

Grado en Ingeniería de Sonido e Imagen
2020-2021

Trabajo Fin de Grado

“Diseño de un Micrófono Biaural para Captación de Sonido Realista”

Tomás Criado Galache

Tutor: Eduardo López Fraguas
Leganés, 2021



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento - No Comercial - Sin Obra Derivada**

RESUMEN

La presente memoria corresponde con el diseño y la implementación de un micrófono biaural para la captación de sonidos realistas. Consta de electrónica analógica y un diseño tridimensional realizado mediante impresión 3D FDM.

Para el diseño 3D se partió de recursos libres de derechos para la modificación, a partir de los cuales se llevó a cabo una total remodelación para garantizar un sistema modular con el que realizar diferentes grabaciones dependiendo de las suposiciones requeridas. Por consiguiente, mediante el intercambio de piezas de una misma unidad se puede variar la ubicación de la cápsula microfónica en el oído emulado, el tamaño y forma de las orejas, siendo estos parámetros fundamentales para generar una sensación psicoacústica correcta para cada individuo. De este modo, se consigue un sistema muy versátil.

El circuito electrónico consiste en un preamplificador de varias etapas, donde se amplifica la señal recogida por las cápsulas microfónicas situadas en el diseño 3D que recrea una cabeza, simulando la captación de sonidos del oído humano. Para la implementación de este circuito electrónico, se han llevado a cabo diferentes etapas. En primer lugar se realizó el estudio de las cápsulas microfónicas de tipo electret, para su posterior acondicionamiento y amplificación. Posteriormente mediante simulación se realizó un primer circuito preamplificador simple y el primer prototipo mediante protoboard. Una vez alcanzados unos resultados satisfactorios se inició el proceso de diseño de la PCB, incrementando la complejidad del circuito mediante la implementación de nuevas configuraciones de amplificación y la adhesión de un sistema de balanceo de la señal. Se realizaron una serie de medidas eléctricas para la verificación del correcto funcionamiento y se corrigieron los errores encontrados. Finalmente, se realizó el circuito final junto a la PCB definitiva y se realizaron test de funcionamiento y caracterización.

Palabras clave: Micrófono Biaural; Preamplificador; Impresión 3D

DEDICATORIA

Como no podía ser de otro modo, mi mayor agradecimiento va dirigido a mis padres. Sin lugar a dudas, sin su apoyo hoy no me encontraría redactando este documento y no sería quien soy hoy. Todo lo pudiera escribir en estas líneas se quedaría corto. Simplemente, GRACIAS.

A mi familia, por el apoyo y el interés que han mostrado siempre en mis estudios.

A mis amigos, que me han acompañado a lo largo de estos años y me han apoyado en todo momento, dándome el apoyo que necesitaba y depositando en mí plena confianza. Me alegra poder contar con unas personas tan maravillosas en mi vida.

A mis compañeros y amigos de la universidad, de los que tanto he aprendido y por los momentos que hemos vivido juntos. Quisiera hacer una mención especial a Jorge Frutos por haber podido aprender tanto de él en todos estos años y la ayuda que me ha ofrecido en todo momento, y a Pablo Lago por ser mi inseparable compañero de clase y aventurarse conmigo desde el primer día en esta etapa de mi vida.

A mi tutor, Eduardo López, el cuál estuvo abierto a mis propuestas desde el primer correo electrónico, me ha orientado en todo momento y me ha ayudado a quitarme esta espinita que tenía clavada con la electrónica. Ha sido un placer trabajar contigo y has conseguido que esto sea una buena experiencia.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación del trabajo	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Antecedentes	2
1.3.1. Productos comerciales	2
1.3.2. Productos no comerciales	5
1.4. Marco regulador	6
1.5. Presupuesto	6
1.6. Impacto socio-económico	9
2. ESCUCHA BIAURAL	10
2.1. Localización en el plano horizontal	10
2.1.1. Diferencia de tiempos interaural	10
2.1.2. Diferencia de niveles interaural	11
2.2. Localización en el plano vertical	12
2.3. Cono de confusión	14
2.4. Problemática de particularización	15
2.4.1. Solución a la problemática de particularización	15
2.4.2. Otros sistemas	15
3. MODELO 3D	16
3.1. Diseño 3D	16
3.2. Impresión 3D	22
4. ELECTRÓNICA	26
4.1. Planteamiento	26
4.2. Primer prototipo	27
4.2.1. Diseño y simulación	28
4.2.2. Diseño de PCB	36
4.2.3. Implementación y resultados	38

4.3. Segundo prototipo	42
4.3.1. Diseño de PCB	42
4.3.2. Implementación y resultados	43
4.4. Prototipo final	45
4.4.1. Diseño y simulación	45
4.4.2. Diseño de PCB	47
4.4.3. Implementación y resultados	48
5. PRUEBAS Y CONCLUSIONES	50
6. TRABAJOS FUTUROS	52
BIBLIOGRAFÍA	53
ANEXO 1. ABSTRACT	
ANEXO 2. CÓDIGO MATLAB PARA CÁLCULO DE COMPONENTES	

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	GRAS KEMAR Manikin Type 45BA	2
1.2	Neumann Dummy Head KU 100	3
1.3	Soundman Dummy Head	3
1.4	B1-E Dummy Head	4
1.5	3DIO	4
1.6	Proyectos previos en impresión 3D	5
1.7	Diagrama de Gantt	8
2.1	Plano horizontal y azimut	10
2.2	Esquema ITD	11
2.3	Influencia del pabellón auditivo a diferentes frecuencias	13
2.4	Localización vertical	13
2.5	Cono de confusión	14
3.1	Modelo inicial de cabeza	16
3.2	Modelo inicial de oreja	17
3.3	Modelo inicial de conducto auditivo	17
3.4	Módulo pabellón auditivo	18
3.5	Módulo pabellón conducto auditivo	19
3.6	Vista interna del módulo conducto auditivo	19
3.7	Sistema de tornillería	20
3.8	Cavidad electrónica y panel trasero	21
3.9	Unión cabeza	21
3.10	Primeras pruebas de impresión	22
3.11	Impresión del primer pabellón auditivo	23
3.12	Dimensionado del pabellón auditivo	23
3.13	Impresión hemisferio izquierdo	24
3.14	Resultado hemisferio izquierdo	24
3.15	Resultado de cabeza final	25

3.16	Vista del panel trasero	25
4.1	Diseño y simulación del primer prototipo con LTspice	28
4.2	Esquemático cápsula microfónica	29
4.3	Montaje en placa de pruebas	33
4.4	Simulación del primer prototipo con LTspice. 1kHz @ 90dB	34
4.5	Simulación del primer prototipo con LTspice. 1kHz @ 60dB	35
4.6	Circuito PCB primer prototipo	37
4.7	Diseño PCBs primer prototipo	37
4.8	PCB primer prototipo	38
4.9	Análisis PCBs primer prototipo	39
4.10	Montaje para medición	39
4.11	Gráficas test primer prototipo	41
4.12	Visualización 3D del diseño de PCB del segundo prototipo	42
4.13	PCB segundo prototipo	43
4.14	Test de la etapa de balanceo de la señal. DVR134	44
4.15	Diseño prototipo final	45
4.16	Diseño extracción tensión continua de la fuente phantom	46
4.17	PCB prototipo final	47
4.18	PCB de alimentación	48
4.19	Prototipo final	49
5.1	Setup de grabación	50

ÍNDICE DE TABLAS

1.1	Costes Herramientas de testeo y fabricación	6
1.2	Coste impresión 3D y construcción biaural	6
1.3	Coste Prototipo Final	7
1.4	Coste recursos humanos	8

DICCIONARIO DE CONCEPTOS

- **Impresión 3D FDM (Fused Deposition Modeling)** - Creación de piezas 3D por la superposición de capas de material termoplástico.
- **PLA** - Material plástico (ácido poliláctico) derivado de materias primas naturales como el maíz.
- **Micrófono Electret** - Micrófono de condensador prepolarizado.
- **Auralización** - Proceso de hacer audible mediante modelado, físico o matemático, el campo de sonido de una fuente en un espacio, de tal manera que simule la experiencia auditiva biaural en una posición dada en el espacio modelado. [1]
- **HRIR (Head-related impulse response)** - Respuesta al impulso relacionada con la cabeza. Contiene información indirecta del oyente como la forma de la cabeza o sus orejas. [2]
- **HRTF (Head-related transfer function)** - Transformada de Fourier de la HRIR. [2]
- **Creative Commons (CC)** - Organización que permite realizar un registro de obras y trabajos, otorgando al creador de una cierta flexibilidad para protegerla y dotar a terceros de ciertos privilegios. [3]
- **Señal balanceada** - Se dice que una señal está balanceada cuando una misma señal eléctrica se transmite por dos conductores en contrafase. De este modo, si en el proceso de transmisión se produce una interferencia, esta será captada por los dos conductores del mismo modo y al volver a invertir la señal transmitida en contrafase, las señales se sumarán en fase aumentando la amplitud de la señal final, mientras que la interferencia se sumará en contrafase, anulándose.
- **DAW (Digital Audio Workstation)** - Estación de trabajo de audio digital. Software para grabar, editar, mezclar y procesar audio.
- **Tweeter** - Altavoz de frecuencias agudas.
- **Woofer** - Altavoz de frecuencias medias.
- **Barrido sinusoidal (Sweep Sine)** - Función sinusoidal cuya frecuencia varía en el tiempo de forma progresiva de menor a mayor frecuencia. En audio dicho barrido se produce en la banda de interés de 20Hz a 20kHz.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación del trabajo

Desde sus orígenes, el mundo audiovisual ha tratado de buscar la manera de reproducir el mundo tal y como lo percibe el ser humano. Para ello se basa en la estimulación de los sentidos de la vista y el oído, encargados de percibir el entorno que nos rodea. Tras el paso de los años, con la mejora de la tecnología, esta industria ha avanzando y se han desarrollado sistemas capaces de llegar al objetivo inicial con una mayor fidelidad [4].

En la actualidad se está experimentando un auge cada vez mayor en referente a la realidad virtual y la recreación de espacios. Esto se ve claramente si se fija la atención en industrias como el cine y los videojuegos. A pesar de que aparentemente con una buena sensación visual se obtienen grandes resultados de inmersión para el espectador, la introducción de un audio realista mejora de la experiencia en gran medida, siendo este aspecto fundamental [5]. Para ello se encuentran en desarrollo diferentes técnicas de grabación, simulación y recreación espacial del sonido. Dentro de estas técnicas se puede destacar el uso de micrófonos biaurales, de los que se tratará en este TFG.

Debido al alto precio de los micrófonos biaurales en el mercado y la dificultad que requiere realizar auralizaciones, obtener grabaciones sonoras realistas no es algo que esté al alcance de todos. Por ello, la realización de un sistema capaz de reducir el coste y que sea fácilmente reproducible, podría abrir el mundo del sonido biaural a diferentes sectores. Además, la reciente situación debida al Covid-19 ha llevado a impulsar más aún el uso de sistemas de streaming y reducir la posibilidad de asistir de manera presencial a ciertos eventos, por lo que la utilización de micrófonos biaurales podría ser una gran herramienta para acercar la experiencia al usuario de una manera sencilla y efectiva.

1.2. Objetivos

El objetivo de este proyecto es la realización de un sistema de grabación biaural de bajo coste, aunando en el mismo diferentes vertientes de la ingeniería como puede ser la impresión 3D, la electrónica y los sistemas electroacústicos.

Para la realización satisfactoria del proyecto se han fijado los siguientes objetivos:

- Diseño tridimensional de una cabeza con morfología humana y oído externo a escala 1:1.
- Modularidad del diseño para la simulación de diferentes condiciones.
- Realización y construcción del diseño mediante impresión 3D.

- Salida de señales balanceadas, compatibles con los sistemas de audio profesionales.
- Ajuste de ganancia variable.
- Capacidad de realizar grabaciones biaurales.

1.3. Antecedentes

1.3.1. Productos comerciales

Para contar con una serie de referencias a la hora de iniciar el planteamiento del sistema, se ha realizado una recopilación de diferentes productos comerciales con las características indicadas por el fabricante. Se ha tenido en cuenta principalmente el precio del producto, las cápsulas usadas junto a la sensibilidad de las mismas (para tener una intuición de como será la transducción), la naturaleza de la señal de salida (si es balanceada o no), los conectores usados y el peso del producto.

GRAS KEMAR Manikin Type 45BA (fig. 1.1) [6] - 10.000€ - Dos cápsulas electret omnidireccionales. Salida BCN y Lemo no balanceada. Sensibilidad 12,5mV/Pa o 50mV/Pa. Peso 7,75Kg.



Fig. 1.1. GRAS KEMAR Manikin Type 45BA [6]

Neumann Dummy Head KU 100 (fig. 1.2) [7] - 7.888€ - Dos cápsulas electret omnidireccionales. SPL max 135dB y 145dB al activar el atenuador. Salida XLR5 balanceada y BNC no balanceada. Sensibilidad 20mV/Pa. Peso 3,5Kg.



Fig. 1.2. Neumann Dummy Head KU 100 [7]

Soundman Dummy Head (fig. 1.3) [8] - 584€ - No incluye cápsulas microfónicas (Soundman OKM II Classic/Studio A3 - electret omnidireccionales - 239€). Peso 4,6Kg. Fabricado en madera.



Fig. 1.3. Soundman Dummy Head [8]

B1-E Dummy Head con micrófonos BE-P1 (fig. 1.4) [9] - 590€ - Dos cápsulas de condensador omnidireccionales. SPL max de 119dB. Salida XLR balanceada. Sensibilidad 100mV/Pa. Peso 2,5Kg. Fabricado en fibra de vidrio.



Fig. 1.4. B1-E Dummy Head [9]

3DIO - Free Space Binaural Microphone, XLR o Pro II (fig. 1.5) [10] - 328€, 533€ o 1643€ - Solo formato orejas (no tienen cabeza ni torso). Dos cápsulas electret omnidireccionales. SPL max de 112dB para el modelo básico y el modelo XLR o 134dB para el modelo Pro. Salida minijack no balanceada, XLR balanceada y minijack no balanceada o XLR balanceada y minijack no balanceada respectivamente. Sensibilidad 40mV/Pa. Peso 680g, 755g o 755g.



Fig. 1.5. 3DIO [10]

1.3.2. Productos no comerciales

Siguiendo una estética similar a la de los productos comerciales, se puede encontrar una serie de proyectos realizados mediante impresión 3D. En este caso, las especificaciones de los mismos no son tan claras como en el apartado anterior debido a que estos proyectos no buscan una comercialización y no cuentan con un hoja de características del resultado final.

A continuación se muestran algunos de estos proyectos.

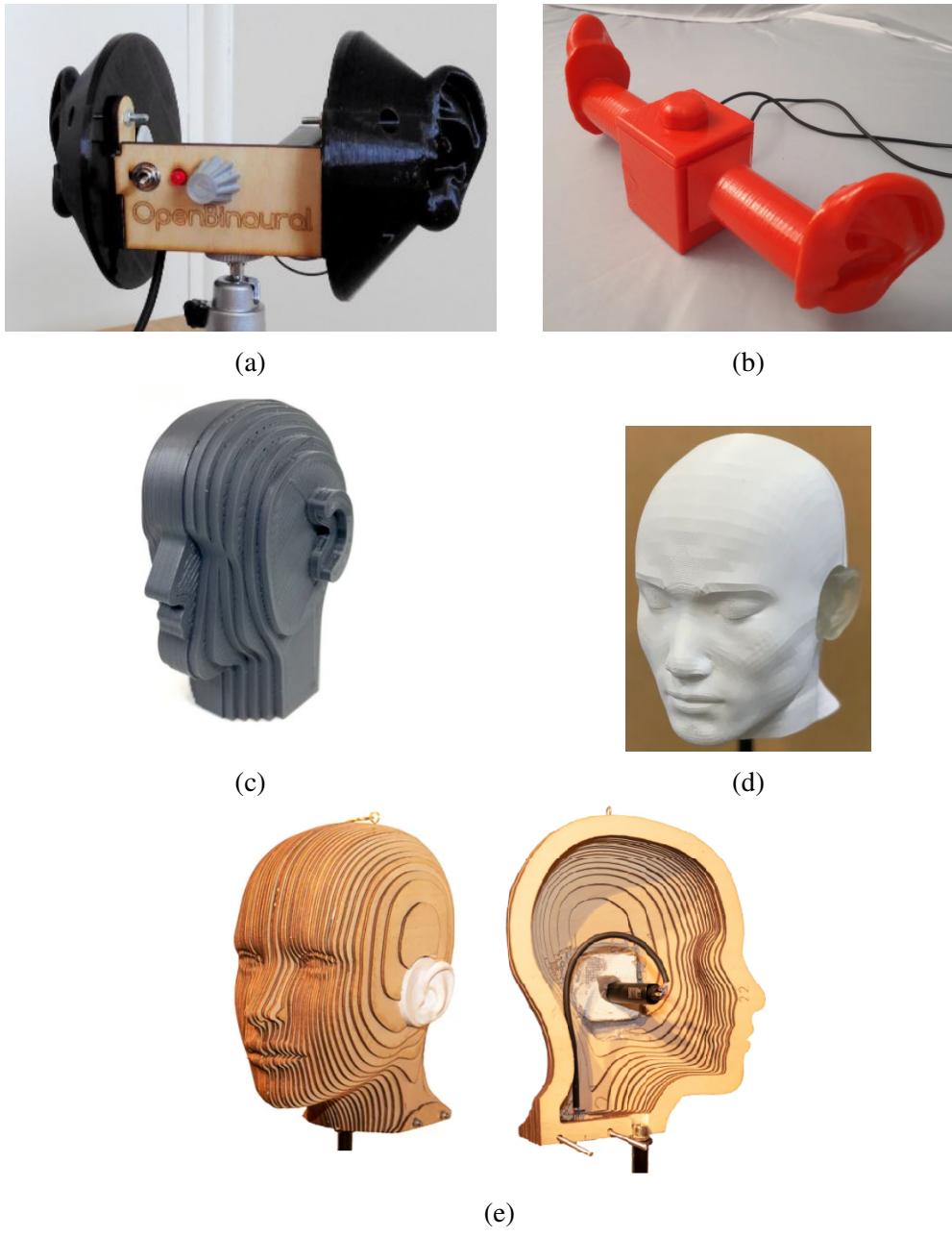


Fig. 1.6. Proyectos previos en impresión 3D: (a) OpenBinaural [11],
(b) Binaural Microphone [12], (c) Binaural Head [13], (d) OpenAural [14],
(e) Artificial head for binaural recordings [15]

1.4. Marco regulador

Para una posible comercialización de este dispositivo y aplicación en las diferentes áreas en las que puede ser utilizado, deberá cumplir los estándares de las distintas partes de la normativa “Electroacoustics - Simulators of human head and ear”, más en concreto la parte 7, “Head and torso simulator for the measurement of air-conduction hearing aids” localizada en IEC TS 60318-7: 2017 [16] y en ANSI S3.36-1985 (R2006), “Specification For Manikin For Simulated In Situ Airborne Acoustic Measurements” [17]. En estas normativas se define cómo debe ser la morfología y diferentes características del maniquí, más en concreto, cómo deben sus dimensiones geométricas y sus propiedades acústicas. Del mismo modo, se define que la banda de frecuencias que se debe considerar es de 100Hz a 16kHz. También se hace referencia a la forma del canal auditivo y a los intervalos de tolerancia e incertidumbre en las medidas.

