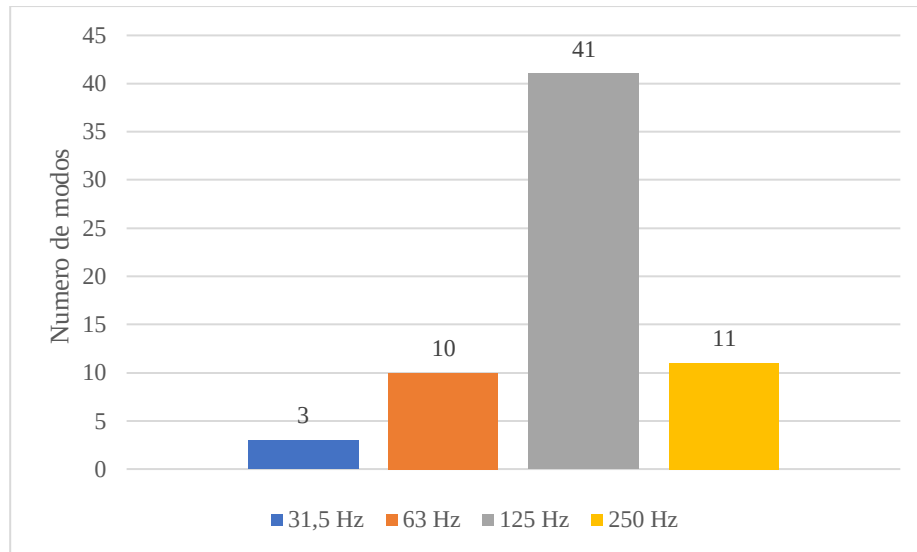
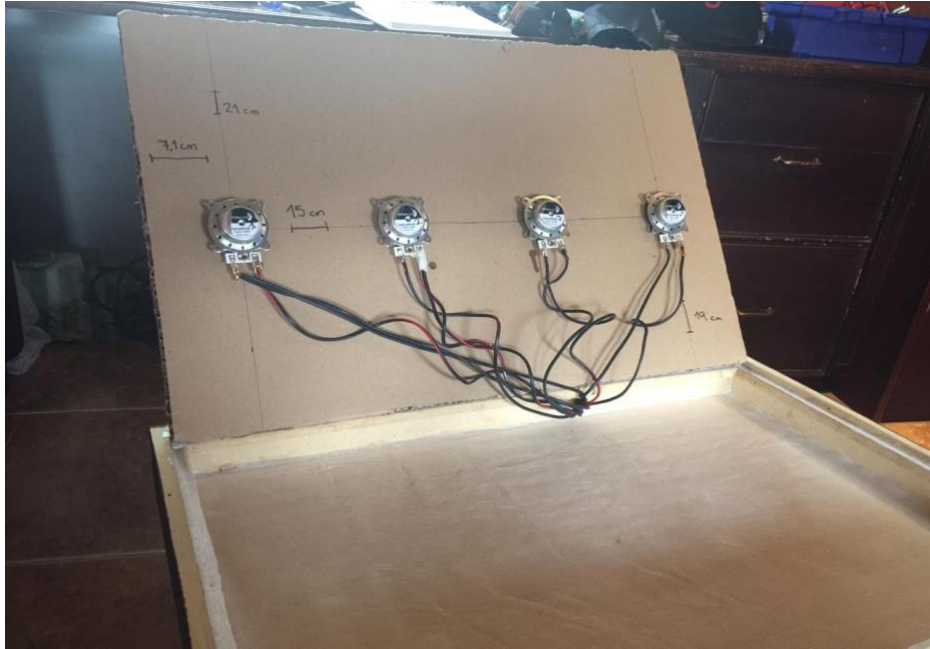


Figura 9. Cantidad de modos por frecuencia fundamental de la placa cuadrada.

Los excitadores usados fueron marca Dayton, referencia DAEX25FHE-4 de 25,00 mm, contaban con una impedancia de cuatro Ohmios a 24 Vatios (según fabricante) lo cual los convertía en excitadores ideales para trabajar con amplificadores pequeños tipo clase D (Dayton Audio, 2019) y amplificadores de alto rendimiento debido al manejo de potencia, estos fueron acoplados al panel vibrante con una separación de 7,10 cm de las superficies verticales del mismo, 19,0 cm de la parte inferior y contaban con una separación de 15,0 cm entre ellos, tal como se muestra en la Figura 6 adicional a su implementación en el presente proyecto (Fotografía 4).



Fotografía 4. Vista interior del panel con los cuatro excitadores.

Se buscaron excitadores acordes a las dimensiones del panel y al tipo de amplificador usado (Se hizo uso de un Amplificador de potencia clase D, referencia TDA7498, sus características se pueden ver en el **Anexo A**), ya que la respuesta en frecuencia y sensibilidad de estos dependerá completamente de la superficie en la cual estén acoplados. Para realizar el conexionado de los excitadores, teniendo varios como es el caso del presente proyecto, donde se usaron cuatro, existe la posibilidad de conectar los mismos en serie, paralelo o una combinación de serie-paralelo como se decidió usar (Figura 10), este tipo de conexionado “asegura tener la misma impedancia que un excitador, siempre que el número ,de excitadores usados sea un cuadrado perfecto (4, 16, 25...)” (PUI Audio, Inc., 2016).

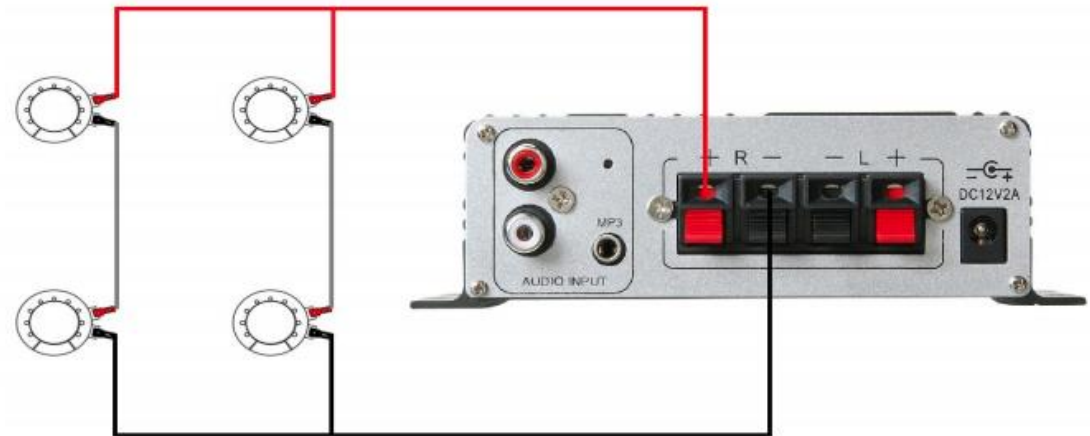


Figura 10. Conexión serie-paralelo excitadores. Recuperado de PUI AUDIO. (2019).

La unión de las cuatro partes del panel multiactuador (marco frontal, panel vibrante, excitadores y marco trasero) se realizó a través de un mecanismo de sujeción entre el marco frontal y el marco trasero con puntillas para madera las cuales permitían la fácil apertura del mismo, contemplando daños o futuros cambios, la placa vibrante reposaba sobre la superficie mencionada anteriormente, entre estas dos partes, y entre el marco frontal y trasero se agregó un material amortiguador el cual evitaba la fricción directa debido al toque de las dos piezas cuando el panel se encontraba en funcionamiento. El ensamble de las piezas da como resultado el prototipo final de un panel y su unión con la totalidad de los paneles actuando en conjunto como uno solo, responde a la creación del prototipo final del panel multiactuador del proyecto (Fotografías 5 y 6 respectivamente).



Fotografía 5. Prototipo final Panel Multi-actuador.



Fotografía 6. Totalidad de los paneles actuando en conjunto como uno solo.

Finalmente, para lograr la elevación de los paneles, buscando posicionarlos a la altura del oído del oyente durante el desarrollo de las mediciones objetivas y pruebas subjetivas respectivamente, se creó un sistema de sujeción a partir de bases mecánicas para los mismos (dos por cada uno, parte superior e inferior) los cuales encajaron en trípodes comunes usados para elevar cabinas de audio, estas bases contaron con material absorbente en su interior con el fin de evitar resonancias y roces con el panel al momento de accionar los paneles.



Fotografía 7. Bases mecánicas para la sujeción de los paneles.

4.2 Mediciones Objetivas para la Caracterización del panel multiactuador

4.2.1 Medición de respuesta en frecuencia.

La medición de respuesta en frecuencia se debe realizar en un lugar que simule las condiciones de cámara anecoica, o en su defecto en campo libre como se hizo la presente medición debido a que dentro de la Universidad de San Buenaventura sede Bogotá no existe una cámara anecoica que se adapte al sistema de sonido del presente proyecto (debido a las dimensiones de los paneles), se verificaron las condiciones climáticas días antes de la medición y se obtuvieron resultados de no presencia de precipitaciones, factor importante para este tipo de mediciones.

Los elementos utilizados para realizar la medición fueron: *Software Room EQ Wizard*, un micrófono de medición referencia ECM8000 el cual se calibra con un pistófono SV30A Type 1 IEC 60942:2003, generando un tono de 1KHz a 94dB, una interfaz de Audio

Box Presonus USB96, y la respectiva conexión al panel multiactuador con su amplificador de potencia clase D referencia TDA7498 como se muestra en la Figura 11.

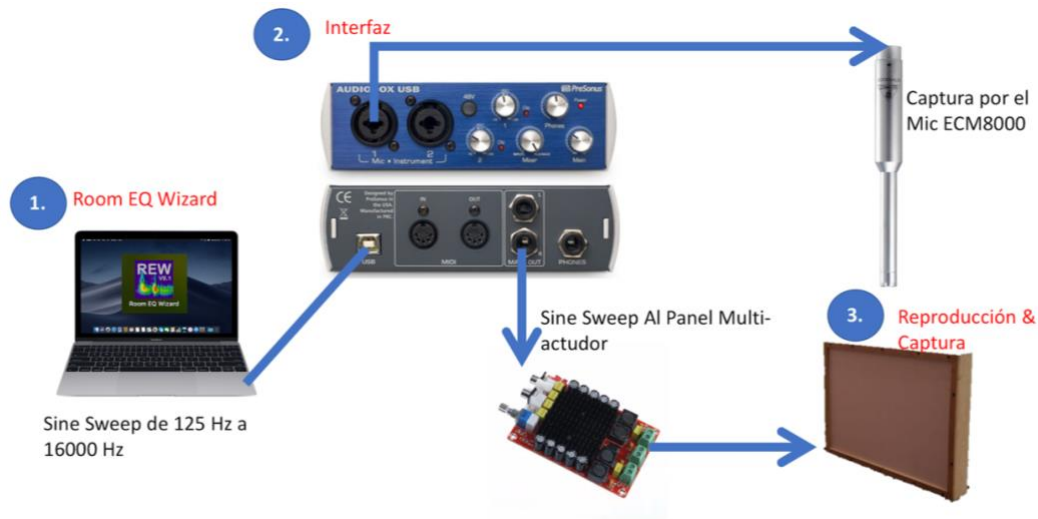


Figura 11. Flujo de señal para la medición de respuesta en frecuencia.

Para realizar la medición fue necesario calibrar la interfaz con la configuración LoopBack presente en el software, donde se evaluó la conexión de la entrada y la salida de la interfaz, esto para verificar la linealidad de la tarjeta de sonido la cual no presentó una variación de ± 1 dB entre el rango de frecuencias a analizar y así obtener la respuesta en frecuencia de la tarjeta para adquirir valores coherentes al momento de realizar la medición (Room EQ Wizard, 2018).

Luego de realizar el proceso descrito anteriormente, se generaron desde el software cuatro señales de barrido sinusoidal (logarítmicas) *Log Sine Sweep*, con una frecuencia inicial de 125 Hz y una frecuencia final de 16 KHz (debido a que este es el rango de frecuencias en la cual trabajan cada uno de los excitadores usados, características que son dadas por el fabricante de los mismos, como se puede observar en el **Anexo B**). Para obtener los datos de respuesta en frecuencia luego de realizar los cuatro barridos mencionados se posicionó el

micrófono a una altura de 1,20 m y a 1 m (Fotografía 8) de distancia del panel como lo indica la normativa IEC 60268-5 (2003).



Fotografía 8. Montaje para la medición de respuesta en frecuencia de cada panel

Se realizó una medición previa del ruido de fondo presente en el lugar, midiendo este con el sonómetro SVANTEK 977 configurado en modo LEQ (nivel equivalente) durante 5 minutos, obteniendo un nivel de 54 dBSPL, valor inferior por los menos 34 dBSPL respecto a la medición, garantizando resultados coherentes, esto basado en la normativa D.S. 38/11.

4.2.2 Medición de Sensibilidad.

Para la medición de sensibilidad de cada uno de los paneles, se posicionó el micrófono de medición a 1 metro de distancia del centro del panel (que en este caso hace las veces de un altavoz convencional), luego de esto, haciendo uso del flujo de señal presentado en la Figura 11 se generó, a través del Software *Smaart 7* un tono de 1 KHz y haciendo uso de un multímetro se verificó el nivel de voltaje presente en la salida del amplificador, que lleva la señal hasta cada uno de los paneles al mover el control de ganancia de los mismos, estos

niveles representan además el nivel de voltaje correspondiente a la impedancia nominal de cada panel multiactuador medido también con el multímetro, para lograr una descripción más completa del altavoz a utilizar o en este caso cada panel a usar, se incorpora la directividad del altavoz a partir de un pistón plano en pantalla infinita (Pueo y Roma, 2003) definido en la Ecuación 16:

$$p(S, \theta, r) = \left[\frac{\rho_0}{2\pi \cdot r} \cdot \frac{eg \cdot B\ell \cdot S_0}{R_{et} \cdot M_{ms}} \right] \cdot \left[\frac{2J_1(Ka \cdot \sin\theta)}{Ka \cdot \sin\theta} \right] \cdot \left[\frac{S^2}{S^2 + \frac{\omega_s}{Q_{ts}} \cdot S + \omega_s^2} \right] \cdot \left[\frac{\omega_0}{S + \omega_0} \right] \text{ Ecuacion 16}$$

Donde:

ρ_0 = Densidad del aire. $[kg/m^3]$

r = Presión sonora que se produce a una distancia. $[m]$

eg = Fuente de tensión. $[Voltios]$

$B\ell$ = Factor de fuerza. $[Newtons]$

S = Ese de laplace, respuesta en frecuencia compleja. $[S = j\omega]$

R_{et} = Resistencia eléctrica total. $[Ohm]$

M_{ms} = Masa mecánica total del altavoz. $[kg]$

J_1 = Función de bessel primer orden.

$Ka \cdot \sin\theta$ = Argumento de la función de bessel.

ω_s = Frecuencia de corte superior a la frecuencia de resonancia, donde no hay una atenuación de 3dB respecto a la banda de paso.

ω_0 = Frecuencia de resonancia filtro pasa banda

Q_{ts} = Coeficiente de sobretensión total del altavoz a la frecuencia de resonancia.

La presión del pistón plano en pantalla infinita tiene asociada en sus argumentos la respuesta en frecuencia compleja (S), el ángulo correspondiente a la función de Bessel (θ) y la presión sonora producida por el pistón plano a una distancia (r), la sección 2 marcada con color azul hace referencia a la directividad emitida por el pistón plano en pantalla infinita, dada por la sección marcada en color dorado indicando el corte de frecuencias pasa altos de segundo orden relacionado con la sección 4 marcada en color verde asociando la función de transferencia de un filtro pasa bajos, retomando asimismo la sección 1 donde se analiza la presión emitida en frecuencias medias en color rojo dada por los filtros ya mencionados (Pueo, B., Roma, M.2003 pp. 61-72).

Tomando así mismo la presión de la zona de media frecuencia, zona donde los filtros no tienen contribución tomando como referencia los siguientes valores para las variables mostradas: $r = 1$ metro, $\theta = 0^\circ$ y $P_e = 1$ *vatio* obteniendo la Ecuación 17.

$$P_e = \frac{eg^2}{R_{et}} \text{ Ecuación 17}$$

Tomando $eg = \sqrt{R_{et}}$ entonces se toma la Ecuación 17 con los nuevos valores.

$$\frac{\sqrt{R_{et}}}{R_{et}} = \frac{R_{et}^{1/2}}{R_{et}} = R_{et}^{1/2 - 1/2} = \frac{1}{R_{et}^{-1/2}} = \frac{1}{\sqrt{R_{et}}} \quad \text{Ecuación 18}$$

Y al reemplazar 18 en 16 tomando solamente el área de interés de la sección 1 de la frecuencia media se obtiene la Ecuación 19 que representa la sensibilidad dada a 1 vatio de potencia a una distancia de un metro.

$$S_{(1w,1m)} = \frac{\rho_0}{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{R_{et}} \cdot B\ell \cdot S_0}{R_{et} \cdot M_{ms}} = \frac{\rho_0}{2\pi} \cdot \frac{B\ell \cdot S_0}{\sqrt{R_{et}} \cdot M_{ms}} \quad \text{Ecuación 19}$$

Con base en la literatura se considera que la sensibilidad de un altavoz es el nivel de presión sonora a 1 vatio de potencia como se puede observar en la Figura 12.

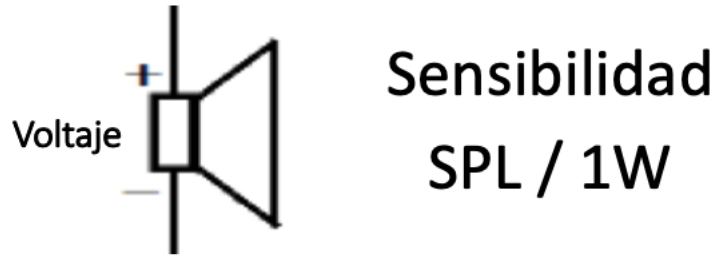


Figura 12. Relación del nivel de presión sonora (SPL) a un vatio de potencia.

Teniendo esta relación se puede demostrar que la impedancia nominal del altavoz (**Z**) es igual a la tensión como se muestra en la Ecuación 20.

$$P = \frac{\text{Voltaje}^2}{Z} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

P_e = Potencia eléctrica. [Watts]

S = Sensibilidad. [Watts/metros]

Z = Impedancia nominal del altavoz. Unidad de medición (Ohm's).

Ya que, alternativamente en lugar de hablar de 1 vatio de potencia eléctrica, puede darse la tensión en voltaje, pero dependerá de la impedancia nominal del altavoz a medir dada por la Ecuación 20, es decir de la carga (Ortega & Romero, 2003). Luego de tener todo el sistema configurado y calibrado y haber asegurado que los valores del amplificador fueran correctos tanto en voltaje como en nivel, el software, arrojaba en tiempo real el valor de dBSPL o sensibilidad generado por cada uno de los paneles.

