



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Gandia

Comparativa de las técnicas de captación microfónica y de postproducción para la espacialización 2D y 3D del sonido de guitarra clásica

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación, Sonido e Imagen

AUTOR/A: Vozmediano Marín, Sergio

Tutor/a: Sanchis Rico, Juan Manuel

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

RESUMEN

Este estudio final de grado consiste en la utilización de técnicas de grabación de sonido modernas e inusuales en comparación con las técnicas de captación microfónicas convencionales, aplicado al caso práctico de una guitarra clásica sonando en una cámara anecoica. Las técnicas de grabación modernas mencionadas son referidas a la utilización de equipos de captación microfónicos tales como un maniquí acústico (o cabeza binaural), micrófonos binaurales *in-ear* y grabación con tecnología Ambisonic. Se estudia el comportamiento de todas estas técnicas de grabación sobre una guitarra clásica y testea la espacialización del sonido transmitido por esta, tanto con grabaciones 2D como 3D de este instrumento. Se estudian también las diferentes formas de conseguir una espacialización del sonido generado por la guitarra clásica mediante herramientas digitales en postproducción, haciendo uso por ejemplo del DAW Adobe Audition, siendo también objeto de comparativa. Posteriormente, se analizan las grabaciones mediante un estudio subjetivo por diferentes grupos de personas para obtener sus observaciones, tanto técnicas como generales, y llevar a cabo una comparativa entre todas ellas con el fin de tener una visión clara de la forma óptima de realizar una grabación/postproducción de este instrumento u opiniones inusuales sobre estas.

PALABRAS CLAVE: Grabación sonido; Binaural; Ambisonic; Postproducción sonido; Guitarra clásica.

ABSTRACT

This final degree study consists of the use of modern and unusual sound recording techniques compared to conventional microphone pickup techniques, applied to the practical case of a classical guitar playing in a normal acoustic environment and in an anechoic chamber. The mentioned modern recording techniques refer to the use of microphone pickup equipment such as an acoustic dummy (or binaural head), "in-ear" binaural microphones and recording with Ambisonic technology. It is intended to study the behavior of all these recording techniques on a classical guitar and verify the spatialization of the sound transmitted by it, that is, to achieve both 2D and 3D recordings of this instrument. The different ways of achieving a spatialization of the sound generated by the classical guitar through digital tools will also be studied, using for example the DAW Adobe Audition, so that it can also be compared. Subsequently, the recordings will be analyzed through a subjective study by different groups of people and obtain their observations, both technical and general, and carry out a comparison between all of them to have a clear vision of the optimal way to make a recording / post-production of this instrument or unusual opinions about it.

KEY WORDS: Sound recording; Binaural; Ambisonic; Sound postproduction; Classical guitar.

Índice

1.	Introducción.....	1
1.1.	Objetivos.....	1
1.2.	Metodología.....	2
1.3.	Estructura.....	3
2.	Marco teórico.....	4
2.1.	La guitarra clásica.....	4
2.1.1.	Antepasados y origen histórico.....	4
2.1.2.	Características generales y acústicas.....	5
2.2.	Sonido biaural.....	7
2.3.	Tecnología Ambisonics.....	9
2.4.	Técnicas microfónicas de grabación.....	12
2.4.1.	Par espaciado.....	12
2.4.2.	Par coincidente.....	13
2.4.3.	Par ORTF.....	15
2.5.	La cámara anecoica.....	16
3.	Hardware.....	18
3.1.	Micrófono AKGC451B.....	18
3.2.	SoundMan OKM II.....	19
3.3.	Maniquí acústico biaural HATS Brüel & Kjaer.....	20
3.4.	Grabadora Ambisonic Zoom H3-VR.....	21
4.	Software postproducción.....	23
4.1.	Adobe Audition.....	23
4.2.	Plugin biaural dearVR.....	24
5.	Diseño experimental.....	25
5.1.	POV Audio: sonido captado desde la perspectiva del músico.....	25
5.2.	Comparativa de las técnicas de captación de sonido espacial.....	26
5.3.	Valoración subjetiva de tres técnicas de grabación biaural.....	29
5.4.	Grabación biaural microfónica y en postproducción.....	29
6.	Estudio subjetivo.....	34
7.	Resultados obtenidos.....	36
7.1.	Experimento 1.....	36
7.2.	Experimento 2.....	37
7.2.1.	Zoom H3-VR.....	37
7.2.2.	HATS Brüel & Kjaer.....	39
7.2.3.	SoundMan OKM II.....	41
7.3.	Experimento 3.....	44
7.4.	Experimento 4.....	44
8.	Conclusiones.....	46
9.	Bibliografía.....	49
10.	Anexos.....	51

Lista de Figuras

Figura 1: Ilustración Cántigas de Santa María, músicos con guitarras moriscas.....	4
Figura 2: Partes principales de la guitarra clásica.....	5
Figura 3: Cadena de eventos acústicos producidos al hacer vibrar una cuerda de la guitarra... ..	6
Figura 4: Modos de vibración de una guitarra clásica.....	6
Figura 5: Prototipo de cabeza de maniquí acústico, o "Dummy".....	7
Figura 6: Anatomía del oído humano.....	8
Figura 7: Técnica Blumlein.....	10
Figura 8: Variación de la técnica M-S con dos cardioides formando un ángulo de 180°.....	10
Figura 9. Configuración de patrones polares en el sistema Ambisonics de primer orden.....	11
Figura 10: Configuración de un sistema par espaciado.....	13
Figura 11: Configuración par coincidente en X-Y.....	14
Figura 12: Ejemplo de dos micrófonos configurados como M-S.....	14
Figura 13: Patrones polares de una configuración M-S.....	15
Figura 14: Patrones y configuración de un par ORTF.....	16
Figura 15: Cámara anecoica de la EPSG.....	17
Figura 16: Par de micrófonos modelo AKG C451B.....	18
Figura 17: Respuesta en frecuencia y patrón polar del micrófono AKG C451B.....	19
Figura 18: Micrófonos biaurales SoundMan OKM II.....	19
Figura 19: Micrófono biaural HATS de B&K, modelo 4100.....	20
Figura 20: Respuesta en frecuencia de los micrófonos Type 4191 del maniquí acústico.....	20
Figura 21: Grabadora Ambisonic Zoom H3-VR.....	21
Figura 22: Resumen del funcionamiento de la grabadora Zoom H3-VR.....	22
Figura 23: Interfaz de la DAW Adobe Audition.....	23
Figura 24: Interfaz del plugin dearVR MICRO.....	24
Figura 25: Grabadora TASCAM DR07.....	26
Figura 26: Esquema del posicionamiento de la espacialización del sonido.....	27
Figura 27: Grabadora Zoom Handy Recorder H4n para almacenar las grabaciones del maniquí.....	27
Figura 28: Posicionamiento de los 3 micrófonos biaurales para el 2º experimento.....	28
Figura 29: Configuración de los pares estéreo en X-Y y ORTF.....	30
Figura 30: Grabadora Zoom PodTrack P4 para el conexionado de los pares estéreo.....	30
Figura 31: Variación del tono de la guitarra según el posicionamiento del micrófono.....	31
Figura 32: Configuración de los AKG C451B para la mezcla multimicrófono.....	31
Figura 33: Edición de la mezcla multimicrófono.....	32
Figura 34: Postproducción biaural aplicada a las grabaciones estéreo frontales.....	32
Figura 35: Experimento 1. Resultados.....	36
Figura 36: Experimento 2. Resultados posición 1. Zoom H3-VR.....	37
Figura 37: Experimento 2. Resultados posición 2. Zoom H3-VR.....	37
Figura 38: Experimento 2. Resultados posición 3. Zoom H3-VR.....	38
Figura 39: Experimento 2. Resultados posición 4. Zoom H3-VR.....	38
Figura 40: Experimento 2. Resultados posición 5. Zoom H3-VR.....	38
Figura 41: Experimento 2. Resultados posición 6. Zoom H3-VR.....	39
Figura 42: Experimento 2. Resultados posición 1. HATS B&K.....	39
Figura 43: Experimento 2. Resultados posición 2. HATS B&K.....	40
Figura 44: Experimento 2. Resultados posición 3. HATS B&K.....	40
Figura 45: Experimento 2. Resultados posición 4. HATS B&K.....	40
Figura 46: Experimento 2. Resultados posición 5. HATS B&K.....	41
Figura 47: Experimento 2. Resultados posición 6. HATS B&K.....	41
Figura 48: Experimento 2. Resultados posición 1. SoundMan OKM II.....	42
Figura 49: Experimento 2. Resultados posición 2. SoundMan OKM II.....	42
Figura 50: Experimento 2. Resultados posición 3. SoundMan OKM II.....	42
Figura 51: Experimento 2. Resultados posición 4. SoundMan OKM II.....	43
Figura 52: Experimento 2. Resultados posición 5. SoundMan OKM II.....	43
Figura 53: Experimento 2. Resultados posición 6. SoundMan OKM II.....	43
Figura 54: Experimento 3. Resultados.....	44
Figura 55: Experimento 4. Resultados 1.....	45
Figura 56: Experimento 4. Resultados 2.....	45

1. Introducción

1.1. Objetivos

En la realización de este proyecto final de grado se busca como objetivo principal desarrollar un estudio práctico de la grabación de sonido binaural en la guitarra clásica. Normalmente, este instrumento es grabado utilizando técnicas convencionales tanto monofónicas como estereofónicas, y cuando se pretende espacializar su sonido en una grabación, suele realizarse mediante la postproducción. Es por eso que, en este estudio, se pretende hacer uso de técnicas de grabación de este instrumento menos convencionales utilizando sistemas de captación de audio expresamente binaurales y verificar que el uso de estos sistemas puede ser o no aplicable a grabaciones útiles para consumo propio, mezcla u otras aplicaciones. Principalmente y por medio de diversos experimentos, se pretende:

- Conseguir una grabación binaural que represente de manera fiable el sonido de la guitarra clásica desde la perspectiva del músico.
- Realizar diversas grabaciones con diferentes sistemas de captación binaurales y comprobar si el oyente medio puede ubicar correctamente donde está situado el audio en el espacio en cada una de ellas.
- Enfrentar el sonido de la guitarra clásica captado por sistemas microfónicos binaurales contra una espacialización conseguida por medio de la postproducción de una mezcla estéreo convencional. Se comprobará cual de estos dos tipos de grabaciones consigue un mejor efecto tridimensional.
- Verificar cuál de los sistemas microfónicos binaurales utilizados consigue un mejor resultado de grabación bajo la interpretación subjetiva del oyente de una forma general.

Como se puede observar, se plantean diferentes cuestiones desde diferentes perspectivas, pero todas ellas plantean un objetivo común, comprobar si la utilización de sistemas microfónicos binaurales es algo válido, y estudiar y analizar las posibilidades que ofrecen en grabaciones instrumentales, en este caso, de una guitarra clásica.

Por otro lado, como objetivo más secundario e individual, se pretende realizar un trabajo de investigación sobre los temas tratados en el proyecto, que son: la guitarra clásica y el funcionamiento acústico de esta, el concepto de sonido binaural y la tecnología Ambisonic, las diferentes técnicas de grabación microfónica de la guitarra y como afecta el entorno de la cámara anecoica a esta.

1.2. Metodología

En primer lugar, se plantea realizar una fase de investigación basada en una búsqueda de información sobre las técnicas de captación habituales la guitarra clásica, como pueden ser las técnicas estereofónicas conseguidas utilizando un par de micrófonos editados posteriormente en el panorama. Posteriormente, se ampliará la investigación más allá indagando en técnicas de carácter biaural y de espacialización, para aplicarlas a grabaciones de la guitarra clásica.

Este proyecto tendrá una fase experimental que pretende contrastar las varias hipótesis planteadas, relacionadas con la espacialización del sonido de la guitarra clásica. Por tanto, se realizarán diversas grabaciones de características baurales, concepto que será expandido más adelante, pero que está directamente relacionado con la espacialización. Se usarán entonces sistemas de grabación y micrófonos acordes a estas características.

Las grabaciones se han realizado todas y cada una de ellas en la cámara anecoica del Campus de Gandía, ya que se trata de un entorno cerrado y seco, completamente libre de reflexiones, y nos permite captar el sonido sin que este sufra de ninguna reflexión de ningún tipo, y entonces nos permite analizar la espacialización de las grabaciones de una forma más detallada.

Entre las hipótesis que se plantean, las cuales están correctamente desarrolladas en el apartado 5 de la presente memoria, encontramos diversas cuestiones como, por ejemplo, si es posible captar el sonido tal y como lo escucha la persona que se encuentra tocando el instrumento (la guitarra clásica) y si una vez captado, existe alguna diferencia substancial con una grabación biaural captada de frente. Usaremos 3 sistemas de grabación tridimensionales para explorar las cuestiones planteadas, por tanto, se verificará cuál de estos 3 sistemas microfónicos espacializa mejor el sonido de la guitarra clásica y las capacidades de un oyente medio para situar cada grabación correctamente. Es por esto por lo que se analizará cada sistema microfónico de forma individual y después de forma conjunta. Posteriormente, también se recogerán los resultados obtenidos si se le plantea a un grupo aleatorio de oyentes si logran reconocer, de las grabaciones de una posición en específico, si alguna de ellas ha sido editada o postproducida para lograr un efecto biaural, y también cuál de ellas simplemente les suena más natural o mejor para ellos. Esta postproducción se realizará mediante el plugin dearVR MICRO en el software Adobe Audition aplicado a grabaciones convencionales utilizando técnicas microfónicas estéreo o mono.

Tenemos entonces un análisis cualitativo, que se realizará mediante la herramienta Forms de Google. Posteriormente se analizarán los resultados y verificaremos las cuestiones planteadas y la calidad de las técnicas de grabación baurales mediante gráficas percentiles.

1.3. Estructura

La memoria de este trabajo final de grado se estructura en 8 apartados, a los que hay que añadir las referencias bibliográficas y los anexos.

Un primer apartado donde se marcan los objetivos a alcanzar, así como la metodología que se ha seguido a cabo en el apartado práctico del proyecto.

Un segundo apartado donde se presentan los conceptos teóricos necesarios en los que se fundamentan nuestro proyecto.

Un tercer y cuarto apartado en los que se describe respectivamente el equipamiento hardware y software de forma detallada utilizado en la parte experimental de este trabajo.

Un quinto apartado donde se describen los experimentos realizados con el fin de analizar los objetivos, cuestiones e hipótesis planteadas.

Un sexto apartado donde se diseña la encuesta que se pasará a los oyentes, que servirá como objeto de análisis con el fin de justificar los objetivos del proyecto.

Un séptimo apartado donde se analizan individualmente los resultados obtenidos en la encuesta para los experimentos realizados.

El trabajo concluye con el apartado ocho donde se exponen las conclusiones obtenidas de las respuestas de la encuesta y una reflexión final generalizada sobre el desarrollo del proyecto.

2. Marco teórico

En este apartado, se realizará una fase de investigación previa a las grabaciones sobre todos y cada uno de los puntos trabajados en el proyecto. Se comenzará con una breve introducción del contexto histórico del instrumento, así como sus orígenes, para después indagar en sus componentes, características principales y acústicas. También se explicará con detalle en qué consiste el sonido binaural, sus diversas aplicaciones y como la anatomía del oído tanto interna como externa es partícipe de la recepción del sonido binaural. Posteriormente se investigará sobre el funcionamiento de la tecnología Ambisonics, sistema de captación de audio espacializado del cuál se hará uso en los experimentos. Para continuar, se realizará un breve repaso de las técnicas de captación microfónicas en estéreo habituales más generales y se finalizará exponiendo las principales características del entorno de grabación utilizado, la cámara anecoica.

2.1. La guitarra clásica

2.1.1. Antepasados y origen histórico

El origen de este instrumento musical no es del todo conocido con exactitud, debido a la insuficiencia de pruebas y datos históricos certeros, pero se puede situar su aparición, a partir de otros instrumentos derivados de cuerda, en la Edad Media europea. En esta época aparecieron varios utensilios musicales que ya se registraron bajo el nombre de guitarra, como pueden ser la guitarra morisca o latina en terrenos hispánicos (Figura 1), y otros nombres como "guitere" o "quinterne" en terrenos europeos.



Figura 1: Ilustración *Cántigas de Santa María*, músicos con guitarras moriscas.
Fuente: <https://www.alhambraguitarras.com>

Por lo general, se considera que la guitarra es un instrumento musical cuyo origen en nuestro país se debe al período en el cuál la población mayoritaria de la Península Ibérica estaba formada por árabes y/o musulmanes, e introdujeron los primeros antepasados del instrumento bajo el nombre de vihuela.

Finalmente, y obviando cambios en los antepasados (cambios de orden, fisionomía, etc.), la guitarra clásica, con sus 6 cuerdas, su clavijero mecánico de metal hecho de clavijas de hueso o de marfil y su diapasón con trastes fijos de metal, nacería en el siglo XVIII la guitarra clásica más cercana a la conocida actualmente, cuyo diseño general permanecería y sería modificado únicamente en materiales de apoyo u otras mejoras. [1]

2.1.2. Características generales y acústicas

La guitarra clásica o española se trata de un instrumento musical de la familia de la cuerda pulsada. Está formado por una caja de resonancia, una tapa armónica, un mango o diapasón formado por 17 trastes, una cabeza con su clavijero y clavijas a sus correspondientes cuerdas y seis cuerdas, tres de acero y tres de nylon, respectivamente (Figura 2).