1.5. Presupuesto

Dada la naturaleza de este proyecto, se ha requerido de la construcción de diferentes prototipos con su correspondiente implementación y coste. Para una mayor claridad en el análisis se ha decidido tratar tan solo el último prototipo siendo este el más completo y significativo.

A continuación se muestran las tablas de costes en cuanto a material se refiere.

Material	Unidades	Coste Unitario (€)	Total (€)
Creality Ender 3	1	150,00	150,00
Tronxy X5SA	1	300,00	300,00
Estación de soldadura	1	100,00	100,00
Osciloscopio	1	300,00	300,00
Fuente de alimentación	1	150,00	150,00
Total			1.000,00

TABLA 1.1. COSTES HERRAMIENTAS DE TESTEO Y FABRICACIÓN

Material	Unidades	Coste Unitario (€)	Total
Bobina PLA 1kg	2	20	40
Bobina Filaflex 250g	1	20	20
Tornillería miscelánea	1	15	15
Material post procesado	1	5	5
Total			80

TABLA 1.2. COSTE IMPRESIÓN 3D Y CONSTRUCCIÓN BIAURAL

Material	Unidades	Coste Unitario (€)	Total (€)
Resistencias			
51Ω	2	0,01	0,01
1kΩ	2	0,01	0,01
4kΩ	2	0,01	0,01
6kΩ	2	0,01	0,01
33kΩ	2	0,01	0,01
10kΩ	2	0,01	0,01
100kΩ	8	0,01	0,05
Condensadores			
1pF cerámico	2	0,08	0,16
1μF poliéster	4	0,67	2,664
1μF electrolítico	2	0,08	0,16
3.3μF tantaló	4	0,34	1,34
4.7μF tantaló	2	0,81	1,62
10μF electrolítico	2	0,08	0,16
330μF tantaló	2	2,91	5,82
Potenciómetros			
100kΩ Log dual	1	2,13	2,13
Circuitos integrados			
OPA227PA	4	4,61	18,44
DRV134PA	2	6,60	13,202
Switch			
MTS 402	1	2,00	2,00
Reguladores			
LM7805	1	1,63	1,63
LM7905	1	1,29	1,29
Cápsulas microfónicas			
Primo EM172	2	12,00	24,00
PCB			
PCB Preamp	2	0,80	1,6
PCB Pwr	1	0,40	0,4
Conectores			
Phoenix	2	1,00	2,00
XLR	2	3,10	6,20
Total			84,94

TABLA 1.3. COSTE PROTOTIPO FINAL

Por consiguiente, se puede concluir que el precio del producto final sería de aproximadamente 164€, sumando tan solo los totales del prototipo final y el material usado para la impresión 3D y el montaje de la cabeza.

Por otro lado, habría que tener en cuenta el coste de los recursos humanos, teniendo en cuenta que el trabajo ha sido realizado por un ingeniero junior en telecomunicaciones (ver fig. 1.7), cuyo sueldo de media oscila entorno a los 12€/h [18].

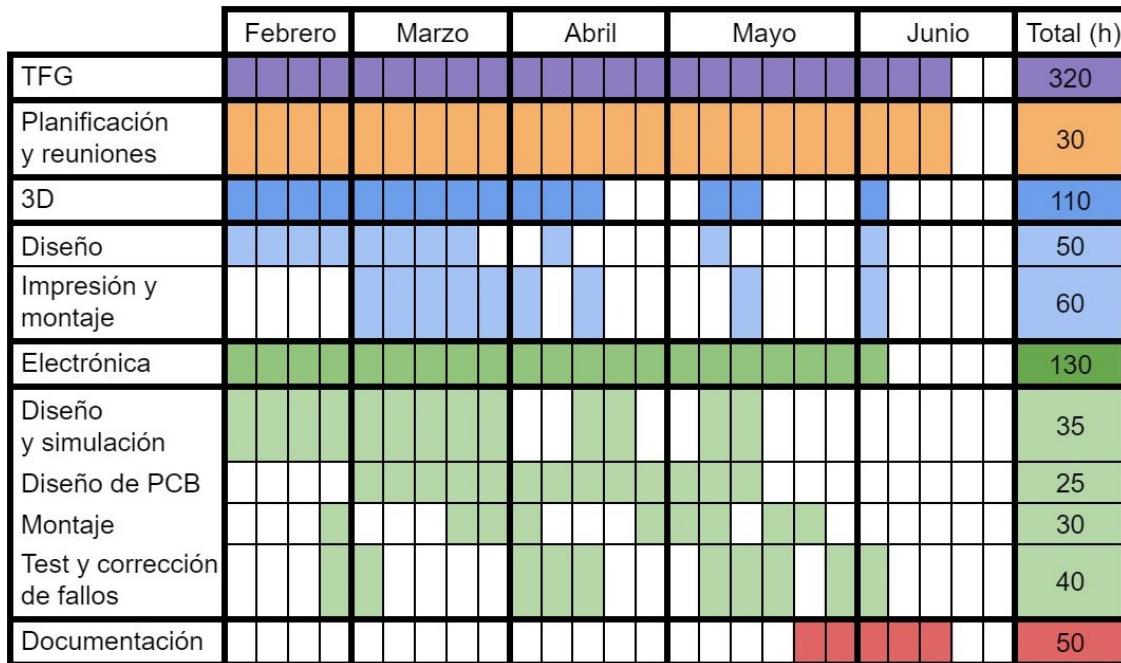


Fig. 1.7. Diagrama de Gantt

Trabajo	Horas	Coste Unitario (€)	Total (€)
Planificación y reuniones	30	12	360,00
Diseño 3D	50	12	600,00
Fabricación y montaje 3D	60	12	720,00
Diseño electrónica	60	12	720,00
Montaje electrónica	30	12	360,00
Testeo	40	12	480,00
Documentación	50	12	600,00
Total	320		3.840,00

TABLA 1.4. COSTE RECURSOS HUMANOS

Dado que el software requerido es gratuito, no es necesario realizar un desglose de los gastos generados por licencias de software de pago.

En conclusión, el coste total sería de 5.004,94€. Sin embargo, el coste real, oscila entre los 100€ y los 200€ debido a que no ha habido un coste salarial y se ha empleado un equipo del que ya se disponía con anterioridad.

1.6. Impacto socio-económico

Dada la situación que se está viviendo a día de hoy por la crisis del Covid-19, donde los eventos en gran medida se están realizando de manera online, y gracias al desarrollo de la capacidad de la infraestructura de internet, se está haciendo muy popular el streaming como vía de comunicación y transmisión de grandes acontecimientos. El uso de herramientas como el micrófono biaural desarrollado en este TFG podrían ser de un uso muy popular para la retransmisión de eventos de este tipo, transportando al oyente de una manera “psicoacústica” al lugar del evento, generando una experiencia más auténtica desde la comodidad de su casa. De este modo grandes eventos como acudir a una ópera o un concierto, podrían ser retransmitidos con una mayor “sensación de directo”, muy personal en este tipo de actividades.

Por otro lado, el bajo coste y la posibilidad de construcción DIY puede llegar a significar un empujón a este mundo a nuevos desarrolladores y creadores de contenido, por ejemplo, creadores de videojuegos independientes que quieran implementar sonido biaural de bajo coste para que sus juegos gocen de una experiencia más inmersiva.

Actualmente el uso generalizado de auriculares por parte de toda la sociedad (desde los más jóvenes, a los más ancianos) debería ser un punto a tener en cuenta a la hora de usar audio biaural. A modo de ejemplo, hay plataformas de contenido donde el consumo se realiza en gran medida en dispositivos móviles, donde es muy común el uso de auriculares, por consiguiente, los anunciantes podrían generar un mayor impacto sobre ciertos productos mediante el uso de audio biaural.

Por consiguiente, se puede hablar de que las futuras aplicaciones de este prototipo pueden convertirse en el día a día de todos y no solo afectar a la comunidad académica, sino que además, puede tener aportaciones útiles para diferentes industrias que directa o indirectamente hacen uso del sonido para generar una mejor experiencia al usuario.

2. ESCUCHA BIAURAL

Se define biaural por la Real Academia Española como: “Dicho de una audición: Que se realiza simultáneamente con los dos oídos.” [19]. De donde se pueden obtener varias conclusiones de las que se parte para definir la técnica de grabación biaural.

Esta técnica se basa en la premisa de que los seres humanos están dotados de dos oídos con los que se tiene la capacidad de escuchar sonidos, y gracias a la experiencia personal de cada individuo a lo largo de los años, los humanos son capaces de percibir la ubicación espacial de esos sonidos. El cerebro humano ha aprendido a percibir esa ubicación de los elementos gracias a la repetibilidad de sucesos y la manera particular en la que son captadas las vibraciones, dependiendo de diferentes conceptos físicos de las ondas sonoras [20].

2.1. Localización en el plano horizontal

Desde un punto de vista evolutivo, debido a la ubicación de los oídos en el plano horizontal (ver fig. 2.1 izquierda), los seres humanos son capaces de percibir la dirección de las fuentes sonoras en este plano situado a la altura del campo de visión. A este fenómeno se le conoce como lateralización [20]. Uno de los pioneros en estudiar la lateralización fue Lord Rayleigh, con la teoría Dúplex, el cuál definió dos sistemas mediante los que el ser humano es capaz de determinar el ángulo azimut (ver fig. 2.1 derecha). Estos dos sistemas son la diferencia de tiempos interaural y la diferencia de niveles interaural [21].

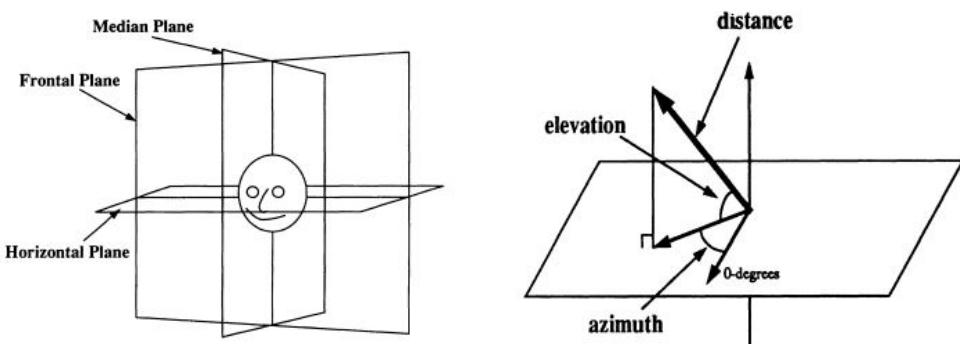


Fig. 2.1. De izquierda a derecha: Descripción del plano horizontal. Definición del ángulo lateral, azimut [22]

2.1.1. Diferencia de tiempos interaural

La Diferencia de Tiempos Interaural o ITD (del inglés Interaural Time Differences) es la diferencia temporal que hay entre la recepción de una señal sonora por parte de un oído y el otro. Si se consideran tonos puros, esta diferencia de tiempos, puede verse traducida

como una diferencia de fase. Gracias a esto, el cerebro es capaz de identificar el origen del cual proviene dicha señal.

La ITD no será relevante para longitudes de onda pequeñas (altas frecuencias) donde esta diferencia de fases será confusa, ya que suponiendo tonos puros, las señales podrían llegar a los oídos en fase pero en diferentes periodos, realizándose una interpretación errónea de la diferencia temporal ya que no se vería reflejada. Por otro lado, la ITD será relevante para longitudes de onda grandes (bajas frecuencias), debido a que se producirá un desfase significativo entre las señales recibidas por los oídos que, en esta ocasión, se realizarán para un mismo periodo.

Esta diferencia de fase se produce como consecuencia de una diferencia de tiempos, debida a su vez por la distancia que recorren estas señales, esta es la razón por la que un sistema biaural es mejor si se considera la cabeza ya que el frente de onda deberá rodear la cabeza hasta llegar a las orejas (ver fig. 2.2), produciendo con ello una diferencia de tiempo más adecuada. Esto se puede comprobar con la ecuación (2.1).

Como conclusión, se puede definir que esta propiedad se encuentra a bajas frecuencias, por debajo de 1,5KHz. [21] [23]

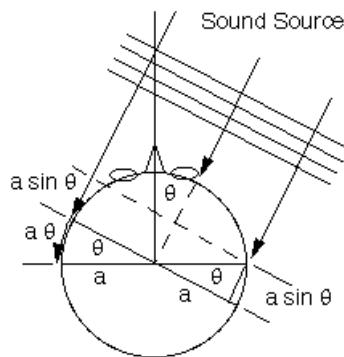


Fig. 2.2. Representación del caso ITD. Se muestra un campo sonoro incidente sobre un sujeto, observándose la diferencia de recorrido trazada entre los oídos [21]

$$ITD = \frac{a}{c}(\theta + \sin(\theta)) \quad (2.1)$$

Donde θ es el ángulo azimut, a es el radio de la cabeza y c es la velocidad del sonido.

2.1.2. Diferencia de niveles interaural

La Diferencia de Niveles Interaural o ILD (del inglés Interaural Level Differences) es la diferencia de presión sonora que hay entre los dos oídos que reciben una misma señal. Del mismo modo que ocurría en el caso de la ITD, la diferencia de las distancias entre la fuente y los oídos es la causante de que la señal transmitida pierda intensidad en el recorrido. A su vez, esta señal se ve atenuada por la sombra acústica generada por la propia cabeza del receptor o inclusive por las orejas si la fuente sonora está ubicada en la

parte posterior del oyente. Por consiguiente, una vez más la teoría refuerza la necesidad de tener una cabeza en los sistemas biaurales, frente a los sistemas que no la consideran.

En este caso, si se compara la longitud de onda de un tono puro de frecuencia baja, frente a las dimensiones de la cabeza, se puede observar que la longitud de onda de dicho tono puro será mucho más grande que el tamaño que la cabeza. Esto significa que la difracción acústica será muy débil, atenuando muy levemente la diferencia de niveles entre los oídos, obteniendo una diferencia despreciable. Por otro lado, si se considera un tono puro de alta frecuencia, el tamaño de la cabeza del receptor será mucho mayor que la longitud de onda del tono puro, por lo que la sombra acústica sería mayor para este caso, atenuando mucho más la señal para uno de los oídos, por lo que la diferencia de niveles será muy significativa.

Como conclusión, se puede definir que esta propiedad se encuentra a altas frecuencias, por encima de 2KHz, siendo irrelevante para frecuencias inferiores. Se puede observar como la ITD y la ILD son totalmente complementarias. [21] [23]

$$ILD = 20 \log \frac{\|H_L(f)\|}{\|H_R(f)\|} \quad (2.2)$$

Donde f es la frecuencia y $H_L(f)$ y $H_R(f)$ son las HRTFs (Head-related transfer function) del oído izquierdo y del oído derecho correspondientemente. Se usan las HRTFs debido a que de este modo se considera particularmente las características de un individuo a la hora de obtener la diferencia de niveles. [24]

2.2. Localización en el plano vertical

Mientras que para realizar una localización en el plano horizontal el cerebro es capaz de tener en cuenta la diferencia de niveles y de tiempos entre la recepción de una señal para los diferentes oídos, en el caso de la localización en el plano vertical se ve influenciada en gran medida por la forma del pabellón auditivo.