4.2.3 Medición de Directividad.

Para la medición de directividad se realizó una circunferencia polar cada 10 grados (Fotografía 9), posicionada en el piso la cual fue utilizada como guía para medir el nivel de presión sonora, esto basado en la teoría que indica una de las formas más comunes de medir directividad "es mediante patrones polares que nos indican el ángulo de cobertura de un altavoz mostrando el perímetro el cual la presión sonora cae -6dB SPL" ⁸. Se verificó que el nivel generado por cada panel fuera el mismo medido a 1 metro de distancia, y se midió la directividad de cada panel multiactuador para las frecuencias de "250, 500, 1000, 2000 y 4000Hz para determinar el grado de cobertura para cada una de estas (bajas, medias y altas)" (Sound: Check, 2008).

⁸ Sound: Check (2008) Interacción acústica y su aplicación en arreglos de altavoces- parte II. Recuperado de: <https://soundcheck.com.mx/interaccin-acstica-y-su-aplicacin-en-arreglos-de-altavoces-parte-ii/>



Fotografía 9. Montaje para la medición de directividad (Circunferencia polar posicionada en el suelo).

4.3 Mediciones Subjetivas para la evaluación de percepción de espacialidad sonora 3D en los oyentes

Para evaluar el tercer objetivo del presente proyecto, se llevó a cabo el desarrollo de la evaluación de percepción de espacialidad sonora, para la cual se realizó y ejecutó un protocolo de aplicación del instrumento “*Encuesta Percepción Sonora 3D*” el cual se presenta a continuación:

4.3.1 Protocolo de aplicación del instrumento

Para realizar la correcta aplicación del instrumento mencionado anteriormente, se siguió cierto protocolo que involucró varios pasos para su ejecución. En primer lugar, fue importante contar con todos los elementos necesarios para realizar la prueba y de esta manera se cumplió con el segundo objetivo específico propuesto en el presente proyecto "Establecer el sistema de control para el panel multiactuador", los elementos utilizados fueron los siguientes: a) Cuatro paneles multiactuadores, los cuales contaban con cuatro diferentes nombres de identificación propuestos por los autores (*Eins, Deux, Harom & Vier*). b) Dos

bases para cada uno de los paneles. c) Cuatro bases de cabinas de audio. d) Amplificadores clase D. e) Interfaz de 4 salidas. f) Cables de TS. g) Cables RCA a 1/8. h) Computador con un DAW Reaper ejecutar el plugin y enviar la señal a los paneles. i) Extensiones de corriente.

La Figura 13 presentada a continuación, muestra el flujo de señal o sistema de control que se llevó a cabo para la aplicación del instrumento:

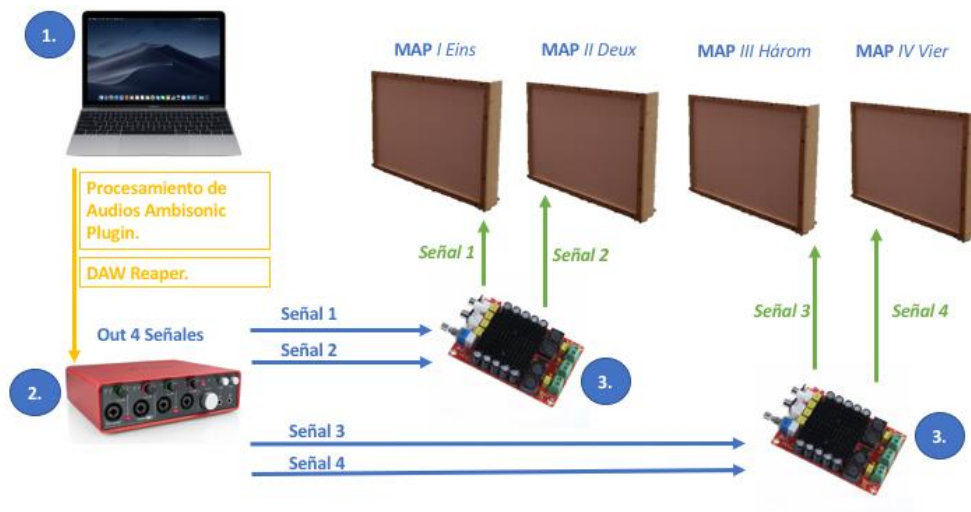


Figura 13. Flujo de conexionado del panel multiactuador con técnica de síntesis

Ambisonics.

En segundo lugar, luego de contar con el sistema de control funcionando en las condiciones correspondientes, la disposición o ubicación de los paneles dentro de la sala a utilizar fue el siguiente paso, la ubicación de estos, respondió a la teoría usada donde se dice que el conjunto de pequeños paneles multiactuadores posicionados uno al lado del otro y actuando en conjunto como un todo forman un panel multiactuador (Ortega,B. 2008), además, al ser posicionados de esta manera, también se evitaba la comparación con los típicos sistemas de reproducción surround como 5.1. La sala donde se realizó la aplicación del

instrumento era acústicamente tratada (sección de grabación de alguno de los estudios de la Universidad de San Buenaventura Bogotá o el salón de sonido en vivo dentro de la misma) esto, con el fin de lograr la caracterización y reproducción del sistema.



Fotografía 10. Paneles ubicados dentro de la sala.

Al tener los paneles ubicados como se evidencia en la Fotografía 10 y habiendo hecho la calibración del sistema, se adecuó la sala poniendo elementos para que el participante desarrollase la prueba, estos elementos fueron: a) Escritorio (mesa y silla) ubicados en la mitad de la sala rodeado de los paneles, b) Computador para diligenciar la prueba de forma electrónica, y la ficha de conceptos guía dentro de una ventana anexa a la prueba electrónica.

Al tener el espacio preparado, se recibió al participante y se le hizo una pequeña presentación sobre el proceso en el cual estaría inmerso y se realizó de forma verbal el consentimiento informado para así iniciar la aplicación del instrumento, la cual contó con los siguientes tiempos de desarrollo descritos en la Tabla 4.

Tabla 4. Proceso de desarrollo de las pruebas subjetivas.

Actividad	Tiempo de realización
Bienvenida, contextualización e instrucciones del instrumento.	2 minutos.
Lectura por parte del participante de las instrucciones de la fase 1.	1 minuto.
Preguntas.	30 segundos.
Inicio fase 1	
Escucha Audio 1 (2 veces).	1 minuto.
Respuestas al Audio 1 escuchado.	1 minuto, 30 segundos.
Escucha Audio 2 (2 veces).	1 minuto.
Repuestas al Audio 2 escuchado.	1 minuto, 30 segundos.
Escucha Audio 3 (2 veces).	1 minuto.
Respuestas al Audio 3 escuchado.	1 minuto, 30 segundos.
Respuesta Final Fase 1.	30 segundos.
Final fase 1	
Lectura por parte del participante de las instrucciones de la fase 2.	1 minuto.
Preguntas.	30 segundos.
Inicio fase 2	
Escucha Audio 1.	30 segundos.
Respuesta Audio 1.	30 segundos.
Escucha Audio 2.	30 segundos.
Respuesta Audio 2.	30 segundos.
Escucha Audio 3.	30 segundos.
Respuesta Audio 3.	30 segundos.
Tiempo total.	16 minutos.
Final de la prueba	

Para la realización de las pruebas se tuvo una fase previa de creación de cuatro audios que son parte de los componentes necesarios para la aplicación del instrumento, cuyo fin fue evaluar la percepción de especialidad sonora 3D en los oyentes, producida por el panel mutiactuador lo que responde al tercer objetivo del proyecto, estos audios se crearon con ayuda de los audios proporcionados por el proyecto online *Freesound* y *Omnitone*.

Para la construcción de los audios se tuvo en cuenta la lateralidad de la percepción auditiva de los seres humanos con el fin de lograr un alto grado de espacialidad, además de la necesidad de preservar la naturalidad de lo escuchado por el oyente, para esto se

contemplaron e implementaron los signos y símbolos auditivos (Asociación de lo escuchado con cosas o lugares con las que el ser humano interactúa en la vida diaria). Otro punto importante para la construcción de los mismos fue el enfoque hacia los espacios de aplicación a los cuales se quiere llegar con los paneles y donde se busca sean ubicados, como lo son los teatros en casa y demás sistemas de sonido caseros por eso se construyen audios utilizando diferentes géneros de audiovisuales.

Adicionalmente se tuvo en cuenta la Rec. ITU-R BS.1284-2, la cual establecía los métodos generales para la evaluación subjetiva de la calidad de sonido resaltando en ella el tiempo general de la aplicación el cual debía ser entre 15 a 20 minutos y el tiempo de cada uno de los audios entre 15 a 20 segundos por consideraciones de la memoria humana.

Es así como todos los audios pasaron por un proceso base donde: **a)** se definió el género de película el cual se quiere representar, **b)** se determinó la situación y se define un audio de fondo, **c)** se buscaron tres o cuatro audios que respondían a los elementos que se incorporaron al audio, **d)** se realizó la mezcla de los mismos contemplando el tiempo de duración y **e)** se probaron y adecuaron según lo requerido. Esto se desglosa para cada audio en el orden de presentación en la prueba en las siguientes tablas (**Tabla 5, 6, 7 y 8**).

Tabla 5. Género, duración, descripción e implementación del audio No. 1.

Audio 1	
Género	Duración
Documental	20 segundos
Descripción del audio	
El audio del documental era una representación de una playa en la cual se encontraban varios niños, se escuchan las olas del mar, un buque al fondo de la mezcla en movimiento y gaviotas.	
Imagen	

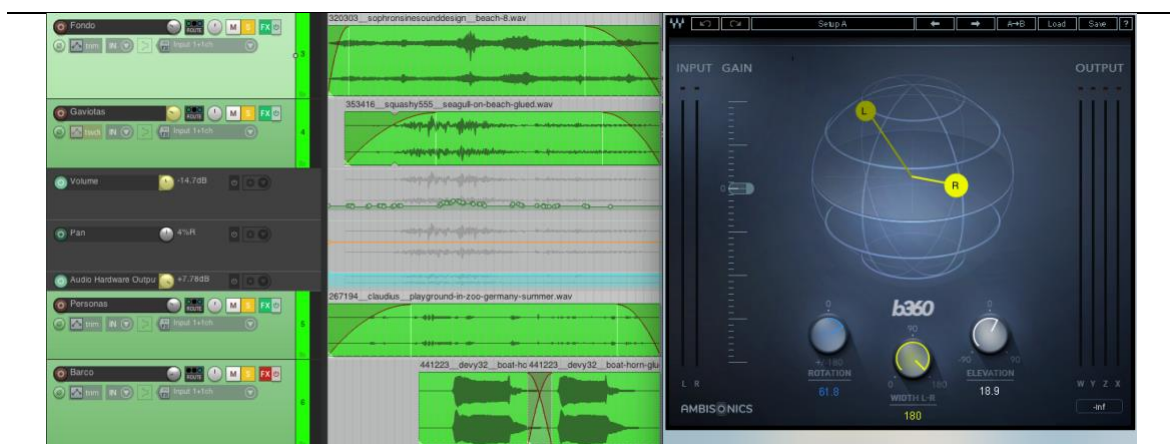


Figura 14. Audio 1 implementado en software *Reaper*.

Como se puede observar en la Figura 14, la creación del audio se realizó por capas, cada canal que se muestra en esta corresponde a un sonido significativo al espacio sonoro que se quería recrear (Gaviotas, agua, buque y personas), además se hicieron automatizaciones y fades para lograr una mejor mezcla. Cada canal, en el botón FX (efecto) tenía insertado el plugin de Ambisonics usado el cual, a través de los parámetros modificables con los que contaba (Rotation, Width L-R y Elevation) posicionaba cada uno de los sonidos en el lugar deseado del espacio.

Tabla 6. Género, duración, descripción e implementación del audio No. 2.

Audio 2	
Género	Duración
Aventura	20 segundos
Descripción del audio	
El género de aventura enfocaba la mezcla a la creación de un ambiente de un Aeropuerto, en él se podían escuchar, un avión en todo el sweet spot, una maleta pasando por detrás del oyente y un ruido de fondo el cual era el de un auxiliar de vuelo.	
Imagen	

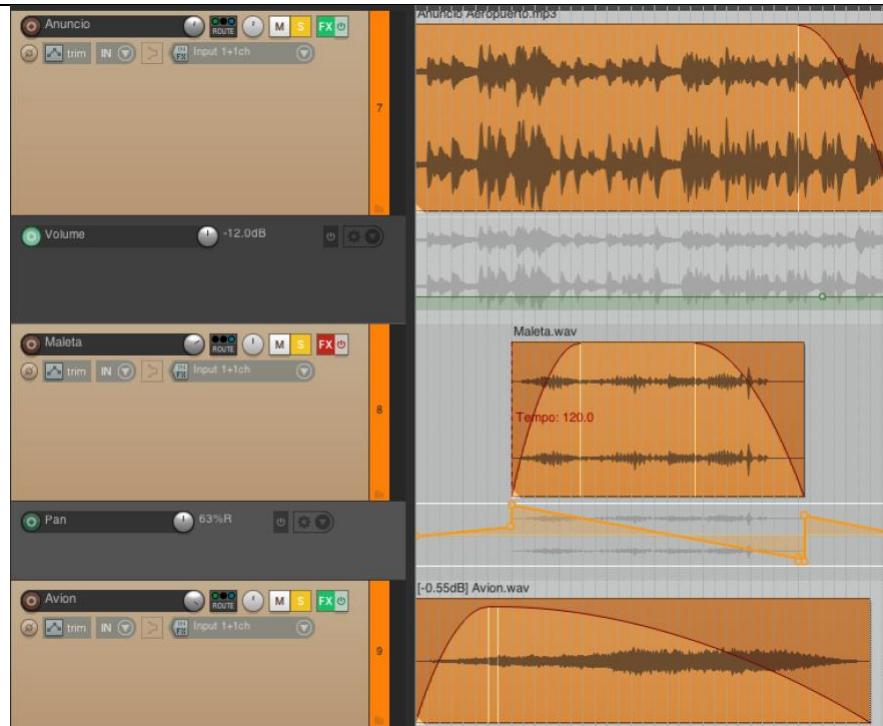


Figura 15. Audio 2 implementado en software *Reaper*.

Al igual que en la creación del anterior audio, se hizo uso de diferentes canales los cuales representaban las capas del espacio sonoro buscado como se puede observar en la Figura 15, en este caso un aeropuerto que contaba como elementos principales con el anuncio de un vuelo a través de un sistema de sonido, una maleta con rodachines y un avión despegando. Cada canal contaba con el mismo plugin Ambisonics en el botón FX y se realizaron paneos, automatizaciones y fades para lograr una mayor naturalidad al momento de crear la mezcla.

Tabla 7. Género, duración, descripción e implementación del audio No. 3.

Audio 3	
Género	Duración
Acción	20 segundos
Descripción del audio	

El siguiente audio recreaba una manifestación, en él se podían escuchar disparos en diferentes puntos del espacio, un pito al cual es un factor fundamental en la manifestación, una ambulancia y por último una bomba.

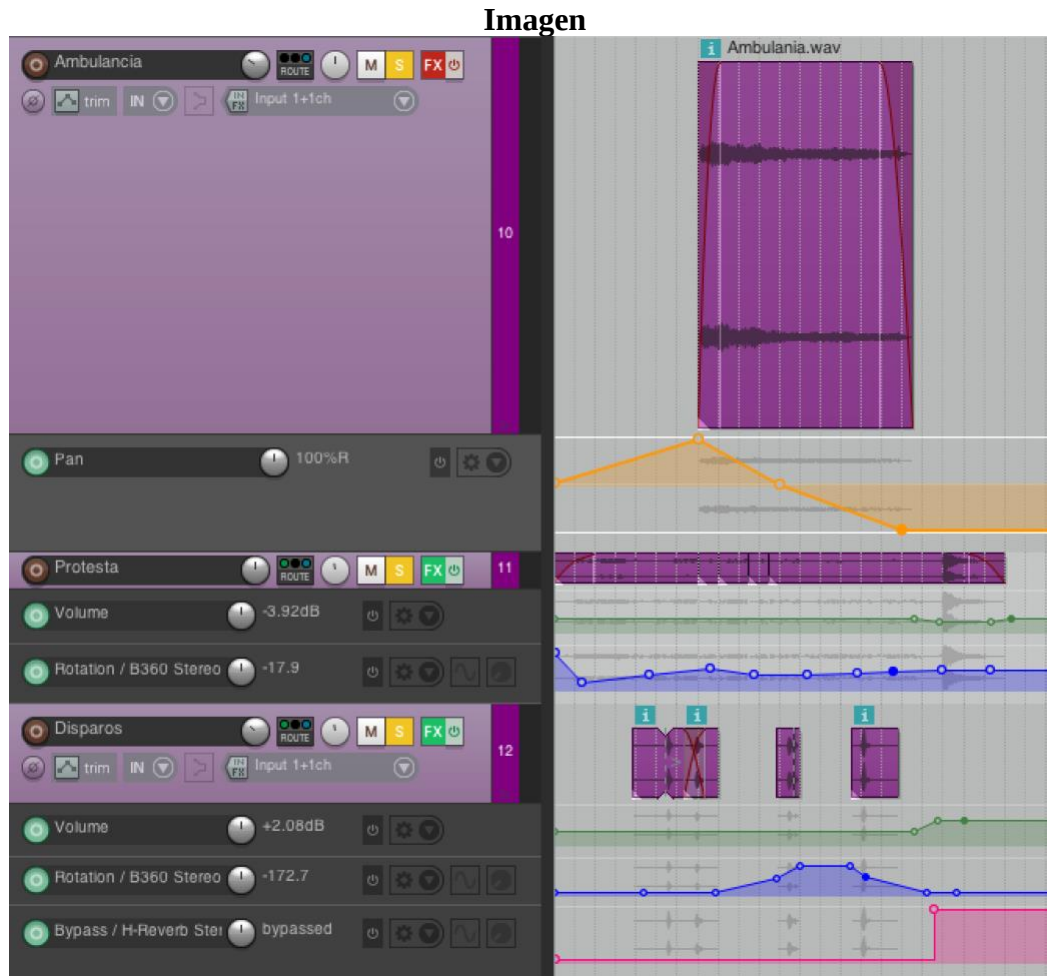


Figura 16. Audio 3 implementado en software *Reaper*

En la Figura 16, se puede observar más detalladamente la manera en la que se realizaba la automatización de los parámetros modificables del Plugin de Ambisonics, en donde, por ejemplo, se le asignaba un valor diferente al botón de Rotación a medida que avanzaba el audio, esto para darle un mayor realismo a la mezcla y crear la sensación de movimiento a medida que se reproducía. Al igual que en los anteriores audios se realizaron paneos y

desvanecimientos de amplitud (*fades*) por cada uno de los canales. En este audio se quería recrear un ambiente de protesta, con gritos, disparos, estallidos y una ambulancia la cual brindaba el aspecto de profundidad.