Figura 2: Partes principales de la guitarra clásica.
Fuente: <https://www.clasesguitarraonline.com>

Por partes, la caja de resonancia, también llamada cuerpo, está compuesta por dos tapas de madera, cuyas formas son rigurosamente exactas y simétricas, y unidas por dos aros o tiras. De esta forma, se crea una caja con un cierto volumen en el cual se realzan los sonidos que emiten las vibraciones de las cuerdas cuando son estimuladas. A la tapa superior de la caja de resonancia, se le conoce como tapa armónica, y se trata de uno de los elementos más importantes, por no decir el principal, de este instrumento. Es aquí donde se propagan las vibraciones de cada cuerda hasta llegar al puente, donde estas vibraciones son forzadas a vibrar con la frecuencia acorde a la nota musical transmitida en ese instante. Esta tapa, cuando se encuentra en vibración, desplaza el aire que se encuentra dentro de la caja de resonancia y así se consigue percibir el sonido amplificado. En cuanto al material utilizado para la tapa armónica, se recomienda principalmente la madera de pinabete, ya que posee una relación de rigidez/densidad muy elevada, parámetro directamente relacionado con la velocidad de conducción del sonido. También se sugiere la utilización de madera de cedro canadiense, que proporciona menos potencia sonora, pero garantiza su resistencia. [2]

Se ha escogido este instrumento musical para la realización del proyecto dadas sus características acústicas y de resonancia, ya que resulta interesante analizar en profundidad el comportamiento de su directividad y sonido, y más en un entorno aislado como puede ser la cámara anecoica, de la cual hablaremos en profundidad más adelante.

Entrando en detalle en cuánto a la acústica del instrumento, al hacer vibrar una cuerda de la guitarra, comienza una serie de eventos en cadena, mostrados en la Figura 3.

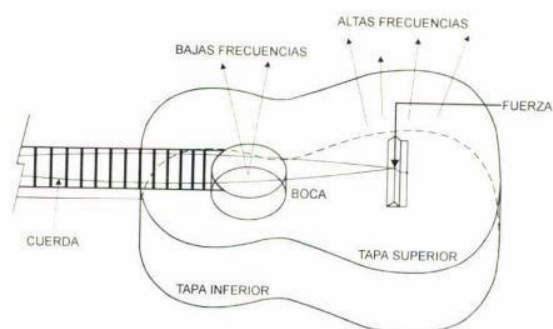


Figura 3: Cadena de eventos acústicos producidos al hacer vibrar una cuerda de la guitarra.
Fuente: [3]

Primero, el músico hace vibrar la cuerda pulsándola ya sea con los dedos o con un plectro o púa, entonces la energía provocada por esta acción es traspasada a través de la cuerda en forma de energía vibratoria que se transmite por el puente hacia las paredes de la caja y su interior. Las bajas frecuencias vibran hacia el exterior por la boca y las altas por la zona del puente a través de la tapa armónica. Las oscilaciones generadas por el cuerpo de la guitarra desencadenan el movimiento de las partículas del aire. Estas vibraciones, al caer dentro del rango audible para los seres humanos en términos de frecuencia (el número de oscilaciones que ocurren en un segundo), son reconocidas como sonido. Dicho sonido se propaga en el entorno y posteriormente es captado por los oídos, siendo percibido e interpretado por el cerebro del intérprete. Esta información es utilizada por el músico para ajustar y perfeccionar su ejecución, ya que el sonido se ve afectado por las características del espacio en el que se encuentra. Por otro lado, en la Figura 4 se ven representados de forma visual los modos de vibración de la tapa armónica de una guitarra clásica, en la que las líneas continuas marcan contornos de igual amplitud y, se puede observar que el máximo modo de vibración acumulado ocurre en las zonas más céntricas de la tapa. [3]

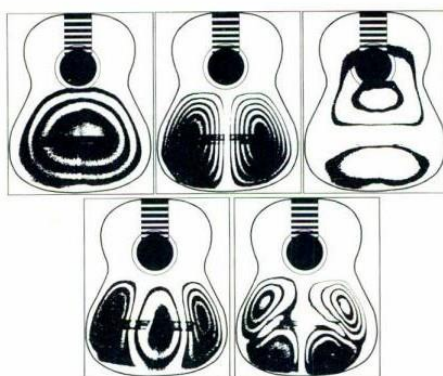


Figura 4: Modos de vibración de una guitarra clásica. Fuente: [3]

Precisamente por esta información en la que, básicamente se resume que este instrumento radia el sonido y lo transmite principalmente por la zona central y delantera, se justificará más adelante las diferentes configuraciones de micrófonos utilizadas y la espacialización del sonido provocado por la guitarra, y como afecta la posición en la que se encuentra el oyente respecto al músico.

2.2. Sonido baural

El sonido baural es una técnica de grabación y reproducción de sonido que busca recrear la experiencia auditiva tridimensional y espacial. Se basa en la forma en que nuestros oídos perciben el sonido de manera natural, teniendo en cuenta las diferencias sutiles en tiempo y volumen que existen entre ambos oídos.

Para conseguir grabaciones de sonido baural se necesita utilizar dispositivos microfónicos específicos, en los cuáles lo más común es utilizar un modelo de una cabeza humana con su pabellón (oreja) y canal auditivo, con un par de micrófonos especialmente diseñados para esta labor colocados en la posición donde se sitúa el tímpano (Figura 5).



*Figura 5: Prototipo de cabeza de maniquí acústico, o "Dummy".
Fuente: Gotham Audio Corporation*

Las grabaciones baurales funcionan siguiendo la siguiente premisa; cuando un ser humano escucha una fuente de sonido natural proveniente de cualquier dirección, la entrada a sus orejas son solamente dos señales unidimensionales, las presiones del sonido a los tímpanos. Si pudiésemos recrear esas mismas presiones a los tímpanos del oyente tal y como habrían ocurrido en directo, podemos reproducir la experiencia auditiva original, incluyendo también información direccional, así como reverberación. [4]

La técnica de grabación baural con reproducción mediante auriculares es actualmente considerada como el enfoque más preciso en términos de representación espacial del sonido. La capacidad de recrear con precisión las ubicaciones de las fuentes de sonido y el entorno de la sala es sorprendentemente fidedigna.

Con frecuencia, los sonidos pueden ser reproducidos de manera envolvente alrededor de la cabeza, ya sea desde el frente, detrás, arriba, o abajo, entre otros. Esta experiencia puede engañar fácilmente a la mente, haciendo creer que se está escuchando un instrumento real resonando en la propia sala de escucha.

A continuación, se va a analizar cómo funciona exactamente una grabación de sonido binaural. Una cabeza o "Dummy" artificial acústica está diseñada para captar el sonido de igual manera que lo haría una cabeza humana (Figura 5). Esta cabeza está diseñada de forma que sea un obstáculo para las ondas sonoras desde las frecuencias medias hasta las altas, ya que presentan una longitud de onda inferior al tamaño de la propia cabeza. Muchos factores de la cabeza acústica (o de una cabeza humana) alteran la percepción del sonido cuando este llega, como hemos dicho la propia cabeza bloquea frecuencias demasiado altas, y en contraste a esto, los lados crean una subida de presión, es decir, un aumento de la respuesta en frecuencia, para las frecuencias medias.

Por otro lado, la anatomía del propio oído humano también afecta a como percibe el sonido el cerebro (Figura 6).

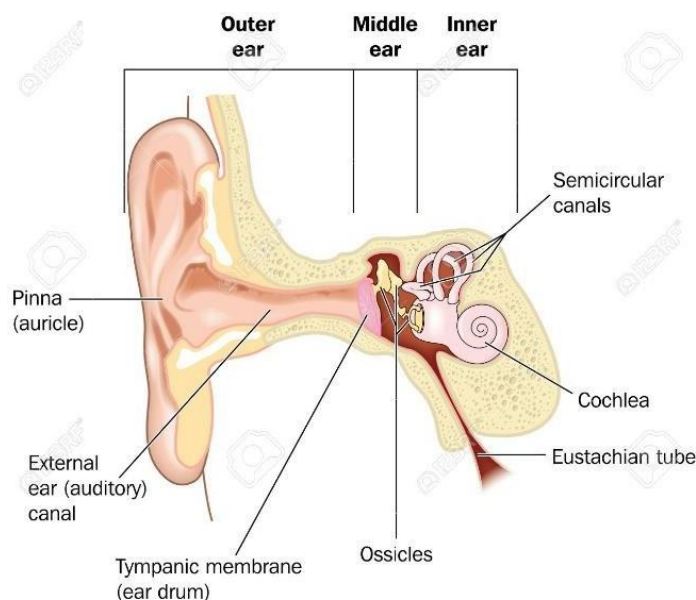


Figura 6: Anatomía del oído humano.
Fuente: <https://es.123rf.com>

La aurícula, o "pinna", que es la parte exterior de la oreja hecha de cartílago, también afecta a la respuesta en frecuencia del sonido reflejándolo dentro del conducto auditivo externo. Estas reflexiones combinadas con el sonido directo pueden causar cancelaciones de fase en algunas frecuencias. En resumen, se podría decir que la cabeza y las orejas actúan como un ecualizador que cambia en función de la dirección de llegada del sonido. Cabe mencionar también que, cuando se diseñan micrófonos binaurales, el diseño de las orejas normalmente omite el tímpano, ya que la resonancia de este no afecta al posicionamiento de la fuente para el cerebro.

Cada oreja capta un espectro diferente de fase y amplitud, ya que la propia cabeza actúa como barrera y se crean unas diferencias interaurales que pueden variar según la ubicación de la fuente respecto de la cabeza. Cuando las señales de una cabeza artificial acústica son reproducidas a través de unos auriculares, se consiguen percibir

las mismas diferencias interaurales que el micrófono capta. Este fenómeno genera la ilusión en la que el sonido se capta desde la posición de la fuente original y eso es la principal base del sonido binaural. [5]

Curiosamente, al sonido binaural se le atribuyen propiedades terapéuticas si es reproducido en unas determinadas frecuencias de manera que se convierten en "pulsos binaurales" para problemas como la migraña o la falta de sueño. Funcionan como una ilusión generada por el cerebro cuando este escucha dos tonos con una frecuencia ligeramente distinta al mismo tiempo. En este proceso el cerebro interpreta los dos tonos como un pulso único. Cuando se escucha un pulso binaural, nuestra actividad cerebral iguala la frecuencia iniciada por la frecuencia del pulso, a esto se le llama *Frequency-Following Response* (FFR). [6]

Como apunte, es necesario mencionar que la investigación de los pulsos binaurales tiene opiniones mixtas, y muchos estudios sufren de limitaciones metodológicas. Algunas investigaciones han fallado a la hora de encontrar efectos significativos de los pulsos binaurales en la actividad cerebral y estos efectos pueden variar según individuos, ya que algunas personas son más sensibles que otras. Se llevó a cabo un estudio en el Departamento de Ciencias del Comportamiento de la UNED, en el cual se halló un grado de efectividad medio a la hora de utilizar estos pulsos binaurales para tratar de reducir niveles de ansiedad o migrañas. Se realizó un tratamiento de dos semanas de 20 minutos de escucha a un número determinado de pacientes, y tan solo el 26% de ellos aseguró que su nivel de ansiedad y dolor se redujo gracias a estos pulsos. Por tanto, no fue suficiente para demostrar la eficacia de esto, o si fue pura sugestión.

2.3. Tecnología Ambisonics

El término Ambisonics, se trata de una marca registrada y su tecnología y estándares pertenecen a la organización Ambisonics Association y está respaldada por la Audio Engineering Society (AES).

Principalmente, Ambisonics es una técnica de grabación y de reproducción de sonido que busca capturar y reproducir un campo de sonido tridimensional completo. Se basa en el concepto de sonido envolvente y permite una reproducción inmersiva del sonido proveniente de todas las direcciones, utilizando micrófonos especialmente diseñados para esta tarea.

Si nos retomamos a la década de los 70's, la tecnología Ambisonics tiene sus orígenes mediante experimentos con otras técnicas convencionales de grabación en estéreo, como puede ser el par Blumlein, que es una variación de la técnica X-Y. Esta utiliza dos micrófonos figura 8 (bidireccionales) con sus cápsulas coincidentes ubicadas formando un ángulo de 90° para que los diafragmas de cada micrófono coincidan sobre el mismo eje (Figura 7).

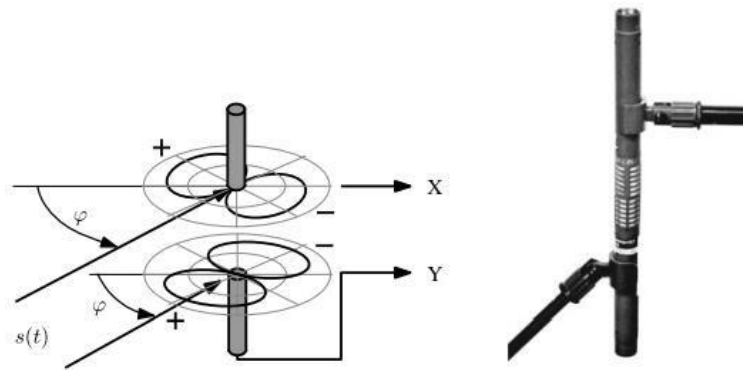


Figura 7: Técnica Blumlein. Fuente: [7]

Esta técnica es combinada con otra llamada técnica estéreo M-S (*Mid-Side*), pero variando su colocación para que dos pares cardioides formen un ángulo de 180°. De esta forma, se eliminan las características bidireccionales con la suma de su señal, y las características omnidireccionales por la resta.

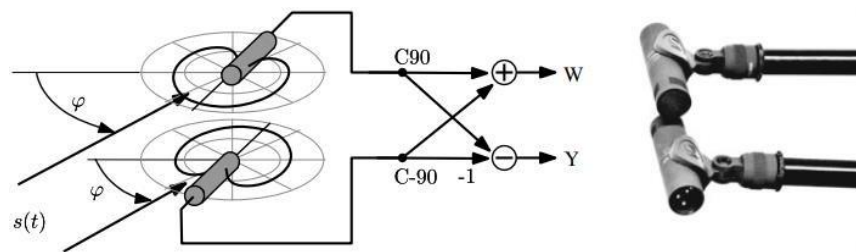


Figura 8: Variación de la técnica M-S con dos cardioides formando un ángulo de 180°. Fuente: [7]

Estos dos experimentos, fueron el primer acercamiento a la tecnología envolvente Ambisonics, para conseguir patrones específicos direccionales. Será más adelante cuando aparezca la técnica Ambisonics de primer orden (FOA), que será la utilizada en las grabaciones de este mismo proyecto. [7]

Cómo hemos explicado antes, esta tecnología surgió en alrededor de 1970, pero no fue hasta hace relativamente poco que se comenzó a comercializar por el auge de la industria que se encarga de desarrollar la realidad virtual, que necesita de un audio correctamente espacializado en los 360° en algunas de sus aplicaciones. Esta es la base de un sistema ambisónico, una esfera de 360° en la que el sonido proviene de todas las direcciones a un punto céntrico común, denominado punto óptimo.

Ambisonics es la tecnología vanguardista para el audio envolvente o sistemas "Surround", que también generan una imagen de audio espacializada utilizando un conjunto de altavoces rodeando al receptor, puede ser 5.1, 7.1, etc. Lo que diferencia a Ambisonics de la tecnología tradicional de audio envolvente, es que esta no envía la señal de audio a altavoces concretos, si no que se decodifica la señal recibida para que esta pueda ser enviada a cualquier grupo de altavoces deseados, en la dirección deseada. Ambisonics se ha establecido como el estándar en audio 360° y realidad virtual debido a sus ventajas distintivas. A diferencia de los formatos envolventes convencionales, Ambisonics logra una reproducción de sonido suave y continua mientras se gira el campo de sonido, evitando saltos abruptos entre altavoces. Además, esta tecnología distribuye el sonido de manera equilibrada en una esfera tridimensional, a diferencia de los sistemas envolventes tradicionales que tienden a

enfocarse en el sonido frontal. Por último, esta técnica supera las limitaciones de estos sistemas al ofrecer una representación completa del sonido, incluyendo la dimensión vertical, es decir, la elevación, permitiendo una experiencia auditiva más inmersiva y realista.

En las grabaciones de este proyecto, utilizaremos un sistema de grabación Ambisonics de primer orden, que hace uso de 4 canales. También se le conoce como formato B. Estos canales se pueden nombrar como W, X, Y y Z, y representan un patrón polar de micrófono específico en direcciones diferentes (Figura 9), en concreto estos:

- W: micrófono de presión con patrón omnidireccional.
- X : micrófono de gradiente de presión con patrón bidireccional hacia delante.
- Y: micrófono de gradiente de presión con patrón bidireccional hacia la izquierda.
- Z: micrófono de gradiente de presión con patrón bidireccional hacia arriba.