Los diferentes pliegues que conforman el pabellón auditivo son capaces de guiar las ondas mediante rebotes en el mismo, reflejando las ondas acústicas hacia el conducto auditivo. Debido a la forma del pabellón auditivo este interacciona de diferente forma para cada longitud de onda, amplificando o atenuando en mayor o menor medida para diferentes frecuencias. Por ello, se puede entender el pabellón auditivo como un ecualizador natural. En la figura 2.3 se puede ver la representación de esta amplificación (valores superiores a 1, representado con tonos progresivos de cian a rojo) o atenuaciones (valores inferiores a 1, representados con tonos azules), así como el ángulo de máxima eficiencia de excitación de estas resonancias. Se puede apreciar como a medida que aumenta la frecuencia, el comportamiento del pabellón pasa de ser más omnidireccional (como en el caso de la figura 2.3a, considerando 4.2kHz), a ser más directivo. Por otro lado, se puede comprobar como para 7.2 kHz (fig. 2.3b) y para 9.5 kHz (fig. 2.3c), el ángulo de

excitación máxima es muy vertical, frente al ángulo de 11.6 kHz (fig. 2.3d) que es muy horizontal. Con estos ejemplos, se puede tener una idea de la repercusión que tiene la forma del pabellón auditivo en la captación del sonido. [25]

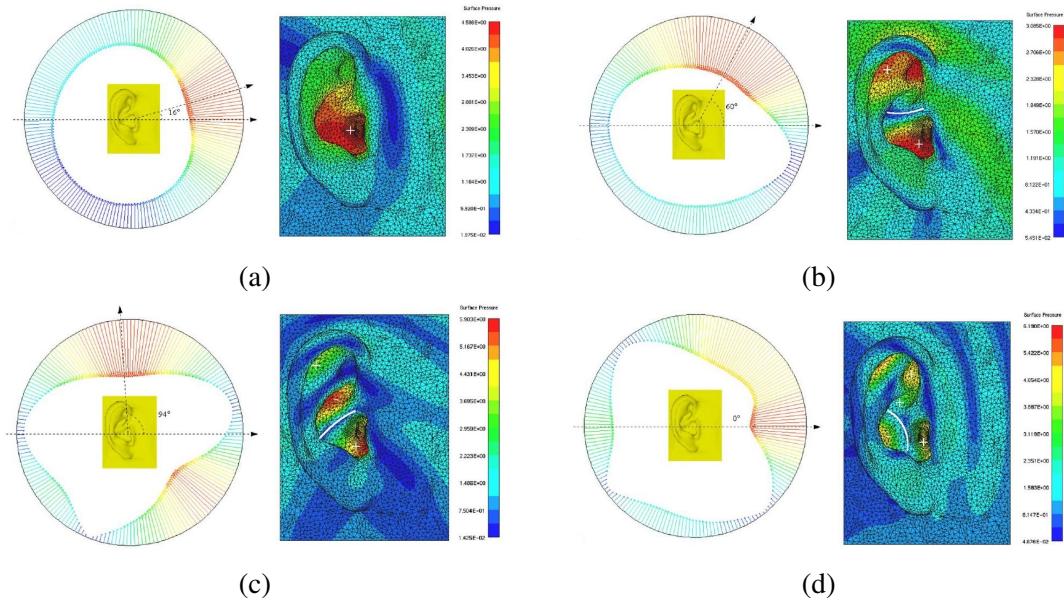


Fig. 2.3. Influencia del pabellón auditivo a diferentes frecuencias: (a) 4.2 kHz, (b) 7.2 kHz, (c) 9.5 kHz, (d) 11.6 kHz [25]

Por otro lado, no solo la forma del pabellón auditivo ayuda a la localización de fuentes sonoras en el plano vertical. Los hombros y el torso generan reflexiones de las ondas sonoras al chocar con estos, dirigiéndolas de nuevo al oído, con las consecuentes diferencias temporales (ver fig. 2.4). El cerebro es capaz de captar estas reflexiones y reinterpretarlas. Por consiguiente, es muy habitual encontrar que en las mediciones profesionales se utilicen productos similares al KEMAR de GRAS (fig 1.1), el cual se conforma no solo de cabeza sino también de hombros y torso, siendo muy habitual vestir al maniquí para asemejar la respuesta del sistema todo lo posible a la realidad. Para la realización de este TFG se ha optado por obviar la realización de hombros y torso debido a la cantidad de material y horas de impresión que supondría realizarlo, pero dado que es un diseño modular, sería sencillo implementar una adaptación para considerar esto. [26]

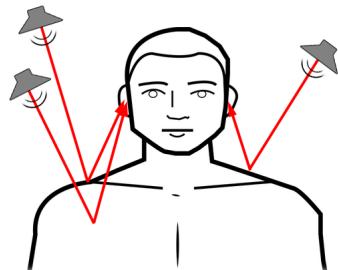


Fig. 2.4. Localización vertical. Influencia de las reflexiones producidas por el hombro y el torso

Un problema habitual a la hora de realizar auralizaciones tiene relación directa con lo tratado anteriormente. La cabeza tiene la posibilidad de rotar sobre el cuello, independientemente del torso y los hombros que se mueven en tandem. Esto es un problema complejo a la hora de tratar de realizar simulaciones de realidad virtual o aumentada, donde el usuario pudiera moverse de manera libre, como por ejemplo pudiera ser un videojuego de campo abierto. [27][20][23]

2.3. Cono de confusión

Siguiendo la teoría de los anteriores apartados, el ser humano es capaz de localizar objetos mediante la ITD y la ILD. En ocasiones estos parámetros resultan ambiguos debido a que se pueden dar los mismos valores de ITD y ILD en diferentes posiciones. Estas posiciones se localizan en el área del cono centrado en el eje interaural (alineado con el oído). A esto se le denomina cono de confusión. [27]

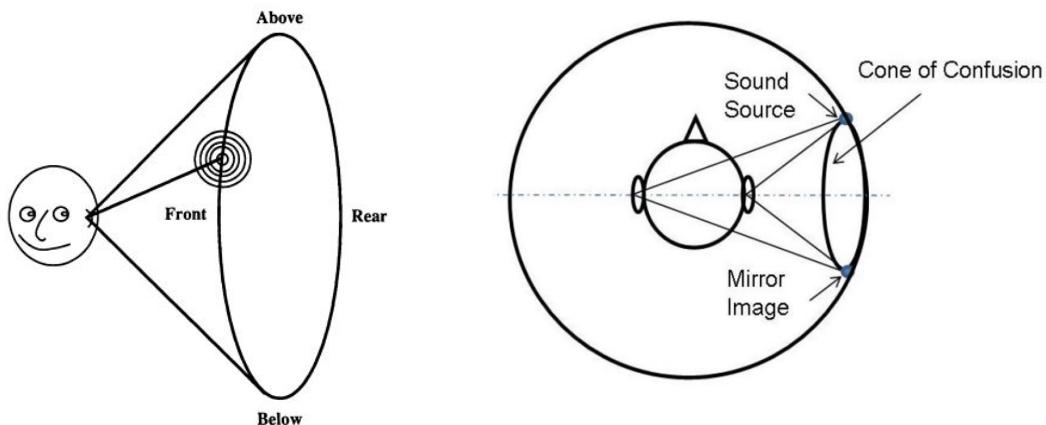


Fig. 2.5. A la izquierda, representación del cono de confusión [22]. A la derecha, ejemplo de caso de confusión (vista en planta) [28]

En la imagen de la figura 2.5 izquierda se representa este cono de confusión. Si se situase una fuente en cualquiera de los puntos que abarca este cono sería costoso ubicar con precisión dicha fuente en el espacio. Esto da una explicación directa al porqué cuando se realizan audiciones con auriculares en un gran número de ocasiones el sujeto no es capaz de definir si la fuente está ubicada delante o detrás (ver fig. 2.5 derecha) ya que la ITD y la ILD sería similar en ambos casos. Nótese que como se explicaba con anterioridad hay más parámetros a tener en cuenta que las diferencias de tiempo y de nivel interaurales, que pueden llevar a facilitar la ubicación de las fuentes en estos casos.

2.4. Problemática de particularización

Debido a los parámetros anteriormente desarrollados, se puede extraer una clara conclusión, es físicamente imposible realizar una grabación realista por medio de un micrófono biaural que sea igual de valida para todos los posibles sujetos que vayan a realizar la audición de dicha captación [29].

Esto se debe a que cada humano tiene una serie de características físicas (tamaño de cabeza y orejas, forma del torso, características del pabellón auditivo, etc) que conforman el propio sistema auditivo de cada oyente en concreto y, como se argumentaba en la introducción, dichas características son fundamentales para que el efecto conseguido sea fiel a la perfección.

2.4.1. Solución a la problemática de particularización

Ante esta dificultad, una de las soluciones que se pueden encontrar dentro de los productos comerciales más profesionales es la posibilidad de sustituir diferentes partes para adaptarlas a las diferentes fisionomías. En la práctica, lo más habitual es la variación del modelo del pabellón auditivo, ya que es una de las piezas clave para la obtención de un resultado positivo.

Por otro lado, ante la posibilidad de intercambiar el pabellón auditivo surge la imposibilidad de tener un número de recambio lo suficiente amplio como para cubrir con exactitud todos los tipos. Por consiguiente, los modelos utilizados de manera práctica se basan en estudios de promediado de las características de estos pabellones auditivos, con el fin de obtener buenos resultados para un gran grupo de personas.

2.4.2. Otros sistemas

Debido a esta problemática hay empresas que han centrado sus estudios en la creación de sistemas de simulación de sonido biaural. A esto se le conoce como auralización. Este proceso se basa en la obtención de respuestas al impulso de la cabeza humana para la caracterización de las mismas, consiguiendo la HRTF (Head-related transfer function) o la HRIR (Head-related impulse response) [2] para posteriormente recrear los diferentes escenarios deseados. A colación de esto, se han desarrollado tecnologías de escaneo del pabellón auditivo para que la caracterización de la cabeza humana sea lo más similar a la del sujeto que va a realizar la escucha finalmente sintetizada. En definitiva, esta tecnología se basa en el uso de herramientas diferentes a las tratadas en este trabajo para la obtención de un audio biaural.

3. MODELO 3D

Al comienzo de este TFG la idea propuesta se basaba en la utilización de un diseño 3D preconcebido conformado tan solo de la parte del oído externo, con el objetivo realizar la parte eléctrica del mismo. Tras investigar sobre el tema, consultar los modelos comerciales y tener un asesoramiento por parte de un experto en acústica, se llegó a la conclusión de que el diseño mejoraría notoriamente si se realizaba la cabeza completa.

Se planteó el uso de cabezas de maniquíes o de poliestireno. Finalmente se optó por realizar todo el diseño en 3D para su posterior impresión debido a las grandes ventajas que ofrecen estos sistemas. A continuación se muestra el proceso de diseño 3D y las decisiones tomadas para la creación de una cabeza modular teniendo en cuenta diferentes consideraciones basadas en los aspectos teórico-prácticos tratados en el anterior apartado para conseguir de este modo una mayor versatilidad.

3.1. Diseño 3D

Para la realización del diseño, adaptación y modelado 3D, se utilizó la herramienta online “Tinkercad”.

Como punto de partida, se inició el modelado a partir de diseños con licencia Creative Commons (CC) que permitían la reutilización y modificación. En primer lugar se seleccionaron las partes de estos proyectos sobre las cuales se basó el diseño final.



Fig. 3.1. Modelo de cabeza, extraído de “Full Size Human Head Model for resting headsets on” diseñado por “lehthanis”[30]

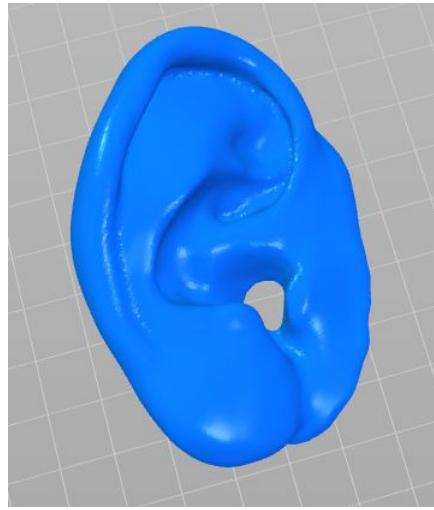


Fig. 3.2. Modelo de oreja, extraído de “Binaural Microphone” diseñado por “jonny”[12]

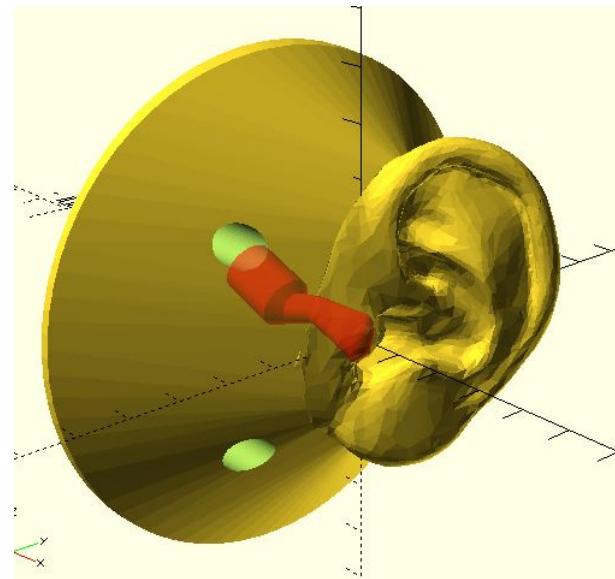


Fig. 3.3. Modelo de conducto auditivo, extraído de “Open Binaural” diseñado por “CarlosGS”[11]

Una vez cargados en nuestra herramienta, en primer lugar se realizó un escalado de los elementos para que coincidieran con el tamaño de una cabeza real. Para ello se realizaron diversas mediciones de tres sujetos tratando de conseguir un tamaño promedio y realista.

Un punto de partida muy importante era cómo y dónde se introduciría la electrónica dentro de nuestra cabeza. La decisión final fue tomar un eje de simetría vertical y partir la cabeza sobre el mismo, pudiendo acceder de este modo al interior y la pieza final constaría de dos partes impresas de manera independiente que posteriormente se unirían. Partiendo de este planteamiento y para agilizar el trabajo se comenzó a trabajar solo sobre el lado derecho de la cabeza, para finalmente realizar una simetría del trabajo y tener dos partes totalmente simétricas.

Debido a que la definición de la forma del pabellón auditivo es sumamente importante para nuestra aplicación se optó por suprimir las orejas del diseño de la cabeza original (fig. 3.1) y se añadieron las de la figura 3.2.

Como se indicaba en el estudio de la escucha biaural, el pabellón auditivo y la diferencia entre sujetos del mismo es algo muy importante a tener en cuenta. Una de las posibles soluciones planteadas para adaptar el audio biaural a diferentes grupos de personas es tener la posibilidad de cambiar el pabellón auditivo. Para ello se comenzó a plantear la forma en la que poder intercambiar piezas que tuvieran diferentes características.

Este problema se adaptó creando un diseño modular con diferentes partes intercambiables, con el fin de poder realizar cambios significativos al producto final. En el caso del pabellón auditivo, se “recortó” un poliedro del área rectangular sobre la cual se apoyaba la oreja obteniendo un bloque modular (módulo de pabellón auditivo, ver fig. 3.4) que podría imprimirse de manera independiente a la cabeza. De este modo si se quisiera sustituir la oreja, valdría simplemente con imprimir este bloque al cual debería estar unido el nuevo modelo de pabellón auditivo.

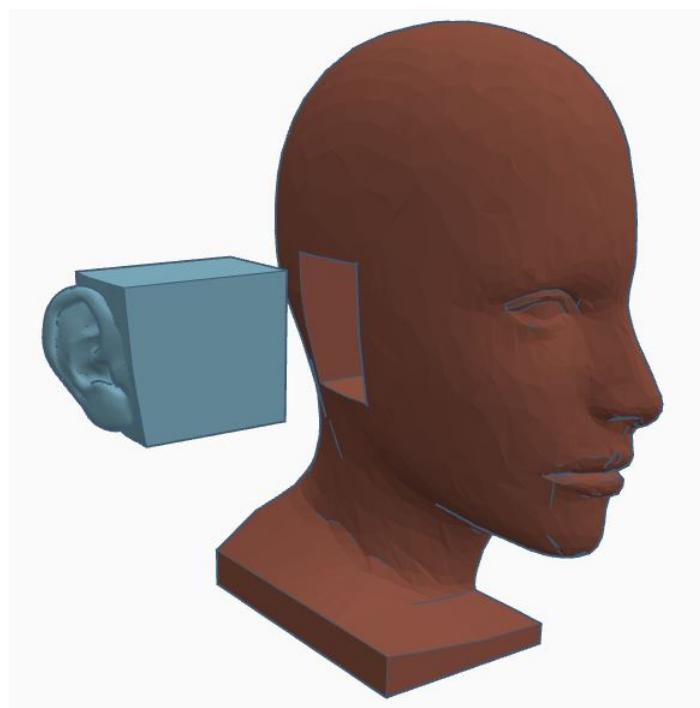


Fig. 3.4. Módulo de pabellón auditivo (en azul) situado frente a la conexión con el diseño de la cabeza (en marrón)

Otra decisión de compromiso a tener en cuenta a la hora de realizar el diseño del modelo es si se quiere considerar o no el conducto auditivo. Se debe tener en cuenta que cuando se realizan grabaciones biaurales estas deben posteriormente reproducirse mediante auriculares, estos pueden ser intraurales (in-ear), supraurales (on-ear) o circumaurales (over-ear). En el primer caso, los intraurales, el dispositivo de reproducción se introduce dentro del conducto auditivo y se sitúa cercano al tímpano, por consiguiente el

sonido no realizar el recorrido por el canal como lo haría un sonido “normal”, proveniente de una fuente externa. Por el contrario, en el caso de los auriculares supraurales o circumaurales, se colocan sobre la oreja o alrededor de la misma y, por consiguiente, el sonido se transmite por el conducto auditivo hasta llegar al tímpano.

Como resultado de este razonamiento, se planteó la realización de un nuevo módulo (ver fig. 3.5). Este se situaría en el interior del bloque del pabellón auditivo. Mediante el diseño de diferentes bloques se podría simular diferentes condiciones como la colocación de la cápsula microfónica. De este modo, simplemente mediante la modificación de un bloque base y la impresión de este nuevo diseño, se podrían considerar diferentes situaciones, como la consideración de conducto auditivo o no, mediante la colocación de la cápsula microfónica en diferentes puntos de este módulo.

A partir de aquí se puede considerar la posibilidad de realizar diseños intercambiables, simulando diferentes pruebas y anomalías, como por ejemplo la inflamación del conducto auditivo [31][32][33][34].

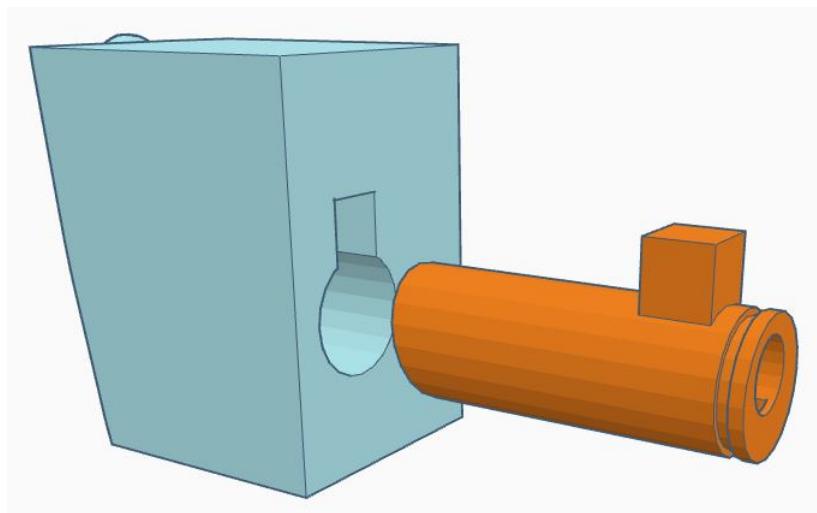


Fig. 3.5. Módulo del conducto auditivo (en naranja) situado frente a la conexión con el módulo del pabellón auditivo (en azul)

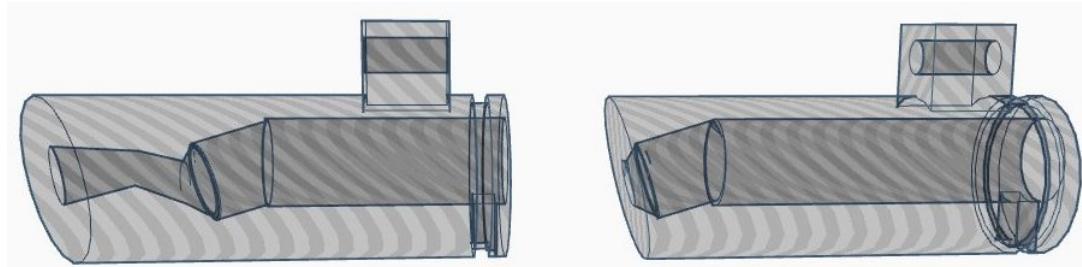


Fig. 3.6. Vista interna del módulo conducto auditivo. A la izquierda, simulación del conducto auditivo. A la derecha, no se considera el conducto auditivo

En la figura 3.6 se puede observar como el modelo de la izquierda considera la forma del conducto auditivo (obtenida de fig. 3.3 [11]) y está preparado para la inserción de la cápsula microfónica detrás de este, mientras que en el caso del modelo de la derecha está pensado para no tener en cuenta el conducto auditivo y colocar la cápsula microfónica en la parte más externa del módulo.