Tabla 8. Género, duración, descripción e implementación de los audios de la fase No. 2.

Audio 4	
Género	Duración
Terror	23 segundos
Descripción del audio	
El audio recreaba una casa embrujada con un grito como elemento discriminante en un ambiente donde se escuchaban pasos en toda la atmosfera sonora, lluvia de fondo, respiraciones y una niña cantando.	

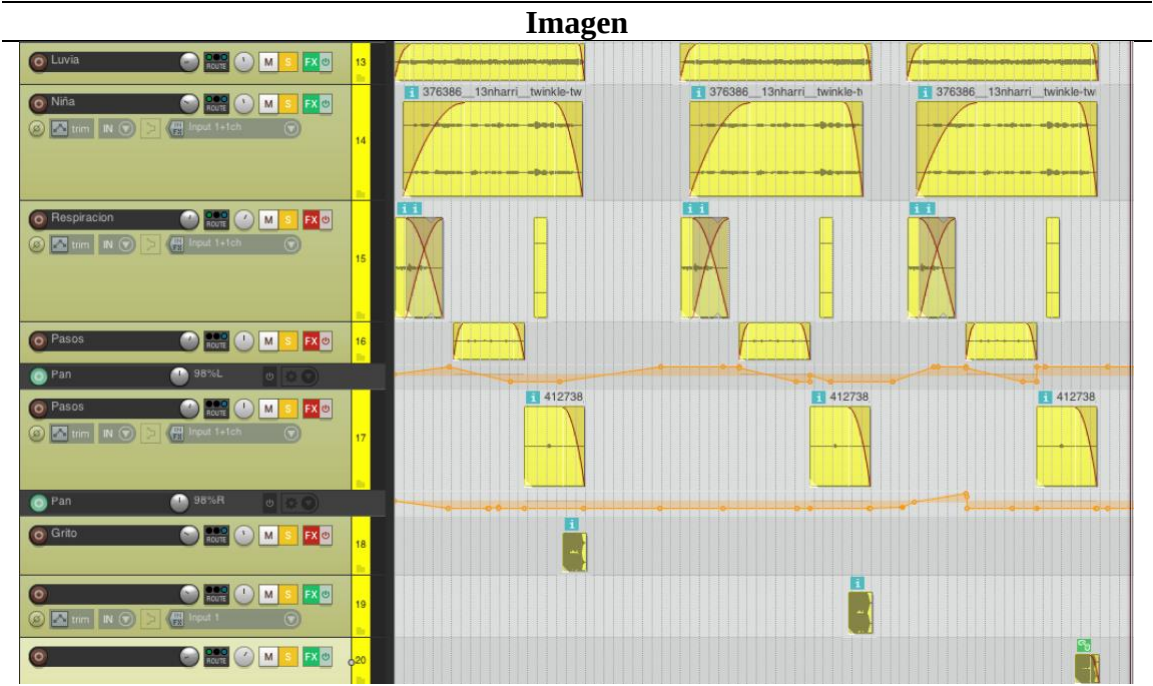


Figura 17. Audios de la fase No. 2 implementados en software *Reaper*

En la Figura 17 se muestra el desarrollo de los audios de la fase No.2, en este caso, todas las capas a excepción del grito se dejaron iguales en cada una de las 3 repeticiones, todos los canales contaban con el inserto del plugin, pero el grito variaba su ubicación por cada reproducción jugando con los parámetros modificables del mismo para así lograr la ubicación deseada.

Capítulo V: Pruebas y resultados

5.1 Realización de pruebas

Las pruebas realizadas en el espacio determinado y aplicando el instrumento se desarrollaron del 21 de julio del 2019 al 5 de agosto del 2019, participando así 37 personas entre profesores y estudiantes como se muestra en la Tabla 9, donde se representan variables demográficas como la distribución de genero, ocupación y semestres. De acuerdo con esta distribución se puede observar la participación de todos los agentes necesarios para la muestra, resaltando la minoría en el genero femenino.

Tabla 9. Distribución de la muestra por variables demográficas.

Género	Ocupación	Semestre			Total	Sub Total	Tamaño de la muestra
		Octavo	Noveno	Decimo			
Masculino	Estudiantes	4	8	16	28	30	37
	Profesores				2		
Femenino	Estudiantes	1	2	2	5	7	
	Profesores				2		

5.2 Análisis de los Resultados

Dada la metodología de investigación de este estudio (mixto), el análisis de resultados se realizó desde dos perceptivas una cuantitativa donde se analizaron las variables numéricas extraídos de las pruebas subjetivas y la otra cualitativa donde se tomaron las posturas descriptivas de los participantes, esto para las dos fases de la prueba.

5.2.1 Análisis cuantitativo (Estadístico).

Para la realización del análisis estadístico se usó el software *SPSS Statistics 25*, para correr los datos subjetivos obtenidos, donde se realizaron revisiones descriptivas de la distribución de la muestra según la frecuencia de calificación en la escala de 1 a 10, donde el rango bajo estaba dado por los valores entre 1 y 3, el rango medio entre 4 y 7 y el rango alto

entre 8 y 10, para los seis factores (naturalidad, profundidad, presencia, localización, claridad, percepción de altura) que representaban la espacialidad para cada audio como se puede observar en la Tabla 10, 11 y 12. Adicionalmente se extrajeron los valores de media, mediana, desviación estándar, valor mínimo y valor máximo, como se puede observar en la Tabla 13, 14 y 15, para describir la distribución de los datos en cada uno de los audios, además se hicieron comparaciones entre la percepción de los audios por medio de análisis ANOVA, Tabla 17.

Tabla 10. Frecuencia de calificación para el audio uno de la fase No. 1.

Tabla de frecuencias audio 1. Fase 1							
	Rango	Naturalidad	Profundidad	Presencia	Localización	Claridad	Percepción de Altura
Bajo	1 - 3	0	0	0	0	0	2
Medio	4 - 7	18	12	10	5	11	22
Alto	8 - 10	19	25	27	32	26	13
Total		37	37	37	37	37	37

La calificación subjetiva del audio No. 1 mostrada en la Tabla 10 según las variables propuestas daba a conocer que toda la muestra otorgaba calificaciones medias y altas con un porcentaje de 95% correspondiente a 35 votos, dándole una relevancia a la calificación alta en todas las variables, teniendo un punto de diferencia en el parámetro de percepción de altura en donde prevalecía la calificación media con un porcentaje de 59,3 % o 22 votos y aparecía el rango bajo con un porcentaje de 5,4% o 2 votos, evidenciando resultados desfavorables en el ítem ya mencionado.

Tabla 11. Frecuencia de calificación para el audio No. 2 de la fase No. 1.

Tabla de frecuencias audio 2. Fase 1							
	Rango	Naturalidad	Profundidad	Presencia	Localización	Claridad	Percepción de Altura
Bajo	1 - 3	0	0	0	0	0	1
Medio	4 - 7	9	6	7	5	10	17
Alto	8 - 10	28	31	30	32	27	19
Total		37	37	37	37	37	37

En las calificaciones del audio 2 que se presenta en la Tabla 11 se evidenció una favorabilidad en el ítem de localización teniendo un 86,4 % o 32 votos de la muestra en el rango alto, generando un promedio en el rango alto de todos los parámetros de 75,15 %, destacando que la percepción de altura contaba con un 51,3%, evidenciando una vez mas que era el parámetro con menos votos para el rango alto de todos los parámetros que constituyen la prueba.

Tabla 12. Frecuencia de calificación para el audio No. 3 de la fase No. 1.

Tabla de frecuencias audio 3. Fase 1							
	Rango	Naturalidad	Profundidad	Presencia	Localización	Claridad	Percepción de Altura
Bajo	1 --> 3	0	0	0	0	0	0
Medio	4 --> 7	16	12	9	9	14	21
Alto	8 --> 10	21	25	28	28	23	16
Total		37	37	37	37	37	37

Se evidencia en la Tabla 12 del audio No. 3, la nula calificación en el rango bajo de todas las variables de calificación de espacialidad, destacando la percepción alta de las 5 primeras variables todas sobre el 50% o 18,5 o más votos, descartando la percepción de altura debido a su porcentaje en el rango medio de 56,7 % o 21 votos, creando así una tendencia en los tres audios como punto crítico en la prueba, lo cual se contrastaba con los análisis de las Tablas de distribución 13,14 y 15.

Tabla 13. Medidas de distribución del audio uno de la fase uno.

Medidas de distribución audio No. 1, fase No. 1						
	Naturalidad	Profundidad	Presencia	Localización	Claridad	Percepción de Altura
Media	7,43	7,95	8,03	8,68	8,05	6,46
Mediana	8,00	8,00	8,00	9,00	8,00	6,00
Moda	8,00	8,00	8,00	10,0	9,00	6,00
Desviación estándar	1,44	1,49	1,59	1,39	1,41	1,93
Valor Mínimo	4,00	4,00	4,00	4,00	5,00	1,00
Valor Máximo	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	9,0

En las medidas de distribución del audio 1 mostradas en la Tabla 13, se perciben factores de favorabilidad en los valores máximo con un valor promedio de 9.83, y un valor mínimo promedio de 3.6, creando una moda promedio en todos los parámetros de 8.1, como valor más repetitivo de la encuesta, obteniendo una media más baja en la variable de percepción de altura de 6,46 y un valor máximo de media de 8,58 en la variable de localización.

Tabla 14. Medidas de distribución del audio No. 2 de la fase No. 1.

Medidas de distribución audio 2. Fase 1						
	Naturalidad	Profundidad	Presencia	Localización	Claridad	Percepción de Altura
Media	8,38	8,54	8,59	8,92	8,32	7,27
Mediana	9,00	9,00	9,00	9,0	9,0	8,00
Moda	9,00	8,00	9,00	9,0	9,0	6,00
Desviación estándar	1,40	1,16	1,23	1,11	1,27	1,88
Valor Mínimo	5,00	5,00	6,00	6,0	6,0	3,00
Valor Máximo	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0

En la Tabla 14 se evidencia que las desviaciones estándar de cada una de las variables se encontraban cercanas con un promedio de 0,154 entre valores, generando una fiabilidad a los datos arrojados en la encuesta, debido a que no se contaba con datos atípicos y que no estaban tan alejados de la media, el valor máximo de la desviación estándar está en la variable de percepción de altura con 1,88 y el valor mínimo corresponde a la localización con 1,11 así mismo teniendo el valor máximo de la media que es de 8,92.

Tabla 15. Medidas de distribución del audio tres de la fase uno.

Medidas de distribución audio 3. Fase 1						
	Naturalidad	Profundidad	Presencia	Localización	Claridad	Percepción de Altura
Media	7,51	7,92	8,14	8,38	7,92	7,14
Mediana	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	7,00
Moda	8,00	8,00	8,00	9,00	8,00	7,00
Desviación estándar	1,64	1,42	1,15	1,16	1,46	1,96
Valor Mínimo	4,00	4,00	5,00	6,00	5,0	4,00
Valor Máximo	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0

En las **Tablas 13, 14 y 15** expuestas anteriormente en las cuales se presentan las medidas de distribución de los 3 audios ya mencionados se puede observar que los datos más alejados del promedio de las variables (media, mediana, moda, desviación estándar y valor mínimo), se encontraban en el parámetro de percepción de altura, esto debido a que los paneles multiactuadores tendían a tener menor cobertura en estos ángulos, lo cual se puede demostrar mediante los resultados hallados al momento de las mediciones objetivos, más

específicamente en las mediciones de directividad y los resultados subjetivos encontrados en la encuesta realizada.

Con la intención de crear un análisis más robusto de la información obtenida y de la viabilidad para la percepción de espacialidad sonora en las tres dimensiones, se realizó el procedimiento para ejecutar una ANOVA (Analysis of Variances) por lo que se ejecutó una prueba de normalidad, teniendo en cuenta que el número de participantes era menor a 50 se acogieron los valores obtenidos por el estadístico Shapiro-Wilk el cual presenta significancias mayores a 0,05 (Romero-Saldaña, 2016) teniendo así todas las variables normalizadas como se presenta en la Tabla 16.

Tabla 16. Análisis estadístico de Shapiro-Wilk para la normalidad de los audios.

Shapiro-Wilk			
	Estadístico	Grados de Libertad	Significancia
Total Audio 1	0,975	37	0,546
Total Audio 2	0,953	37	0,123
Total Audio 3	0,981	37	0,758

Tabla 17. Análisis estadístico de ANOVA entre los audios presentados a los oyentes en la fase uno.

Anova		
	F	Significancia
Total Audio 1	0,896	0,542
Total Audio 2	0,289	0,874
Total Audio 3	1,761	0,273

El siguiente paso dentro del análisis cuantitativo realizado condujo al análisis de la tabla de ANOVA (Tabla 17) entre los audios expuestos, en esta se puede observar el estadístico F (Valor del ANOVA para cada audio) con su nivel de significancia. La teoría estadística dice

que en caso de que el nivel de significancia (sig.) intraclase sea menor o igual que 0,05, se rechaza la hipótesis de igualdad de medias, si es mayor – se acepta la igualdad de medias, es decir, no existen diferencias significativas entre los grupos Lizasoain y Joaristi (2003), para el presente caso, se observa que los valores de ANOVA y su nivel de significancia relaciona muy bien los audios expuestos a los oyentes y los diferentes ambientes presentes dentro de los mismos; ninguno de los valores de significancia se encontraba por debajo de 0,05 lo que demuestra, además, sustentando en los análisis presentados anteriormente para los parámetros subjetivos, que la espacialidad sonora 3D percibida por los oyentes fue estándar para cada uno de los audios, esto representa en resumen cualidades bien logradas para un ambiente sonoro tridimensional en cada uno de ellos pero nuevamente destacando al Audio 2, con un nivel de significancia mayor respecto a los otros audios presentados.

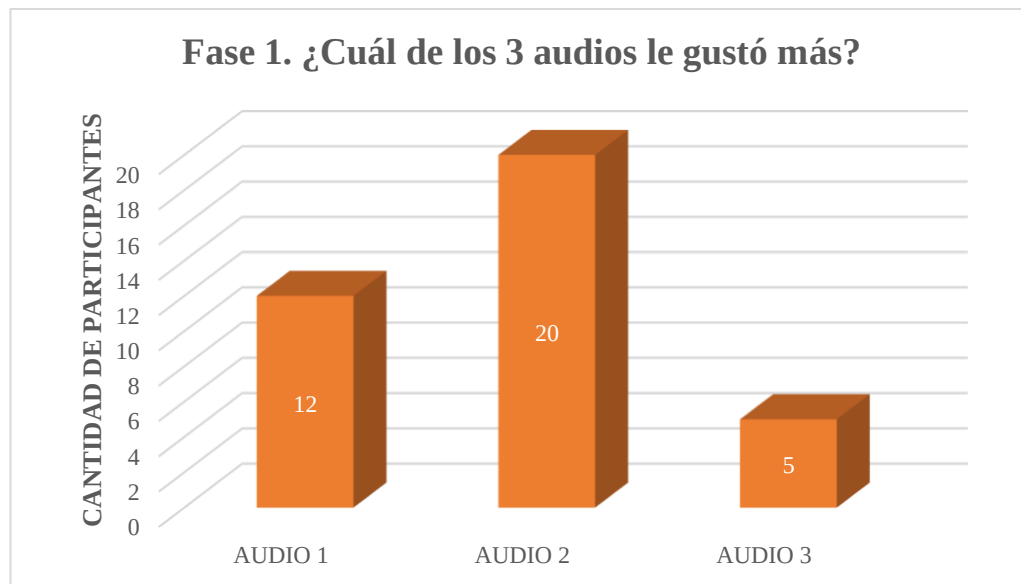


Figura 18. Diagrama de barras ilustrativo sobre la cantidad de participantes encuestados enfocado a la favorabilidad a cada audio.

Como se puede observar en la Figura 18, a pesar de que se puntuó al menos una vez cada uno de los audios presentados a los oyentes en la Fase No. 1, el audio que tuvo mayor predominancia fue el audio No. 2 con 20 votos; el audio que obtuvo el menor número de valoraciones fue el audio No. 3 con 5 votos. Esto se puede relacionar además con el análisis presentando anteriormente donde se observó que la calificación de los parámetros subjetivos del Audio No. 2 fue el que obtuvo mejores calificaciones.

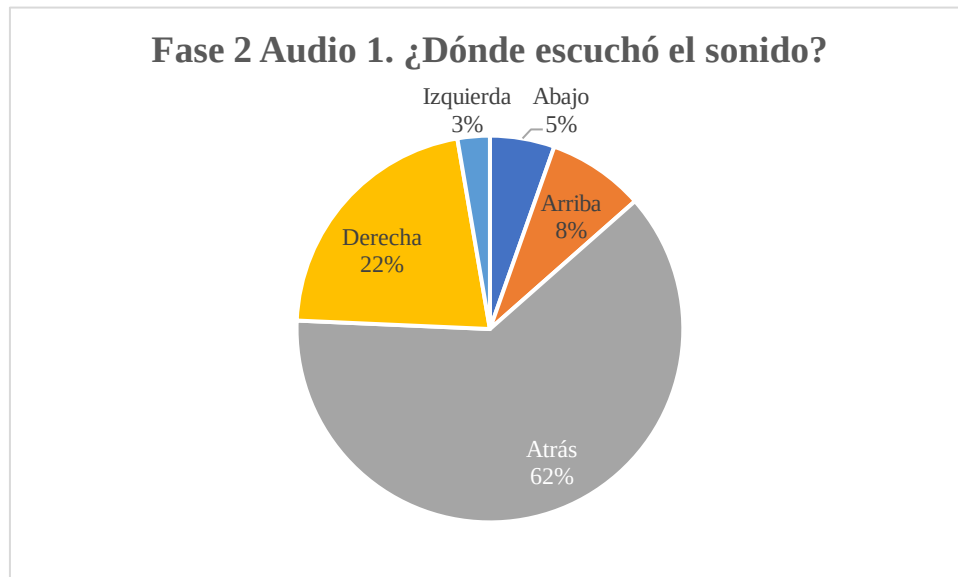


Figura 19. Gráfico circular 2d porcentual de las respuestas las cuales los participantes de la encuesta asignaron en la fase 2 del audio 1.