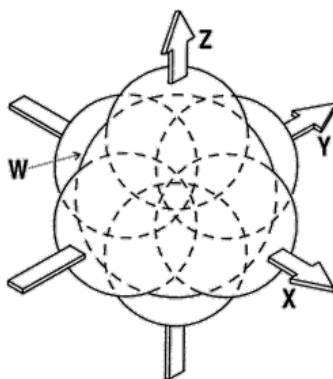


Figura 9. Configuración de patrones polares en el sistema Ambisonics de primer orden.
Fuente: [7]

Como se puede observar (Figura 9), los 4 canales no cubren todas las direcciones de por sí, pero haciendo uso de las fases invertidas se puede cubrir el patrón opuesto a cada canal, y la combinación de todas las fases de todos los patrones resulta en una esfera completa. Por otro lado, la ganancia de captura varía según la dirección, siendo esta máxima en la parte trasera y en la parte frontal, que irá disminuyendo a medida que nos alejemos de estos ejes.

Esto se relaciona con la técnica M-S explicada anteriormente ya que M representa un patrón omnidireccional y S representa un patrón figura 8, entonces añadiendo el eje Z que proporciona la elevación y el X que proporciona la profundidad, y en conjunto con las fases positivas y negativas se consiguen cubrir los 360°.

Continuando con la explicación de este sistema, existen dos sub-formatos de grabación dentro del formato B Ambisonics (primer orden), que son AmbiX y FuMa (*Furse-Malham*). La diferencia entre los dos recae en el orden en el cual están dispuestos los 4 canales, siendo WYZX para AmbiX y WXYZ para FuMa. En este proyecto usaremos el estándar AmbiX.

Cuando llega la hora de grabar hay que tener en cuenta que un micrófono Ambisonics está diseñado con cápsulas (4 si es primer orden) encapsuladas muy cercanas la una a la otra y están configuradas inicialmente como patrones polares cardioides, que

constituirían el formato A. Si se desea utilizar el formato B, será necesario codificarlo utilizando una matriz simple al formato B que utiliza los canales WXYZ con los patrones antes descritos, normalmente utilizando un software externo instalable que viene parejo al micrófono adquirido. Cada canal se codifica de manera independiente como una pista mono, siguiendo una dirección específica, y luego los resultados son combinados. Por otro lado, para reproducir el contenido de una sesión Ambisonics se deberá decodificar la señal de los 4 canales en direcciones concretas o grupo de altavoces concretos. [8]

2.4. Técnicas microfónicas de grabación

A continuación, vamos a desarrollar brevemente algunas de las técnicas de grabación microfónicas más convencionales, ya que, a fin de cuentas, el proyecto se basa en experimentos con grabaciones a instrumentos (concretamente de la guitarra clásica) y, no solo se han utilizado sistemas de captación binaurales o tridimensionales. Como se ha mencionado en la metodología, también se ha grabado la guitarra clásica utilizando técnicas de grabación multimicrófono y estéreo ya que después estas serán postproducidas para recrear un efecto binaural. Es por eso que es necesario dedicar un espacio en el marco teórico a estas grabaciones, mencionando también algunas metodologías aplicables para guitarra clásica. Principalmente se describirán técnicas estereofónicas, en las que se crearán una imagen estéreo por las diferencias en fase o nivel con las que el sonido llega a cada micrófono. Se recomienda usar una pareja de micrófonos idénticos, aunque si existieran diferencias en el par de micrófonos elegidos, es posible compensarlas manipulando la ganancia del preamplificador.

2.4.1. Par espaciado

La técnica del par espaciado, también llamada técnica A-B estéreo es una técnica de captación microfónica estereofónica en la que se configuran los micrófonos separados de forma paralela en una cierta distancia (Figura). El efecto estéreo es conseguido mediante las diferencias de tiempo, porque la onda de presión acústica tendrá un mayor tiempo de recorrido hasta el micrófono, que se encuentre a una distancia mayor de la fuente. Esta distancia de separación puede ser calculada, de hecho, la diferencia de separación mínima entre los dos micrófonos deberá ser por lo menos $\lambda/4$ de la frecuencia mínima a cuál se esté realizando la grabación. Se debe tener en consideración que normalmente, las frecuencias menores de 150 Hz son complejas de localizar en las grabaciones, por tanto, una distancia de separación adecuada estaría entre los 40 y los 60 cm.

$$f_{\min} = 150 \text{ Hz} \rightarrow \lambda_{\max} = 2,28 \text{ m} \rightarrow d_{\max} = 0,57 \text{ m}$$

Esta distancia es óptima para fuentes relativamente grandes, pero si se desea captar una fuente de un tamaño más reducido se deberán utilizar distancias más pequeñas. Si la distancia no está debidamente marcada y es demasiado larga, se generará una especie de "vacío central" en la configuración, por otro lado, si la distancia es demasiado pequeña, se generará una grabación prácticamente monofónica ya que a los dos micrófonos les llegará casi la misma información.

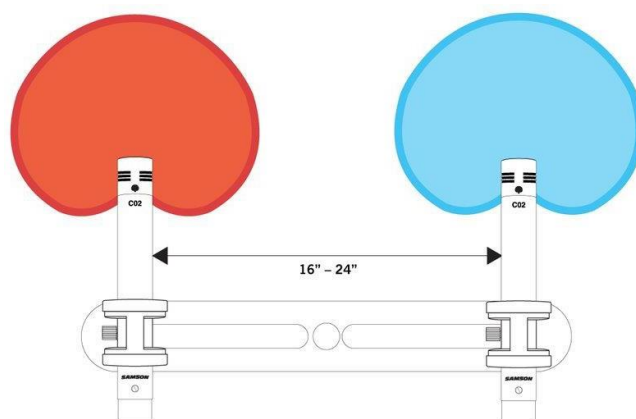


Figura 10: Configuración de un sistema par espaciado.

Fuente: <https://produccionsonora.com>

En esta técnica de grabación se suelen utilizar micrófonos omnidireccionales, aunque también es posible utilizar micrófonos con patrones cardioides, ya que, teniendo en cuenta el efecto de proximidad entre ellos y procediendo con cautela, evitaremos la captación de reflexiones producidas en la parte posterior de la sala en la que se está grabando.

2.4.2. Par coincidente

Las técnicas de par coincidentes también son técnicas estereofónicas de grabación, con la diferencia de que aquí las cápsulas de los micrófonos están colocadas de manera que coincidan en el mismo punto, de ahí su nombre. De esta manera, si los micrófonos se sitúan en el mismo punto, la diferencia de tiempos de llegada será cero independientemente de donde esté situada la fuente sonora. Contrariamente a la técnica del par espaciado, en esta configuración la imagen estéreo no se consigue por la distancia de separación (diferencia de tiempos y de intensidades entre micrófonos), sino más bien por el ángulo de incidencia de cada canal y por su diagrama polar (solo diferencia de intensidades entre micrófonos). Al no tener esa dependencia de la distancia existe una ventaja, pero también hace que no existan diferencias de tiempo y por tanto poca espacialización en la imagen estéreo.

X-Y Estéreo

La configuración estéreo X-Y es una variación de la técnica de pares coincidentes en la que se utilizan dos cápsulas de micrófono con un patrón estrictamente cardiode, situadas en el mismo punto (Figura 11). El ángulo que los dos micrófonos deben formar para esta configuración suele ser de 90° , aunque también se han utilizado ángulos de 120° y de 135° . Existe una relación que dice que, cuanto mayor sea el ángulo de separación y más estrecho el diagrama polar cardiode de los dos micrófonos, se conseguirá una imagen estereofónica con más apertura. Como en la anterior configuración, también puede aparecer un vacío en la imagen estereofónica, pero esta vez en lugar de la distancia es el ángulo el cual no debe ser demasiado grande. En resumen, cuánta más distancia exista entre las cápsulas, mayor será la apertura y, por ende, el ángulo.

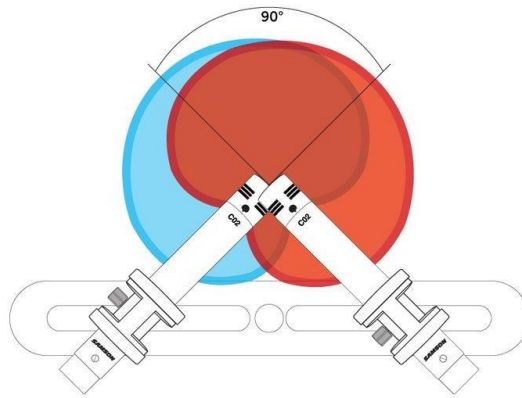


Figura 11: Configuración par coincidente en X-Y.
Fuente: <https://produccionsonora.com>

La imagen estéreo está formada por la combinación de los dos patrones cardioide dividida en partes iguales a la derecha y a la izquierda. Una vez más esta imagen es creada por las diferencias de nivel entre las cápsulas. Como estas están muy juntas, casi en el mismo punto, la imagen estéreo generada es más cerrada, por lo que es más efectivo grabar tomas cercanas a la fuente, como por ejemplo a la hora de grabar una guitarra clásica o acústica.

M-S Estéreo

Otra técnica estereofónica perteneciente al grupo de los pares coincidentes es la técnica M-S, cuyo nombre está relacionado con la captación de cada micrófono utilizado (Figura). Uno de ellos (Figura 13) es un micrófono cardioide orientado hacia la fuente que capta la zona más central (*Mid*) y el otro es un micrófono con patrón bidireccional volteado situado encima que cubre los laterales (*Side*), tiene un ángulo de 90° respecto a la fuente.



Figura 12: Ejemplo de dos micrófonos configurados como M-S.
Fuente: <https://music.tutsplus.com>

Al combinar los patrones cardioide y bidireccional (o figura 8) de los dos micrófonos obtenemos un patrón que cubre tanto la zona central como los laterales, donde en cada uno tenemos las señales M y S.

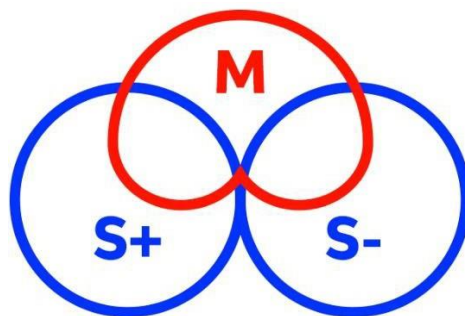


Figura 13: Patrones polares de una configuración M-S.
Fuente: <https://www.easa-ec.com>

En este caso, se puede adquirir la imagen estereofónica calculando las señales de los canales L y R, que pueden obtenerse mediante las siguientes expresiones:

$$L = \frac{M+S}{k} \quad R = \frac{M-S}{k}$$

En estas dos expresiones, k se trata de un factor de corrección dependiente de la fuente. Para señales coherentes, como por ejemplo una voz uniforme centrada, k tendría un valor de 2 que logarítmicamente equivale a una corrección de -6 dB. Por otro lado, para señales no coherentes, como una batería o un grupo de instrumentos, k tomaría un valor de $\sqrt{2}$, equivalencia de -3 dB.

Como ventaja principal de esta configuración, encontramos que es posible controlar la cobertura estéreo remotamente sin tener que modificar la posición de los dos micrófonos, solo la relación de señal previamente mencionada. Cuánto más alto sea el valor de M en comparación con el valor de S, la cobertura estéreo será más pequeña, y viceversa para una imagen estéreo más amplia.

2.4.3. Par ORTF

En esta técnica situamos dos micrófonos con patrón polar tipo cardioide separados normalmente alrededor de 17 cm y de forma que se forma un ángulo de aproximadamente 110° (Figura 14). Esto coincide con la distancia interaural, que viene a ser la distancia de nuestra cabeza que separa nuestras orejas. Esta separación de los micrófonos precisamente pretende emular mediante la directividad y el ángulo la diferencia de nivel provocada por la cabeza. Con esta configuración se reduce la captación de las características acústicas de la sala y nos permite colocar el sistema de micrófonos algo más alejado de la fuente de lo normal y obtener mayor cobertura estéreo. Las siglas ORTF se desglosan en "Office de Radiodiffusion Télévision Française". [9]

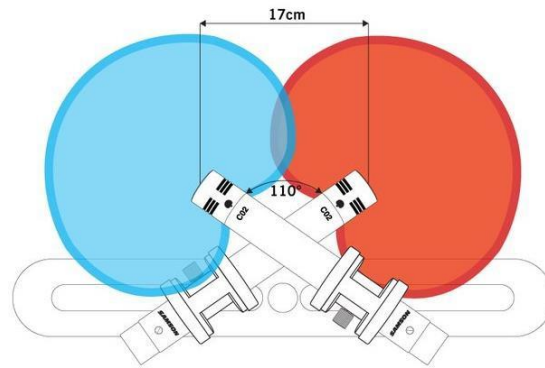
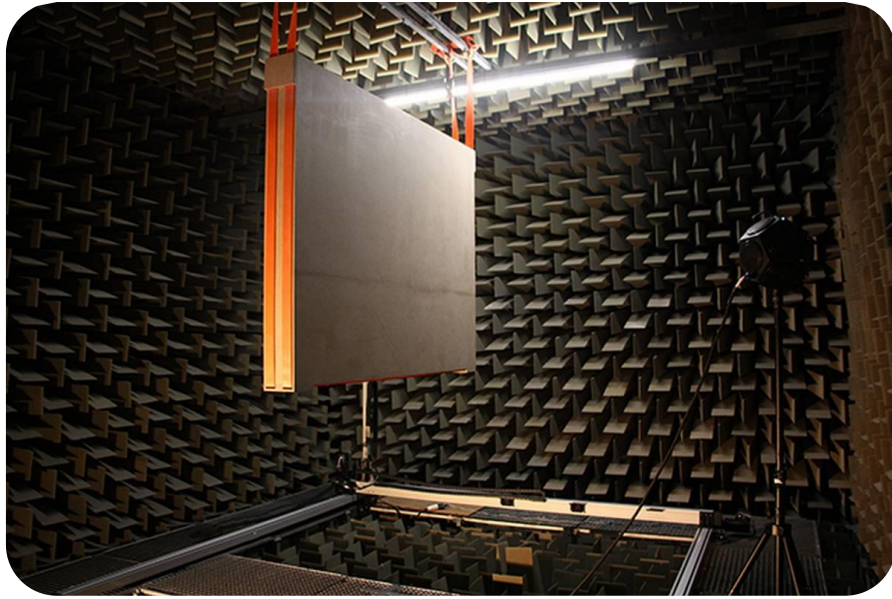


Figura 14: Patrones y configuración de un par ORTF.
Fuente: <https://produccionsonora.com>

2.5. La cámara anecoica

Todas y cada una de las grabaciones realizadas en este proyecto se han llevado a cabo en la cámara anecoica del Campus de Gandía de la Universidad Politécnica de Valencia (Figura 15). Una cámara anecoica es un tipo de sala construida de forma que cualquier tipo de reflexión producida por ondas acústicas, sonoras e incluso electromagnéticas sea absorbida casi en su totalidad en las paredes, techo y suelo del recinto. Como su nombre indica, en definitiva, es una sala donde no existe el eco, que a fin de cuentas son reflexiones del sonido producido por las superficies. La sala, que también se encuentra aislada completamente de fuentes de ruido externas, intenta simular la condición acústica ideal del campo libre y logra reproducir el sonido en el absoluto vacío. Se utiliza sobre todo para realizar mediciones exactas del sonido, calibrar fuentes sonoras, medir directividad, potencia, caracterización de altavoces, instrumentos, etc.

Estas cámaras están recubiertas con materiales absorbentes como pueden ser la espuma porosa, fibra de vidrio o lana de roca en forma de cuñas piramidales, para que las frecuencias que se escapan de ser absorbidas se queden rebotando en estas cuñas infinitamente hasta desaparecer. El rango de frecuencias que es capaz de absorber una cámara anecoica correctamente diseñada va desde los 200 Hz hasta 20 kHz, y absorben alrededor del 95%, siendo las frecuencias más complejas de mitigar las más bajas. Algún ejemplo de cámaras anecoicas más eficaces son la cámara de Microsoft en Redmond y la cámara de Orfield en Minnesota, las dos en Estados Unidos. [10]



*Figura 15: Cámara anecoica de la EPSG.
Fuente: <https://cadenaser.com>*

Se ha escogido este lugar para realizar las grabaciones ya que, al no existir ningún tipo de reflexión del sonido, resulta una sala ideal para evaluar la espacialización de una grabación de forma íntegra. Además, no será necesario tomar en consideración estricta la distancia de micrófonos hacia la fuente, ya que estas distancias normalmente se marcan respecto a una sala convencional con reverberación natural, cosa que no existe en una cámara anecoica. Tan solo tendremos que ajustar el nivel para compensar la variación de distancia entre posiciones del micrófono.

3. Hardware

A continuación, se va a realizar un breve repaso del hardware utilizado para las grabaciones, así como sus especificaciones técnicas, aplicaciones y características generales. Principalmente nos centraremos en los sistemas microfónicos, ya que constituyen la base de este proyecto.