Para facilitar la extracción de esta pieza del módulo del pabellón auditivo, se incorporó un saliente del que poder tirar con facilidad. Del mismo modo para que los cables que salen de esta pieza desde la cápsula microfónica quedaran colocados correctamente y no sufrieran daños, se creó una pequeña apertura por donde guiarlos.

A raíz de las anteriores soluciones, surge un nuevo problema. Todas estas piezas modulares deberán estar fijas de algún modo entre sí. La opción por la que se optó fue por la de crear un sistema de tornillería oculta, con acceso por la parte interior para no afectar a la captación, ni a la parte estética del diseño. Este sistema consiste en crear un orificio por el que introducir una tuerca de tal modo que esta no pueda girar sobre sí misma al atornillar el tornillo, y un orificio por el que introducir un tornillo (ver fig. 3.7 izquierda). La métrica considerada para realizar este diseño fue M4. Este diseño de tornillería es utilizado para el resto del sistema. Mediante este sistema se realizó la unión del módulo del pabellón auditivo y la cabeza, y la unión del modulo del conducto auditivo y el módulo del pabellón auditivo (ver fig. 3.7 derecha).

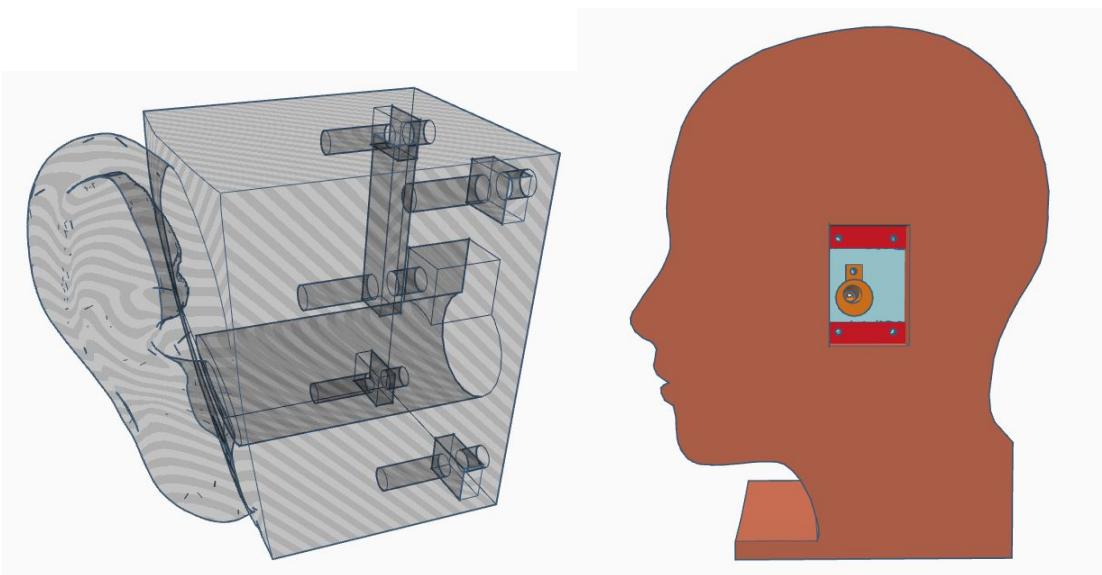


Fig. 3.7. A la izquierda se puede apreciar el sistema interno del sistema de tornillería, mientras que a la derecha se aprecia la vista interna del modelo donde se encuentra el acceso al sistema de tornillería

Una vez realizados los diseños anteriormente descritos, el siguiente paso consistió en realizar la cavidad mostrada en la figura 3.8 izquierda, donde posteriormente iría el circuito y el panel trasero donde se anclarán los conectores XLR, el potenciómetro, el switch y el conector de alimentación (ver fig. 3.8 derecha).

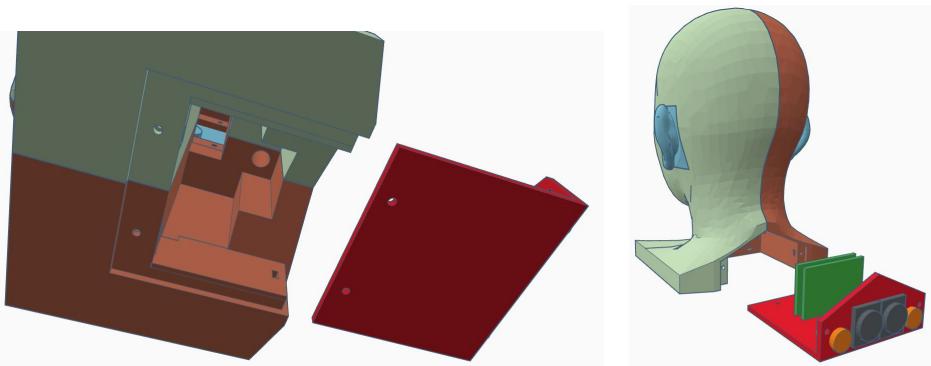


Fig. 3.8. A la izquierda, vista inferior de la cavidad prevista para la electrónica, el panel trasero y la unión entre ambos. A la derecha vista general del diseño del panel trasero extraído, simulando la colocación de la electrónica

Finalmente la última decisión de diseño consistía en encontrar la forma de unir las dos partes en las que se había dividido la cabeza. El criterio seguido consistió en todo momento en encontrar el modo de mantener oculta de la mayor forma posible las cavidades y la tornillería que uniría las diferentes partes del sistema. Como consecuencia se optó por introducir de manera vertical dos tornillos de métrica M10 que unieran ambas partes. Para ello una de las partes debería tener unos orificios y la otra deberían tener unos salientes por los que, tras encajarlos, pasar los tornillos fijando ambas partes (ver fig. 3.9 izquierda). Debido a problemas técnicos a la hora de realizar el proceso de impresión dada la complejidad del sistema, se decidió que ambas partes tendrían las cavidades y se imprimiría una pieza auxiliar externa que uniría ambas partes (pieza en verde de la fig. 3.9 derecha).

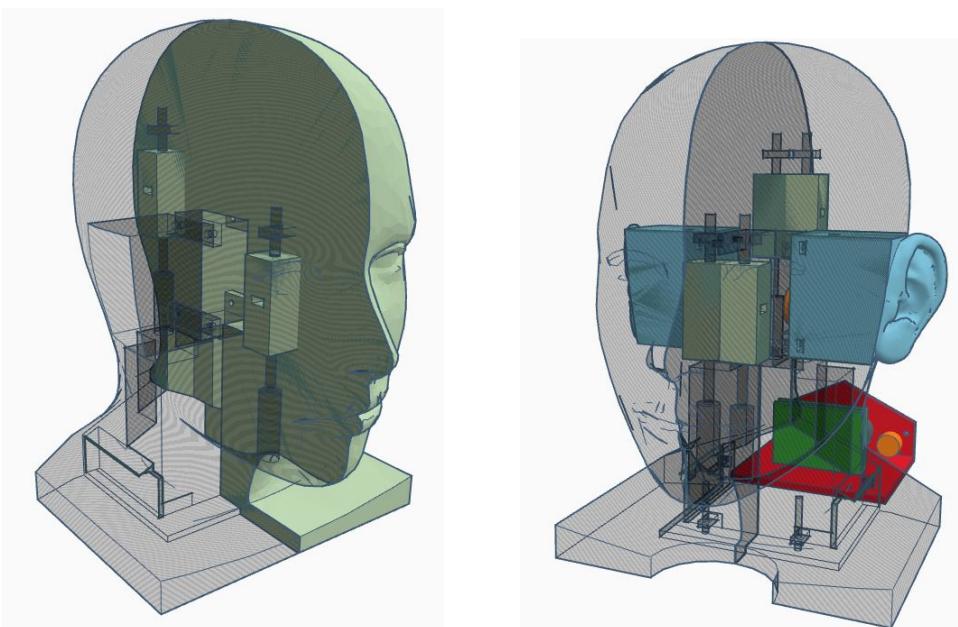


Fig. 3.9. Unión de los hemisferios de la cabeza. A la izquierda, vista interna de un hemisferio junto al otro hemisferio “sólido”. A la derecha, vista interna de cabeza, uniones y colocación de los diferentes elementos

3.2. Impresión 3D

Para la realización del modelo se ha utilizado fabricación aditiva optando por el uso de impresión 3D FDM. Las impresoras usadas han sido una Creality Ender 3, para la realización de las partes más pequeñas y una Tronxy X5SA para la impresión de las partes más voluminosas (los dos hemisferios de la cabeza).

Principalmente el material empleado ha sido ácido poliláctico (PLA) debido a que es un material con propiedades muy aptas para la impresión 3D, no emite gases tóxicos durante la impresión, es económico y es de origen orgánico por lo que además es biodegradable. Por otro lado, para dar al pabellón auditivo un tacto lo más similar posible al de los humanos, se optó por el uso de filaflex, un tipo termoplástico elastómero (TPE), desarrollado para el uso en impresión 3D.

Tras realizar el proceso de puesta a punto de las impresoras para garantizar que la impresión de las diferentes partes fuera de la mayor calidad posible, se procedió a la impresión de pequeñas pruebas, principalmente de holgura y las partes mecánicas diseñadas para juntar las diferentes partes.

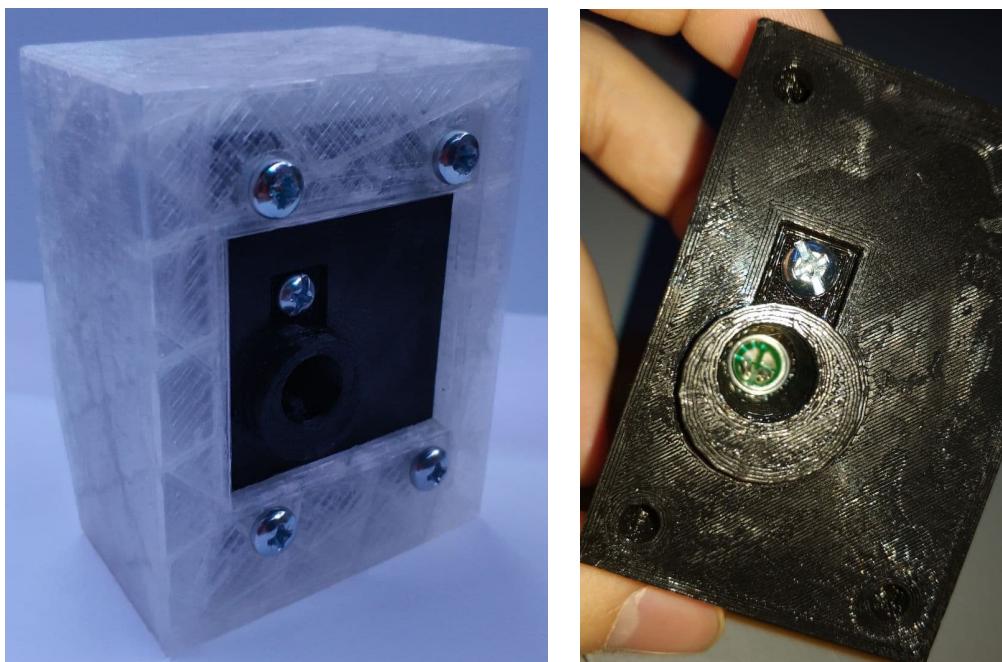


Fig. 3.10. Primeras pruebas de impresión. A la izquierda se ve en PLA translúcido la cavidad de la cabeza donde se introducen el módulo del pabellón auditivo y en él, el módulo del conducto auditivo, en PLA negro. Se prueba el sistema de tornillería diseñado y la holgura de las impresiones. A la derecha, se puede apreciar la colocación de una cápsula microfónica en la correcta posición del módulo del conducto auditivo

Como se puede apreciar en la figura 3.10, en la imagen de la derecha, la cápsula microfónica se ajusta a la perfección dentro del módulo del conducto auditivo.

Una vez testeados los aspectos básicos y comprobado que era factible realizar las impresiones finales, se comenzó a imprimir la pieza correspondiente al pabellón auditivo (fig. 3.11). Para la realización de esta pieza se debía tener especial cuidado ya que a partir de cierta capa se debería realizar un cuidadoso cambio de filamento pasando de PLA a filaflex, ajustando debidamente los diferentes parámetros de impresión.

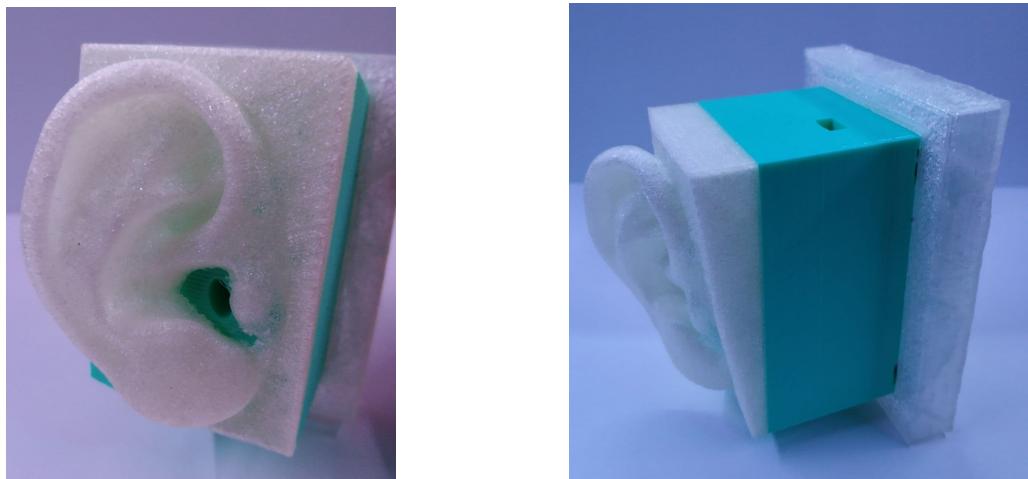


Fig. 3.11. Impresión del primer pabellón auditivo. A la izquierda, pabellón auditivo en detalle. A la derecha, módulo de pabellón auditivo fijado a un fragmento de la cavidad donde se posicionarán en la cabeza. Prueba de holgura

Antes de continuar la impresión, se llevó a cabo una prueba de dimensiones del diseño y se imprimió la plantilla de la figura 3.12 izquierda del perímetro de la cabeza para poder tener una idea del tamaño real. Se observó que la oreja anteriormente impresa era de un tamaño más pequeño a lo esperado y la proporción no era la esperada, por lo que gracias al diseño modular, se pudo editar e imprimir de nuevo una nueva pareja con las dimensiones corregidas (fig 3.12 derecha).

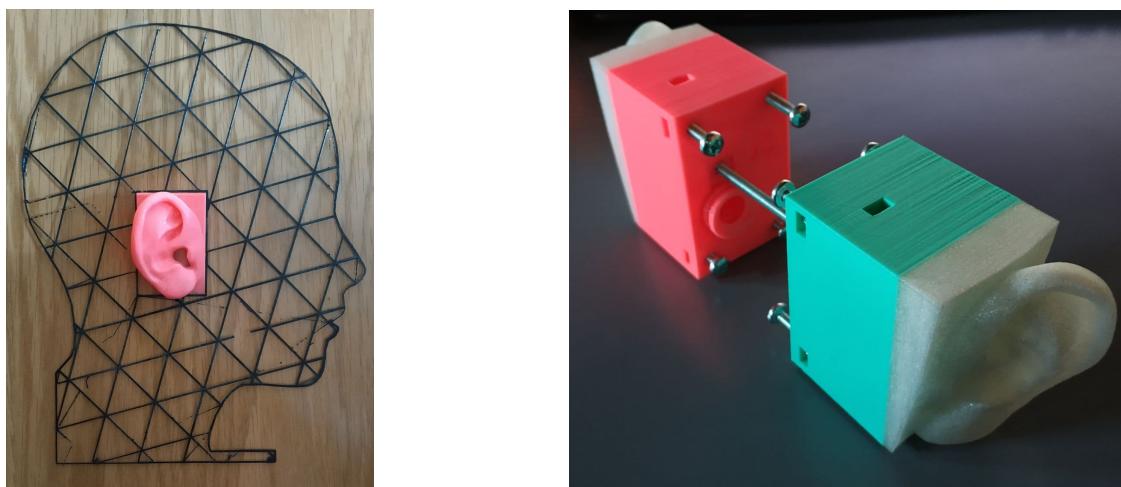


Fig. 3.12. A la derecha plantilla del perímetro de la cabeza y nuevo dimensionado de la oreja. A la izquierda, impresión final de los módulos de pabellón auditivo y conducto auditivo necesarios

En la figura 3.13 se puede apreciar la impresión de las partes más voluminosas, los dos hemisferios de la cabeza. En primer lugar se imprimió el hemisferio izquierdo de la cabeza consumiendo aproximadamente 600g de material y teniendo una duración 31h.

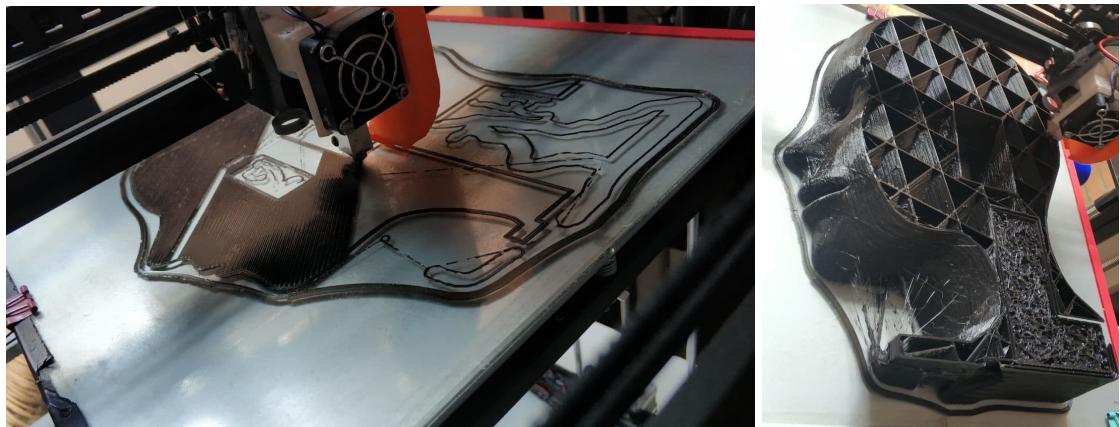


Fig. 3.13. Impresión hemisferio izquierdo. A la izquierda, detalle de la impresión de la primera capa. A la derecha, proceso de impresión tras 24h de impresión

Tras esta impresión se realizó un post procesado de la pieza y se realizó el montaje del resultado hasta el momento (ver fig. 3.14), consiguiendo resultados satisfactorios.