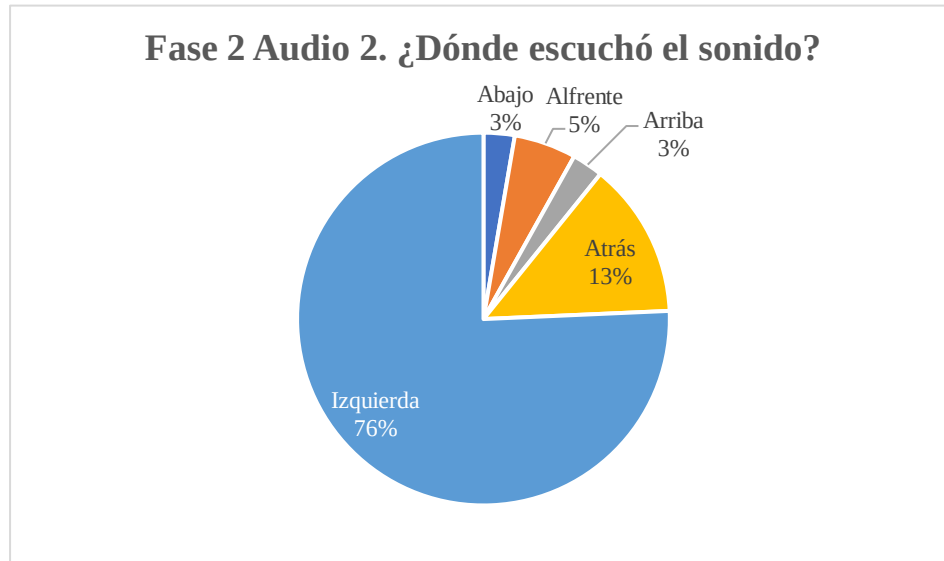


Figura 20. Gráfico circular 2d porcentual de las respuestas las cuales los participantes de la encuesta asignaron en la fase 2 del audio 2.

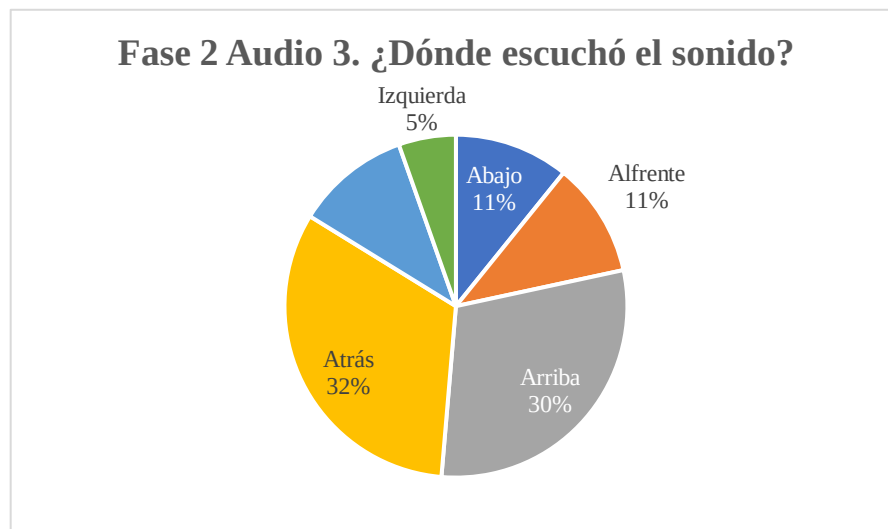


Figura 21. Gráfico circular 2d porcentual de las respuestas las cuales los participantes de la encuesta asignaron en la fase 2 del audio 3.

Las Figuras 19, 20 y 21 presentadas anteriormente, representan en un gráfico circular las respuestas obtenidas por los oyentes para la fase dos de la encuesta subjetiva del presente

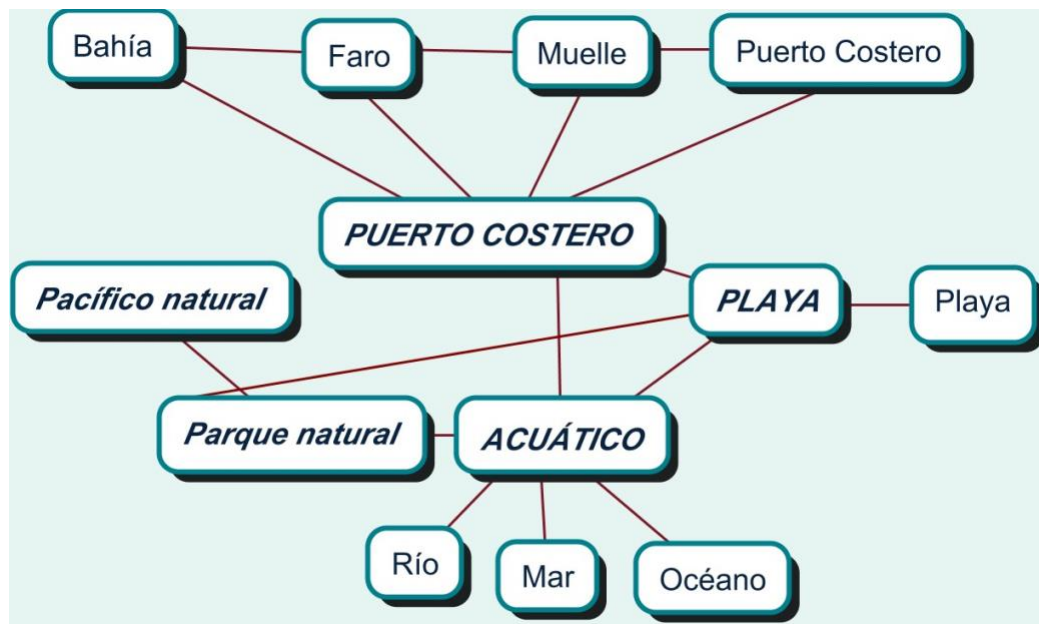
proyecto dándole cumplimiento al objetivo tres identificando la capacidad del panel multiactuador para posicionar un estímulo auditivo con un sonido excluyente en los diferentes ejes del espacio (X, Y y Z), creado por una mezcla de la autoría de los investigadores ya establecida en el proceso de creación del instrumento. Se pudo destacar la buena percepción de los oyentes a la hora de localizar el sonido excluyente en la prueba (el grito), teniendo un 62 % de acierto en el audio 1. En el audio 2 se observó la calificación más alta de la fase 2 con un 72% de aciertos localizando el audio en el sector izquierdo del espacio y por ultimo analizando la percepción de altura proporcionada por los paneles Multi-actuadores se generó una dispersión de la población a la hora de calificar la localización del sonido excluyente, dando un 30 % en la respuesta correcta(arriba), confirmando la relación coherente de la variable de percepción de altura en el eje Z del espacio en la fase 1 con la fase 2.

5.2.2 Análisis cualitativo

Para el análisis cualitativo se tomaron en cuenta las respuestas abiertas de la fase 1 expuesta a los oyentes la cual denotaba las posturas que tenían hacia las características y elementos presentes dentro de los audios expuestos. Para esto, se sintetizó la información para su análisis en matrices conceptuales las cuales muestran la frecuencia de aparición de los conceptos en las respuestas de los oyentes (Morales, 2012) y también se hizo uso de redes semánticas con las que se articulan de manera visual estos conceptos para obtener un significado por cada audio según lo percibido por los oyentes participantes (Vargas-Garduño, Méndez & Vargas, 2014).

Tabla 18. Matriz de los ambientes del audio No. 1.

AMBIENTES AUDIO No. 1		
Categoría.	Palabras.	Frecuencia.
Puerto costero	Bahía- Faro-Muelle-Puerto costero	23
Playa	Playa	22
Acuático	Mar-Océano-Río	15
Parque natural	Parque natural	1
Pacífico natural	Pacífico natural	1


Figura 22. Red semántica ambiente Audio 1. Creado en software *CmapTools*.

Para el análisis cualitativo del audio, se definió en primer lugar el enfoque que se le quiso dar al mismo a la hora de su creación para después, enfocado en esto, determinar la frecuencia de repetición en palabras claves para categorizar el ambiente que da a conocer el audio. El ambiente pensado al momento de la producción de los audios fue una Playa, la cual contenía personas jugando, el graznido de las gaviotas, el ruido de las olas (Muy presente) y

por último un factor de profundidad que era un buque. Al analizar las respuestas abiertas a la pregunta "**¿Qué ambiente se desarrolla en el ambiente presentado?**" de los participantes en Fase 1 las cuales se presentan en la Tabla 18, se identificaron cuatro palabras claves ("Bahía", "faro", "muelle", "puerto costero") con una frecuencia de 23 repeticiones y la palabra "Playa" con 22 repeticiones, lo cual denotó un acierto del oyente en la sensación de inmersión en el ambiente que se pretendió recrear al momento de realizar la prueba. Categorías como "Acuático", "Parque natural" y "Pacífico natural" brindan el complemento necesario para corroborar que todos los oyentes tuvieron la sensación de estar inmersos en una Playa, esto además se puede comprobar a través de los datos arrojados en la Tabla 10 del análisis cuantitativo donde se puede observar que los parámetros de localización y claridad son los mejor puntuados.

La red semántica presentada en la Figura 19, nos mostraba de manera gráfica la manera en la que las palabras principales lograban recrear el ambiente deseado por parte de los oyentes en el momento de sus respuestas, se puede observar que en el centro de la red semántica se encuentran las palabras principales que cuentan con una mayor frecuencia de repetición y que recrean fielmente el Ambiente de playa y en su contorno las palabras que complementan la red principal sin contar con datos atípicos que no tengan relación con las categorías con mayor frecuencia de repetición.

Tabla 19. Matriz de los elementos del audio No. 1.

ELEMENTOS AUDIO 1				
Categoría	Palabras	Frecuencia	Frecuencia factor mas llamativo	Frecuencia factor menos llamativo
Buque	Barco-Buque-Crucero-Balsas-Bocina-Pito Vehículo-Claxon del un barco	33	11	3

Personas	Niños-Risas-Personas	24	1	6
Animales	Gaviotas-Pájaros-Animales	29	7	5
Agua	Agua-Mar-Olas-Caída de agua	30	7	12
Viento	Viento-Aire-brisa	6		3
Arboles	Arboles-palmeras	1	0	0
Paisaje sonoro		0	1	0

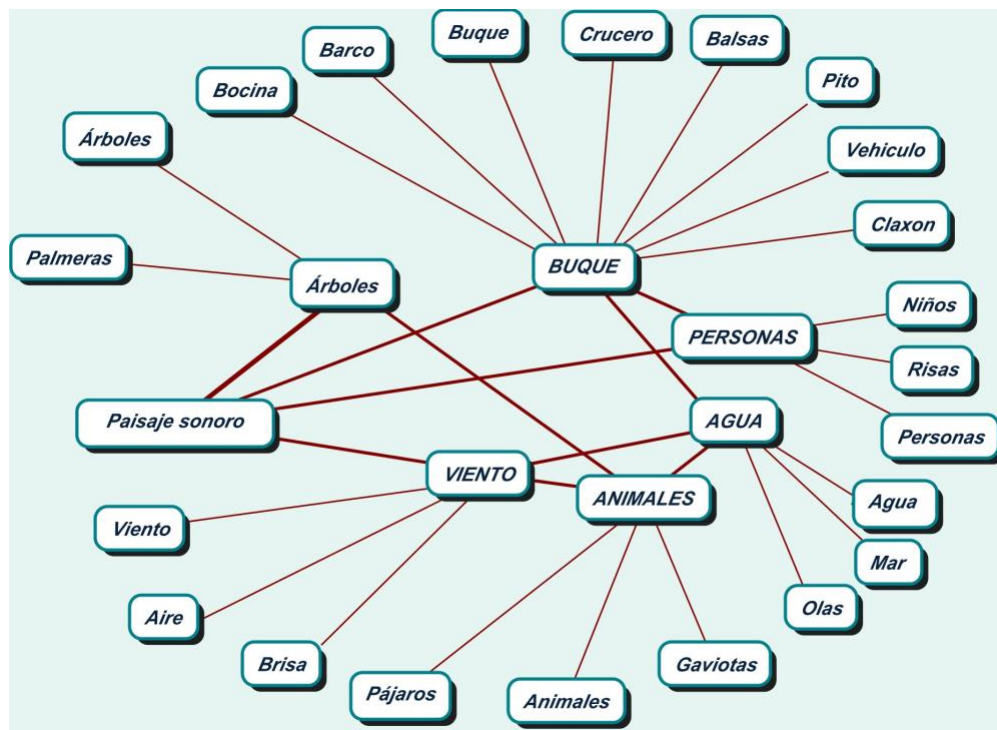


Figura 23. Red semántica elementos Audio 1. Creado en CmapTools.

Respondiendo a las preguntas "**¿Qué elementos identificó en el audio?**", "**¿Cuál elemento llamo más su atención? ¿Por qué?**" y "**¿Cuál elemento llamo menos su atención? ¿Por qué?**" se creó la matriz presentada en la Tabla 19, la cual se decidió dividir en 7 categorías halladas para las cuales se asociaron ciertas palabras que cuentan con una relación estrecha a estas; cada una de ellas estaba ligada además a una frecuencia de repetición y sus correspondientes factores de preferencia positiva o negativa hacia el mismo elemento, teniendo en cuenta que existieron respuestas neutrales (Favoritismo nulo hacía alguno de los elementos identificados).

La categoría con más repeticiones fue la palabra Buque y sus sinónimos con un total de 33 repeticiones, obteniendo el valor de favoritismo más alto respecto a las demás categorías con 11 votaciones favorables, analizando las demás categorías se pudo observar que los oyentes identificaron plenamente cada uno de los elementos que se implementaron en los 4 canales de la producción del audio realizado mencionados en la Figura 14 y que se constata también en la red semántica presentada en la Figura 23, además se encontraron 3 categorías más las cuales no estaban contempladas en la producción de los audios pero responden al Ambiente creado (Viento, árboles, paisaje sonoro). En el **Anexo C** se presenta la matriz que responde al ¿Por qué? de las preguntas mostradas anteriormente para preferencia positiva o negativa?

Tabla 20. Matriz de los elementos y ambientes del audio dos.

ELEMENTOS AUDIO 2				
Categoría	Palabras	Frecuencias	Frecuencia factor mas llamativo	Frecuencia factor menos llamativo
Aeropuerto	Aeropuerto	36		
Maleta	Maleta-Ruedas- Rodachines- Equipaje-Carro maletero- Maquina de	26	14	5

	transporte de carga movimiento			
Parlantes de locución	Voz-Llamado- Locución Parlantes- Llamada de vuelo-Altavoz- Sistema PA- Anuncio- Sistema de audio	37	16	13
Personas	Caminadas- Pasos- Pasajeros- Transeúntes	17	1	
Avión	Aviones- Movimiento	22	3	9
Puerta	Puerta	1		
Tren	Carriles del tren	1		



Figura 24. Red semántica Audio 2. Creado en CmapsTools.

Para el análisis del audio 2, se decidió crear una sola matriz presentada en la Tabla 20 y una sola red semántica mostrada en la Figura 24 que asociaba el ambiente que se presentaba en el audio respecto a los elementos presentes en el mismo, esto debido a que la totalidad de las personas lograron identificar plenamente que el audio presentado transcurría en un aeropuerto lo cual se puede comprobar a través del análisis estadístico de ANOVA donde el audio 2 cuenta con un mayor valor de significancia (0,874) respecto a los otros dos audios, para este caso, se establecieron 6 categorías de elementos, teniendo en cuenta que la principal y más importante presentada es "Aeropuerto" que hace referencia al ambiente con un total de 36 repeticiones. Una vez más, a través de las categorías halladas, se pudo observar que los oyentes, debido al alto grado de inmersión presente en el audio (sustentado en las calificaciones obtenidas cuantitativamente para los parámetros subjetivos de la sección 5.2.1, Tabla 11) lograron identificar cada uno de los elementos que se posicionaron en la mezcla del audio al momento de la producción, pero es importante resaltar que debido a las características de la muestra a la cual fue aplicada la prueba, el elemento que más se logró identificar y además el que más llamo la atención fue el de "parlantes de locución", obteniendo además los valores más altos en cuanto a favoritismo positivo (16) y negativo (13).

Tabla 21. Matriz de los ambientes del audio tres.

AMBIENTES AUDIO 3		
Categoría	Palabras	Frecuencia
Protesta	Protesta-Manifestaciones	31
Entrenamiento militar	Campo de entrenamiento militar	1
Carretera	Espacio abierto-Carretera	1

Combate	Ambiente de combate	2
Mezquita	Ciudad o mezquita	1



Figura 25. Red semántica ambiente Audio 3. Creado en CmapsTools.

Tabla 22. Matriz de los elementos del audio No. 3.

ELEMENTOS AUDIO 3				
Categoría	Palabras	Frecuencias	Frecuencia factor mas llamativo	Frecuencia factor menos llamativo
Orador	Voz- un man que habla- vocero-orador	12	3	6
Instrumentos	Bombo- tambor	1		
Estallidos	Bomba- Explosion- Papasbombas- Pistolazo- Balazos- Disparos- Tiros- Polvora- Estallidos- Disparos del Smart	40	23	6
Silbato	Pitos-silbato	22	2	7

Manifestantes	Gente- Manifestantes- Muchas personas- Protesta- Voces- Murmullos- Multitud- Algarabía- Personas gritando	25	3	9
Canticos	Canticos- cantos de soldados	3	1	
Megáfono	Megáfono	5		
Ruido	Ruido			
Sirena	Sirenas	8	2	
Pasos	Pasos de marcha	1		
Ambulancia	Ambulancia	1		
Carros	Carros	1		1
Ejército	Ejército	1	1	
Ruido	Ruido de calle	1		
Movimiento de carteleras	Movimiento de carteleras	1		
Policía alarmada	Alarma de policía	1		1

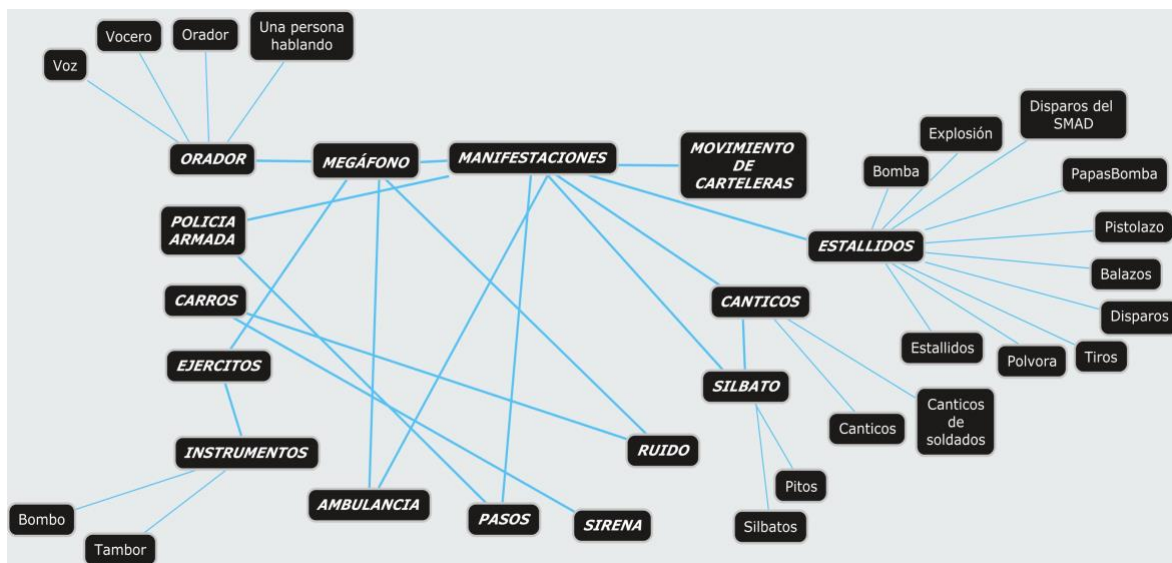


Figura 26. Red semántica elementos Audio 3. Creado en CmapsTools.