3.1. Micrófono AKG C451B

Para las grabaciones con toma multimicrófono y estéreo convencionales que se han realizado además de las binaurales, contamos con un par de micrófonos AKG modelo C451B (Figura 16). Estos micrófonos son una reinención contemporánea del modelo C451 originario de 1969, el cual está diseñado como el primer modelo de AKG que utiliza amplificación FET (utiliza transistores de efecto de campo) y cápsulas intercambiables. Este equipo utiliza normalmente cápsulas CK-1 de patrón cardioide, aunque es posible encontrar modelos con capsulas CK-2, con patrón omnidireccional. [11]



Figura 16: Par de micrófonos modelo AKG C451B.
Fuente: <https://thumbs.static-thomann.de>

Pero el modelo utilizado en estas grabaciones ha sido el C451B, micrófono de condensador de pequeño diafragma con un comportamiento acústico prácticamente idéntico al de su predecesor que fue un éxito de ventas en su época. Con un sonido abierto y aireado, un límite de sobrecarga bastante elevado y una ingeniería general mejorada, se trata de un diseño más que apto para las grabaciones. Tiene una capacidad de nivel de presión sonora de 155 dB SPL, permitiendo así posicionarlo cerca de fuentes sonoras de alta energía sonora sin que llegue a distorsionar. También dispone de un filtro paso alto de 12 dB por octava regulable que previene de la distorsión de baja frecuencia provocada por sonidos de viento o vibración. Por otro lado, incorpora un preamplificador configurable sin transformador que proporciona una distorsión muy baja, más fiabilidad y menos peso general. [12]

La respuesta en frecuencia y el patrón polar de este micrófono se muestran en la Figura 17.

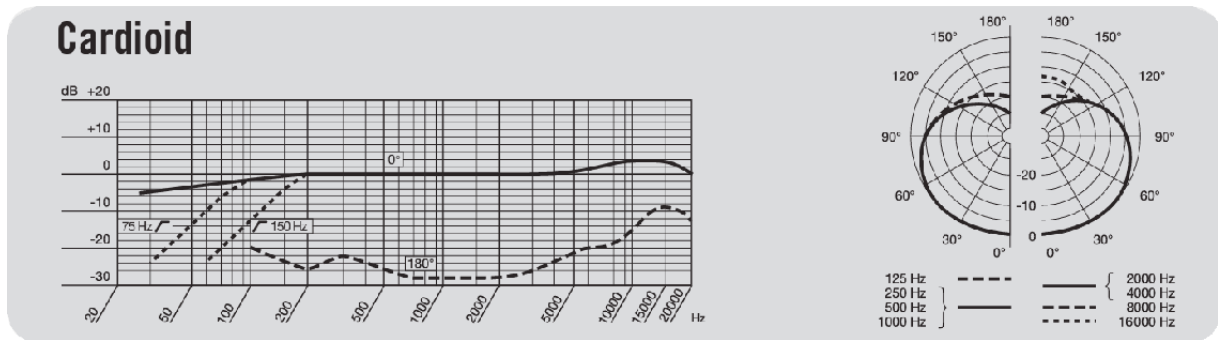


Figura 17: Respuesta en frecuencia y patrón polar del micrófono AKG C451B. Fuente: [12]

Para las grabaciones de este proyecto se han utilizado 4 micrófonos AKG C451B combinados en distintas configuraciones y técnicas.

3.2. SoundMan OKM II

Los micrófonos SoundMan OKM II son un equipo estéreo binaural *in-ear* formado por dos cápsulas de patrón omnidireccional de condensador recubiertos con protección anti-viento que se colocan en el pabellón auditivo, como si de unos auriculares se tratasen (Figura 18). Permiten grabaciones musicales con carácter espacializado y son especialmente útiles para grabaciones de música en directo. Se pueden utilizar también como micrófono de zona de presión y como micrófonos Lavalier o de solapa. Funcionan mediante conector TRS y se conectarán a una grabadora portátil para almacenar las 2 pistas de audio captadas.



Figura 18: Micrófonos binaurales SoundMan OKM II. Fuente: <https://shop.acrdirect.ch>

En nuestro caso utilizaremos los SoundMan OKM II como micrófonos binaurales colocados en la cabeza, cuya grabación se corresponde con la percepción subjetiva del sonido del usuario y si se reproduce, simula un espacio tridimensional. Los micrófonos están recubiertos de una espuma permeable coloreada donde se indica que la azul se corresponde a la oreja izquierda y la roja a la oreja derecha. [13]

Se utilizarán estos micrófonos para realizar la captación del sonido de la guitarra clásica desde la perspectiva del músico y desde la perspectiva del oyente.

3.3. Maniquí acústico biaural HATS Brüel & Kjaer

Como segundo sistema de captación microfónica biaural se ha utilizado el maniquí acústico o "Dummy" de Brüel & Kjaer HATS modelo 4100 (Figura 19). Diseñado inicialmente para captar el ruido del interior de vehículos para su evaluación, también se utiliza para optimizar sonoramente aparatos de consumo, herramientas eléctricas, equipos marinos, etc. Por otro lado, otra de sus aplicaciones es la evaluación de auriculares y equipos de protección auditiva, todo porque simula la forma de las orejas, cabeza y torso superior de un ser humano.



Figura 19: Micrófono biaural HATS de B&K, modelo 4100

El equipo dispone de dos micrófonos, fácilmente instalables o desmontados destornillándolos, colocados a las entradas de los canales auditivos externos del maniquí, simulando de esta manera la separación espacial que existe de una oreja a otra de una cabeza humana (distancia interaural) y asegurando una señal que también incluya las interferencias producidas por la propia cabeza y el torso superior. Por otro lado, el pabellón auditivo y toda la parte exterior de las orejas están fabricadas con silicona para así imitar lo máximo posible el cartílago de las orejas de una persona, así como los patrones de directividad propios de un sistema auditivo humano. También, con el sistema de grabación viene incluido un chaleco de cobertura para simular los cambios de reflexión producidos desde el cuerpo hasta los hombros para obtener también una directividad óptima.

Los micrófonos que se encuentran colocados en cada oreja del maniquí son también de Brüel & Kjaer, modelo Type 4191 de media pulgada. Cuentan con un patrón polar omnidireccional, una sensibilidad de 50 mV/Pa, y una capacidad de nivel de presión sonora de 148 dB SPL. Su respuesta en frecuencia se muestra en la Figura 20.[14]

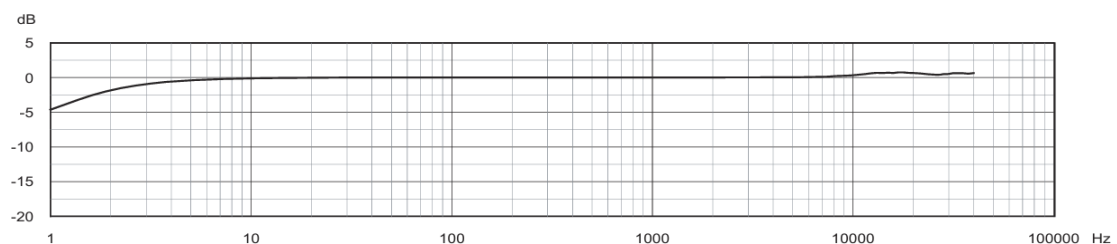


Figura 20: Respuesta en frecuencia de los micrófonos Type 4191 del maniquí acústico. Fuente [14]

Este sistema microfónico biaural será utilizado para captar las grabaciones de la guitarra clásica en diferentes posiciones de la cámara anecoica y verificar así su funcionamiento a la hora de espacializar el sonido correctamente.

3.4. Grabadora Ambisonic Zoom H3-VR

En el marco teórico de la presente memoria, se ha desarrollado el origen y funcionamiento de la tecnología Ambisonics, pues bien, para las grabaciones de este proyecto se ha utilizado una grabadora Ambisonics marca Zoom modelo H3-VR Handy Recorder (Figura 21). Esta grabadora ofrece la posibilidad de capturar el audio en una esfera de 360° en formato ambisónico, estéreo y biaural.



Figura 21: Grabadora Ambisonic Zoom H3-VR.
Fuente: zoomcorp.com

En cuanto a sus características podemos mencionar su capacidad de nivel de presión sonora de hasta 120 dB SPL, grabando en cualquier dirección, incluyendo elevación y profundidad, a una resolución de 24 bits/96 kHz de máxima. Dispone de 4 cápsulas de micrófono unidireccionales colocadas en un array Ambisonic y la grabación puede ser decodificada en formato Ambisonic A y B, este último admitiendo los estándares AmbiX y FuMa.

El sonido grabado por cada cápsula de micrófono se guarda de forma individual y se puede gestionar y editar como según convenga la situación, ya sea para una escucha biaural, con un sistema 5.1 o con un sistema estéreo convencional (Figura 22).

Como se ha desarrollado previamente, esta grabadora permite utilizar tanto el formato A de Ambisonics como el formato B. En el formato A se graban directamente los datos de audio en la configuración unidireccional de los micrófonos, por tanto, este formato no es capaz de reproducir el audio en una esfera de 360° completa. Por otro lado, en el formato B (que es el utilizado en este proyecto), se recogen los datos grabados del formato A para procesarlos y enviarlos a los 4 canales WXYZ desarrollados en el marco teórico, para reproducir una imagen ambisónica de audio completa. Después pueden ser procesados tanto en AmbiX como en FuMa.

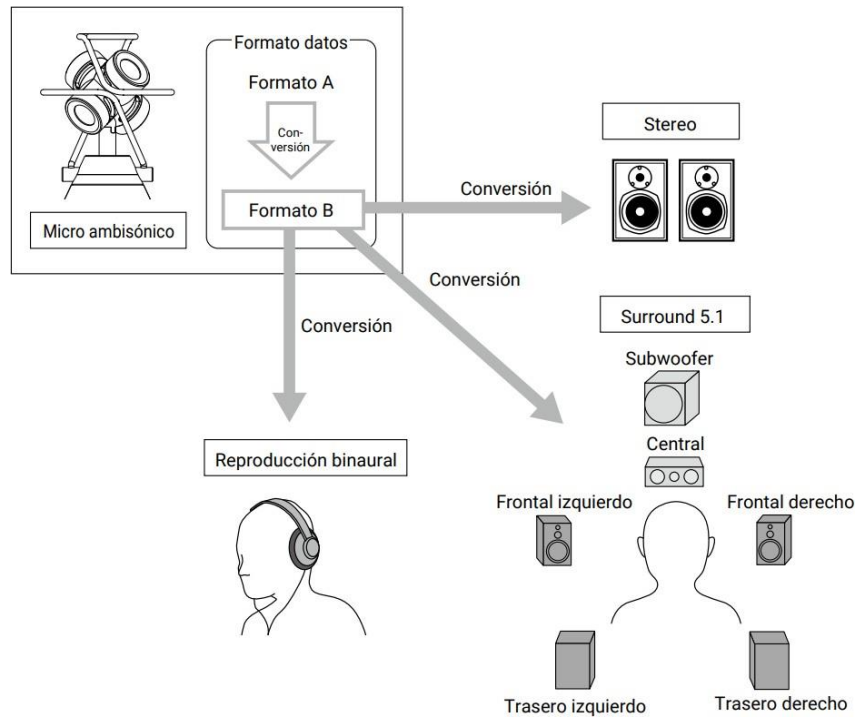


Figura 22: Resumen del funcionamiento de la grabadora Zoom H3-VR.
Fuente: zoomcorp.com

4. Software postproducción

A continuación, se va a realizar una breve descripción del software utilizado para la postproducción de algunas grabaciones, que será necesaria para la realización de las encuestas. Posteriormente y como experimento final se valorará al oyente la capacidad de distinguir sonido binaural grabado con las técnicas mencionadas, frente a un sonido binaural postproducido, para así validar estas técnicas de grabación o, por el contrario, demostrar que es más efectiva la postproducción para conseguir el efecto de espacialización.

4.1. Adobe Audition

El software utilizado para la edición y postproducción de las grabaciones ha sido Adobe Audition, concretamente la versión de 2019, una DAW (*Digital Audio Workstation* - Estación de trabajo de audio digital) desarrollada por Adobe Systems utilizada principalmente para la edición, mezcla, grabación y restauración de archivos de audio (Figura 23). Tiene su origen en Cool Edit Pro, un software de edición de audio desarrollado por Syntrilium en los 90's, hasta que en 2003 Adobe Systems realizó la compra de Syntrilium y rebautizó el software como Adobe Audition.

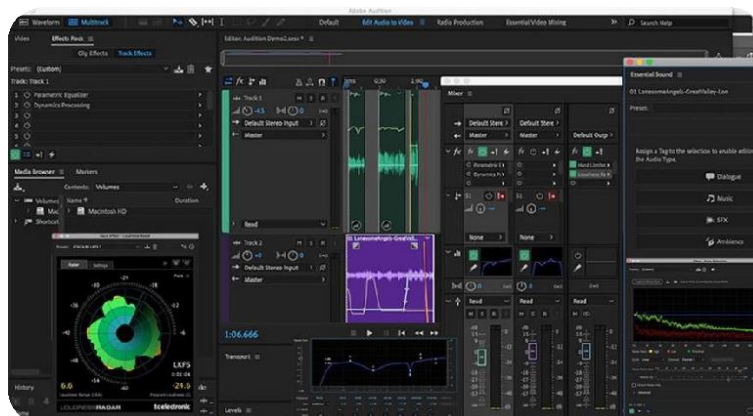


Figura 23: Interfaz de la DAW Adobe Audition

Entre las diversas funcionalidades del software encontramos la edición en forma de onda, la mezcla y enrutamiento de múltiples pistas de audio, la eliminación de ruido y restauración de audio, la edición multipista y la aplicación de efectos de procesamiento de audio y dinámica, entre otras.

Principalmente para este proyecto se han utilizado las herramientas de variación en el panorama, la edición en forma de onda y la edición multipista. También se ha utilizado la variación de ganancia y volumen en algunas pistas y eliminación de ruidos de fondo no deseados. Por último, se ha hecho uso de la herramienta de normalización de sonoridad, concretamente a un nivel de -16 LUFS (*Loudness Units Relative to Full Scale*). Se ha elegido este nivel de normalización ya que, según la normativa vigente relacionada con la sonoridad de los audios, se debe seguir que el habla debe estar normalizada a -18 LUFS y la música a -16 LUFS, entre otras consideraciones para distintos formatos. [15]

4.2. Plugin biaural dearVR

Adicionalmente a las herramientas disponibles de Adobe Audition, se ha utilizado un plugin instalable externo propio de Dear Reality, denominado dearVR MICRO. Este plugin se ha utilizado aplicándolo a grabaciones de audio convencionales en estéreo situándolas en la posición deseada, es básicamente una herramienta para espacializar el audio.



Figura 24: Interfaz del plugin dearVR MICRO.
Fuente: Dear-reality.com

Como podemos observar en la Figura 24, el plugin dearVR MICRO dispone de distintas herramientas para la espacialización de audio. A la izquierda se dispone de un deslizador en grados de la elevación de la fuente de audio, para situarla en la posición deseada del eje vertical. A la derecha, como herramienta más importante, hay un controlador en grados acimut (referido al ángulo de orientación sobre la superficie de una esfera virtual) para posicionar la fuente sonora alrededor del receptor ya sea delante, detrás o a los laterales frontales o traseros. Por otro lado, en la parte inferior se disponen de funcionalidades variadas que permiten modificar o simular las reflexiones de la sala y aumentar el rango de proyección de la fuente sonora hacia el oyente.

En resumen, a pesar de ser la versión reducida de un plugin mucho más repleto de herramientas (dearVR PRO) cumple más que suficiente con lo necesario en este proyecto, que es postproducir grabaciones convencionales en estéreo para aplicarles un efecto de espacialización, y posteriormente compararlas junto con las grabaciones binaurales espacializadas obtenidas de forma natural con los sistemas microfónicos descritos.

5. Diseño experimental

Una vez desarrollado el marco teórico de los conocimientos que se van a aplicar en el proyecto y expuesto tanto el hardware como el software utilizados, se procederá a detallar la realización de las grabaciones.

Para todas y cada una de las grabaciones se ha interpretado la misma pieza musical en guitarra clásica, una versión simplificada instrumental de la canción "Zombie" de la banda irlandesa de rock "The Cranberries". Se interpreta la misma pieza musical con todos los sistemas de captación binaural y estéreo grabando simultáneamente ya que se pretende evaluar principalmente la espacialización del sonido, y no se desea que las variaciones armónicas o tonales de diferentes piezas musicales lleguen a afectar a la valoración final.

5.1. POV Audio: sonido captado desde la perspectiva del músico

Para este primer experimento, se plantea la primera hipótesis del proyecto, y esta trata de averiguar si existe alguna variación substancial en el sonido que escucha una persona mientras está tocando un instrumento (en este caso la guitarra clásica) respecto al sonido escuchado por un oyente situado frente al músico.

Primero, se debe idear algún sistema para poder captar el sonido desde el punto de vista del músico, conseguir un POV (*Point Of View*) del audio. Para ello, utilizaremos micrófonos binaurales SoundMan OKM II, que, como ya se ha desarrollado en el punto 3 de la presente memoria, se colocan en el interior del pabellón auditivo, como si de unos auriculares se tratasen, y captan el sonido de forma espacializada alrededor del usuario.