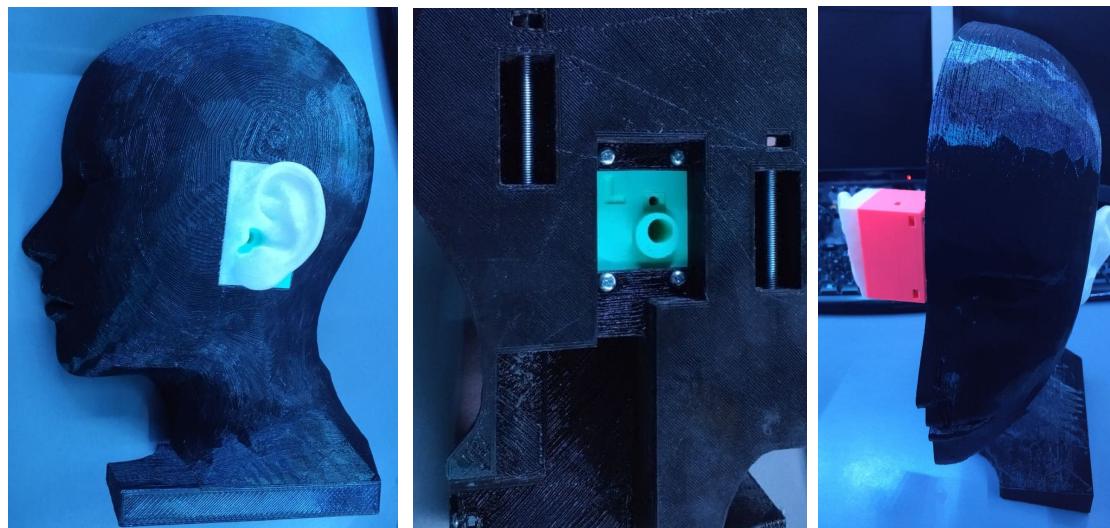


Fig. 3.14. Resultado del hemisferio izquierdo. De izquierda a derecha: Vista exterior del hemisferio y pabellón auditivo. Vista interior del sistema de tornillería. Vista general del hemisferio izquierdo con ambos pabellones auditivos

Como se explicó en el apartado de diseño, se trató de imprimir el hemisferio derecho con bloques salientes para encajar los dos hemisferios entre sí. Para ello era necesario imprimir todo el hemisferio izquierdo sobre unos grandes soportes. Tras una gran cantidad de horas la impresión falló a causa de un problema los soportes anteriormente nombrados. Por ello, la decisión final fue imprimir una versión simétrica del hemisferio derecho,

uniendo ambas partes mediante unas piezas intermedias independientes (ver fig. 3.15 de recha).



Fig. 3.15. Resultado de cabeza final. A la izquierda, vista general del resultado. A la derecha, vista inferior del sistema de unión de los hemisferios

En la figura 3.15 izquierda se puede ver como, debido a pequeñas holguras en la impresora con la que se imprimió la cabeza, el resultante no es completamente simétrico. A pesar de ello, tras un proceso de post-procesado, ambas partes encajan correctamente y se pueden unir acorde con el diseño realizado. Por otro lado, estas imperfecciones no influirán en gran medida a las captaciones resultantes.

Para terminar con el trabajo de impresión, se realizó el panel trasero (ver fig. 3.16) donde se situaron los diferentes componentes necesarios para la operación con el micrófono biaural.

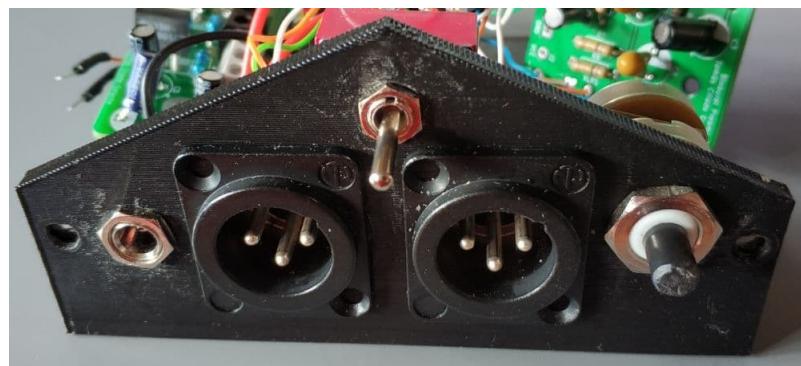


Fig. 3.16. Vista del panel trasero. Se pueden observar los diferentes componentes. De arriba a abajo y de izquierda a derecha: interruptor de conmutación de la segunda etapa de amplificación, conector de alimentación externo, XLRs, potenciómetro de regulación de ganancia de la primera etapa de amplificación

4. ELECTRÓNICA

4.1. Planteamiento

Para comenzar con el diseño de la parte electrónica, en primera instancia se realizó un trabajo de investigación y análisis para considerar las necesidades del sistema. Como primera toma de contacto se partió del análisis de las especificaciones de los productos comerciales.

A continuación, se diferenciaron los objetivos en varias partes, las cuales a medida que se concluía el proceso de diseño se irían implementando en los siguientes prototipos.

Por consiguiente se definieron los siguientes objetivos:

- Acondicionamiento de la cápsula microfónica. Para el correcto funcionamiento de las cápsulas es necesario alimentarlas al valor de tensión de trabajo.
- Ganancia. Las señales captadas por las cápsulas son muy débiles, siendo necesaria una amplificación, por lo que uno de los puntos fundamentales es conseguir que la señal final tenga la suficiente amplitud para trabajar con ella, consiguiendo un nivel “de línea”.
- Ganancia variable. Debido a que la naturaleza de las fuentes sonoras puede variar y tener diferentes niveles de presión sonora, se precisa de cierta versatilidad a la hora de amplificar la señal transducida.
- Segunda etapa de amplificación. Continuando con el punto anterior, dado que el margen de diferencia de presiones acústica puede ser muy amplio, se consideró realizar el diseño de una segunda etapa de amplificación fija.
- Balanceado de las señales. El objetivo final del sistema es tener un prototipo funcional de un micrófono biaural. Por consiguiente, dado que el objetivo es realizar una conexión de este sistema con un equipo profesional de audio como puede ser una interfaz de sonido o una mesa de mezclas mediante conectores XLR, la señal del sistema deberá funcionar del mismo modo que la del resto de micrófonos. Esto se realiza para tener una mayor protección frente a interferencias electromagnéticas a la hora de transmitir las señales captadas desde el dispositivo a los siguientes sistemas.
- Etapa de alimentación. Para garantizar una autonomía del dispositivo fuera del entorno de trabajo del laboratorio.

Como resultado de este planteamiento, finalmente se decidió realizar un preamplificador que aunara todas estas características.

Finalmente una vez realizado el planteamiento inicial, se comenzó con el diseño. A continuación se detalla el procedimiento seguido para el desarrollo del proyecto en el apartado electrónico. El proceso se puede subdividir en 3 prototipos realizados en los cuales se van supliendo las diferentes necesidades y se va comprobando el funcionamiento del diseño.

Es importante tener en cuenta que el rango de frecuencias audible es de 20Hz a 20kHz, por lo que es fundamental mantener en todo momento una respuesta plana en este ancho de banda.

4.2. Primer prototipo

El elemento base sobre el que se debe centrar el diseño del preamplificador es la cápsula microfónica, por lo que el primer paso a realizar consistió en la selección de una cápsula que cumpliera con las características buscadas. La cápsula seleccionada debe ser una cápsula omnidireccional de condensador de tipo electret, ya que este tipo de cápsulas son prepolarizadas lo cual facilita su implementación en este tipo de sistemas y además son cápsulas de respuesta en frecuencia plana y de un tamaño muy reducido. Finalmente, se optó por usar un par de cápsulas Loudity LD-MC-6035W [35], omnidireccionales, con respuesta en frecuencia de 50Hz a 13kHz y una sensibilidad de -40dBV, siendo estas características similares a las de los productos comerciales. La razón por la que se optó por este modelo se debió a que son cápsulas de un coste muy bajo (entre 1€ y 2€), con características muy similares a otras cápsulas (tensión de trabajo de 2V, impedancia de carga de $2.2\text{k}\Omega$), fáciles de encontrar en tiendas de electrónica y con las que se contaba de manera previa a la realización del proyecto, por lo tanto eran ideales para la implementación de unas pruebas básicas.

Para la realización del primer preamplificador, se partió de una serie de premisas iniciales. El diseño se plantearía para su utilización en conciertos en los que el nivel de presión sonora (SPL) oscila entre los 80dB y los 110 dB, por consiguiente, se consideró un SPL máximo de 120dB para contar con un margen, asegurandonos que la señal grabada en ningún caso llegaría al nivel de saturación.

En cuanto a la alimentación del sistema en esta etapa preeliminar, se optó por una alimentación simple de 5V para darle portabilidad al dispositivo, pudiendo alimentar el circuito con una powerbank en exteriores o mediante un transformador de teléfono móvil en el caso de encontrarse en un interior, por ejemplo. Esta idea finalmente acabará derivando a otras soluciones debido a la necesidad de tener una alimentación simétrica/dual.

A partir de las anteriores premisas, se comenzó la primera etapa de diseño y simulación.

4.2.1. Diseño y simulación

A continuación en la figura 4.1 se muestra el circuito implementado y los resultados de simulación obtenidos. Posteriormente se describe el proceso de diseño seguido, así como un análisis de los resultados.

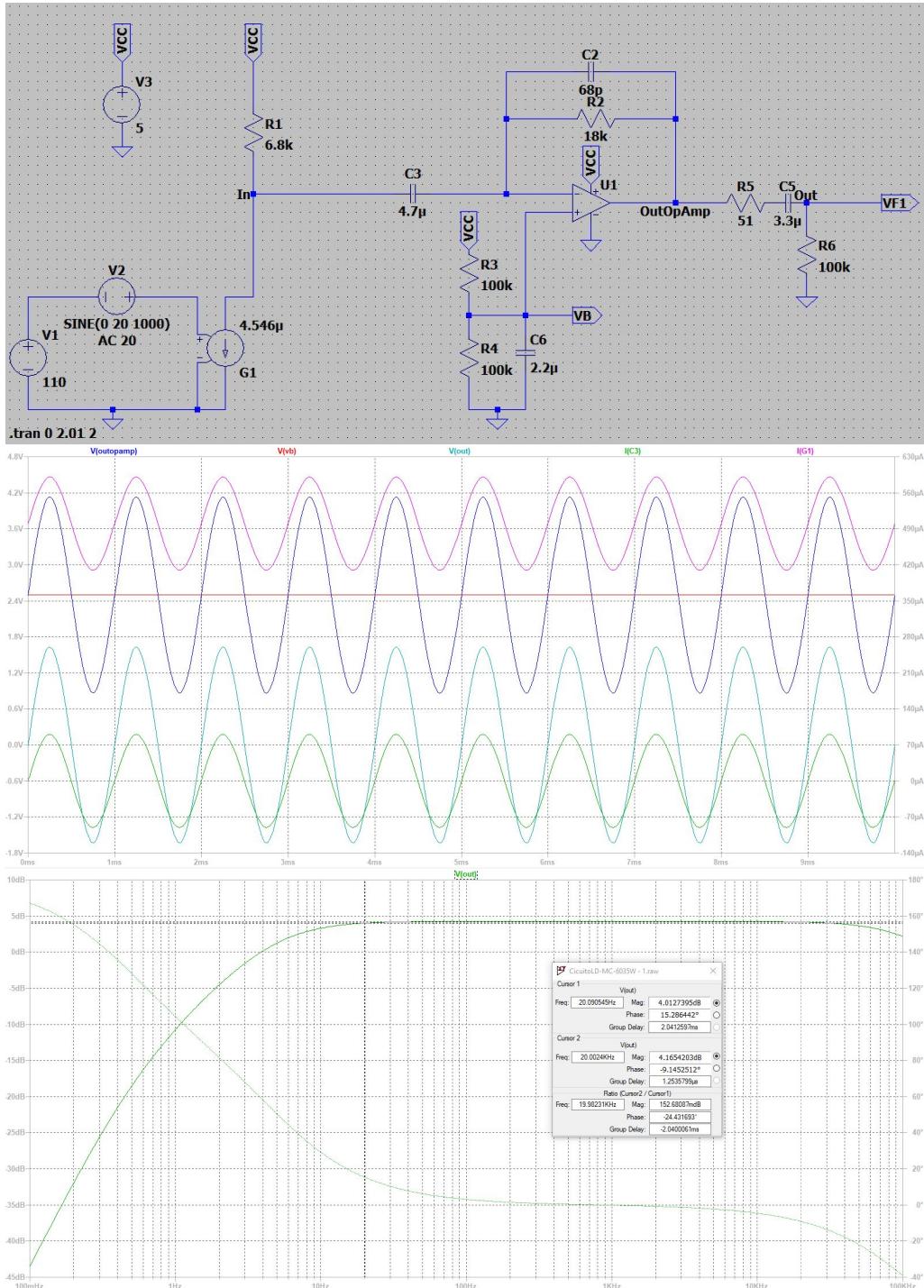


Fig. 4.1. En la primera imagen se representa el diseño del primer circuito realizado. En la segunda imagen se representa la simulación del circuito en el dominio temporal. En la tercera imagen se representa la simulación del circuito en el dominio frecuencial. Ambas simulaciones se han realizado con un tono puro de 1kHz y un SPL de 120dB

Para el acondicionamiento de la cápsula electret se tuvo que tener en cuenta las características comentadas con anterioridad, obtenidas del datasheet de la propia cápsula [35] y el esquema proporcionado (fig. 4.2). Teniendo en cuenta que la tensión de alimentación del circuito (V_{cc}) es de 5V, la tensión de trabajo de la cápsula (V_s) es de 2V y la corriente máxima de la cápsula es $I_{max} = 0,5mA$, se realizó una conexión en serie entre una resistencia R_1 y la cápsula electret.

$$V_{cc} = V_{R1} + V_s \rightarrow V_{cc} = I_{R1} \cdot R_1 + V_s \xrightarrow{I_{R1}=I_{max}} R_1 = \frac{V_{cc} - V_s}{I_{max}} = \frac{5V - 2V}{0,5mA} = 6k\Omega \quad (4.1)$$

Como el objetivo de esta resistencia es limitar la corriente de la cápsula, la resistencia elegida será de $R_1 = 6,8k\Omega$ siendo este el valor nominal más próximo al calculado por encima para obtener una mayor restricción de la corriente, asegurando una corriente inferior a $I_{max} = 0,5mA$.

Posteriormente será necesario filtrar la corriente continua necesaria para alimentar el transistor JFET interno de la cápsula, y considerar únicamente la corriente alterna, para ello será preciso la utilización de un condensador C_3 . Este condensador formará un filtro paso bajo junto con R_1 , por lo que para calcular C_3 será necesario tomar una frecuencia de corte inferior a 20Hz, evitando de este modo que la respuesta en frecuencia en la banda de interés se vea afectada. Por consiguiente, se considera $f_{ci} = 5Hz$.

$$f_{ci} = \frac{1}{2\pi R_1 C_3} \rightarrow C_3 = \frac{1}{2\pi \cdot R_1 \cdot f_{ci}} = \frac{1}{2\pi \cdot 6,8k\Omega \cdot 5Hz} = 4,7\mu F \quad (4.2)$$

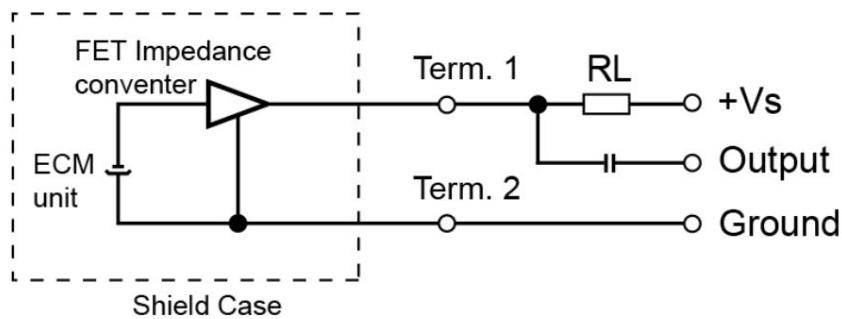


Fig. 4.2. Esquemático básico de la cápsula microfónica provisto por datasheet [35]

Una vez obtenido este acondicionamiento básico para alimentar el transistor interno de la cápsula, se diseñó la primera etapa de amplificación [36]. Es fundamental tener en cuenta, debido al funcionamiento de la cápsula, que el movimiento del diafragma de la cápsula se transduce a una variación de intensidad, por lo que se puede considerar como una fuente de intensidad¹. Por consiguiente, la etapa de amplificación propuesta consistirá

¹Más adelante esto supondrá un problema para realizar las pruebas pertinentes.

en un amplificador operacional (OpAmp) realimentado en configuración transimpedancia, lo cual implica que a la entrada se considera una señal de corriente y a la salida se tendrá la señal amplificada como una tensión. Se necesita saber cuánto se tiene que amplificar la señal, por lo que se debe suponer la presión máxima a la que se verá sometida la cápsula, con lo que se sabrá el nivel de la señal máxima transducido por la cápsula. Además se debe saber cuál es el nivel máximo que se quiere obtener a la salida, siendo en este caso el nivel nominal de línea usado en audio $V_{rms} = 1,228V$, o de otro modo $V_{pk} = 1,736V$. Para calcular la ganancia de esta etapa se deberá calcular el valor de R_2 y el valor de C_2 , la resistencia y el condensador que conforman el bucle de realimentación respectivamente.

Considerando un SPL máximo de 120dB, se calculará la presión sonora máxima.

$$SPL_{max} = 20 \cdot \log \frac{p_{max}}{p_{ref}} \rightarrow p_{max} = p_{ref} \cdot 10^{\frac{SPL_{max}}{20}} = 20 \times 10^{-6} Pa \cdot 10^{\frac{120dB}{20}} = 20Pa \quad (4.3)$$

donde $p_{ref} = 20 \times 10^{-6} Pa$ es la presión de referencia.