El audio 3, pretendía recrear un espacio de guerra o protesta, haciendo énfasis en los sonidos de impacto como disparos y estallidos, al observar la matriz de ambiente para el audio 3 (Tabla 21) y además la red semántica creada mostrada en la Figura 25 se establecieron 5 ambientes diferentes los cuales correspondían a las respuestas de los oyentes a la primera pregunta abierta, estos fueron: "Protesta" y sus respectivas palabras con 31 repeticiones como categoría general y principal de enfoque y las 4 restantes que fueron "Entrenamiento militar", "Carretera", "Combate" y "Mezquita" con valores entre 1 o 2 repeticiones, esto nos arrojó un resultado positivo a la hora de compararlo con la producción y el sentido que se le quería dar al audio, esto se vinculó con las respuestas presentadas en la Tabla 12 donde se resalta que fue el único de los audios que no obtuvo calificaciones bajas en las variables de calificación de espacialidad, igualmente, esto corroboraba la cantidad de elementos identificados en el audio, que fueron 16 pero siempre relacionados con el ambiente de protesta como "Manifestantes", "Silbato", "Estallido" y "Orador" evidenciado en la Tabla 22 y su respectiva red semántica de la Figura 26 .

Capítulo VI: Discusión y análisis de resultados

6.1 Análisis de la Respuesta en frecuencia de los paneles multiactuadores.

6.1.1 Respuesta en frecuencia sin ecualización.

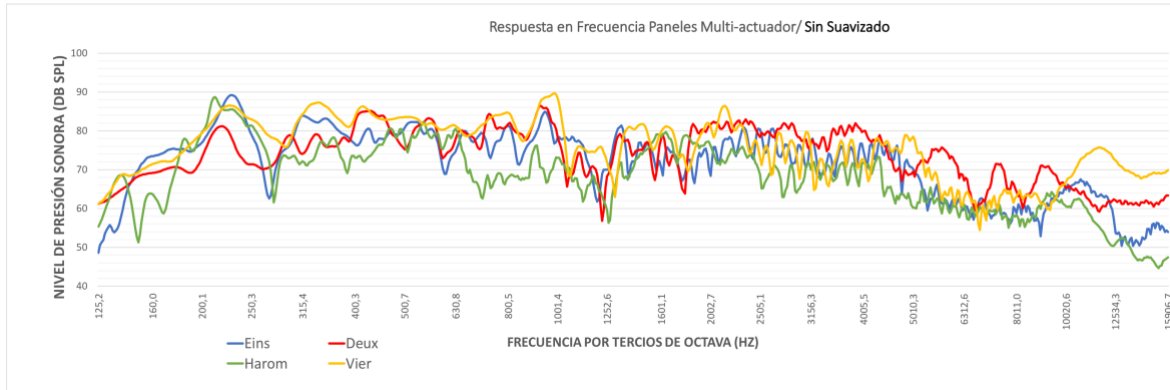


Figura 27. Respuesta en frecuencia Paneles Multi-actuadores sin ecualización.

La Figura 27 presenta la gráfica de respuesta en frecuencia de cada uno de los paneles multiactuadores, gráfica que se presenta sin ecualización y por frecuencias centrales de bandas.

En esta, se puede observar que la frecuencia de resonancia oscilaba entre las frecuencias de 200 y 250 Hz correspondiendo de esta manera a la frecuencia de resonancia de cada uno de los excitadores presentada por el fabricante (224 Hz) recordando que debido a la manera en la que se conectan los excitadores dentro del panel, la impedancia total de los 4 excitadores correspondía a la de uno solo ($\approx 5.7\Omega$) **medidos**, ajustando así la información dada por el fabricante de la impedancia de un solo excitador ($\approx 4\Omega$).

Se puede observar además que cada una de las cajas presentaba un decaimiento de más de 6 dB en la frecuencia de 4000 Hz (El ajuste o ecualización para cada una de las frecuencias críticas de los paneles se presenta en la sección 6.1.2), el comportamiento de las

frecuencias altas desde la frecuencia de 4000 Hz en adelante se producía debido a las propiedades de los excitadores ya que desde su proceso de diseño no cuentan con características para su reproducción en frecuencias altas, sin embargo como se trató anteriormente el material usado en el panel vibrante (Cartón nido de abeja) logro generar un realce en estas frecuencias altas sin afectar la fase y sin llegar a saturar, dejando un espectro lo más homogéneo posible.

La respuesta en frecuencia general de cada uno de los paneles por separado se podrá observar de una mejor manera en el **Anexo D** y además de esto se podrá también comparar y observar la relación existente con la respuesta en frecuencia de los excitadores, esta información es proporcionada por el fabricante, y se puede observar en el **Anexo B** como se había mencionado anteriormente.

6.1.2 Filtrado de corrección.

Al realizar la medición de respuesta en frecuencia y analizar las gráficas obtenidas, se hallaron ciertas frecuencias críticas (Frecuencia de resonancia en 224 Hz, y atenuación en frecuencia alta comenzando desde los 4000 Hz, aparte de picos de decaimiento en la frecuencia de 1000 Hz) que generaban cancelaciones o sumatorias que estaban presentes en cada uno de los paneles. Debido a esto, se consideró necesario realizar un ajuste o ecualización con el fin de lograr una reproducción del sistema lo más plano posible para una mejor escucha en los oyentes.

Para este proceso, se hizo uso de los siguientes Software y Plugins de la “Suite” de Waves: 1) Smaart 7 acoplado al Plugin de Waves Tract, como visualizador en **tiempo real** de la respuesta en frecuencia de cada panel. 2) O3A Gain (Blue Ripple Sound Limited), como Plugin libre para unificar el ruido rosa de cada uno de los paneles a un mismo nivel de presión

sonora 88,4 dBSPL. 3) Ecualización tipo FIR dado por el Plugin Tract en el corte de cada una de las frecuencias para no afectar la fase al momento de la reproducción (Kuo & Lee, 2001).

Para determinar la ganancia que se le debía aplicar a cada una de las frecuencias críticas, se hizo uso de la herramienta del software Room EQ wizard “EQ measurement” (Después de realizar las mediciones presentadas en la sección 6.1.1), la cual al establecer ciertos parámetros (Figura 28, Figura 29, Figura 30) arrojaba automáticamente la ganancia estimada buscada para las mismas. El procesamiento realizado para la ecualización de cada uno de los paneles haciendo uso del presente Plugin se puede evidenciar en el **Anexo E**.

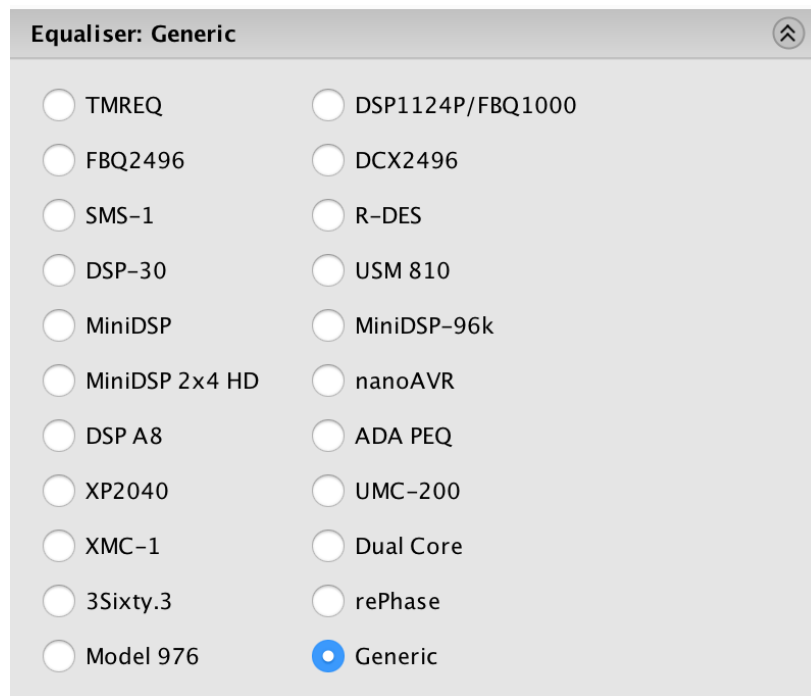


Figura 28. Selección tipo de ecualizador software Room EQ wizard “EQ measurement”.

Target Settings

Speaker Type: Full Range

Crossover:

Cutoff (Hz):

LF Slope: 24dB/octave

LF Cutoff (Hz): 125

LF Rise Start (Hz): 100

LF Rise End (Hz): 28

LF Rise Slope (dB/octave): 0.0

HF Fall Start (Hz): 1000

HF Fall Slope (dB/octave): 0.0

Target Level (dB): 76.4

Set target level

Figura 29. Configuración de la tarjeta software Room EQ wizard “EQ measurement”.

Filter Tasks

Match Range: 80 to 16,000 Hz

Individual Max Boost: 12 dB

Overall Max Boost: 12 dB

Flatness Target: 6 dB

☒ Allow narrow filters below 200 Hz

Match response to target

Manual optimisation controls

- Optimise gains
- Optimise gains and Qs
- Optimise gains, Qs and frequencies

Retrieve filter settings from equaliser

Save filter coefficients to file

Export filter settings as text

Reset filters for current measurement

Figura 30. Herramientas del filtro seleccionado software Room EQ wizard “EQ measurement”.

Se hizo la elección del ecualizador tipo Generic por su alta gama de filtros debido respuesta en frecuencia plana buscada, este tipo de filtro deja elegir 20 frecuencias diferentes (Room EQ Wizard ,2018), por su parte, la tarjeta fue configurada con un Low Past Start de 100Hz, sabiendo que el sistema comenzaba su funcionalidad en 125 Hz, cortado por un filtro LWR 48 en 125 Hz, además de esto, no se presentaba una decaída en ningún momento en frecuencia alta ya que el sistema generaba una atenuación mayor a 10 dB de 4000 Hz en adelante.

La calibración del sistema se realizó de la misma manera en la que se midió la respuesta en frecuencia sin ecualización haciendo uso de Room EQ Wizar, pero esta vez al tratarse de una medición en tiempo real se generó un ruido rosa debido a que en todas las bandas de octava en el espectro en frecuencia cuentan con la misma presión sonora (Figura 31).

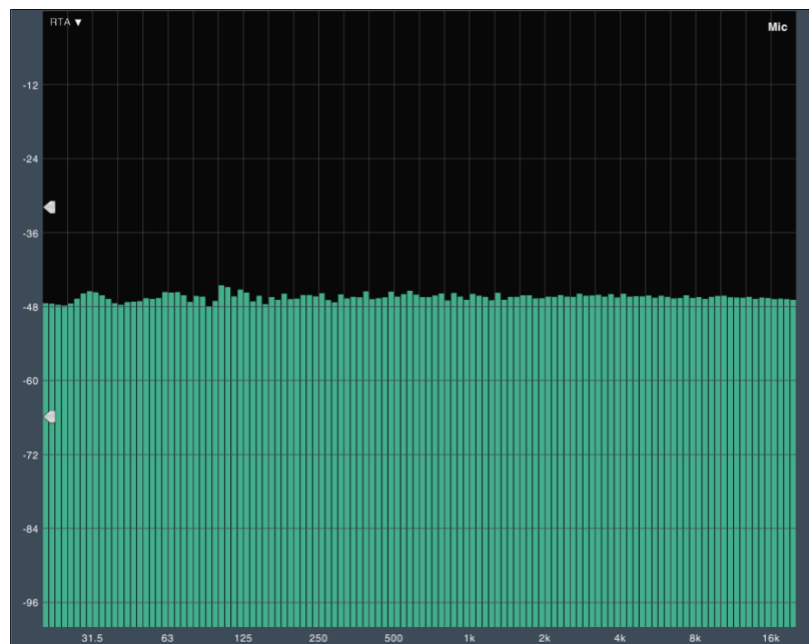


Figura 31. Espectro frecuencial de un ruido rosa generado a través del Software *Smaart 7*.

Luego de tener el sistema correctamente configurado y montado como se muestra en la Fotografía 8, se comenzó a capturar y recibir el valor arrojado por cada uno de los paneles en tiempo real, tomando siempre la información con un suavizado de 1/12 para su mejor visualización. Se decidió elegir la visualización de la gráfica con un ventaneo tipo Hamming debido a que el decaimiento de los lóbulos laterales de la frecuencia fundamental era más extenso, obteniendo así más registro o una mejor visualización de la respuesta en frecuencia (Kuo & Lee, 2001).

Las Figuras presentadas a continuación (**32, 33, 34 y 35**), logran evidenciar la homogeneidad en la franja de -48 & -36 dBFS en las frecuencias críticas que se hallaron al realizar al proceso de medición sin ecualización, se puede observar en cada una de ellas que el rango en frecuencias dentro de los que trabajaba cada uno de los paneles se encontraba entre los 125 Hz como frecuencia de partida del panel y los 16.000 Hz como frecuencia máxima, actuando de manera mucho más plana respecto al funcionamiento sin ecualización.

Se puede observar, además, como la frecuencia de resonancia con la que se contaba disminuye +/- 10 dBFS y como los picos atípicos en la frecuencia de 1300 Hz respecto a las frecuencias aledañas, los cuales ya presentan una uniformidad en la franja de -48 & -36 dBFS. Por su parte, la mala contribución en frecuencias altas que se obtuvo al momento de medir la respuesta en frecuencia sin ecualización, desde la frecuencia de 4000Hz hacia arriba teniendo una decaída de -6 dBFS, logró ser corregida hasta los 8000 Hz haciendo uso de un incremento de + 10 dBFS sin tener saturación en el sistema.

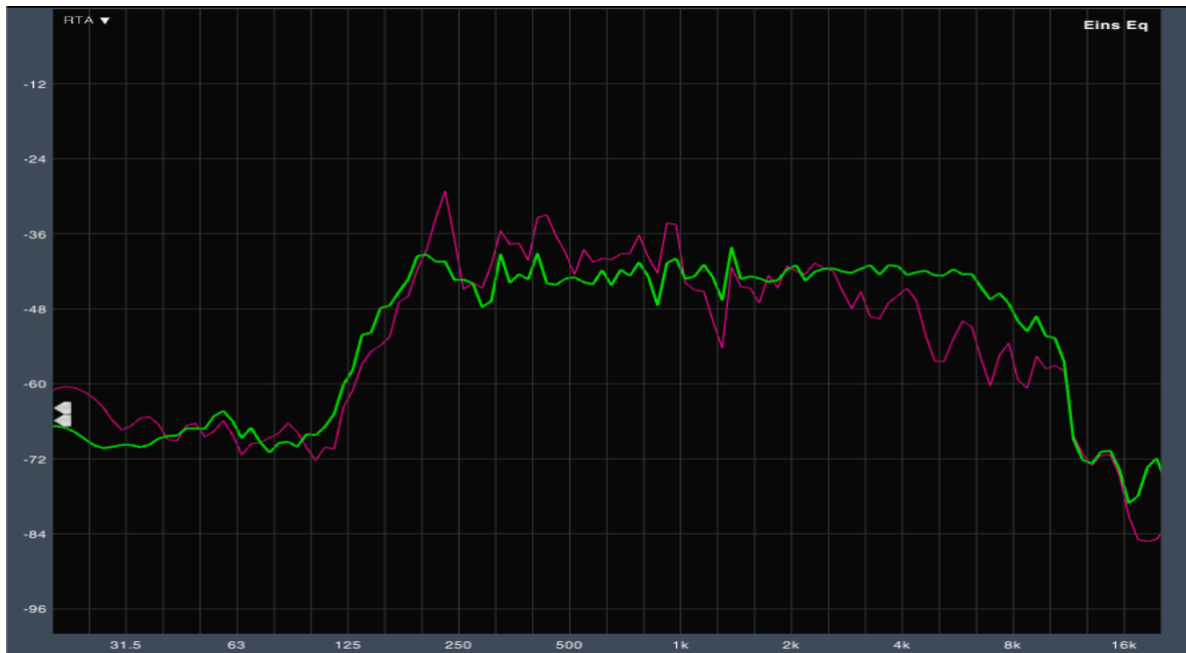


Figura 32. Respuesta en frecuencia Panel Eins Vista **Suavizado 1/2** (Línea rosa: Sin ecualización, Línea verde: Ecualizado).

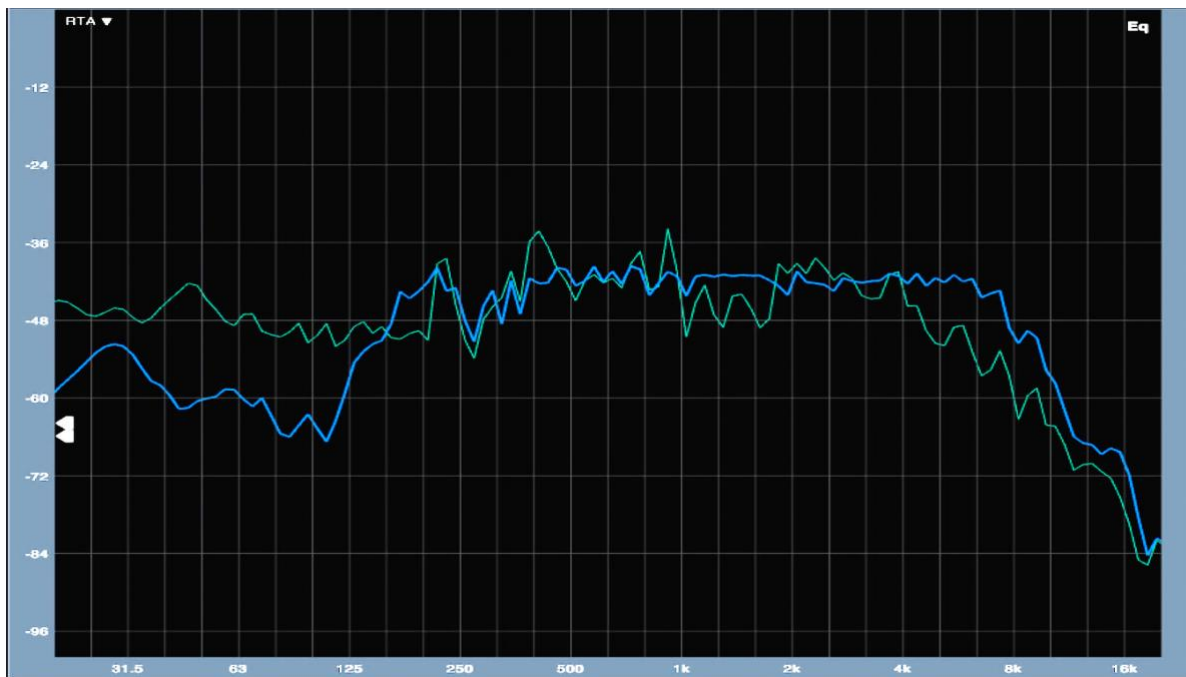


Figura 33. Respuesta en frecuencia Panel Deux Vista **Suavizado 1/2** (Línea verde militar: Sin ecualización, Línea azul: Ecualizado).