El objetivo de este experimento será realizar diversas grabaciones de una persona tocando la guitarra clásica, mientras está haciendo uso de estos micrófonos binaurales, colocados en sus orejas. Se busca verificar el funcionamiento de este dispositivo y comprobar si la grabación captada se corresponde con lo realizado y generar de esta forma una ilusión binaural a cualquiera que escuche la grabación, para que escuche el sonido desde el punto de vista de una persona tocando la guitarra.

Como señales de test se dispondrán de dos grabaciones con dos pares de micrófonos SoundMan OKM II, un par insertados en el músico mientras interpreta la pieza musical mencionada, y el otro par los portará una persona que actuará como oyente, situada frente al músico a una distancia de aproximadamente 1 metro, los dos situados en el interior de la cámara anecoica. El músico comenzará a interpretar la canción mientras que los dos pares binaurales están en funcionamiento, de forma que los dos captaran el mismo sonido.

Tanto músico como oyente deberán portar consigo una grabadora con entrada de micrófono con conector TRS en la cual se almacenarán las 2 pistas de audio. En este caso se ha hecho uso de dos grabadoras TASCAM modelo DR07 propiedad del Campus (Figura 25).



Figura 25: Grabadora TASCAM DR07. Fuente: tascam.com

Posteriormente, las pistas de audio serán extraídas de la grabadora TASCAM, e importadas en el software de Adobe Audition para así normalizarlas a -16 LUFS, con tal que tengan el mismo nivel sonoridad y se valore así únicamente la espacialización del sonido.

Obtenemos finalmente dos grabaciones estéreo válidas para la encuesta:

- *BinSerg_Exp1* → Punto de vista del músico
- *BinOyente_Exp1* → Punto de vista del oyente

La idea principal es que los participantes de la encuesta sean sometidos a la escucha de los audios con el desconocimiento de cuál es el punto de vista de cada uno, y tengan ellos mismos que escoger cuál de los dos creen que se corresponde con el audio captado desde el punto de vista del músico.

5.2. Comparativa de las técnicas de captación de sonido espacial

En este segundo experimento realizaremos prácticamente la mayor parte de las grabaciones y será el apartado práctico más extenso de este proyecto ya que se buscará testear la capacidad de espacialización de los 3 micrófonos binaurales mencionados, es decir, el SoundMan OKM II, el maniquí acústico HATS de Brüel & Kjaer y la grabadora ambisónica Zoom H3-VR.

Se probará la eficacia de espacialización de los 3 sistemas microfónicos de forma individual, en 6 posiciones del espacio, siendo estas las siguientes:

Las 6 posiciones detalladas en la Figura 26 se corresponden con las siguientes:

1. En frente, a tu izquierda
2. Frente a ti, directamente
3. Frente a ti, a tu derecha
4. Detrás de ti, a la izquierda
5. Detrás de ti, directamente
6. Detrás de ti, a tu derecha

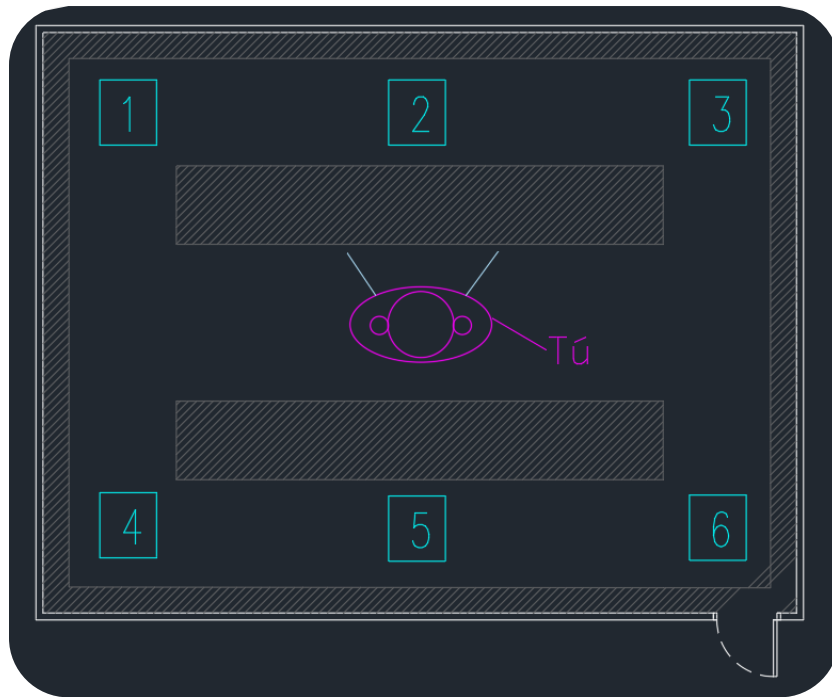


Figura 26: Esquema del posicionamiento de la espacialización del sonido.

Para la realización de este experimento, se realizará el montaje de los tres micrófonos binaurales frente al músico, y este interpretará la pieza musical repetidas veces, una en cada una de las 6 posiciones, con los tres micrófonos en funcionamiento. Cada uno de ellos irá conectado directamente a una grabadora, en el caso de la Zoom H3 VR ya es una grabadora en sí, y en el caso de los SoundMan OKM II, ya hemos mencionado que el oyente portaría consigo una TASCAM DR07. Así que solo queda conectar el maniquí acústico HATS de Brüel & Kjaer, el cual inicialmente se conectó mediante un preamplificador hacia un ordenador portátil, pero finalmente se decidió conectarlo a una grabadora que admitiera conexión microfónica. En este caso se ha utilizado una grabadora Zoom Handy Recorder H4n (Figura 27).



Figura 27: Grabadora Zoom Handy Recorder H4n para almacenar las grabaciones del maniquí. Fuente: zoomcorp.com

De esta forma, ya se tendrían los 3 sistemas microfónicos de captación de audio espacial conectados correctamente para almacenar las grabaciones. En cuanto al posicionamiento de ellos, se situarán los 3 en fila frente al músico, en la zona más céntrica de la cámara anecoica, situados de la forma que detalla la Figura 28.

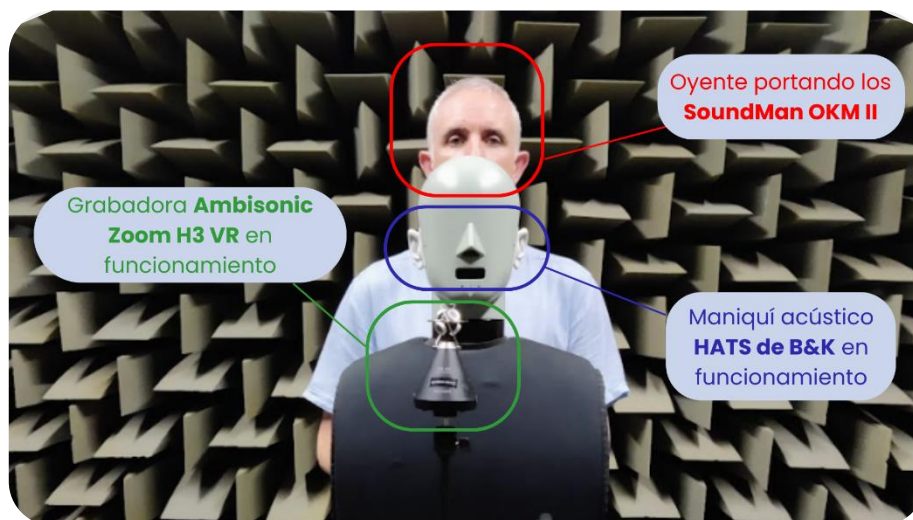


Figura 28: Posicionamiento de los 3 micrófonos binaurales para el 2º experimento

Por otro lado, mientras el posicionamiento de los micrófonos permanece inmóvil, será el músico el cuál irá interpretando la pieza musical una vez en cada una de las 6 posiciones, para así obtener un total de 18 grabaciones, con la relación de nombres de archivo según la posición que se muestra en la Tabla 1.

Posición esquema	SoundMan OKM II	Maniquí acústico HATS de B&K	Grabadora Ambisonic Zoom H3 VR
1	<i>BinOyente_Exp2A_I</i>	<i>Dummy_Exp2A_I</i>	<i>AmbiX_Exp2A_I</i>
2	<i>BinOyente_Exp2A_F</i>	<i>Dummy_Exp2A_F</i>	<i>AmbiX_Exp2A_F</i>
3	<i>BinOyente_Exp2A_D</i>	<i>Dummy_Exp2A_D</i>	<i>AmbiX_Exp2A_D</i>
4	<i>BinOyente_Exp2F_Detraslzq</i>	<i>Dummy_Exp2F</i>	<i>AmbiX_Exp2F_Detraslzq</i>
5	<i>BinOyente_Exp2E_Detrás</i>	<i>Dummy_Exp2E</i>	<i>AmbiX_Exp2E_Detrás</i>
6	<i>BinOyente_Exp2D_DetrásDcha</i>	<i>Dummy_Exp2D</i>	<i>AmbiX_Exp2D_DetrásDcha</i>

Tabla 1: Archivos grabados.

El objetivo de la encuesta, dividida en 3 secciones, una por cada micrófono, será que cada participante intente averiguar correctamente en qué posición está situada la fuente, en este caso, la guitarra, sin ninguna información previa, con el fin de evaluar cómo de precisa es la captación de la posición para cada técnica binaural.

Cada una de las grabaciones ha sido procesada por Adobe Audition y normalizada a -16 LUFS para que tengan el mismo nivel de sonoridad.

5.3. Valoración subjetiva de tres técnicas de grabación biaural

Para este tercer experimento se busca conseguir una valoración subjetiva y unipersonal sobre la espacialización de cada micrófono, pero esta vez los participantes de la encuesta sí sabrán la posición de fuente de la grabación de forma previa. Lo que desconocerán será con qué dispositivo se ha realizado la grabación, y lo que estos deberán elegir es qué audio de los 3 que han escuchado creen que espacializa mejor la posición escogida para la prueba.

Realmente para este experimento no es necesario realizar ninguna grabación adicional, basta con escoger una posición de las ya grabadas, una grabación de cada micrófono, y someter a los participantes a la prueba con estas. En este caso, se ha escogido la posición 6 del esquema planteado en la Figura 26, que se corresponde con la posición trasera a la derecha, por tanto, los audios escogidos son:

- *BinOyente_Exp2D* → SoundMan OKM II
- *Dummy_Exp2D* → Maniquí acústico HATS de B&K
- *AmbiX_Exp_2D_DetrasDcha* → Grabadora Ambisonic Zoom H3VR

Una vez más, los 3 archivos sonoros han sido normalizados a -16 LUFS en Adobe Audition para que tengan el mismo nivel de sonoridad.

5.4. Grabación biaural microfónica y en postproducción

En este último experimento se pretende valorar la capacidad de un oyente medio para distinguir entre un audio biaural captado utilizando los 3 sistemas microfónicos descritos de un audio espacializado conseguido mediante la postproducción de una grabación estéreo de la guitarra. Para ello, lo principal en esta sección será realizar grabaciones en estéreo de la guitarra clásica utilizando alguna de las técnicas mencionadas en el marco teórico, y haciendo uso del par estéreo AKG C451B.

Primero, se realizó un montaje de 2 pares estéreo AKG C41B frente a la guitarra clásica mediante la combinación de dos técnicas (Figura 29). El primer par de micrófonos (les nombraremos 1 y 2) está configurado haciendo uso de la técnica del par coincidente en posicionamiento X-Y. Por otro lado, el segundo par (3 y 4) están configurados mediante la técnica del par ORTF aumentando ligeramente la distancia interaural entre cada cápsula. El montaje de los dos sistemas microfónicos se ha realizado en el mismo trípode, para asegurarnos de que se encuentran en la misma posición respecto a la distancia horizontal. Posteriormente se elegirá cuál de las dos grabaciones en estéreo es adecuada para la encuesta.



Figura 29: Configuración de los pares estéreo en X-Y y ORTF

Cabe mencionar que este montaje de micrófonos se realizó de forma pareja a los micrófonos binaurales, y, por tanto, se grabaron las mismas pistas de audio, inclusive en diferentes posiciones. De estas grabaciones, solo se tomará en consideración la pista frontal, puesto que se buscará espacializarla artificialmente mediante postproducción.

Cada uno de los micrófonos está conectado a una grabadora similar al maniquí acústico, pero esta vez se ha utilizado una grabadora que admite 4 canales con conexión XLR en lugar de 2. Se ha hecho uso de la grabadora Zoom modelo PodTrack P4 (Figura 30).



Figura 30: Grabadora Zoom PodTrack P4 para el conexionado de los pares estéreo.

Después de una escucha preliminar de las dos pistas en estéreo nos decidimos por el sonido captado por los micrófonos configurados en el par X-Y. Esto es debido a que se busca un sonido con una amplia imagen estereofónica, haciendo uso de la técnica X-Y desplazando en el panorama a la izquierda y a la derecha cada micrófono respectivamente. Y estos micrófonos eran los que estaban situados más cercanos a la posición ideal de grabación de la guitarra, que es en un punto ligeramente fuera de eje y por encima o por debajo de la boca de sonido a una distancia de entre 15,24 cm y 30,24 cm (6 pulgadas y 1 pie), con los micrófonos aproximadamente colocados en el centro del puente, aproximadamente en el traste nº12, en esa distancia, para asegurarnos de que el rango completo del instrumento está siendo captado. [16]

Después de extraer la grabación de la posición frontal de la configuración X-Y se ha pasado por Adobe Audition y aplicado la normalización a -16 LUFS para asegurar el nivel de sonoridad.

Por otro lado, y, para no escatimar en grabaciones, se ha decidido utilizar los 4 micrófonos AKG C451B para una mezcla multimicrófono con estos colocados en posiciones específicas y estratégicas. La razón por la que se han colocado los AKG en posiciones diferentes recae en el cambio de tono, ya que cada instrumento musical radia una calidad de tono distinta en cada dirección, lo mismo con cada parte del instrumento. En el caso de la guitarra encontramos bastante óptimo colocar el micrófono tanto por encima del hombro apuntando al puente como por delante del mástil apuntando al traste 12. En cambio, si queremos captar frecuencias más bajas el micrófono deberá estar apuntando a la boca y si queremos captar un sonido más tenue deberá estar en dirección al puente, posicionado delante del instrumento (Figura 31). [17]

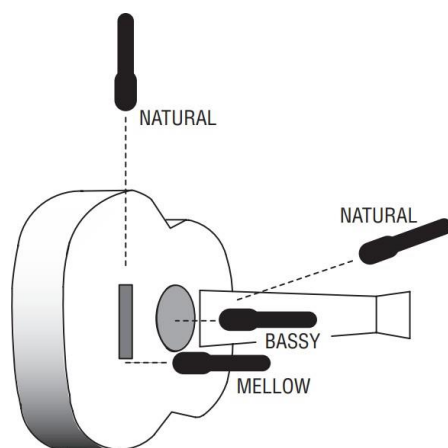


Figura 31: Variación del tono de la guitarra según el posicionamiento del micrófono.
Fuente: [17]

Es entonces que, haciendo uso de estas recomendaciones, se han utilizado los 4 micrófonos colocados imitando la configuración de la Figura 31, y realizado una mezcla multimicrófono en Adobe Audition haciendo uso o de todas las pistas o de alguna de ellas, para generar una sola pista estéreo. La configuración real de micrófonos se muestra en la Figura 32.

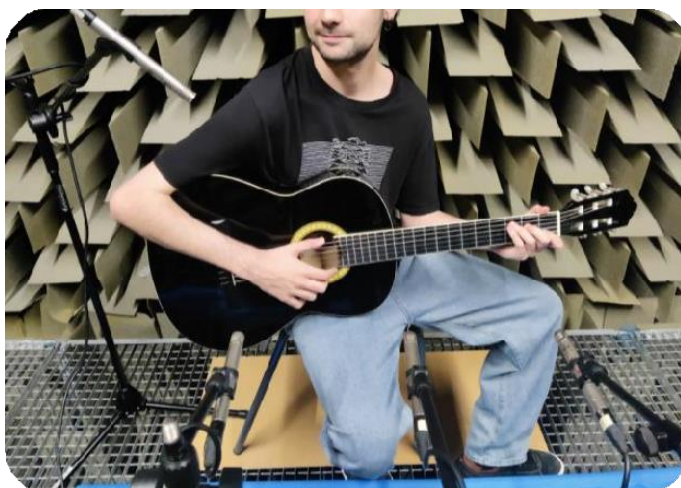


Figura 32: Configuración de los AKG C451B para la mezcla multimicrófono.

Para el conexionado de los micrófonos y almacenamiento de las pistas se ha utilizado de igual manera que en la anterior grabación en estéreo, la grabadora Zoom PodTrack P4.

Posteriormente, se han volcado las 4 pistas captadas por los AKG en Adobe Audition y se ha procedido a su edición en multipista (Figura 33), para exportarla como una pista única. Finalmente, se ha decidido por utilizar únicamente las pistas captadas por los micrófonos que están por encima del hombro y apuntando al mástil, respectivamente. Para la mezcla, la pista del micrófono situado encima del hombro se ha desplazado en el panorama hacia la izquierda en un 80% y reducido la ganancia -5 dB. En cambio, la pista captada por el micrófono situado apuntando al mástil de la guitarra se ha desplazado en el panorama hacia la derecha un 80% y, mantenido la ganancia original. Las demás pistas no han sido utilizadas por generar una saturación que distorsionaba la mezcla por efectos de fase.