A partir de la sensibilidad en dB (S_{dB}) ofrecida por el datasheet de la cápsula microfónica [35], se obtiene su equivalente en V/Pa (S) con lo que se obtendrá la corriente de salida de la cápsula.

$$S = 10^{\frac{S_{dB}}{20}} = 10^{\frac{-40dB}{20}} = 0,01 \frac{V}{Pa} \quad (4.4)$$

$$I_{micPa} = \frac{S}{R_L} = \frac{0,01 \frac{V}{Pa}}{2,2k\Omega} = 4,55 \times 10^{-6} \frac{A}{Pa} \quad (4.5)$$

donde $R_L = 2,2k\Omega$ es la impedancia de la cápsula. [35]

$$I_{mic} = I_{micPa} \cdot p_{max} = 4,55 \times 10^{-6} \frac{A}{Pa} \cdot 20Pa = 90,9 \times 10^{-6} A \quad (4.6)$$

Con estos datos se puede proceder al cálculo de la ganancia por medio del cálculo de R_2 y de C_2 .

$$R_2 = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{rms}}{I_{in}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 1,228}{90,9 \times 10^{-6} A} = 19,1k\Omega \rightarrow R_2 = 18k\Omega \quad (4.7)$$

Para mantener una respuesta en frecuencia plana, seleccionaremos C_2 en función de R_2 manteniendo la frecuencia de corte del filtro paso alto conformado por ambos componentes por encima de 20kHz.

$$f_{ps} = \frac{f_{cs}}{\sqrt{(\frac{G_0}{G_{fs}})^2 - 1}} = \frac{20kHz}{\sqrt{(\frac{1}{0,989})^2 - 1}} = 134kHz \quad (4.8)$$

siendo f_{ps} la frecuencia del polo superior, f_{cs} la frecuencia de corte superior, G_0 la ganancia en el ancho de banda y G_{fs} la ganancia de compromiso en la frecuencia de corte superior.

$$f_{ps} = \frac{1}{2\pi \cdot R_2 \cdot C_2} \rightarrow C_2 = \frac{1}{2\pi \cdot R_2 \cdot f_{ps}} = \frac{1}{2\pi \cdot 19k\Omega \cdot 134kHz} = 66pF \rightarrow C_2 = 68pF \quad (4.9)$$

Por otro lado, para poder usar una fuente simple y alimentar el OpAmp solo positivamente, se debe añadir una continua con la que poder trabajar con la señal sin que esta saturé. Al trabajar con 5V, se puede suponer que si se añade una continua de 2,5V, y nuestra señal de pico es $1,736V_{pk}$, se podrá trabajar de 2,5V a 5V con el semi-ciclo superior y de 2,5V a 0V con el semi-ciclo inferior de la señal. Para acoplar esta continua se deberá introducir por medio del terminal de realimentación positivo del OpAmp. Para ello, primero es necesario conformar un divisor de tensión para obtener estos 2,5V por medio de las resistencias $R_3 = R_4$ y un condensador C_6 para filtrar el ruido térmico producido por las resistencias y la fuente de alimentación. Es importante que el filtro paso bajo formado por estos componentes tenga una frecuencia de corte inferior a los 20Hz. Para limitar el consumo del circuito en el divisor de tensión y que este sea bajo, es necesario que la corriente en este punto sea baja y, por consiguiente, se colocarán resistencias de valores altos.

Se supone $R_3 = R_4 = 100k\Omega$ obteniendo que $I_+ = \frac{V_{cc}}{R_3 + R_4} = \frac{5V}{100k\Omega + 100k\Omega} = 25\mu A$

Si se selecciona $C_6 = 2,2\mu F$ se tendrá un resultado acorde con las condiciones planteadas:

$$f_{cn} = \frac{1}{2\pi \cdot (R_3 // R_4) \cdot C_6} = \frac{1}{2\pi \cdot (100k\Omega / 100k\Omega) \cdot 2,2\mu F} = 1,45Hz \ll 20Hz \quad (4.10)$$

En este punto se tendría la señal de la cápsula microfónica amplificada pero esta tendría un offset de 2,5V. El siguiente paso realizado consiste en la adecuación de la señal para una salida óptima y compatible con el dispositivo donde posteriormente conectaremos el micrófono biaural.

Por medio del condensador C_5 se conseguirá filtrar la el offset de la salida del amplificador operacional. La resistencia $R_5 = 51$ se encargará de limitar la corriente para evitar problemas de interconectar los dispositivos. La resistencia R_6 formará una ruta de descarga para el condensador C_5 , usando típicamente un valor de $R_6 = 100k\Omega$ debido a que este se encontrará en paralelo con la impedancia de entrada del siguiente dispositivo, siendo típicamente de un valor de $Z_{in} = 10k\Omega$. C_2 y R_6 conformarán un filtro paso alto por lo que a la hora de calcular C_5 deberemos tener en cuenta que este filtro no afecte al ancho banda de interés.

$$f_c = f_{ci} \sqrt{\left(\frac{G_0}{G_f}\right)^2 - 1} = 20Hz \sqrt{\left(\frac{1}{0,944}\right)^2 - 1} = 7kHz \quad (4.11)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot (R_6//Z_{in}) \cdot C_5} \rightarrow C_5 = \frac{1}{2\pi \cdot (R_6//Z_{in}) \cdot f_c} = \frac{1}{2\pi \cdot 10k\Omega \cdot 7Hz} = 2,2\mu F \quad (4.12)$$

Para realizar una correcta selección del amplificador operacional se realizó el calculo del Slew Rate (SR).

$$SR = 2\pi \cdot f_{cs} \cdot V_{pk} = 2\pi \cdot 20kHz \cdot 1,736V = 2,18 \frac{V}{\mu s} \quad (4.13)$$

Tras realizar los cálculos pertinentes², se procedió a simular el circuito con la herramienta LTspice[37].

Debido a que la herramienta no dispone de un componente que simule la cápsula electret, se realizó un diseño alternativo mediante la utilización de diferentes fuentes que representan las características de la cápsula. En la primera imagen de la figura 4.1 la fuente V1 representa la transducción de la presión V_{sim} . La fuente V2 representa un tono puro de 1kHz y una presión de 20Pa. Como la salida de la cápsula a considerar es la corriente, se utilizó una fuente de corriente dependiente de las anteriores fuentes de tensión (G1), cuyo valor es el de I_{micPa} , la salida de corriente de la cápsula en función de la presión incidente.

$$V_{sim} = \frac{I_{max}}{I_{inPa}} = 110 \quad (4.14)$$

La segunda imagen de la figura 4.1 representa la señal simulada de 1kHz en diferentes puntos del circuito en el dominio temporal. La señal marcada en rosa es la corriente del generador de corriente G1, se puede observar como tiene un offset de aproximadamente 0,5mA. La señal marcada en verde es la corriente que circula por el condensador C_3 , similar a la rosa, pero sin el offset debido a que el condensador C_3 se encarga de filtrarlo. En rojo se representa la tensión configurada para introducir el offset en la entrada de feedback positivo del OpAmp de 2,5V, sobre la cual se representa en azul la salida del OpAmp, la misma variación que se observaba de un 1kHz a la entrada con la diferencia que en este caso es una variación de la tensión en lugar de una variación en la corriente. Finalmente en cian, se representa la salida del circuito, filtrando el offset de 2,5V de la salida del OpAmp.

Realizando la simulación del dominio frecuencial se obtiene como resultado la tercera imagen de la figura 4.1, teniendo un espectro frecuencial muy plano dentro de la banda de interés de 20Hz a 20kHz.

²Para una mayor practicidad a la hora de realizar nuevos cálculos y modificaciones de parámetros, se realizó el código de MATLAB del Anexo 2.

Se realizó el montaje del circuito en una placa de pruebas (ver fig. 4.3) obteniendo resultados satisfactorios por lo que se procedió a continuar con el diseño.

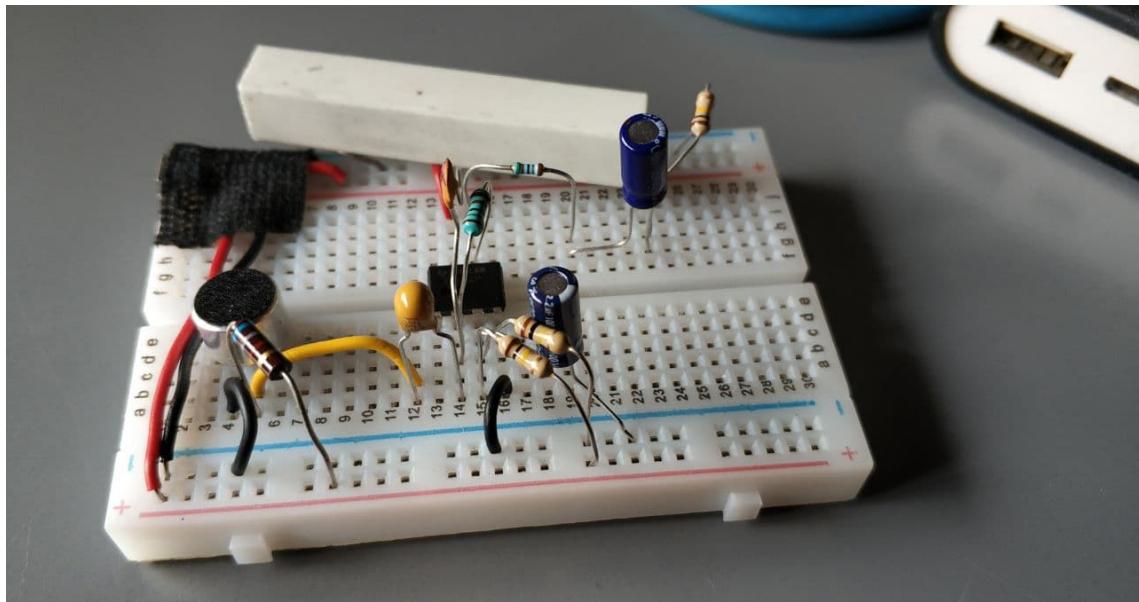


Fig. 4.3. Montaje del primer diseño en placa de pruebas. Preparado con un conector micro usb y una resistencia de carga para realizar una alimentación mediante una powerbank

Con el objetivo de considerar fuentes sonoras con una naturaleza diferente que implicaran un menor SPL, se optó por añadir una resistencia variable al bucle de retroalimentación consiguiendo con esto una mayor amplificación a medida que el valor de la resistencia variable aumentara. Del mismo modo, para evitar que el filtro paso alto formado por R_2 y C_2 afectara al ancho de banda de interés, se recalcularó C_2 en función del valor máximo de R_2 .

En esta ocasión se consideró que la fuente incidente podría variar entre los 90dB y los 120dB de SPL. Como el valor de los componentes para el caso de 120dB de SPL máximo ya está calculado en el paso anterior, se calcularon los componentes necesarios para considerar el otro extremo a tener en cuenta, 90dB de SPL máximo.

Como resultado de las operaciones siguiendo el procedimiento anterior, se obtuvo que:

$$p_{max} = 0,63Pa \quad R_2 = 560k\Omega \quad C_2 = 0,21pF \approx 1pF \quad (4.15)$$

Para realizar la simulación (primera imagen fig. 4.4) se cambió el valor de V2 para considerar el cambio de presión incidente y R_2 se configuró para realizar diferentes repeticiones, con diferentes valores y obtener el resultado de la variación. Dichas variaciones deberán ser logarítmicas debido a la naturaleza del problema.

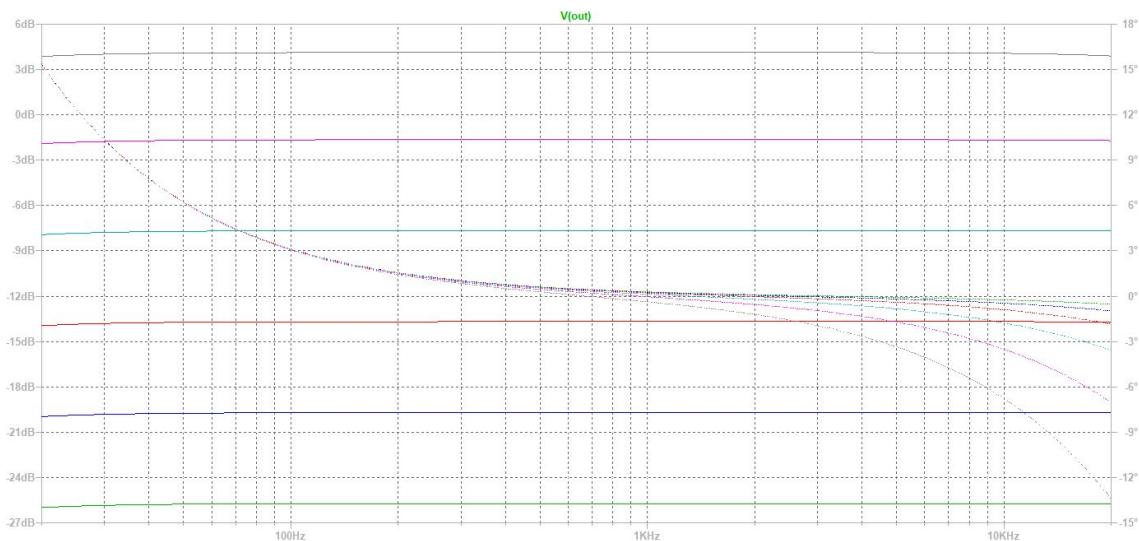
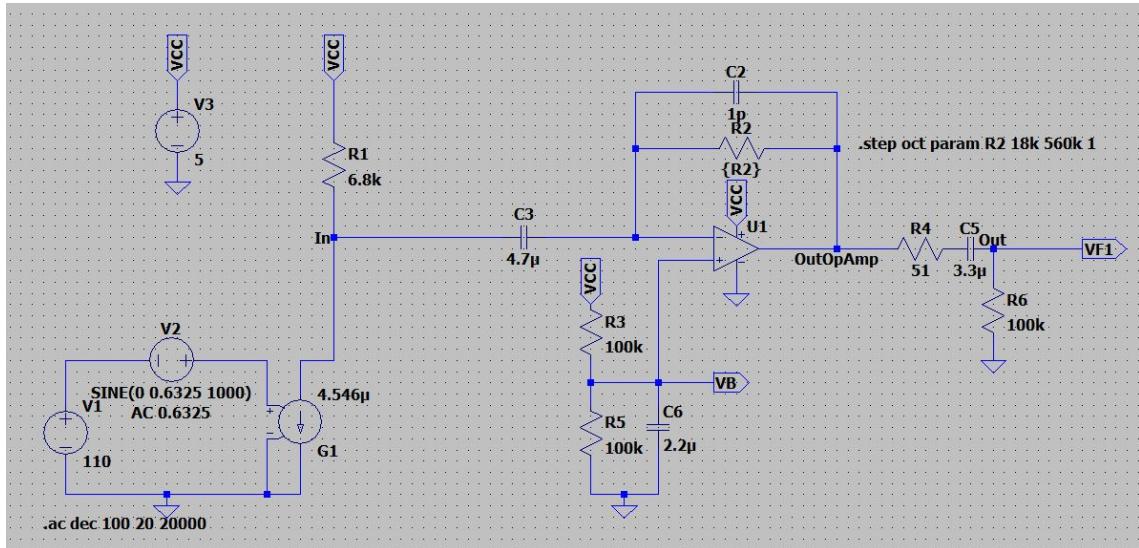


Fig. 4.4. En la primera imagen se representa el circuito modificado añadiendo el empleo de una resistencia variable. En las segunda imagen se representan las diferentes ganancias obtenidas para diferentes valores de la resistencia variable. Evaluado simulando un tono puro de 1kHz y un SPL de 90dB

En la segunda imagen de la figura 4.4 se puede observar como para diferentes valores de R_2 la ganancia del circuito varía de forma lineal, aumentando 6dB en cada iteración, ya que estos valores son resultado de un crecimiento logarítmico desde el valor inferior 18k Ω (en verde) hasta 560k Ω (en gris).

Debido a que hasta este punto las fuentes consideradas tienen un SPL máximo entre 90dB y 120dB, pero los niveles de presión sonora habituales en la vida diaria, por ejemplo una conversación, se sitúan entorno a los 60dB, se optó por añadir una segunda etapa de amplificación. En este caso, se consideró la utilización de un amplificador operacional en configuración no inversora [38][39]. Es importante tener en cuenta la variación que nos

ofrecerá la primera etapa con la resistencia variable, ya que esto nos influirá directamente en esta segunda etapa del mismo modo, por lo que se optó por considerar la configuración que aportara una ganancia máxima en la primera etapa para realizar los cálculos, teniendo de este modo un margen de actuación mediante la combinación de ambas etapas.

La ganancia en esta combinación viene dada por:

$$G = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{R_8}{R_7} + 1 \quad (4.16)$$

Por consiguiente, al configurar la fuente para simular 60dB de SPL, o lo que es lo mismo, 0,02Pa de presión sonora, se observa que es necesaria una ganancia de $33\frac{V}{V}$. Si consideramos $R_7 = 1k\Omega$ y despejamos de la expresión anterior tendremos que $R_8 = 33k\Omega$. Por otro lado es preciso añadir un condensador $C_4 = 3,3\mu F$ para evitar la amplificación de los 2,5V de offset sobre los que trabaja el OpAmp.