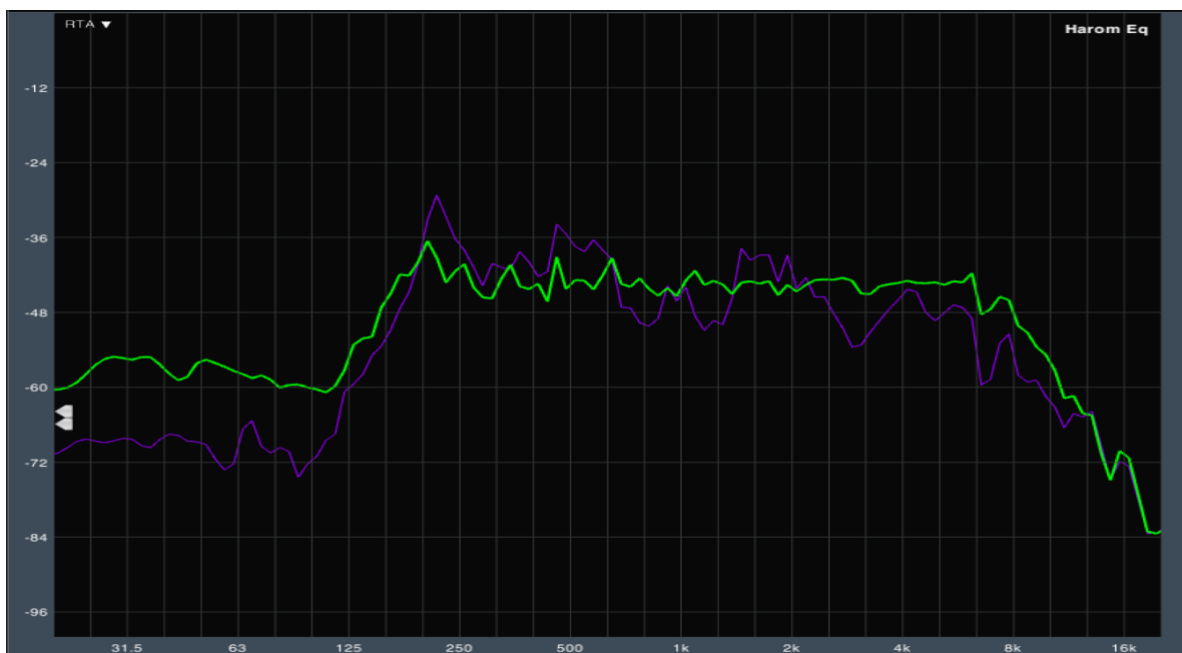


Figura 34. Respuesta en frecuencia Panel Harom Vista **Suavizado 1/2** (Línea violeta: Sin ecualización, Línea verde: Ecualizado).

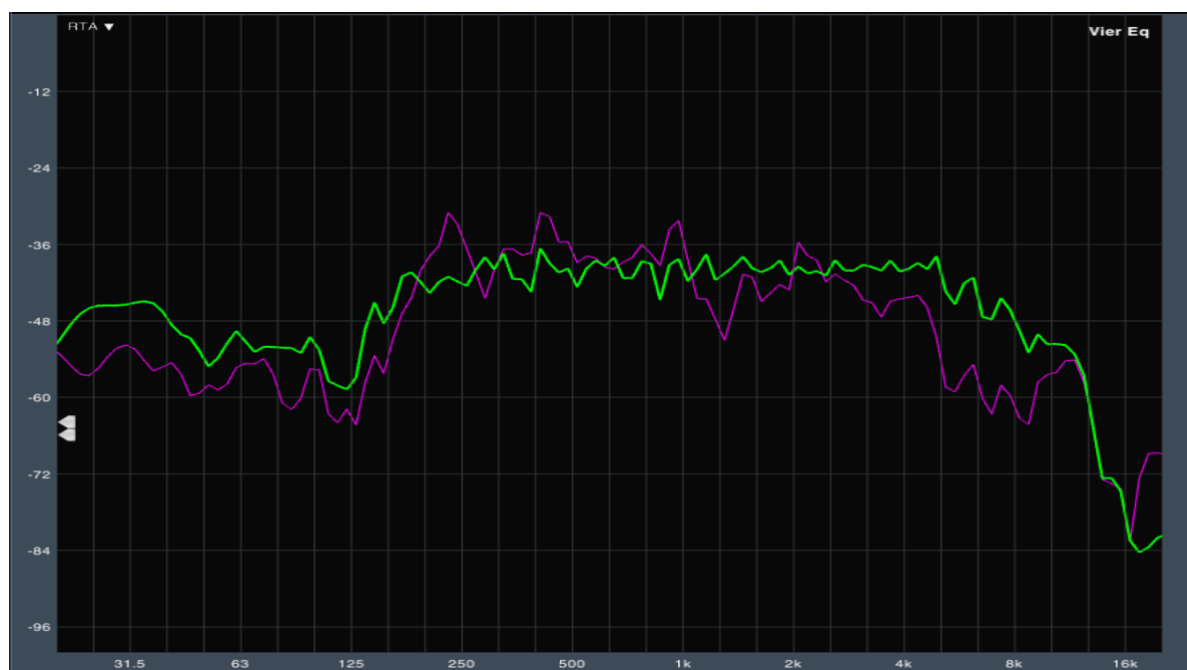


Figura 35. Respuesta en frecuencia Panel Vier Vista **Suavizado 1/2** (Línea violeta: Sin ecualización, Línea verde: Ecualizado).

6.2 Resultados medición de Sensibilidad de los paneles multiactuadores.

Siguiendo el proceso descrito en la sección 4.2.2 y haciendo uso de la ecuación 19 presentada en la misma sección con el fin de comprobar los valores obtenidos experimentalmente respecto a la teoría, a continuación, se muestra en la Tabla 23 los valores de Sensibilidad para cada uno de los Paneles Multi-actuadores. En esta tabla se puede observar la coherencia existente en el nivel de presión sonora generado por cada uno de los paneles, donde existe una desviación de $\pm 1\text{dB SPL}$ entre cada uno, basado esto en los valores de impedancia de los excitadores y su nivel de voltaje.

Tabla 23. Sensibilidad paneles multiactuadores.

Sensibilidad paneles			
Panel	Impedancia Nominal (Ohm)	Tensión (Voltios)	Sensibilidad @1kHz
Eins	5,7 Ω	2,39 V	99,6dB SPL
Deux	5,8 Ω	2,41 V	100,5dB SPL
Harom	5.9 Ω	2,43 V	101dB SPL
Vier	5,7 Ω	2,39 V	99,7dB SPL

6.3 Análisis de la directividad de los paneles multiactuadores.

Al realizar el proceso de medición descrito anteriormente (paneles sin ecualización), se pudieron obtener los patrones polares de cada uno de los paneles Multi-actuadores, medidos en las frecuencias de 250Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz y 4000Hz cada 10° . Cada uno de estos paneles presentaban un comportamiento omnidireccional para cada una de las

frecuencias estudiadas, respondiendo a la manera en la que fueron construidos y a la teoría descrita por (Ortega, B. 2008) en la que asegura que este tipo de sistema de sonido logra irradiar energía en todas las direcciones, omitiendo así el Sweet Spot presente en otros sistemas Surround. **Las Figuras 36, 37, 38 y 39** muestran el patrón polar de los Paneles Multi-actuadores Eins, Deux, Harom y Vier respectivamente. Para la recolección de datos se tomaron por cada grado cinco muestras, generando un promediado energético para así tener un menor porcentaje de error a la hora de mostrar los datos.

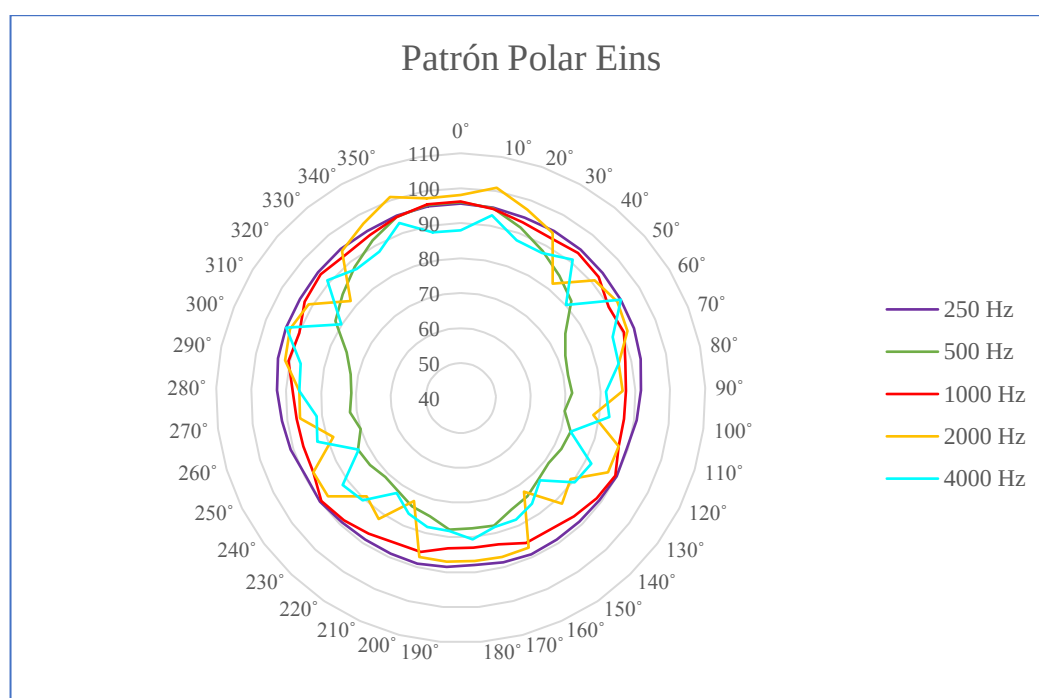


Figura 36. Patrón Polar del panel *Eins*.

En el Patrón polar del Panel *Eins* mostrado en la Figura 36, se puede observar la radiación uniforme presente en la frecuencia baja, más específicamente en la frecuencia de 250Hz; en 500Hz la presión sonora decae +/- 30dBSPL en 90° y 280° que corresponden a los costados del panel multiactuador medido sin ecualización. Analizando las frecuencias de

1000Hz en adelante se puede observar un patrón con radiación uniforme, pero con presencia de múltiples zonas en las que existen cancelaciones con decaimientos de $\pm 10\text{dB SPL}$, unos ejemplos de estas zonas son 50° , 110° , 220° , 250° y 310° , esto se puede dar debido a que estos grados estaban ubicados de igual manera en zonas donde no se encontraba el panel vibrante, zonas laterales del Panel Muti-actuador.

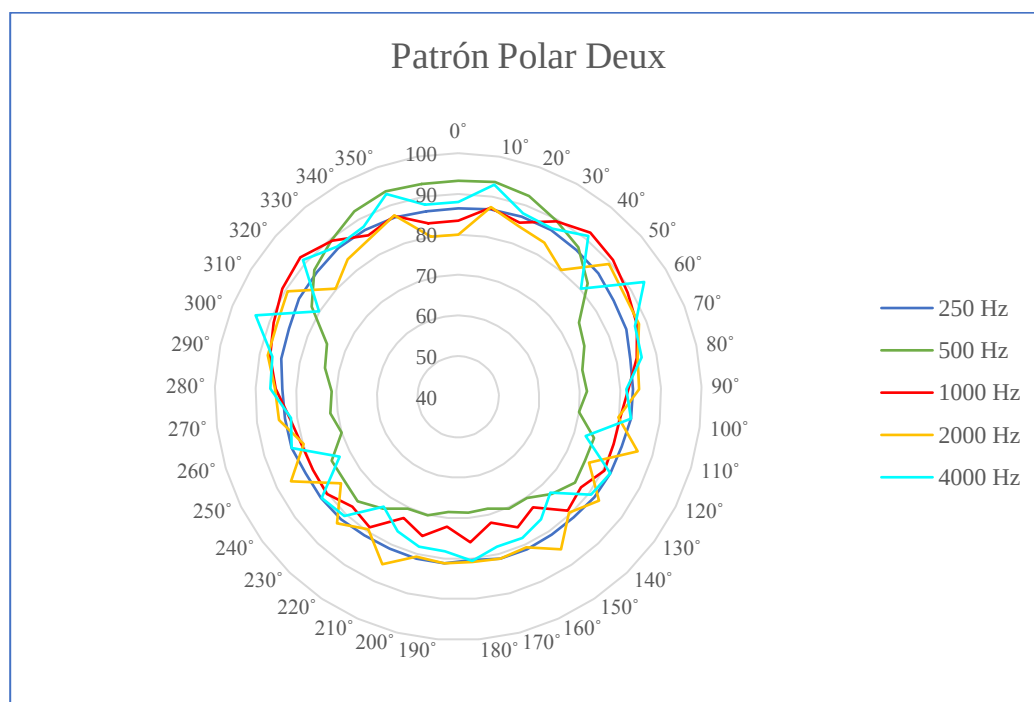


Figura 37. Patrón Polar del panel *Deux*.

En el caso del Patrón polar del Panel *Deux* mostrado en la Figura 37, se evidencia la omnidireccionalidad con la que contaba la frecuencia de 250Hz al igual que en el Panel *Eins*, la frecuencia de 500Hz presentaba una atenuación en 180° que corresponde a $68,6\text{dB SPL}$ en la parte posterior del panel, esto debido a que la respuesta en frecuencia del panel en esta frecuencia contaba con un pico de cancelación, la mayor contribución para esta frecuencia se

observa en la parte frontal del Panel, a 0°. Las frecuencias de 1000Hz en adelante contaban con un nivel promedio de 87,5dB SPL en toda la circunferencia medida, pero con ciertos picos en los cuales se identifican sumas energéticas como por ejemplo en la frecuencia de 4000Hz en los 60° y 300° que corresponden a las esquinas del marco vibrante del Panel.

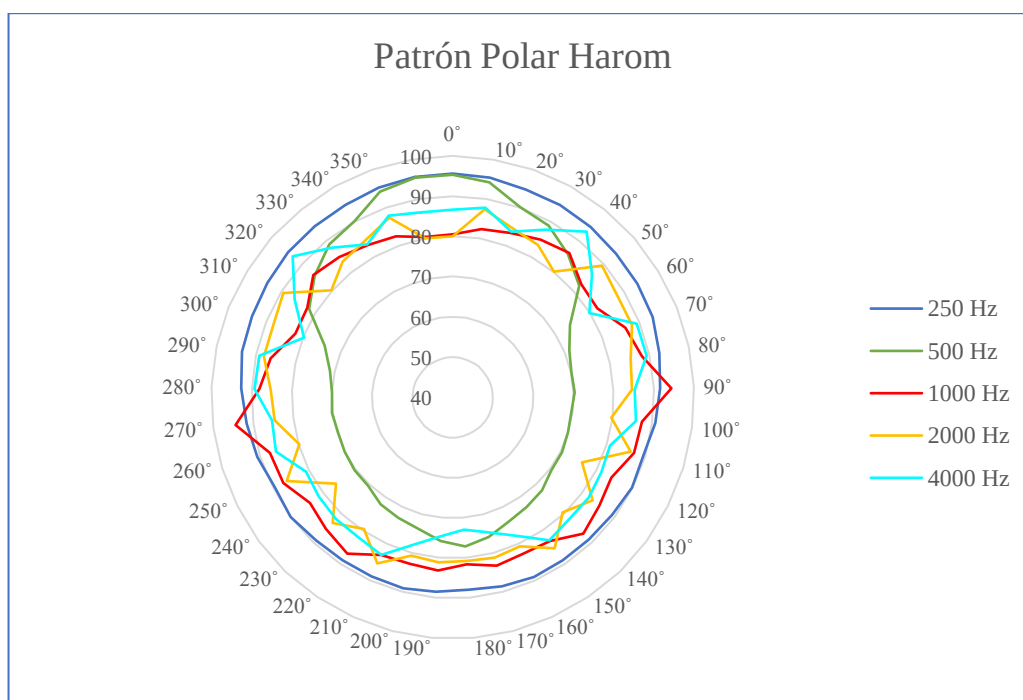


Figura 38. Patrón Polar del panel *Harom*.

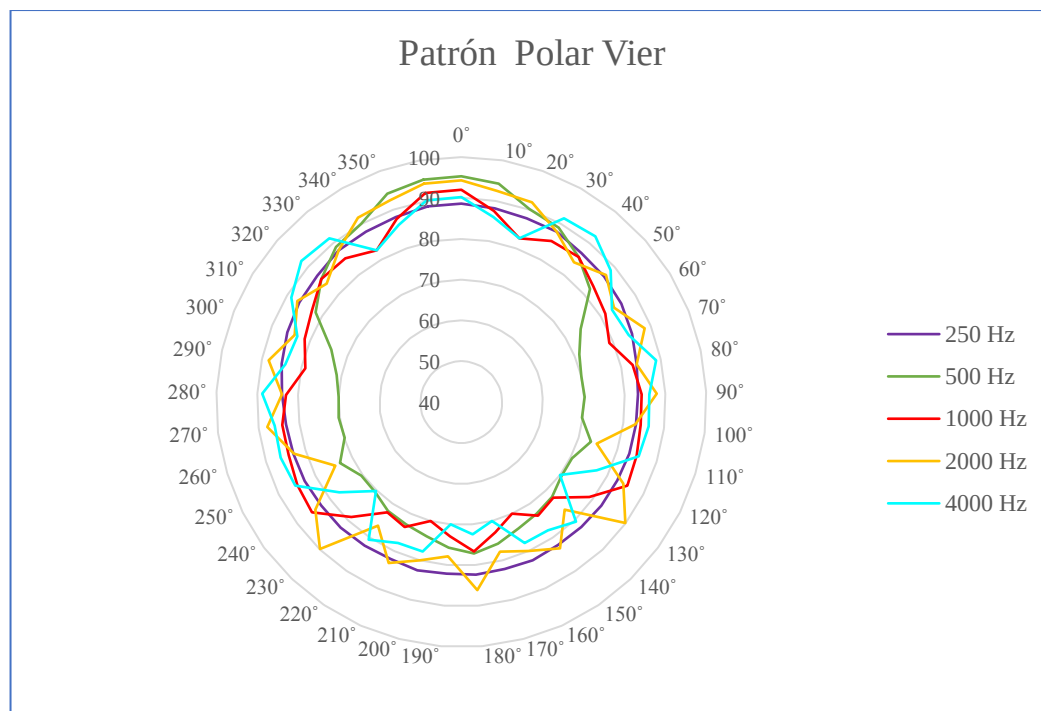


Figura 39. Patrón Polar del panel Vier.