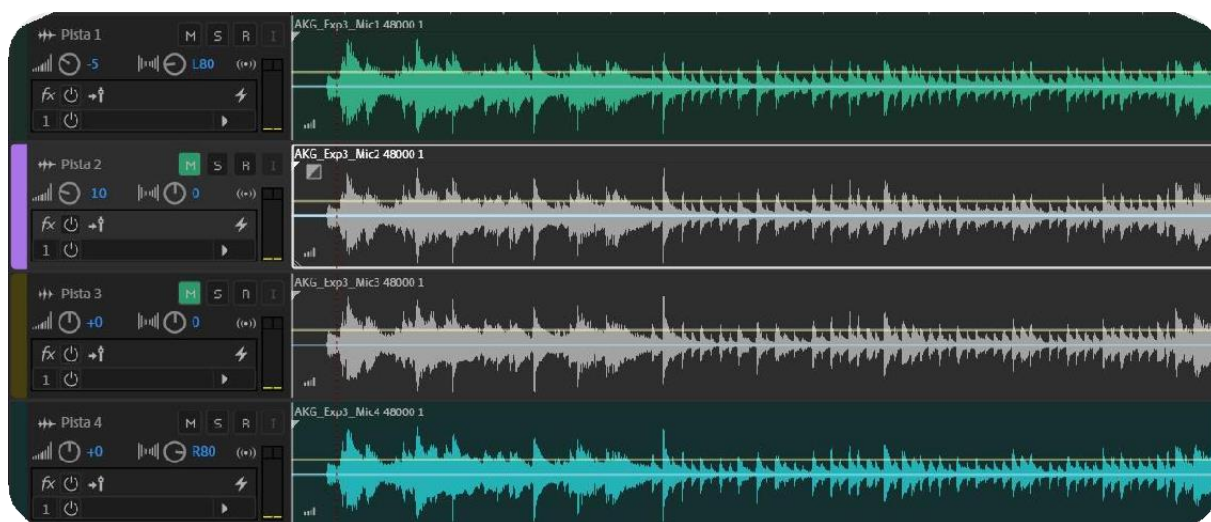


Figura 33: Edición de la mezcla multimicrófono.



Figura 34: Postproducción binaural aplicada a las grabaciones estéreo frontales

Finalmente, y después de exportar las dos grabaciones estéreo como pistas únicas, y normalizarlas a -16 LUFS de nivel de sonoridad, se procederá a utilizar el plugin descrito

anteriormente dearVR MICRO para aplicar el efecto de espacialización a las dos pistas. Se ha escogido la posición 1 de la Figura 26, es decir, frente al oyente, pero un poco a la izquierda. Es por esto que, haciendo uso del plugin dearVR MICRO, se ha espacializado el sonido de las dos pistas por igual unos -35° grados acimut a la izquierda, con un 20% de amplitud (Figura 34). También, en el menú de reflexiones, se ha escogido la sala "Drywall", la cuál de todas las opciones es la sala que más se asemeja a una cámara anecoica.

Con esto finalmente obtenemos las dos pistas que serán utilizadas en la encuesta del estudio subjetivo. Se valorará si el oyente es capaz de identificar al menos una de ellas frente a las grabaciones binaurales de la misma posición (1) y también tendrá que valorar la naturalidad de estas. Tenemos entonces que los audios a valorar serán:

- *Dummy_Exp2AI* → Maniquí acústico HATS de B&K
- *AKG_Exp2A_XY_F* → AKG, mezcla postproducida en X-Y
- *AmbiX_Exp2AI* → Grabadora ambisónica Zoom H3VR
- *BinOyente_Exp2AI* → SoundMan OKMII
- *MEZCLA_MULTIMICRÓFONO_mezcla* → AKG mezcla multimicrófono postproducida

6. Estudio subjetivo

Una vez terminadas las grabaciones y escogidos los audios para su evaluación, se comenzará a diseñar el estudio subjetivo, base principal de este proyecto. Como se ha desarrollado, el principal objetivo de realizar las grabaciones es obtener una verificación del correcto funcionamiento en lo referente a la espacialización de las técnicas de grabación binaurales para la guitarra clásica. Para ello, se ha elaborado una encuesta interactiva con las grabaciones escogidas mediante la herramienta Forms de Google.

Esta encuesta constará de diversas secciones, en la primera el participante deberá elegir cuál de los dos audios escogidos para el experimento 1 se corresponde con la grabación binaural captada por los SoundMan OKM II portados por el músico, de los portados por el oyente. Depende de los resultados se podrá verificar si se ha conseguido captar una grabación de sonido tal y como lo escucharía un guitarrista mientras interpreta una pieza musical, o, por el contrario, si no existe ninguna diferencia substancial al respecto.

A continuación, dan comienzo 3 secciones idénticas, excepto por el tipo de micrófono utilizado. El oyente tendrá que escuchar 6 grabaciones por cada micrófono, y desconociendo su naturaleza (nombre del micrófono y posición de la fuente) tendrá que escoger en qué posición de las 6 descritas en el apartado 5.2 cree que se encuentra posicionado el sonido de la guitarra. Como se ha expuesto, este test se repetirá 3 veces, una por cada sistema microfónico, siguiendo el orden de: grabadora Zoom H3 VR, maniquí HATS y SoundMan OKM II. A raíz de los resultados se podrá analizar cuál de los 3 sistemas microfónicos binaurales posiciona mejor el audio y en qué posiciones existe una espacialización más clara.

Posteriormente, se realizará una prueba similar, pero esta vez los participantes sí conocen la posición en la cual está posicionada la fuente sonora, y tendrán que elegir cuál de las 3 grabaciones les resulta que espacializa mejor la guitarra (desconociendo el nombre de los sistemas microfónicos para que no influya en su decisión). En este caso se ha escogido la posición 6 detallada en el apartado 5.2, es decir, detrás del oyente hacia la derecha. De esta forma obtendremos una valoración más subjetiva y cualitativa de la espacialización.

Finalmente, en la última sección de la encuesta, se harán uso de las grabaciones binaurales conseguidas mediante postproducción con el plugin dearVR, al igual que los 3 micrófonos binaurales. En total tendremos 5 audios para que los participantes los escuchen, a sabiendas de que en todos ellos la fuente sonora está situada frente a ellos hacia la izquierda (posición 1) pero desconociendo el tipo de grabación, es decir, no se especificará el micrófono utilizado en ninguna de las grabaciones. De hecho, los participantes deberán escoger, entre los 5 audios, cuál de ellos creen a juicio propio que se trata de una grabación postproducida. Esto se realiza para comprobar la eficacia de la postproducción en cuanto a espacialización se refiere frente a la conseguida mediante sistemas microfónicos dedicados a esta tarea.

Después, habrá una última pregunta en la que los participantes escogerán cuál de los 5 audios les resulta más natural o simplemente de mejor calidad para ellos, para de esta forma obtener también una valoración cualitativa, también desconociendo su naturaleza, únicamente la posición de la fuente.

Para realizar la encuesta, se recomienda estar en un lugar relativamente silencioso y se deberán utilizar auriculares circumaurales, es decir, que cubran toda la oreja. Para notar mejor el efecto 3D de las grabaciones puede ayudar cerrar los ojos mientras se escuchas.

La encuesta se puede realizar a través el siguiente enlace:

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSf2oo9cmQ7e-fQfwhCGOMXfbadNoEduwtKgB5ulltct1e0BSQ/viewform?usp=sf_link

7. Resultados obtenidos

Una vez difundida la encuesta y pasado un determinado período de tiempo, se consigue recoger la cifra de 25 resultados, cada uno correspondiente a una persona con respuesta única. La encuesta ha sido realizada por individuos cualesquiera en el anonimato, de diversa edad y género, con la condición de que dispongan de auriculares circumaurales para la escucha de las grabaciones. A continuación, se procederá a exponer y analizar los resultados obtenidos de las 25 respuestas.

7.1. Experimento 1

Para la primera sección de la encuesta, se recogen los resultados para el primer experimento, que plantea la posibilidad de captar la grabación de una guitarra clásica tal y como lo escucha el intérprete, seleccionando de entre dos audios. El audio 1 se corresponde con el punto de vista del músico, y el audio 2 se trata del punto de vista del oyente frente al intérprete. Los resultados obtenidos se exponen en la Figura 35:

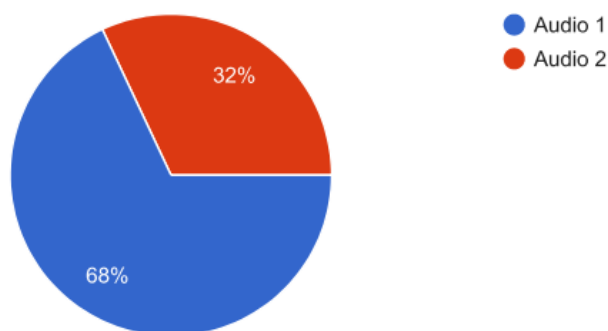


Figura 35: Experimento 1. Resultados.

Como podemos observar en el gráfico, un 68% de las respuestas afirman que el audio 1 se corresponde con una grabación captada desde el punto de vista del guitarrista, lo cual es correcto, en contraste con el 32% de respuestas que escogen el audio 2. Se puede afirmar entonces que el experimento ha sido un éxito ya que la mayoría de las respuestas han acertado la hipótesis. Esto demostraría que sí existen diferencias entre una grabación y otra y un intérprete capta diferencias (aunque sutiles) en su escucha frente a un oyente. A pesar de ello, no se puede obviar el 32% de respuestas que afirman lo contrario, por tanto, es probable que las diferencias sean mínimas y no sean del todo substanciales, al menos para un número determinado de personas. Pero sí que se demuestra la efectividad del sistema microfónico SoundMan OKM II para captar estas desigualdades en las dos grabaciones.

7.2. Experimento 2

Para este experimento, se ha valorado la espacialización de cada micrófono biaural de forma individual, por lo tanto, se deben de realizar tres secciones idénticas, una por cada sistema microfónico. En cada una de ellas se ha puesto a prueba la espacialización del micrófono frente a 6 posiciones (Figura 26) de forma aleatoria, sin tener conocimiento de si están escuchando grabaciones de la grabadora Zoom H3-VR, del maniquí acústico HATS o de los SoundMan OKM II.

7.2.1. Zoom H3-VR

Primero, los participantes han escuchado las grabaciones de las 6 posiciones captadas por la grabadora ambisónica Zoom H3-VR. Estos han sido los resultados para la posición 1, es decir, **frente al oyente hacia la izquierda**.

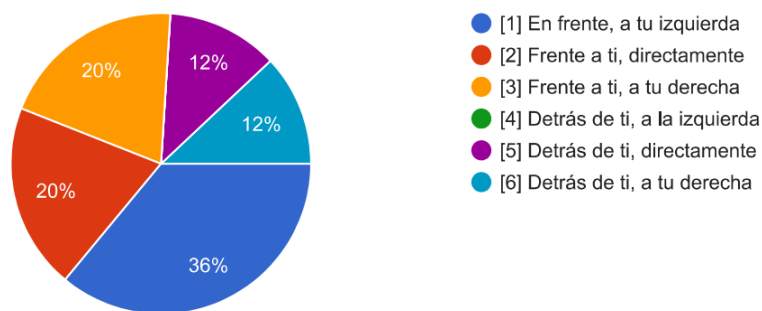


Figura 36: Experimento 2. Resultados posición 1. Zoom H3-VR.

Pese a obtener un mayor porcentaje que afirma escucharlo por la posición correcta (36%) existe una gran disparidad de opiniones que sitúan la grabación en el resto de las posiciones, a excepción de la opción número 4 (detrás de ti a la izquierda) que no obtiene ninguna respuesta.

A continuación, los resultados para la posición 2, correspondiente con la fuente situada **directamente frente al oyente**.

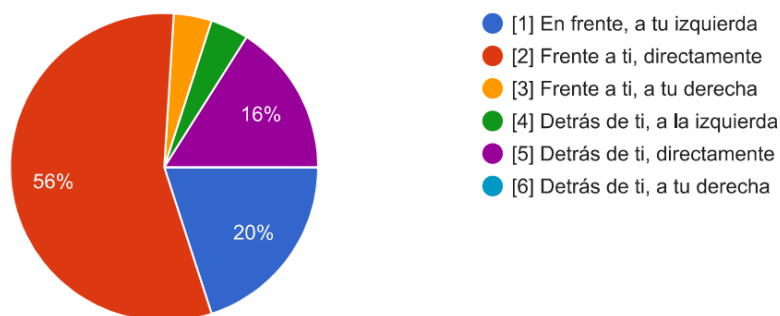


Figura 37: Experimento 2. Resultados posición 2. Zoom H3-VR.

En esta ocasión, la opción correcta supera el 50%, por tanto, se puede afirmar que la mayoría de las respuestas han sido positivas, existiendo solo competencia en la posición trasera directa (un 16% no diferencia entre delante y detrás) y en la posición frontal izquierda, con un 20% de personas que posicionan la fuente a la izquierda de su posición real.

Siguiendo con el orden de posiciones, la siguiente es la 3, correspondiente con la posición **frontal derecha**, la cual ha obtenido los siguientes resultados.

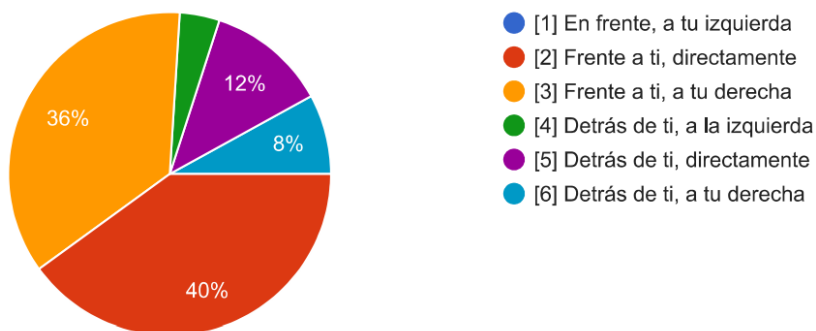


Figura 38: Experimento 2. Resultados posición 3. Zoom H3-VR.

En esta ocasión el resultado con mayor porcentaje se trata de la posición frontal directa (40%), y el segundo mayor es la posición correcta, la frontal derecha (36%). Existe entonces una discrepancia ya que el resultado no demuestra una correcta espacialización en esta posición, al menos con este sistema microfónico.

Acto seguido, dejamos de lado las posiciones frontales para pasar a las traseras, comenzando con la 4, con la fuente posicionada **detrás del oyente hacia la izquierda**.

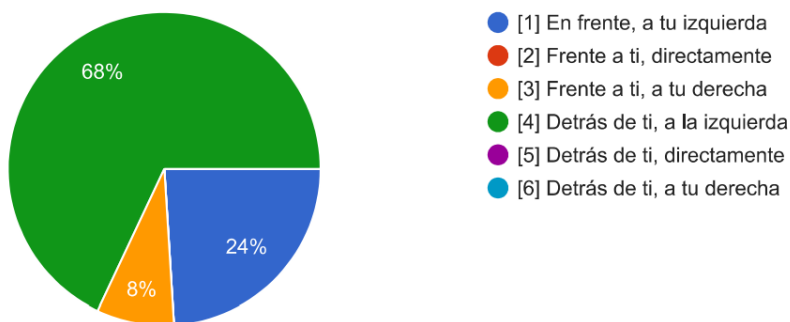


Figura 39: Experimento 2. Resultados posición 4. Zoom H3-VR.

Se ha obtenido un 68% de respuestas escogiendo la posición correcta, por tanto, se puede afirmar que la espacialización en esta posición es apropiada, aun existiendo un 24% situando la fuente al lado contrario. Existe un 8% que confunde detrás con delante.

Seguidamente, la posición 5, es decir, la **trasera directa**, ha recogido los siguientes resultados en la encuesta.

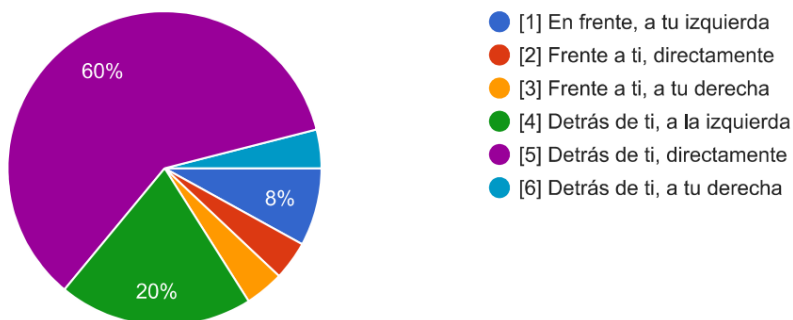


Figura 40: Experimento 2. Resultados posición 5. Zoom H3-VR.