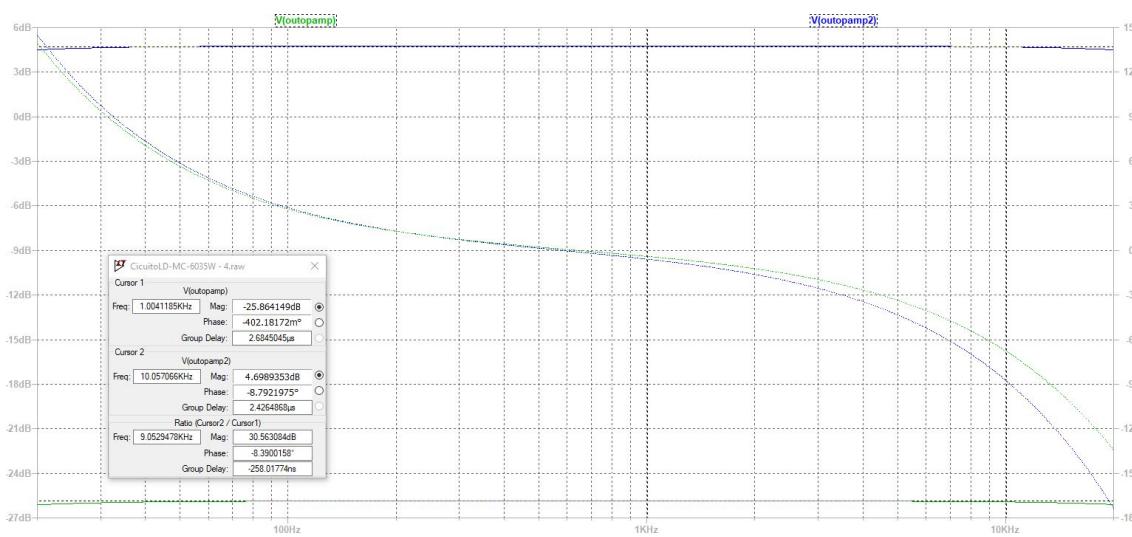
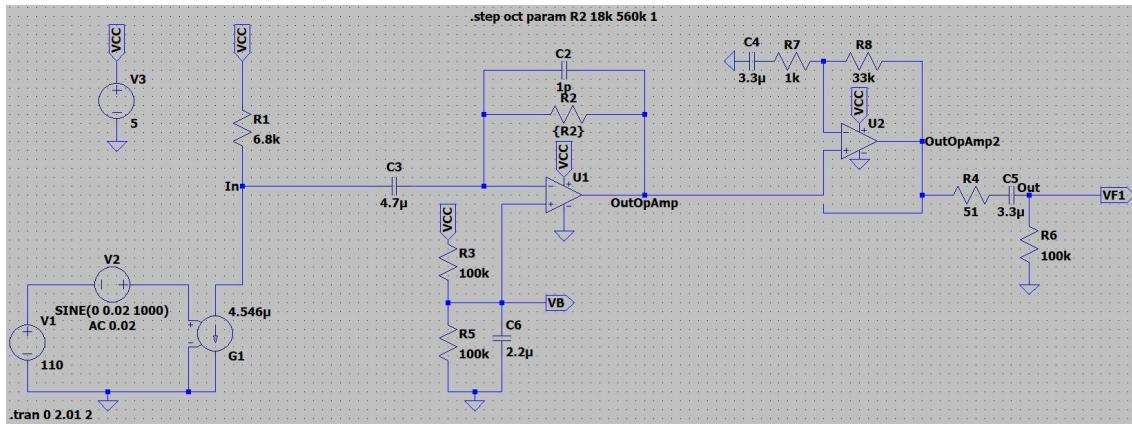


Fig. 4.5. En la primera imagen se representa el circuito del primer prototipo. En la segunda imagen se representa una simulación en el dominio frecuencial en la que se muestra la diferencia de ganancia a la entrada y a la salida de la segunda etapa de amplificación. Evaluando simulando un tono puro de 1kHz, un SPL de 60dB y $R_2 = 560k\Omega$

En la segunda imagen de la figura 4.5 se puede ver la diferencia de 30dB de ganancia entre la salida del OpAmp de la primera etapa y el de la segunda etapa. En esta ocasión se puede observar como esta segunda etapa introduce una pequeña atenuación en baja frecuencia, la cual puede ser asumida por el sistema.

Finalmente, se quiso realizar una última etapa de balanceado. Para ello, se utilizó un OpAmp en configuración inversora y otro en configuración no inversora. Este diseño finalmente se descartó debido a que comercialmente existen encapsulados para esta funcionalidad, por lo que se sustituyó el diseño mencionado por la utilización del encapsulado DVR134 [40] de Texas Instruments.

4.2.2. Diseño de PCB

Para el diseño de PCBs se optó por el uso del software libre KiCad. [41]

Una vez realizado el diseño y las simulaciones pertinentes del circuito, se procedió a diseñar la PCB correspondiente al primer prototipo.

Para el diseño de la PCB de cada preamplificador el circuito será el mostrado en la figura 4.6. El circuito es similar al simulado en el anterior apartado con la diferencia de ciertas decisiones de diseño. Para sustituir la resistencia variable se utilizó un potencíometro logarítmico de $500k\Omega$ junto con una resistencia $R_2 = 18\Omega$. Por otro lado, se decidió usar un switch para conectar y desconectar la segunda etapa de amplificación. Finalmente se optó por soldar cables para la salida de señal y la alimentación (2 conjuntos de pads) y a fin de trabajar de una manera más práctica, se colocaron conectores tipo phoenix para la conexión de las cápsulas microfónicas.

Dado que finalmente se decidió usar el encapsulado DVR134 y este no se encontraba dentro de la librería de KiCad, se diseñó el componente en la aplicación y se añadió al circuito siguiendo la configuración expuesta en el correspondiente datasheet [40]. El mayor inconveniente que supuso el uso de este encapsulado es la necesidad de alimentación tanto positiva como negativa, por lo que esta placa deberá estar alimentada a $\pm 5V$ para el correcto funcionamiento de la última etapa destinada al balanceo de la señal.

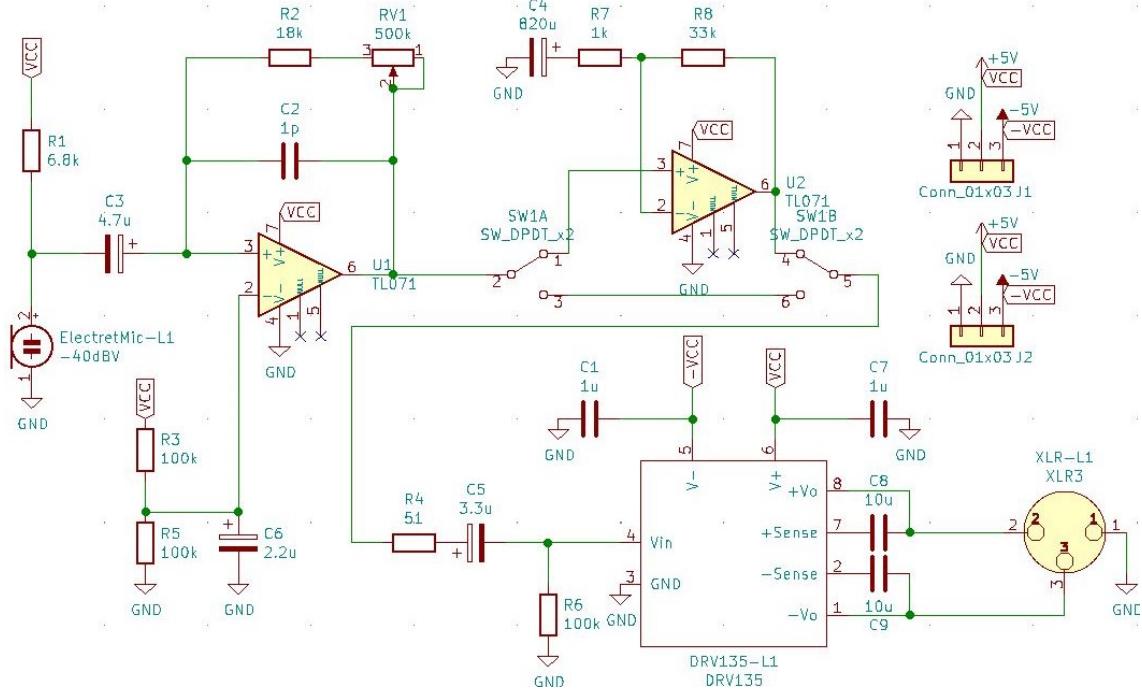


Fig. 4.6. Circuito de la PCB del primer prototipo con la implementación de la etapa de balanceo

En una primera iteración se consideró la opción de incluir dos preamplificadores por placa, con el objetivo de tener en solo una PCB la electrónica para todo el sistema, donde poder conectar las cápsulas microfónicas correspondientes al oído izquierdo y el oído derecho. Debido a limitaciones a la hora de la fabricación esto quedó descartado (primera imagen fig. 4.7).

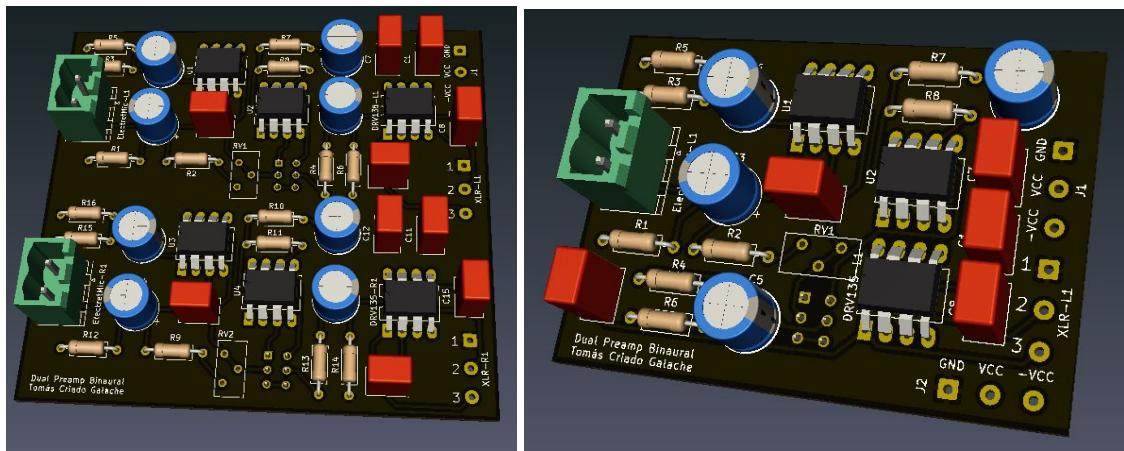


Fig. 4.7. A la izquierda, visualización 3D del diseño de PCB descartado. A la derecha, visualización 3D del diseño del primer prototipo

Tras una serie de modificaciones intermedias, el resultado final de la PCB del primer prototipo (segunda imagen fig. 4.7) estaría finalizada y lista para su fabricación.

4.2.3. Implementación y resultados

Cuando se consiguió la PCB, se comenzó con el montaje de un previo para verificar el correcto funcionamiento y realizar una serie de pequeñas pruebas eléctricas.

Para que la realización del primer prototipo no se demorase, se construyó con componentes adquiridos con anterioridad, por lo que varios componentes no serían en alguna ocasión los más apropiados o exactamente los usados finalmente, como el uso de condensadores electrolíticos en lugar de condensadores de tántalo, para evitar el ruido audible provocado por los condensadores electrolíticos o la utilización de los OpAmp TL081[42] y TL071[43]. Debido a esto, para este prototipo finalmente se omitió la etapa de balanceado y las pruebas realizadas se centraron en el acondicionamiento de la cápsula microfónica y las dos etapas de amplificación.

El primer fallo de diseño detectado consistió en una elección errónea de los pads de los OpAmps, lo cual obligó a soldar los encapsulados correspondientes con sumo cuidado. Una vez soldados todos los componentes correctamente, se procedió a realizar un test de funcionamiento sin éxito debido a que, a pesar de los buenos resultados anteriormente obtenidos, el diseño de la PCB no funcionaba. Tras repasar las soldaduras y comprobar la continuidad, se optó por revisar el esquemático, encontrando el segundo fallo de diseño, las entradas del OpAmp de la primera etapa estaban intercambiadas debido a que el diseño del componente en los diferentes programas usados no tienen las entradas situadas del mismo modo. Una vez resuelto esto, se optó por seccionar las pistas con un cíter y puenteear las pistas solucionando así el problema (ver fig. 4.8).

Durante el proceso de prueba anteriormente explicado, en todo momento se usó un tono puro de 1kHz emitido desde una fuente externa y recogido por la cápsula microfónica. Esto se debe a que la cápsula microfónica funciona como un generador de corriente variable y el generador de funciones del laboratorio proporciona señales de tensión, siendo obligatorio el uso de la cápsula.

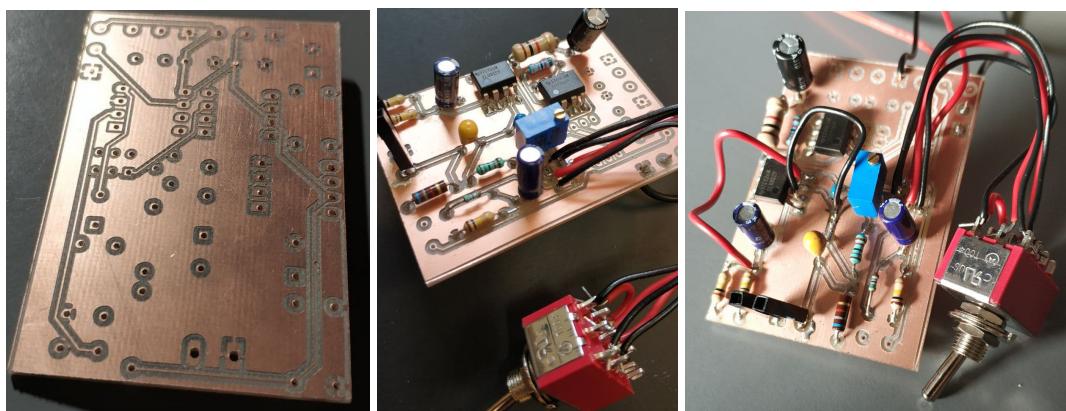


Fig. 4.8. Proceso de construcción del primer prototipo sobre PCB. De izquierda a derecha se puede apreciar la progresión: En primer lugar la PCB propiamente dicha. PCB soldada. PCB con problemas de diseño solventados

Una vez solucionados los fallos de diseño se comenzaron las pruebas de funcionamiento con el objetivo de testear el diseño y encontrar puntos de mejora en los futuros diseños.

En primer lugar se realizaron pruebas con tonos puros y barrido sinusoidal (sweep sine) dando lugar a su correcta visualización en el osciloscopio (ver fig. 4.9).

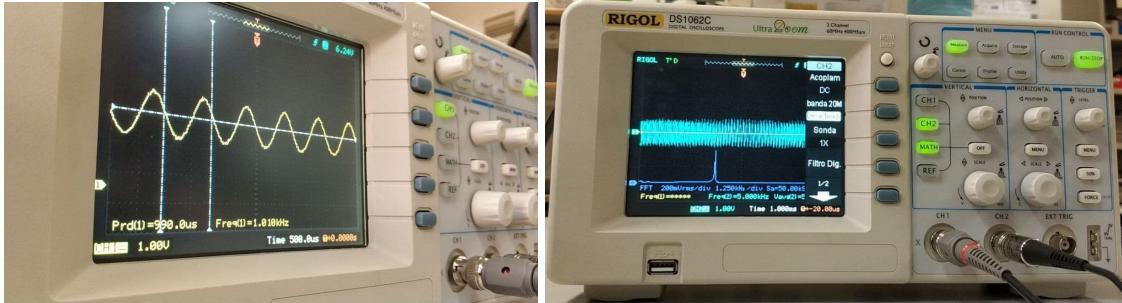


Fig. 4.9. Análisis PCBs primer prototipo. A la izquierda, análisis de un tono puro @ 1kHz. A la derecha, análisis de sweep sine en modo FFT

Finalmente se concluyeron los test de este primer prototipo mediante el análisis de la respuesta en frecuencia. Para ello, se realizó un montaje (ver fig. 4.10) intentando asemejarse al usado a la hora de efectuar las mediciones pertinentes para caracterizar micrófonos en un laboratorio de mediciones, con los medios disponibles.

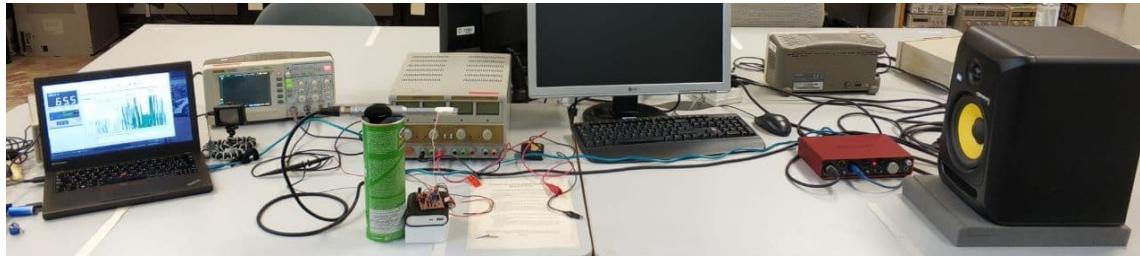


Fig. 4.10. Montaje para medición. material usado de izquierda a derecha: portátil con el software REW, osciloscopio, micrófono de referencia, primer prototipo, fuente de alimentación, interfaz de sonido y fuente sonora

Para este test se utilizó a modo de altavoz de referencia un KRK Rokit 6 G3, como micrófono de referencia el micrófono de medición Behringer ECM8000, la tarjeta de sonido Focusrite Scarlett 2i4, un ordenador portátil con el software REW (Room EQ Wizard) a modo de analizador y calibrador sonoro, y el software Reaper como DAW para la generación de tonos y ruidos banda ancha. La cápsula de nuestro sistema biaural se conectó al circuito del previo y se situó junto a la del micrófono de referencia. Ambas cápsulas se situaron a 1m del altavoz de referencia a una altura intermedia entre el tweeter y el woofer del mismo. Mediante el uso del osciloscopio se obtuvo la señal transducida con el preamplificador diseñado, mientras que por medio del montaje realizado se monitorizaban las

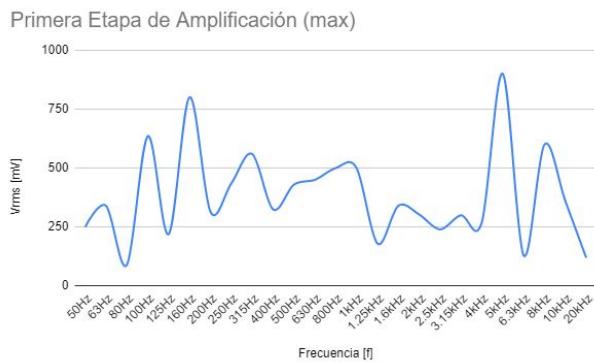
condiciones de las señales emitidas. A pesar de que las condiciones de medición no son las ideales y el procedimiento seguido dista en gran medida del procedimiento real a la hora de caracterizar un micrófono, este experimento aportará una serie de datos útiles.

Para analizar la respuesta en frecuencia del sistema, se emitieron diferentes tonos puros a lo largo del espectro, siguiendo como procedimiento el escoger las frecuencias centrales de las bandas de tercio de octava, usadas típicamente para la realización de pruebas en un entorno profesional de medición.