El patrón polar medido para el Panel *Harom* mostrado en la Figura 38 presentaba un nivel de presión sonora de mas de 90 dBSPL en los 90° y 270° para la frecuencia de 1000Hz, diferente al comportamiento que se puede observar en la frecuencia de 500Hz donde existía un decaimiento de +/- 30dBSPL. Como sucedía en los otros paneles medidos, en los patrones polares presentados en las Figuras 38 para el patrón polar de *Harom* y 39 para el patrón polar de *Vier*, existió una homogeneidad para la frecuencia de 250 y 1000Hz en adelante, la frecuencia de 500Hz, por el contrario, es la que expone mayor diferencia en las mediciones realizadas, en los **costados** de cada uno de los paneles, desde 60° a 120° y de 250° a 310° se midió un nivel de presión sonora promedio de 71,3 dBSPL que se percibía auditivamente al momento de realizar las mediciones.

Capítulo VII: Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones.

- A pesar de contar con varios prototipos de los cuales se hubiera podido basar la construcción de los paneles del presente proyecto, el prototipo presentado por IRCAM & Sonic en el año 2007 fue en el cual se basó este proyecto, esto debido a las dimensiones similares a las de sistemas de sonido caseros actuales las cuales facilitaban el transporte y su instalación para su uso, su economía al momento de la construcción por los materiales usados (\$200.000 COP) y el ancho de banda buscado (Frecuencias medias altas, 125Hz-16kHz), cumpliendo de esta manera el objetivo numero 1.
- Para lograr una correcta distribución e irradiación de energía por parte de Panel, es necesario realizar un acoplamiento entre cada parte de este a través de pegamentos o presión entre las partes, esto para lograr una caja completamente hermética (Ortega, B. 2008) (pp.71-74). Debido a esto se crearon también bases mecánicas para la sujeción de los Paneles Multi-actuadores para evitar la perforación de estos.
- Al comparar la impedancia de los excitadores dada por el fabricante respecto a la medida se haya una variación de $\pm 0,5-1,3 \Omega$, este valor es importante al momento de la elección del amplificador a utilizar debido a la relación de impedancia que existe entre los dos para lograr la máxima transferencia de potencia.
- Se pudo observar que la respuesta en frecuencia de los paneles multiactuadores, se asemeja a la respuesta en frecuencia de los excitadores la cual es dada por el fabricante de estos, contando con la misma frecuencia de resonancia en 224Hz. Cabe resaltar, que esta respuesta en frecuencia surge sí y solo sí el excitador o en este caso,

el conjunto de los 4 excitadores cuenta con una superficie a la cual estará acoplada y sobre la cual estará actuando.

- Al garantizar la estabilidad de fase entre los excitadores usados por cada panel (Haciendo uso de filtros tipo FIR), se pudo realizar la corrección de respuesta en frecuencia de estos. A pesar de contar con una buena calidad al momento de la reproducción de los audios, en las gráficas del Anexo E se pudo observar que se contaba con cancelaciones o sumas en ciertas frecuencias, por ejemplo en el panel Eins se generaba una atenuación de -54.28dBFS en la frecuencia de 1,3Hz, la cual se corrigió con el filtrado ya nombrado obteniendo un valor posterior de -46,6dBFS para esta frecuencia, este proceso se realizó para cada uno de los paneles, logrando una respuesta plana con un promedio en el ancho de banda desde 125Hz a 8Khz entre -48dBFS a -36dBFS
- El posicionamiento de los paneles Multi-actuadores haciendo uso de la Técnica de síntesis Ambisonics se considera irrelevante al momento de su reproducción, esto debido a que la teoría usada afirma que "Cualquier persona dentro la sala va a escuchar correctamente y va a poder localizar las fuentes sonoras en cualquier parte de la misma sin ninguna discriminación por ubicación" (Ortega, B. 2008), esto además se puede sustentar en el Capítulo VI, sección 6.3 , analizando los patrones polares de cada uno de los paneles y observando que en frecuencia Alta (1KHz, 2KHz, y 4Hz) su comportamiento presentaba una radiación uniforme por cada uno de los grados de medición de nivel de presión sonora SPL. Por ejemplo, en el patrón polar del panel Deux la frecuencia de 1KHz tuvo un nivel de 87,5dBSPL en toda la

circunferencia medida, teniendo en cuenta que las frecuencias bajas cuentan siempre con un comportamiento omnidireccional.

- Al realizar el análisis cualitativo para las respuestas abiertas a las preguntas subjetivas presentadas en la Fase 1 de la prueba, se pudo observar que los oyentes asocian elementos al audio presentado a pesar de estos no ser contemplados en la producción de los audios, esto se puede presentar debido al asociamiento de las experiencias vividas en los ambientes recreados por los paneles multiactuadores; prueba de esto son las categorías extras halladas en las matrices en la sección 5.2.2 para cada uno de los audios. Ej: Audio 1- Categoría: Viento, Palabras: Viento, aire, brisa con una frecuencia de respuesta de seis.
- Las características de la muestra a la cual fue aplicada la prueba determinaron el tipo de respuesta a las preguntas abiertas para el audio 2, estas respuestas se relacionaban al conocimiento y experiencia auditiva con la que contaban los oyentes, esto se puede evidenciar con la categoría que obtuvo más frecuencia de repetición: "Parlantes de locución" y sus sinónimos, sobretodo: "Sistema de audio", relacionando más el sonido al elemento emisor mas no a la persona que emitía el mensaje.
- La alta cantidad de elementos identificados en el Audio 3 corresponde a la no presencia de calificaciones en el rango bajo para los parámetros subjetivos presentados en la fase 1 de la prueba, concluyendo que la buena distribución de los elementos dentro del Audio, generan una tendencia de mejor calificación para la percepción de espacialidad sonora 3D.

7.2 Recomendaciones.

- Para lograr un ancho de banda más extenso, haciendo uso del mismo sistema de paneles (Mismas dimensiones, mismos materiales y misma referencia de excitadores) se recomienda utilizar un arreglo de excitadores que trabajen como Subwoofer con una respuesta en frecuencia de 40Hz a 125Hz con una relación de potencia de 100 watts, debido a que esta será la misma potencia generada por cada panel multiactuador.
- Para próximas implementaciones y creaciones de paneles multiactuadores, se recomienda contar con un modelado del material del panel vibrante a utilizar además de seguir las sugerencias de materiales presentadas por los fabricantes de los excitadores, esto con el fin de lograr analizar de manera correcta la distribución de energía dentro del material y tener la certeza de no contar con resonancias no deseadas en ninguna frecuencia dentro del ancho de banda. En el presente proyecto se hizo uso de dos materiales de prueba para el panel vibrante, el primero fue una lámina de PVC la cual contaba con buen comportamiento en frecuencias altas, pero con resonancias exageradas en frecuencias bajas, aproximadamente en 86Hz y 250Hz a pesar de contar con gran hermeticidad en la caja, esto se corrigió completamente haciendo uso del material nombrado en el presente proyecto (Cartón nido de abeja).
- Para realizar la medición del patrón polar de cada uno de los paneles multiactuadores se recomienda posicionar el panel en campo abierto y acostado en el suelo boca arriba, esto para evitar posibles reflexiones provenientes desde el piso y analizando solamente el área del panel que va a irradiar energía.

- Para la medición de respuesta en frecuencia, el usuario se debe cerciorar de que la respuesta en frecuencia de la tarjeta de audio sea lo más plana posible, esto se puede comprobar generando ruido rosa a través del Software de medición con la configuración LoopBack (Ver capítulo IV, sección 4.2).
- Se recomienda realizar la corrección de la respuesta en frecuencia ligada al uso que se le va a dar a los paneles multiactuadores.
- Debido a los resultados obtenidos en las pruebas subjetivas (Capítulo V), para lograr una correcta percepción de altura y/o posicionamiento de una fuente en el eje vertical, se considera necesario ubicar literalmente un panel justo arriba y abajo del oyente.
- Para próximas investigaciones en las que se lleve a cabo mediciones con el micrófono de medición ECM8000 se recomienda realizar una técnica de corrección de respuesta en frecuencia del micrófono, esto debido al deterioro por uso que presenta el micrófono.

Referencias

- Aguacia, J., Pardo, D. & Lozano, C. (2014). Diseño de atmósferas sonoras tridimensionales utilizando sistemas Ambisonics. (Tesis Pregrado). Universidad de San Buenaventura Bogotá.
- Dayton Audio. (2019). Guía de los compradores de Dayton Audio Exciters, excitadores y transductores táctiles. Recuperado de www.daytonaudio.com/index.php/exciters-buyers-guide
- Farrar, K.(1979).Soundfield microphone, design and development of microphone and control unit. *Wireless word*, pp 48-50.
- Frank, M., Zotter, F. & Sontacchi, A. (2015). Producing 3D Audio in Ambisonics. University of Music and Performing Arts. pp. 2-8.
- Gerzon, M. A. (1975) ‘Ambisonics. Part Two’ Studio Techniques’ Studio Sound, Vol. 17, no. 8, pp 24-26, 28, 30.
- Giuliano, G. y Aranda, L. (2013). Cuadernos de Taller Museo Dr. Horacio G. Piñero, Número 3: Percepción y sensación auditiva. Fac. de Psicología, Universidad de Buenos Aires.
- Hernández, R., Fernández, C. & Baptista, P. (2003). Metodología de la Investigación. (4) Pág. 396. México, D.F.: McGraw-Hill
- Herrera, M., Rincón, R. y Vargas, C. (2013). Metodología psicoacusticas en la determinación de desórdenes psicológicos. *Ingenium* 27. pp.108-116.
- Kinsler, L. Frey, A. Coppers, A. Sander, J. Fundamentos de acústica. 4ª ed. Limusa,
- Kolundzija, M & Faller, C, (2018), Advance B-Format Analysis (pp.2). École Polytechnique Fédérale de Lausanne(EPFL), Switzerland

- Kuo, S & Lee, B, (2001), Real-Time Digital Signal Processing (pp.189).
Chichester,Inglaterra: John Wiley & Sons, LTD.
- Kuster, M., De Vries, D., Beer, D. and Brix, S. (2006). Structural and Acoustic Analysis of
Multiactuator Panel. *J. Audio Eng. Soc.*, 54(11), 1065-1076
- Ledo, M. (2013). Tecnología de registro y reproducción sonora para entornos de realidad
virtual (Tesis pregrado). Universidad Politécnica de Madrid.
- Lizasoain, L., Joaristi, L. (2003). Gestión y análisis de datos con SPSS. Versión 11.
Thomson: Madrid.
- Mejia, J. (2012). Realidad Virtual, Estado del arte y análisis crítico. (Trabajo Final de
Master). Universidad de Granada.
- Merino, J & Muñoz, L, (2007), La percepción acústica: Física de la audición. Dpto. de
Didáctica de las Ciencias Experimentales. Universidad de Valladolid
- Morales,R. (2012). Diseño de matrices semánticas conceptuales y el desarrollo de
habilidades directivas. (Trabajo de ascenso para profesor agregado). Universidad de
Carabobo, Valencia.
- NIDCD (2018) National Institute of Deafness and other Communication Disorders. Pérdida
de audición relacionada con la edad. Recuperado de:
www.nidcd.nih.gov/es/espanol/perdida-de-audicion-relacionada-con-la-edad
- Norma UIT-R BS.1116-3. Métodos para la evaluación subjetiva de pequeñas degradaciones
en los sistemas de audio incluyendo los sistemas de sonido multicanal. Asamblea de
Radiocomunicaciones de la UIT, 04, febrero 2015. <https://www.itu.int/rec/R-REC-BS.1116-3-201502-I/es>.

- Norma UIT-R BS.1284-2. Métodos generales para la evaluación subjetiva de la calidad de sonido. Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT, 21, enero 2019.
<https://www.itu.int/rec/R-REC-BS.1284-2-201901-I/es>
- Ortega, B. (2008). Analysis and Enhancement of Multiactuator Panels for Wave Field Synthesis Reproduction. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia.
- Pueo, B. y Romá, M. (2003). Electroacústica: altavoces y micrófonos. Madrid: Prentice Hall.
- Pueo, B. y Tur, V. (2009). Sonido espacial para una inmersión audiovisual de alto realismo. *Icono*, (14). 334-345.
- Pueo, B., Lopez, J., Scolano, J. y Horchen, L. (2010). Multiactuator Panels for Wave Field Synthesis: Evolution and Present Developments. *J. Audio Eng. Soc.*, 58 (12), 1045-1063.
- PUI AUDIO. (2016). The Invisible Speaker-PUI Audio eXciter.
- Romero-Saldaña, M. (2016). Pruebas de bondad de ajuste a una distribución normal. *Enfermería del trabajo*. 6(3).
- Romero, C. (2000). Las capacidades Perceptivo Motoras y su Desarrollo. En M. Ortiz Camacho, Comunicación y Lenguaje Corporal (pp.117-167) Granada, España: Ediciones Proyecto Sur
- Room EQ Wizard (2018), Getting set up for measuring. Recuperado de:
https://www.roomeqwizard.com/help/help_en-GB/html/calsoundcard.html
- Smith, C., Perry, Lynellen, D. S. & Yang, S. (1997). An investigation of current virtual reality interfaces., *XRDS: Crossroads*, pp. 23-28.

Sound:Check (2008). Interacción acústica y su aplicación en arreglos de altavoces- parte II.

Recuperado de: <https://soundcheck.com.mx/interaccin-acstica-y-su-aplicacin-en-arreglos-de-altavoces-parte-ii/>

Unidad técnica de control interno (UTCI). (2011). Guía practica para la construcción de muestras, Chile: Contraloría General de la Republica.

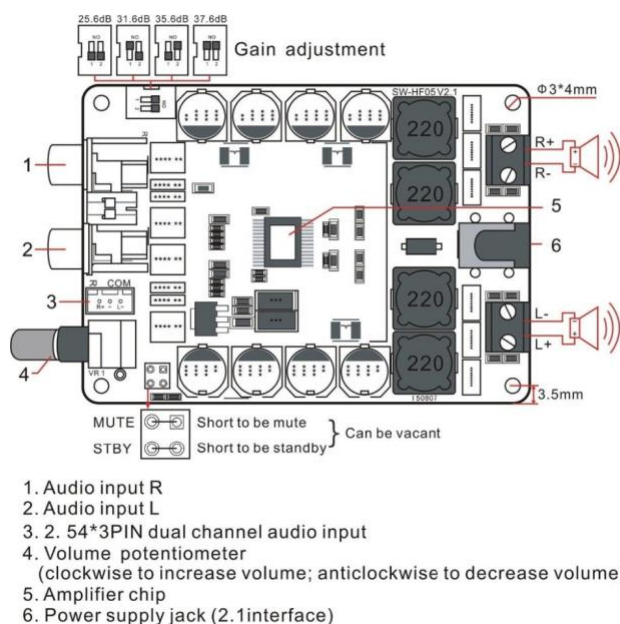
Vargas-Garduño, M., Méndez, A. & Vargas, A. (2014). La técnica de redes semánticas naturales modificadas y su utilidad en la investigación cualitativa. IV Encuentro Latinoamérica de metodología de las ciencias sociales, Universidad Nacional de la Plata.

Anexos

Anexo A: Amplificador de potencia clase D, referencia TDA7498, características.

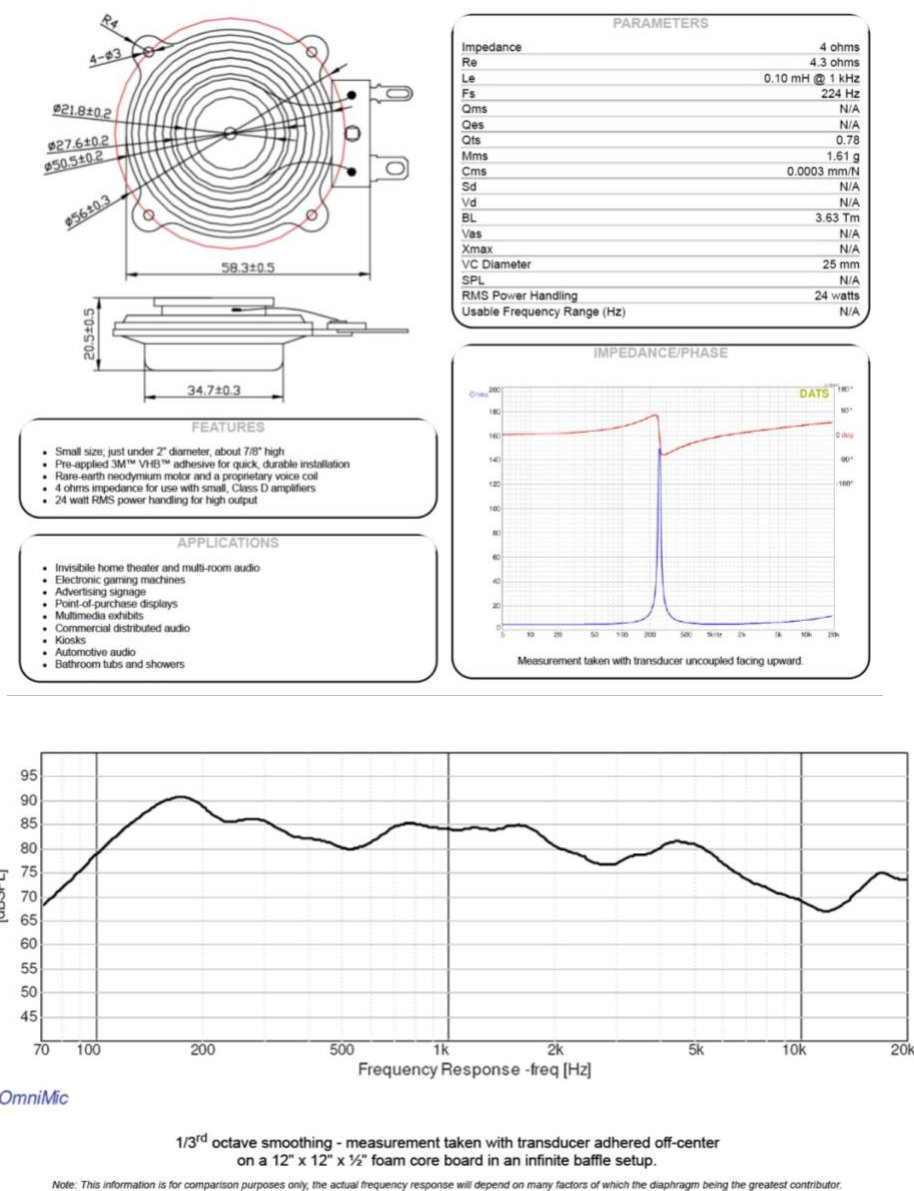
Características:

Amplificador	TDA7498D
Potencia de salida	100W + 100W (VCC = 36 V, RL = 6Ω, THD: 10%)
Potencia de salida	80W + 80W (VCC = 34 V, RL = 8Ω, THD: 10%)
Fuente de alimentación	14-34V DC (24V preferido a)
Impedancia de altavoz aplicable	8 Ohm mejor (4 Ohm o 6 Ohm también funciona)
Distorsión Armonica:	1W/0.05%
Alta eficiencia	hasta 90%
Dimensiones:	(L * W): 9.4*6.2 cm/3.7*2.44 pulgadas
Peso:	90g / 3.2oz



Recuperado de: STMicroelectronics. Especificaciones Amplificador de potencia clase D,
referencia TDA7498.