En esta ocasión el porcentaje mayoritario (60%) corresponde con la posición reproducida, se puede afirmar entonces que la mayoría de los participantes han escuchado la grabación espacializada correctamente. Aun existiendo respuestas incorrectas, se puede considerar un resultado aceptable.

Finalmente, se prueba la espacialización de la última posición restante, con la fuente sonora situada **tras el oyente, hacia la derecha**.

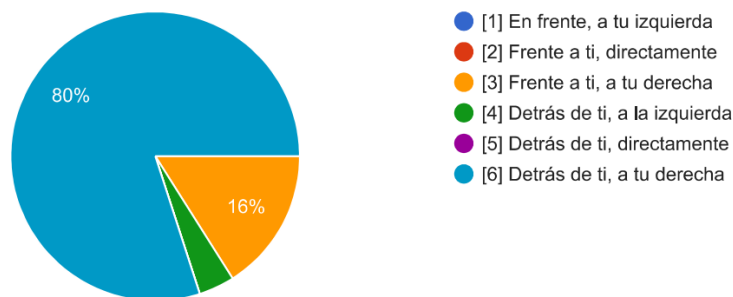


Figura 41: Experimento 2. Resultados posición 6. Zoom H3-VR.

Para esta posición existe una clara mayoría que ha respondido correctamente. El 80% de los participantes de la encuesta escucha la grabación en la posición correcta, por tanto, se afirma que la espacialización aquí es óptima.

7.2.2. HATS Brüel & Kjaer

Una vez finalizada la sección de la grabadora, le sigue la misma encuesta, pero esta vez utilizando el maniquí acústico HATS de Brüel & Kjaer. Las grabaciones están dispuestas en un orden distinto a la sección anterior, también de forma aleatoria. Comenzamos con la posición 1, **frontal izquierda**.

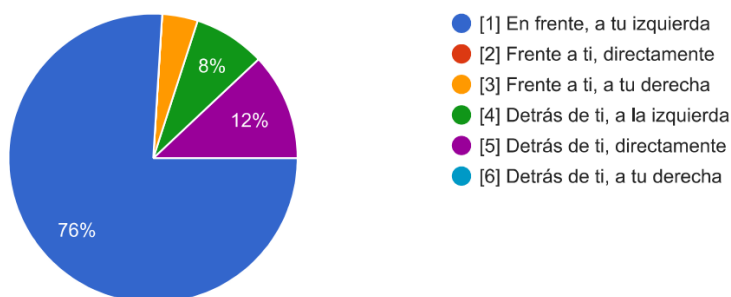


Figura 42: Experimento 2. Resultados posición 1. HATS B&K.

Obtenemos un resultado bastante positivo, con una mayoría del 76% situando la grabación en la posición correcta, y superando al recuento de la grabadora Zoom.

Seguidamente, estos son los resultados obtenidos en la encuesta para la siguiente posición, que se corresponde con la **frontal directa**.

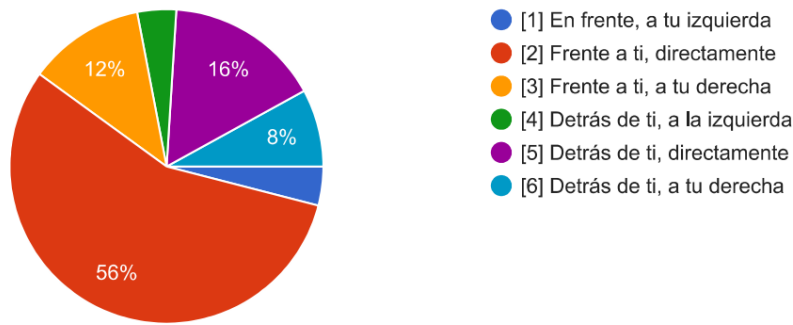


Figura 43: Experimento 2. Resultados posición 2. HATS B&K.

Una vez más el resultado es mayoritariamente positivo, aunque por un margen menor, puesto que algunos resultados sitúan la grabación en, curiosamente, el resto de las 6 posiciones totales, siendo la más numerosa (16%) la que confunde la posición delantera con la trasera.

Posteriormente, se exponen los resultados obtenidos para la última posición **frontal, situada hacia la derecha**.

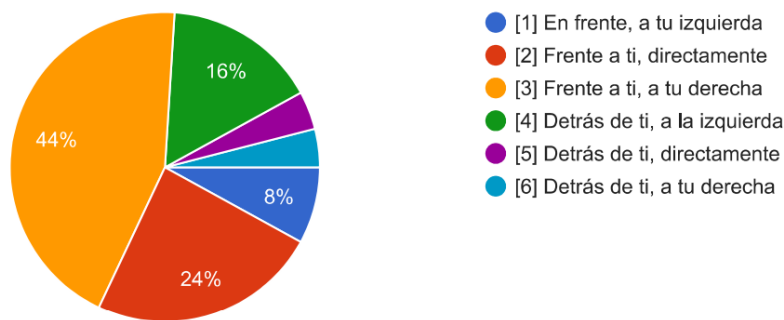


Figura 44: Experimento 2. Resultados posición 3. HATS B&K.

Esta vez, a pesar de que un 44% de los participantes han respondido correctamente, la suma del resto de posiciones se corresponde con la mayoría, un 66% no posicionan correctamente a la fuente sonora.

A continuación, dejamos de lado las posiciones frontales para el maniquí acústico para pasar a las traseras, empezando por la número 4, correspondiente con la **trasera izquierda**.

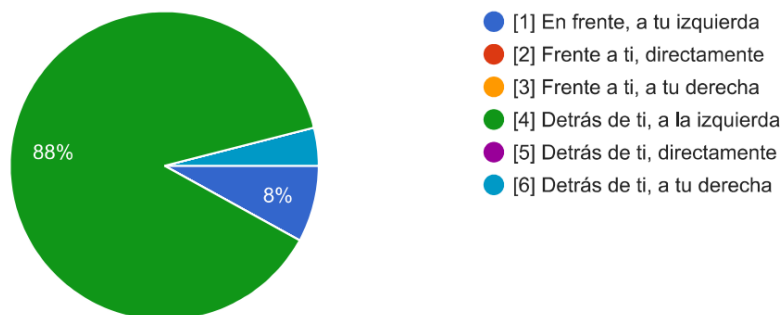


Figura 45: Experimento 2. Resultados posición 4. HATS B&K.

En este caso, la espacialización del sonido ha sido más que correcta, con un 88% de participantes respondiendo correctamente.

Por otro lado, la posición **trasera directa**, ha presentado los siguientes resultados en la encuesta.

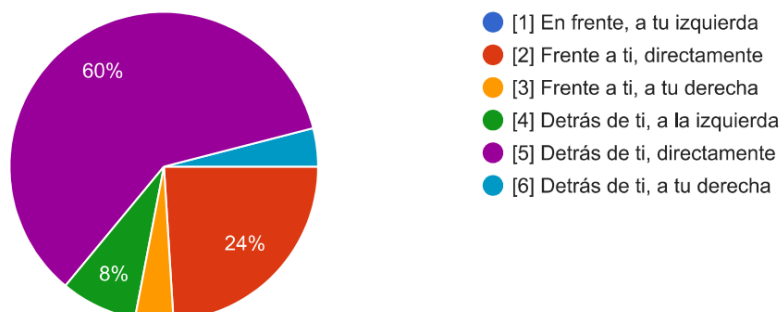


Figura 46: Experimento 2. Resultados posición 5. HATS B&K.

Con un 60% de participantes respondiendo la opción correcta, se puede considerar una espacialización trasera satisfactoria, no obviando el resto de las respuestas, con un 24% de personas situando el audio en la posición frontal, mostrando de nuevo que existen personas que no suelen diferenciar el sonido trasero frente al delantero.

Para finalizar con la sección dedicada al maniquí acústico, se evalúa la posición 6, que se corresponde con la fuente sonora situada **tras el oyente a la izquierda**.

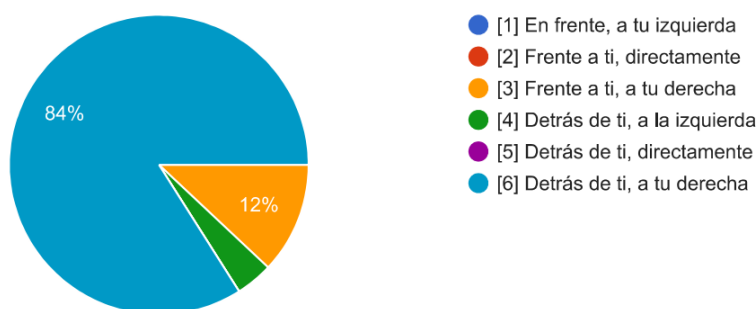


Figura 47: Experimento 2. Resultados posición 6. HATS B&K.

Una vez más, se ha obtenido un resultado válido, ya que la gran mayoría de participantes, un 84%, han respondido correctamente.

De esta forma damos por finalizada la sección del experimento 2 dedicada a la evaluación de la espacialización del maniquí acústico, con unos resultados ligeramente mejores a los obtenidos en la sección de la grabadora Zoom.

7.2.3. SoundMan OKM II

Para finalizar el experimento 2, se expondrán los resultados obtenidos en la misma encuesta que las dos anteriores, pero esta vez utilizando las grabaciones obtenidas mediante los micrófonos *in-ear* binaurales SoundMan OKM II. La primera posición, que se corresponde con la **frontal derecha**, presenta los siguientes resultados:

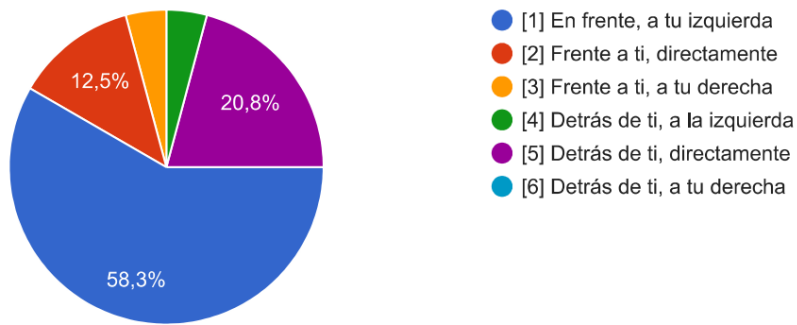


Figura 48: Experimento 2. Resultados posición 1. SoundMan OKM II.

Con un 58,3% de votos, la mayoría, aunque con poco con margen, ha escogido correctamente la posición.

Siguiendo con las posiciones frontales, a continuación, se muestran los resultados de la **frontal directa**.

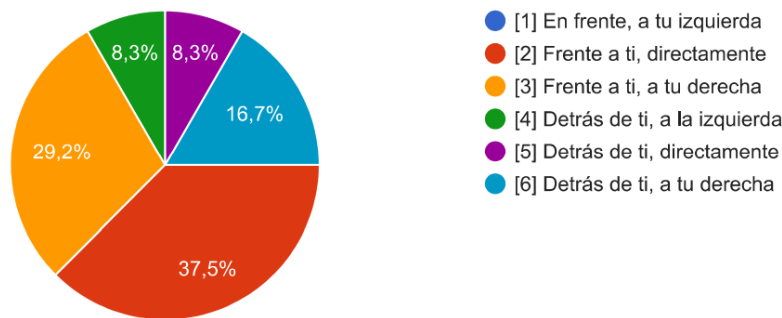


Figura 49: Experimento 2. Resultados posición 2. SoundMan OKM II.

En esta ocasión se han obtenido resultados más dispares en el recuento de los votos, existiendo solo un 37,5% de los participantes escogiendo la opción correcta.

Para finalizar las posiciones frontales propias de las grabaciones obtenidas con los SoundMan, sigue la ubicación **frontal derecha**.

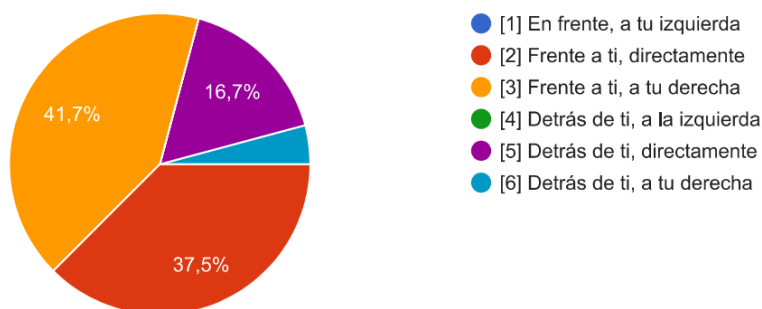


Figura 50: Experimento 2. Resultados posición 3. SoundMan OKM II.

Para esta posición encontramos resultados más heterogéneos, con un 41,7% de los votos en la posición correcta, un 37,5% situando la fuente en la posición anterior, y un 16,7% en la posición trasera.

Una vez finalizadas las posiciones frontales propias de las grabaciones del SoundMan, pasamos a las **traseras**, comenzando por la **izquierda**.

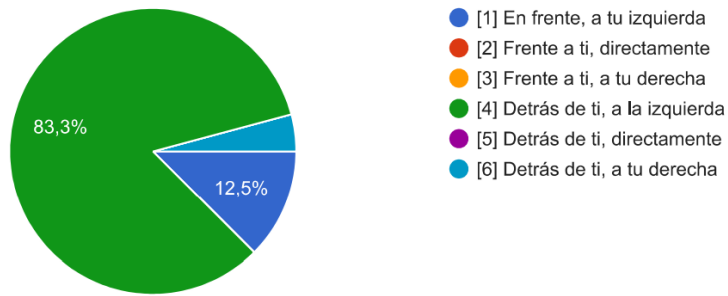


Figura 51: Experimento 2. Resultados posición 4. SoundMan OKM II.

Comienza a ser la norma que las posiciones traseras están mejor espacializadas en las grabaciones que las delanteras, como podemos ver en ese 83,3% de votos correctos situando la guitarra de forma precisa.

A continuación, los resultados de la posición **trasera directa**.

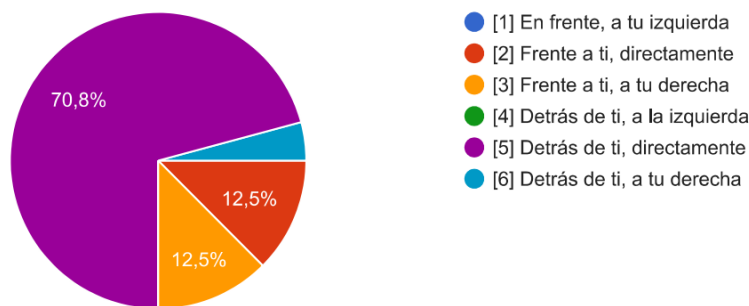


Figura 52: Experimento 2. Resultados posición 5. SoundMan OKM II.

A pesar de existir variaciones en los votos, la mayoría de participantes han situado correctamente la fuente sonora en la posición trasera directa.

Finalmente, se exponen los resultados de la última posición de las grabaciones del SoundMan, y última cuestión del experimento 2, la posición **trasera derecha**.

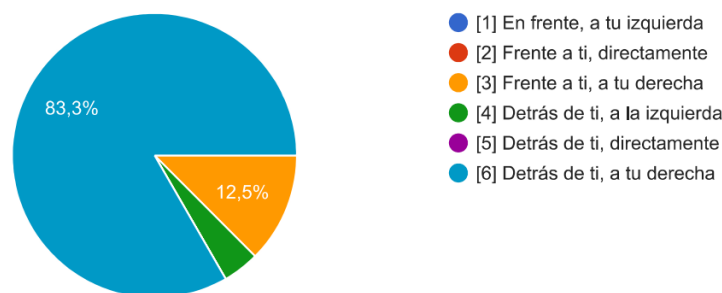


Figura 53: Experimento 2. Resultados posición 6. SoundMan OKM II.

En este gráfico final, encontramos unos resultados muy similares a los de la posición 4, con el resultado correcto siendo votado por un 83,3% de los participantes, demostrando una espacialización trasera muy superior a la frontal con este sistema microfónico.

7.3. Experimento 3

Para este experimento, los participantes han tenido que escuchar 3 audios diferentes, cada uno de ellos captado con un sistema microfónico binaural, y todos ellos espacializados en la posición trasera derecha. Los participantes desconocen el micrófono utilizado en cada grabación, pero se les informa de la posición. El objetivo es que estos escojan simplemente de entre las 3 grabaciones cuál de ellas les resulta que consigue una mejor espacialización del sonido en la posición mencionada.

El audio 1 se corresponde con la grabación captada por el sistema SoundMan OKM II, el audio 2 con la grabación del maniquí acústico HATS y el audio 3 con la de la grabadora ambisónica Zoom H3-VR.

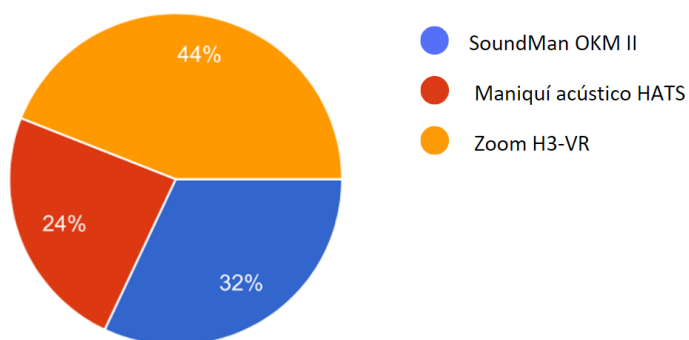


Figura 54: Experimento 3. Resultados.