Anexo B: Características y especificaciones excitadores DAEX25FHE-4.



Recuperado de: DAYTON AUDIO. Especificaciones DataSheet Excitador

DAEX25FHE-4.

Anexo C: Tabla de matrices a la respuesta del ¿Por qué? de las preguntas abiertas.

Matriz general del porque llamo la atención los elementos identificados en los audios de la fase 1

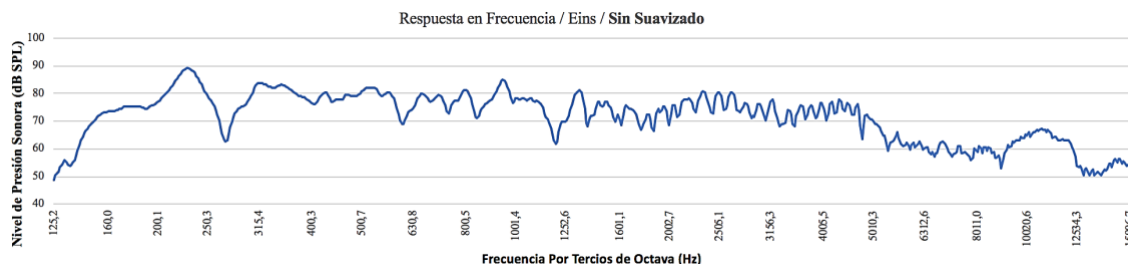
Categoría	Palabras	Frecuencia
Presencia	Presencia	13
	Fuerza del audio	
Profundidad	Movimiento	33
	Profundidad	
	Desplazamiento	
	Distancia	
	Planos diferentes	
	Lejanía & Cercanía	
Naturalidad	Naturalidad	21
	Ambientación	
	Relevancia	
	Estado de alerta	
	Drama	
	Reverberación	
	Significado dado por historia de vida	
Localización	Localización	6
	Identificación de componente	
Claridad	Claridad	15
	Buena definición	
	Calidad	
	Solidez	
	Balance de sonidos	
	Nivelación	
Altura	Altura	6
	Sobre posición	
Emergentes	Amplitud	25
	Realismo	
	Inmersión ambiental	
	Espacialidad	10

Matriz general del porque no llamo la atención los elementos identificados en los audios de la fase 1

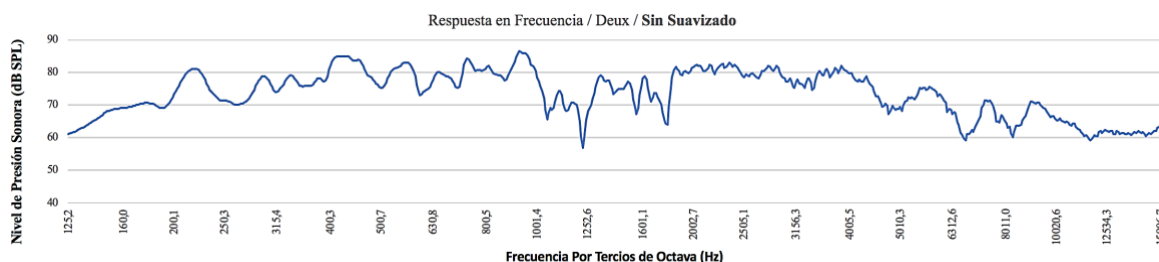
Categoría	Palabras	Frecuencia
Presencia	Notorio	4
	Presencia	
Profundidad	Comprimido	6
	Cercanía	
	Simple y breve	
	Poca importancia	
	Alejado	
Naturalidad	Falsedad	8
	Naturalidad no se siente	
	Captar atención	
	Artificialidad	
	Naturalidad	
Localización	Relevancia del elemento	9
	Superficial	
	Poca exactitud de movimiento	
	Localización	
	Falta de movimiento	
	Relevancia en el ambiente	
	Estático	
Claridad	Claridad	21
	Opaca	
	Corta duración	
	Sonoridad no agradable	
	Se pierde entre elementos	
	Estridente (muy fuerte)	
	Poca percepción	
Altura	Plano	8
	Altura	
	Amplitud	
	Percepción de distancia	
	Molesto- Incómodo	
Emergentes	Costumbre	3
	No realismo	2
	Importancia	3
	Realismo	3

Para realizar el análisis cualitativo de las respuestas al porque les había gustado o disgustado cierto elemento identificado dentro de los audios presentados, se categorizaron las respuestas obtenidas respecto a los parámetros subjetivos propuestos en la fase 1 de la prueba, además surgió una categoría extra que era la de "emergentes" en la cual se incluyeron aquellas respuestas que no tenían cabida en ninguna de las categorías de parámetros subjetivos propuestos.

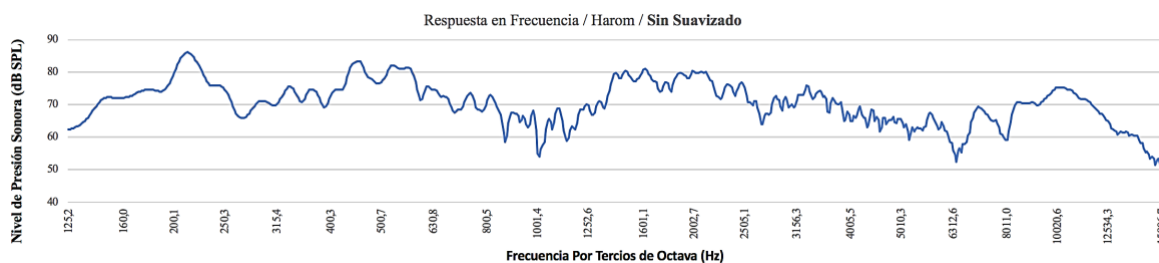
Anexo D: Respuesta en frecuencia paneles multiactuadores sin filtrado.



Fuente propia: Respuesta en frecuencia Panel Eins. Sin suavizar

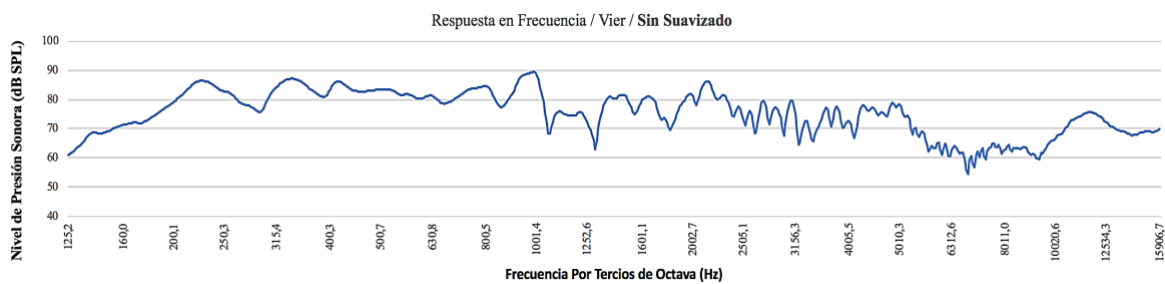


Fuente propia: Respuesta en frecuencia Panel Deux. Sin suavizar



Fuente propia: Respuesta en frecuencia Panel Harom. Sin suavizar

PANEL MULTIACTUADOR AMBISONICS 123



Fuente propia: Respuesta en frecuencia Panel Vier. Sin suavizar

Anexo E: Filtrado tipo FIR realizado con el Plugin TRACT (Waves).



Fuente propia: Filtrado FIR Panel Eins.



Fuente propia: Filtrado FIR Panel Duex.

PANEL MULTIACTUADOR AMBISONICS 125



Fuente propia: Filtrado FIR Panel Harom.



Fuente propia: Filtrado FIR Panel Vier.

Anexo F: Formato consentimiento informado



Consentimiento Informado

Trabajo de Grado

Diseño y Construcción de un Panel multi-actuador para Técnica de Síntesis Ambisonics

Apreciado(a) estudiante:

Usted ha sido invitado a participar en el trabajo de investigación: **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PANEL MULTI-ACTUADOR PARA TÉCNICA DE SÍNTESIS AMBISONICS** llevado a cabo desde el Programa de Ingeniería de Sonido de la Universidad de San Buenaventura sede Bogotá por las estudiantes Mateo Gómez y Santiago Quintana. Todo debidamente supervisado por el docente de la facultad de Ingeniería Dr. Marcelo Herrera Martínez. La participación en el proyecto es estrictamente voluntaria por lo que usted decide si desea participar y si desea en algún momento retirarse, el negarse a participar no tiene consecuencia alguna. Su participación consiste en evaluar la espacialidad sonora 3D presentada en diferentes audios reproducidos a través del panel multiactuador creado para el presente proyecto haciendo uso de la técnica de síntesis Ambisonics para la ENCUESTA DE EVALUACIÓN DE PERCEPCIÓN SONORA 3D PARA EL PROYECTO DE GRADO “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PANEL MULTI-ACTUADOR PARA TÉCNICA DE SÍNTESIS AMBISONICS”.

Su identidad, así como la información que se obtenga durante el proceso de investigación será tratada con la mayor confidencialidad posible, es decir, nadie diferente a las investigadoras y asesores del proyecto podrá conocerla.

Si usted después de haber firmado este documento o incluso durante la investigación se arrepiente de su participación, puede retirarse en el momento que desee. Las investigadoras también podrán solicitarle que se retire de la misma, si lo consideran conveniente.

Teniendo claro los anteriores aspectos usted podrá dar a continuación el consentimiento para ser participe en la investigación.

Anexo G: Instrumento

ENCUESTA PERCEPCIÓN SONORA 3D
PROYECTO DE GRADO “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PANEL MULTIA-
CTUADOR PARA TÉCNICA DE SÍNTESIS AMBISONICS”
UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
BOGOTA D.C. 2019

A continuación, usted estará diligenciando una encuesta, para participar en el proyecto de Grado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PANEL MULTIA-CTUADOR PARA TÉCNICA DE SÍNTESIS AMBISONICS” del programa de Ingeniería de Sonido.

La siguiente encuesta tiene como propósito realizar la evaluación de la percepción de espacialidad sonora 3D en los oyentes, haciendo uso de un Panel multi-actuador que utiliza la técnica de síntesis sonora Ambisonics para su reproducción. **Esta encuesta se dividirá en dos fases, teniendo como primera la evaluación de tres audios previamente diseñados y producidos a partir de los siguientes parámetros subjetivos:**

Naturalidad: La naturalidad del sonido que escucha. El sonido no debe sentirse artificial o sobrepuesto en el ambiente.

Profundidad: La distancia espacial aparente de la fuente de sonido al oyente. Que tan cercana o lejana siente las diferentes fuentes sonoras.

Presencia/Realismo: La impresión de estar inmerso en el lugar. Que tan real es la sensación del ambiente sonoro.

Localización: La ubicación aparente de las diferentes fuentes de sonido. Que tan fácil es la ubicación de los diferentes sonidos dentro del Ambiente.

Claridad: Grado de separación entre sonidos individuales percibidos dentro del ambiente. Que tan fácil es identificar cada uno de los sonidos individualmente.

Percepción de altura: Percepción de sonidos el eje vertical del oyente. Percibe las fuentes sonoras arriba y debajo de usted.

Y como segunda fase, la evaluación de un audio presentado tres veces con un sonido característico y representativo posicionado en diferentes lugares del espacio auditivo con el ánimo de que identifique el lugar del cual proviene este sonido.

Fase 1

Le solicitamos escuchar detenidamente cada audio, observar con mucho detenimiento la tabla presentada y responder de manera sincera.

Dentro de esta encuesta, usted deberá diligenciar la siguiente tabla siendo 1 el valor mínimo y 10 el valor máximo para cada uno de los parámetros expuestos anteriormente. Recuerde que usted escuchara cada uno de los audios DOS veces, por lo cual le solicitamos llenar la

encuesta al final de la segunda escucha. Si tiene dudas sobre el método de evaluación por favor hágaselo saber al personal encargado de la encuesta.

Audio 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Naturalidad										
Profundidad										
Presencia										
Localización										
Claridad										
Percepción de altura										

¿Qué ambiente se desarrolla en el audio presentado?

¿Qué elementos identificó en el audio?

¿Cuál elemento llamó más su atención? ¿Por qué?

¿Cuál elemento llamó menos su atención? ¿Por qué?

Audio 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Naturalidad										
Profundidad										
Presencia										
Localización										
Claridad										
Percepción de altura										

¿Qué ambiente se desarrolla en el audio presentado?

¿Qué elementos identificó en el audio?

¿Cuál elemento llamó más su atención? ¿Por qué?

¿Cuál elemento llamó menos su atención? ¿Por qué?

Audio 3

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Naturalidad										
Profundidad										
Presencia										
Localización										
Claridad										
Percepción de altura										

¿Qué ambiente se desarrolla en el audio presentado?

¿Qué elementos identificó en el audio?

¿Cuál elemento llamó más su atención? ¿Por qué?

¿Cuál elemento llamó menos su atención? ¿Por qué?

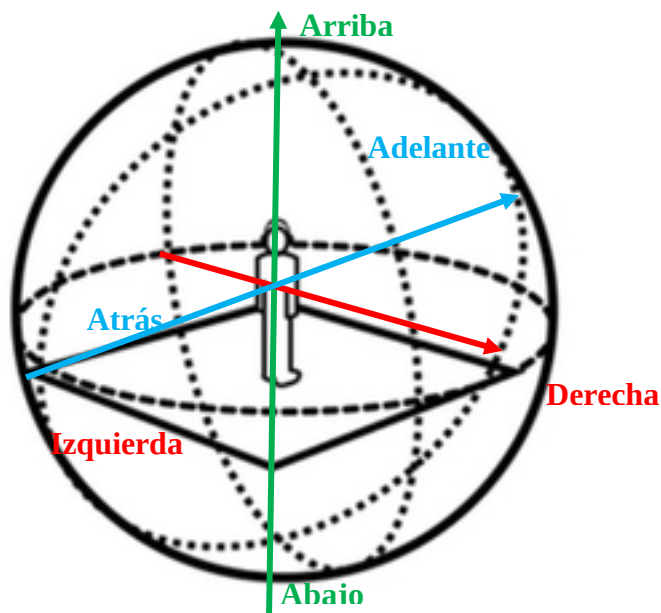
¿Cuál de los 3 audios le gustó más? ¿Por qué?

- ☐ Audio 1
- ☐ Audio 2
- ☐ Audio 3

Fase 2

Le solicitamos por favor escuchar detenidamente cada audio, observar con mucho detenimiento las opciones presentadas y responder de manera sincera.

Dentro de esta encuesta, usted deberá marcar con una X de las opciones presentadas la que se acerque más a la posición específica donde escucho el sonido del audio reproducido. Recuerde que usted escuchara cada uno de los audios DOS veces, por lo cual le solicitamos llenar la encuesta al final de segunda repetición. Si alguna duda por favor hágaselo saber al personal encargado de la encuesta.



¿Dónde escucho el sonido?						
	Arriba	Abajo	Izquierda	Derecha	Adelante	Atrás
Audio 1						
Audio 2						
Audio 3						

¡Muchas gracias por su colaboración!

Anexo H: Tabla de comparación de distribución modal para placa rectangular y cuadrada

	Modos dimensiones placa rectangular			Modos dimensiones placa cuadrada		
Modo	n	m	Frecuencia	n	m	Frecuencia
1	1	1	55,54	1	1	27,58
2	2	1	77,61	2	1	43,60
3	1	2	96,96	1	2	43,60
4	2	2	111,08	2	2	55,15
5	3	1	104,51	3	1	61,66
6	3	2	131,29	3	2	70,31
7	3	3	166,63	3	3	82,73
8	2	3	151,21	2	3	70,31
9	1	3	141,16	1	3	61,66
10	4	1	133,34	4	1	80,40
11	4	2	155,23	4	2	87,21
12	4	3	186,07	4	3	97,50
13	4	4	222,17	4	4	110,31
14	3	4	206,16	3	4	97,50
15	2	4	193,91	2	4	87,21
16	1	4	186,18	1	4	80,40
17	5	1	163,09	5	1	99,43
18	5	2	181,42	5	2	105,01
19	5	3	208,42	5	3	113,70
20	5	4	241,20	5	4	124,86
21	5	5	277,71	5	5	137,89
22	4	5	261,35	4	5	124,86
23	3	5	247,89	3	5	113,70
24	2	5	237,80	2	5	105,01
25	1	5	231,54	1	5	99,43
26	6	6	333,25	6	6	165,46
27	6	5	296,48	6	5	152,30
28	6	4	262,59	6	4	140,62
29	6	3	232,84	6	3	130,81
30	6	2	209,02	6	2	123,33
31	6	1	193,32	6	1	118,61

PANEL MULTIACTUADOR AMBISONICS 132

32	5	6	316,67	5	6	152,30
33	4	6	302,43	4	6	140,62
34	3	6	290,87	3	6	130,81
35	2	6	282,32	2	6	123,33
36	1	6	277,07	1	6	118,61
37	7	7	388,79	7	7	193,04
38	7	6	351,84	7	6	179,78
39	7	5	317,23	7	5	167,75
40	7	4	285,81	7	4	157,21
41	7	3	258,75	7	3	148,51
42	7	2	237,54	7	2	141,96
43	7	1	223,85	7	1	137,89
44	6	7	372,05	6	7	179,78
45	5	7	357,28	5	7	167,75
46	4	7	344,72	4	7	157,21
47	3	7	334,62	3	7	148,51
48	2	7	327,22	2	7	141,96
49	1	7	322,70	1	7	137,89
50	8	8	444,33	8	8	220,62
51	8	7	407,25	8	7	207,29
52	8	6	372,14	8	6	195,00
53	8	5	339,60	8	5	183,96
54	8	4	310,46	8	4	174,41
55	8	3	285,74	8	3	166,61
56	8	2	266,69	8	2	160,80
57	8	1	254,57	8	1	157,21
58	7	8	427,48	7	8	207,29
59	6	8	412,31	6	8	195,00
60	5	8	399,03	5	8	183,96
61	4	8	387,82	4	8	174,41
62	3	8	378,88	3	8	166,61
63	2	8	372,36	2	8	160,80
64	1	8	368,39	1	8	157,21
65	9	9	499,88	9	9	248,19