A raíz de los resultados extraemos que la grabadora Zoom H3-VR espacializa mejor la grabación, seguida de los micrófonos SoundMan OKM II y del maniquí acústico HATS. A pesar de ello, ninguno de los tres sistemas microfónicos presenta una mayoría clara y es complejo declarar una espacialización notablemente superior a las demás. Pero como conclusión, los resultados colocan a la grabadora Zoom H3-VR como la principal.

7.4. Experimento 4

Para el último experimento, se ha escogido esta vez la posición frontal izquierda como objeto de evaluación, pero esta vez añadiendo dos audios más, también espacializados hacia esta posición, pero grabados con técnicas estéreo con micrófonos AKG C451B y espacializando el sonido hacia la parte frontal izquierda en postproducción. Consta de dos secciones, en la primera los participantes han escogido cuál de los 5 audios creen que se ha editado para conseguir el efecto de espacialización en la posición mencionada, y en la segunda han escogido cuál les parece más natural o tiene un mejor sonido de forma subjetiva.

En este caso el audio 1 se corresponde con la grabación captada por el maniquí HATS, el audio 2 es la grabación postproducida captada por el par estéreo AKG en X-Y, el audio 3 la grabadora Zoom H3-VR, el audio 4 los micrófonos SoundMan y el audio 5 la grabación postproducida captada por 2 AKG con la configuración detallada en el apartado 5.4 de la presente memoria.

Primero, se exponen los resultados obtenidos cuando a los participantes se les pregunta por la postproducción en la naturaleza de las grabaciones.

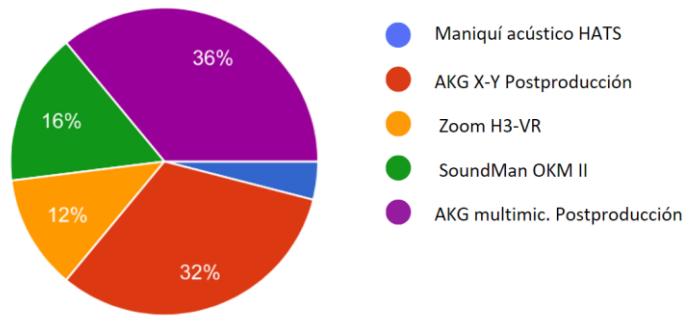


Figura 55: Experimento 4. Resultados 1.

Podemos observar cómo los resultados mayoritarios se centran en el audio 2 y en el audio 5, correspondientes con las grabaciones procesadas en postproducción. Sin embargo, al menos un 28% de participantes tienen la creencia de que las grabaciones postproducidas provienen de las obtenidas mediante la grabadora Zoom y el sistema microfónico SoundMan. Es por esto que, aunque reconocible, se puede afirmar que la postproducción en cuanto a la espacialización se mimetiza correctamente con la conseguida de forma natural.

A continuación, los participantes de la encuesta han escogido también la grabación que tiene un mejor sonido de forma subjetiva.

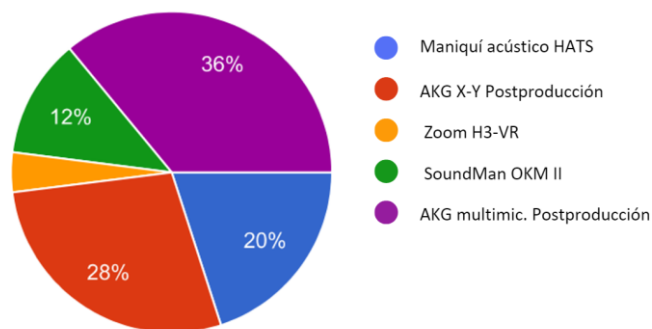


Figura 56: Experimento 4. Resultados 2.

En esta sección se ha obtenido unos resultados muy similares a la anterior, donde, de forma peculiar, a los participantes les resulta que las grabaciones conseguidas mediante postproducción ofrecen una mejor calidad subjetiva que las demás, aunque como en el resto de resultados, las opiniones son mixtas.

Hasta aquí el análisis de los resultados obtenidos en la encuesta, como se ha detallado al inicio, realizada por un total de 25 personas anónimas, mediante auriculares circumaurales.

8. Conclusiones

Tras analizar detenidamente los resultados obtenidos en las encuestas, podemos abordar las hipótesis y/o cuestiones planteadas en este proyecto.

Primeramente, se puso sobre la mesa si era posible obtener una grabación fidedigna de la guitarra clásica desde el punto de vista del intérprete y si al conseguirla, existían diferencias substanciales frente a una grabación frontal. Para ello se ha utilizado dos sistemas microfónicos binaurales SoundMan OKM II siendo los portadores de cada uno el intérprete y el oyente, situado enfrente. Una vez realizadas las grabaciones y normalizadas al mismo nivel de sonoridad, se planteó una encuesta para verificar estas cuestiones y, frente a los resultados detallados en el apartado anterior (68% de respuestas correctas), se puede afirmar que sí existen diferencias sutiles en la grabación y el oyente medio es capaz de diferenciarlas, aunque por un margen estrecho. Estas diferencias pueden ser causadas principalmente por el propio pabellón auditivo y torso, cuya presencia afecta al sonido recibido. Cabe mencionar que podría ser relativamente complejo captar el sonido desde un punto de vista unipersonal y escucharlo como tal (véase el fenómeno en el cuál grabamos nuestra propia voz y la mayoría de las personas, al escuchar la grabación, la encuentran distinta a como ellos/as mismos/as la escuchan en su propia cabeza) ya que además de las orejas, existen otros factores que afectan a la forma de transmisión del sonido más internos, como puede ser la propia vibración de los huesos pertenecientes al cráneo. Para conseguir una representación 100% precisa, deberíamos insertar algún tipo de sistema microfónico dentro de las cavidades auditivas y que logren captar esas mismas vibraciones. También se podría plantear el hecho que no todos los oyentes saben realmente que matices tímbricos aprecia el músico diferentes al oyente. Es decir, si alguno de los oyentes no ha tocado nunca una guitarra o presentan un desconocimiento de teoría musical, es posible que los resultados sean afectados. Sería entonces interesante realizar la misma encuesta, pero haciendo la distinción entre si el oyente es o no músico y comparar los resultados

Por otra parte, la segunda cuestión planteada en este proyecto era comprobar la eficacia de la espacialización de tres sistemas microfónicos binaurales distintos y verificar la capacidad del oyente para situar la fuente sonora correctamente. De esta manera se ponen a prueba tanto los sistemas microfónicos como la destreza de espacialización de los oyentes. En vista de los resultados obtenidos para las 3 secciones, se puede observar una clara vertiente que indica que la espacialización general en los 3 micrófonos es notablemente más precisa en las posiciones traseras que en las delanteras, puesto que los oyentes han localizado mejor estas fuentes. Dado que este fenómeno sucede en las grabaciones de los 3 micrófonos, se descarta la posibilidad que el problema sea del oyente, y se pueden plantear otras posibles causas. Primero se podría proponer que el problema radique en las grabaciones, principalmente porque el instrumento, siendo la guitarra clásica, tiene un patrón de radiación frontal directivo bastante amplio, es decir, no es un patrón frontal directo, sino que el sonido generado se propaga por el plano frontal de forma dilatada, y esto puede afectar a que no se aprecie tanto las diferencias entre izquierda, centro y derecha. Por otro lado, las posiciones traseras sí que han sido correctamente espacializadas en su mayoría, ya que, al no ser una fuente omnidireccional y emitir el sonido principalmente por delante, es más sencillo localizar las diferencias entre las posiciones laterales y se logra espacializar

el sonido más precisamente. También cabe mencionar que, aunque con un poco menos de margen, el oyente medio también ha conseguido diferenciar si el sonido proviene por delante o por detrás, en cuanto a la posición frontal. Finalmente, si analizamos los resultados de forma individual, es el maniquí acústico HATS de Brüel & Kjaer el que ha presentado más porcentaje de respuestas correctas respecto a los demás. Esto era en cierta parte esperable ya que se trata de un sistema microfónico binaural que intenta ser lo más fidedigno posible a la capacidad de recepción del sonido de una persona humana, incluyendo pabellón auditivo y torso. Curiosamente, esto cambia en el experimento siguiente.

Siguiendo con las cuestiones planteadas, posteriormente se ha probado la espacialización de los 3 sistemas microfónicos pero esta vez los oyentes eran conocedores de la posición de la fuente sonora, común en las 3 grabaciones. En esta ocasión los resultados indican a la grabadora Zoom H3-VR como predominante en cuanto a la espacialización, seguida por los SoundMan OKM II y el maniquí acústico HATS. Aunque ninguno de los 3 sistemas presenta una ventaja o desventaja significativa o por encima la media. Este resultado tan divergente del anterior puede ser debido a que, si se da a conocer previamente la posición de la fuente al escuchar la grabación, es posible que el cerebro se sugiera y preste más atención a ella, no como en el experimento anterior el cuál se desconoce de donde proviene el sonido. Tiene sentido que la grabadora Zoom obtenga buenos resultados, ya que la espacialización conseguida mediante la tecnología Ambisonics es bastante notable por presentar patrones que definen elevación y profundidad. Es claro que los 3 sistemas microfónicos consiguen la espacialización lateral, pero en vista de los resultados obtenidos en este apartado, es la grabadora Zoom la que consigue una mejor representación espacial en el plano trasero.

Finalizando con los objetivos del proyecto, en esta ocasión se pone sobre la mesa el factor de la postproducción, ya que, en caso de no disponer un sistema microfónica binaural, en muchas ocasiones se editan grabaciones convencionales para lograr este efecto en función de la aplicación. Se pretende verificar la capacidad del oyente para distinguir entre una grabación binaural natural con una grabación binaural postproducida, para ello, se ha realizado una encuesta con 5 grabaciones situadas en la misma posición, dos de ellas producto de la postproducción, y el oyente debería escoger una. Se puede ver en los resultados que, aunque por un margen estrecho, el oyente logra reconocer cuál de las grabaciones es postproducida, aunque también existen respuestas que afirman lo contrario, por tanto, no son del todo reconocibles. Esto ha podido ocurrir ya que la posición escogida para la grabación es frontal y, como se ha explicado anteriormente, las grabaciones frontales en la guitarra clásica son más complejas de distinguir entre ellas por la radiación del instrumento. Entonces, al utilizar la postproducción, únicamente escoges el ángulo de posición y no se tiene en cuenta este patrón de radiación, sino que trata la guitarra como si de una fuente omnidireccional se tratase, proporcionando las mismas distinciones en posiciones tanto traseras como delanteras. Aun así, de esta forma es posible corregir de alguna manera el problema visto en el experimento 2 sin tener que modificar las posiciones delanteras, para lograr una espacialización correcta frontal de la guitarra. También se cuestiona a los oyentes para que escojan qué grabación les resulta de mejor calidad de forma subjetiva, y se han recogido resultados heterogéneos, pero con una vertiente dirigida a las grabaciones postproducidas. Esto puede ser debido a que las configuraciones estéreo realizadas con los micrófonos AKG se han montado expresamente para la guitarra teniendo en cuenta su posicionamiento para captar las

frecuencias deseadas de este instrumento y entonces se capta un sonido más detallado, a excepción de los sistemas microfónicos biaurales que no se han configurado de una forma específica para la guitarra, sino de una forma más general.

Como conclusión general y personal, al haber tratado con sistemas microfónicos de carácter biaural e investigar sobre el funcionamiento de ellos, el sonido tridimensional ofrece una variedad muy amplia de posibilidades, tanto como para grabaciones musicales como otras aplicaciones. En base a los resultados obtenidos, se debería plantear la posibilidad de usar la postproducción para lograr espacializar el sonido, pero no como sustitución de los micrófonos biaurales, ya que salen a la luz propuestas muy interesantes, sino como apoyo para corregir situaciones como la que se ha obtenido en las grabaciones realizadas.

En resumen, este proyecto ha contribuido al conocimiento existente sobre el sonido biaural aplicado a grabaciones instrumentales y ha proporcionado información valiosa que puede ser utilizada por profesionales y académicos interesados en este campo. Se espera que los hallazgos de este estudio sirvan como punto de partida para investigaciones futuras y para la implementación de estrategias y acciones que promuevan el uso de las tecnologías desarrolladas en la presente memoria no solo para grabaciones instrumentales sino también para la infinidad de aplicaciones que ofrece el campo del sonido tridimensional.

9. Bibliografía

- [1] I. R. Altamira, *Historia de La Guitarra y Los Guitarristas Españoles*. Editorial Club Universitario, 2005.
- [2] J. V. Rodríguez, *La guitarra española: Características y construcción*. Barcelona: Clivis Publicaciones, 1985.
- [3] R. Ruiz Boullosa, "Algunas notas sobre la acústica de la guitarra clásica", *Revista Mexicana de Física*, vol. 43, n.º 2, p. 300-313, 1996.
- [4] H. Moller. "Reproduction of Artificial-Head Recording Through Loudspeakers". *Journal of the Audio Engineering Society*, vol 37, n.º. 1-2, p. 30-33, 1989.
- [5] J. Bartlett y B. Bartlett, *On Location Recording Techniques*. Focal Press, 1999.
- [6] "What Are Binaural Beats?" WebMD. <https://www.webmd.com/balance/what-are-binaural-beats> (accedido el 26 de junio de 2023).
- [7] F. Zotter, *Ambisonics: A Practical 3D Audio Theory for Recording, Studio Production, Sound Reinforcement, and Virtual Reality*. Cham: Springer Nature, 2019.
- [8] "Ambisonics Explained: A Guide for Sound Engineers | Waves". waves.com. <https://www.waves.com/ambisonics-explained-guide-for-sound-engineers> (accedido el 28 de junio de 2023).
- [9] A. Gómez, F. Morales y J. L. Molero, *Grabación en estudio. Preparación y técnicas*. Editorial Altaria, 2015.
- [10] "¿Qué es una cámara anecoica? Definición y Ejemplos ▷ EDS Robotics". EDS Robotics. <https://www.edsrobotics.com/blog/camara-anecoica/> (accedido el 29 de junio de 2023).
- [11] B. Owsinski, *The Recording Engineer's Handbook*, 2ª ed. Boston, MA: Course Technology Cengage Learning, 2009.
- [12] "C451 B | Reference small-diaphragm condenser microphone". Official AKG Store - Microphones, Headphones, and More! <https://www.ake.com/Microphones/Condenser%20Microphones/C451B.html> (accedido el 29 de junio de 2023).
- [13] "Handbücher - Soundman.de". Soundman.de - Mikrofone von Soundman. <https://soundman.de/handbuecher/> (accedido el 29 de junio de 2023).
- [14] "4100 - Simulador de cabeza torso (HATS) | Brüel & Kjær".

B&K | Sound and Vibration Measurement | Brüel & Kjær.
<https://www.bksv.com/es/transducers/simulators/head-and-torso/hats-type-4100> (accedido el 29 de junio de 2023).

[15] *Recommendations for Loudness of Internet Audio Streaming and On-Demand Distribution*, AESTD1008.1.21-9 (supersedes TD1004), Audio Engineering Society, Inc., New York, 2021.

[16] D. M. Huber, *Modern recording techniques*, 6^a ed. Boston: Focal Press/Elsevier, 2005.

[17] B. Bartlett, *Practical recording techniques*, 5^a ed. Boston: Elsevier/Focal Press, 2008.

10. Anexos

Anexo I - Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030.

Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS):

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No Procede
ODS 1. Fin de la pobreza.				X
ODS 2. Hambre cero.				X
ODS 3. Salud y bienestar.			X	
ODS 4. Educación de calidad.			X	
ODS 5. Igualdad de género.				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.				X
ODS 7. Energía asequible y no contaminante.				X
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.			X	
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.	X			
ODS 10. Reducción de las desigualdades.				X
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.				X
ODS 12. Producción y consumo responsables.			X	
ODS 13. Acción por el clima.				X
ODS 14. Vida submarina.				X
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.				X
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.				X

Descripción de la alineación del TFG con los ODS con un grado de relación más alto:

Este proyecto aborda temáticas relacionadas con la ODS número 9: 'Industria, innovación e infraestructura'. A través de la comparación de las técnicas de captación microfónicas y de postproducción para la espacialización del sonido de la guitarra clásica, esta investigación puede ser ubicada en el contexto de la innovación en el campo del sonido y de la música. Mediante el uso de micrófonos binaurales en una cámara anecoica, se emplea tecnología avanzada y especializada, que contribuye al desarrollo de infraestructuras y equipos técnicos necesarios para la producción musical innovadora. Este estudio refleja la importancia de invertir en infraestructuras y recursos que promuevan la industria del sonido y la música, fomentando la mejora de la calidad y la experiencia auditiva. De esta manera, se alinea con la ODS 9 al impulsar la innovación, la industrialización y la construcción de infraestructuras y la utilización de técnicas de grabación novedosas en la ingeniería del sonido.