Siguiendo el procedimiento anteriormente descrito se midieron las diferentes configuraciones del preamplificador. Dado que el ruido de fondo era superior a los 40dB, no era posible usar la fuente sonora por debajo de los 50dB, por lo que la medición de la configuración de la primera y la segunda etapa en conjunto, con el potenciómetro situado en su valor máximo no se pudo caracterizar. Por otro lado, durante la medición de la ganancia de la segunda etapa de amplificación, se advirtió que debido a una gran diferencia de nivel (entre la entrada y la salida de esta etapa), algunos de los valores medidos se veían limitados por la saturación de los OpAmp. No resultó posible realizar una mejor configuración de la fuente sonora ya que si el SPL era superior a 50dB, esta segunda etapa saturaba a la salida, mientras que si era inferior a 50dB, la señal de entrada era muy débil, por lo que a pesar de que podía ser observada, el osciloscopio era incapaz de medir la amplitud de la señal, resultando imposible anotar los datos necesarios.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4.11. Gráficas obtenidas del test del primer prototipo: (a) primera etapa con RV al mínimo y SPL=70dB, (b) primera etapa con RV al máximo y SPL=50dB, (c) primera y segunda etapa con RV al mínimo y SPL=50dB, (d) ganancia segunda etapa con SPL=50dB

Si nos fijamos de manera individual en las gráficas de la figura 4.11 se puede ver claramente como la respuesta en frecuencia dista en gran medida de ser plana, esto será provocado por las condiciones poco ideales del entorno³ y a una mala respuesta en frecuencia de la cápsula microfónica usada. Por otro lado, si se observan las tres primeras gráficas en conjunto, se puede ver con claridad que el dibujo que estas trazan se parecen en gran medida, significando que a pesar de las diferentes configuraciones que se están considerando, la respuesta es muy similar, por lo que se puede suponer una respuesta plana del preamplificador según las consideraciones tomadas y los resultados simulados. Es preciso tener en cuenta que dadas las condiciones del entorno de pruebas, puede haber ligeras variaciones en el mismo, así como errores humanos a la hora de medir que introduzcan variabilidad entre medidas.

³Normalmente este tipo de pruebas y mediciones se realizan en una cámara anecoica, donde se suponen condiciones ideales de campo libre.

4.3. Segundo prototipo

Debido a que los resultados obtenidos en el primer prototipo fueron satisfactorios la finalidad del segundo prototipo es la de crear un prototipo funcional con el que poder realizar grabaciones biaurales, siendo preciso en este caso la utilización de la etapa de balanceo de la señal y la utilización de los conectores pertinentes.

En esta ocasión el diseño y la simulación de este prototipo se obviaron debido a que los resultados del primer prototipo fueron correctos en este aspecto, por lo que se comenzó la implementación directamente desde el diseño de PCB.

4.3.1. Diseño de PCB

La creación de un segundo diseño de PCB (fig. 4.12) para este prototipo recaía fundamentalmente en la necesidad de subsanar los errores encontrados en el primer diseño.

Por ello, en primera instancia, se realizó la correcta conexión del OpAmp de la primera etapa, invirtiendo las conexiones de las entradas del mismo.

La siguiente corrección a realizar sería la sustitución de las huellas de los encapsulados por las adecuadas para una mejor y más sencilla inserción de los componentes en ellas.

Para facilitar la conexión de los componentes externos a la placa, como puede ser la resistencia variable y el switch, se sustituyeron las huellas asignadas en el anterior prototipo y se asignaron huellas para la utilización de cable.

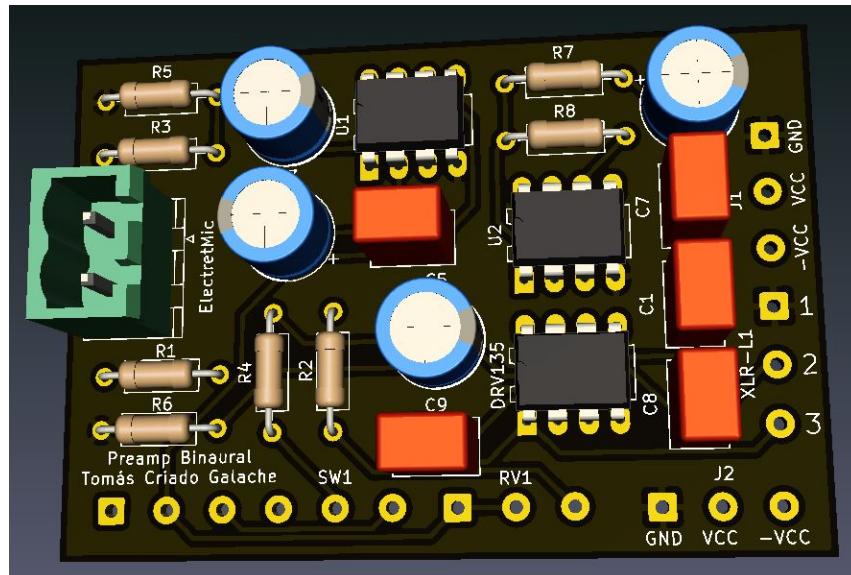


Fig. 4.12. Visualización 3D del diseño de PCB del segundo prototipo

4.3.2. Implementación y resultados

En este caso se encargaron dos PCBs para contar con dos previos y cumplir el objetivo de realizar grabaciones biaurales.

Para la construcción de estos nuevos preamplificadores se realizó un pedido de componentes, por lo que en esta ocasión se omitió el uso de condensadores electrolíticos, sustituyéndose por condensadores de tántalo. Para un manejo de la ganancia de los dos previos de manera simultanea se utilizó un potenciómetro logarítmico dual y un switch MTS 402, con el que poder comutar de manera simultanea la utilización de la segunda etapa de amplificación de los preamplificadores.

Se optó por la utilización de los OpAmp OPA227PA[44] y en esta ocasión se dispuso de los encapsulados DVR134[40] para la etapa de balanceo, mientras que para la conexión de las cápsulas se contó con la utilización de conectores euroblock.

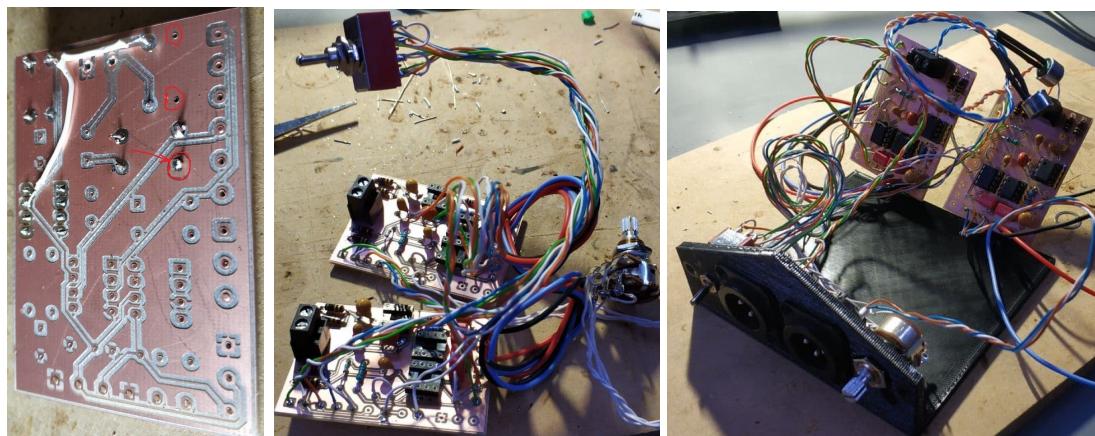


Fig. 4.13. PCB segundo prototipo. De izquierda a derecha: Segunda PCB y resolución de problema. Segunda PCB soldada. Colocación de los conectores XLR, switch y potenciómetro en el panel trasero

Como se puede apreciar en la primera imagen de la figura 4.13 las placas PCBs en esta ocasión tenían algunos problemas de fabricación que se subsanaron correctamente.

Después de terminar de soldar los prototipos, se procedió a probar su funcionamiento en el laboratorio con el uso de la fuente de alimentación y del osciloscopio. Tras comprobar la continuidad de las placas y repasar soldaduras, el funcionamiento del prototipo fue el esperado.

En la tercera imagen figura 4.13 se puede ver como quedarían los componentes externos ya fijados en el panel posterior del micrófono biaural.

Se comprobó que la primera y segunda etapa de amplificación funcionaban de manera similar que en el anterior prototipo, por lo que se centró el análisis en la comprobación del sistema de balanceado (fig. 4.14).

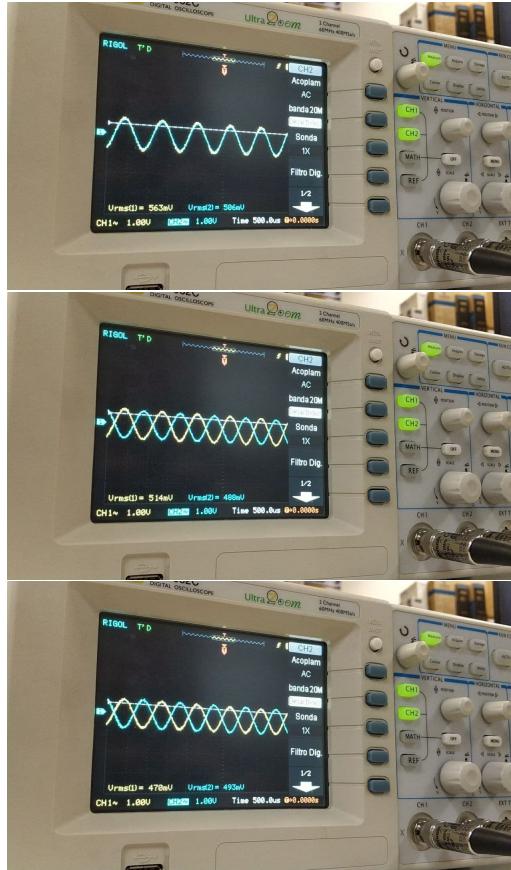


Fig. 4.14. Test de la etapa de balanceo de la señal implementado con el encapsulado DVR134. En la primera imagen se representa la entrada y la salida en fase. En la segunda imagen se representa la entrada y la salida en contrafase. En la tercera imagen se representa la salida en fase y la salida en contrafase

Una vez comprobado el correcto funcionamiento con el uso del osciloscopio se realizaron una serie de pruebas mediante la conexión del circuito a la interfaz de sonido Focusrite Scarlett 2i4. A pesar de que las pruebas anteriores eran satisfactorias, en este caso el sonido resultante era de baja calidad, muy inferior a la esperada, siendo la voz grabada muy distorsionada, con un claro efecto de saturación.

Ante este problema se optó por sustituir las cápsulas por unas Primo EM172-Z1[45], dado que estas son cápsulas de una mejor calidad que las Loudity LD-MC-6035W[35].

Tras la sustitución de las cápsulas se observó como la calidad de las grabaciones eran de una calidad notoriamente superior, por lo que se decidió montar dichas cápsulas en la posición correspondiente, dando lugar a las grabaciones obtenidas en el apartado 5 de “Pruebas y conclusiones”.

4.4. Prototipo final

En vista del buen funcionamiento del segundo prototipo, se iba a considerar como el resultado final. Finalmente, ante la posibilidad de encargar unas nuevas PCBs, se aprovechó la oportunidad no sin antes realizar una serie de modificaciones que garantizasen un mejor funcionamiento del sistema.

4.4.1. Diseño y simulación

Como se comentaba en anteriores apartados, la etapa de balanceo obligaba a que el sistema estuviera alimentado a $\pm 5V$ por lo que alimentar a $5V$ los amplificadores operacionales carecía de sentido ya que al alimentarlos de manera simétrica estos funcionarían mejor, teniendo un mayor margen hasta alcanzar la saturación y siendo mucho más sencilla su configuración en el circuito (imagen superior fig. 4.15).

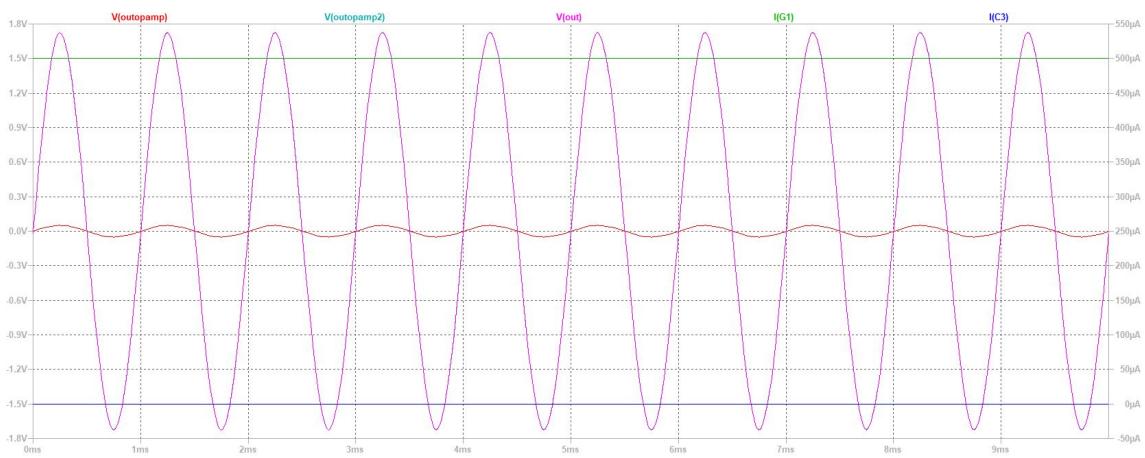
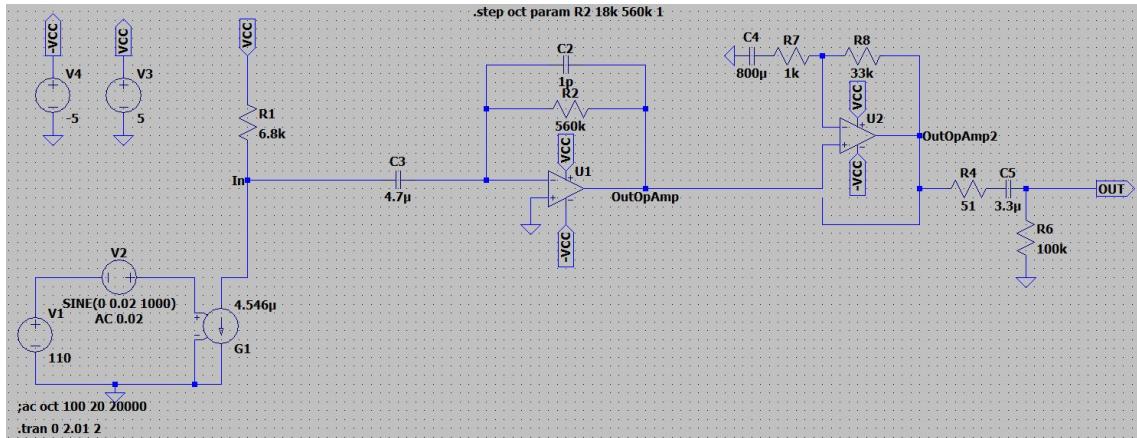


Fig. 4.15. En la primera imagen se representa el circuito final obviando la etapa de balanceo. En la segunda imagen se representa la simulación en el dominio temporal realizada. Se considera un tono puro de 1kHz con un SPL de 60dB

En la segunda imagen de la figura 4.15 se puede ver en color verde la representación de la corriente de salida de la cápsula. En azul se encuentra representada esa corriente una vez es filtrada la continua con el condensador C_3 . A diferencia de lo mostrado en la segunda imagen de la figura 4.1, en esta ocasión la salida del primer amplificador operacional se encuentra centrada en 0V, representada en rojo. De igual manera, la salida del segundo amplificador operacional viene representada en cian y, dado que en esta ocasión no tiene offset de continua, se superpone a esta señal la que encontramos a la salida final del circuito simulado, representada en rosa. Esta señal representada en rosa es la que posteriormente entrará al encapsulado DVR134, realizándose el balanceo correspondiente.

Por otro lado, con el fin de poder alimentar el sistema fuera del entorno de laboratorio se diseñó un pequeño circuito con el cual poder alimentar a $\pm 5V$ el circuito a través de una fuente de corriente continua externa de 12V, o bien, mediante la alimentación phantom proporcionada por ejemplo por la interfaz de sonido a la que posteriormente conectaremos el micrófono.[46][47]

Debido a que los componentes necesarios no se encuentran en LTspice, la simulación de este circuito no se realizó de manera integral. Sin embargo se simuló la extracción de la fuente phantom mediante la utilización de dos generadores de tensión alterna, suponiendo un tono puro de 1kHz y un offset de 48V similar al que encontramos en estas fuentes (fig. 4.16). La extracción se basa en la suposición de que el sistema es balanceado y al sumar dichas señales, la componente alterna se sumará en contrafase, quedando finalmente tan solo el offset de 48V.

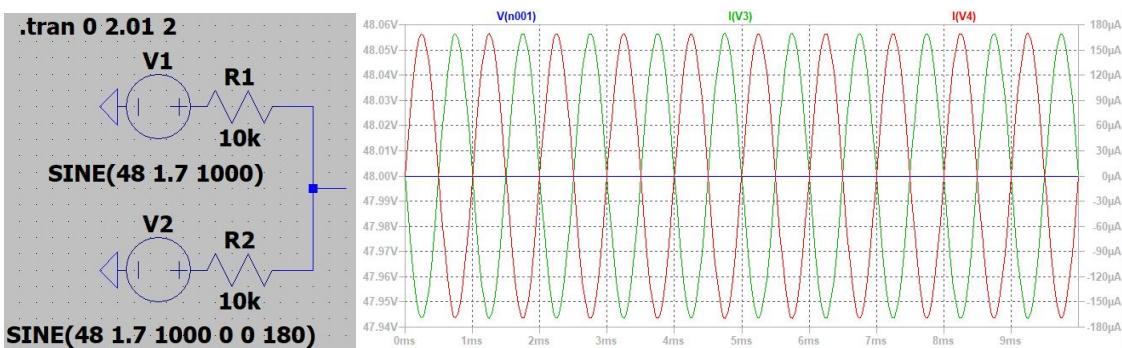


Fig. 4.16. En la imagen de la izquierda se representa el circuito empleado para la extracción de la tensión de la fuente phantom y a la derecha se puede ver la simulación en el dominio temporal del circuito

En la figura 4.16 se representan las señales implicadas en la simulación descrita. En verde una señal de tono puro a 1kHz, en rojo la misma señal de 1kHz en contrafase. Ambas señales tienen un offset de 48V, por lo que al sumarse se obtiene la señal azul, que tiene como resultado una tensión continua de 48V, eliminando de este modo la señal alterna.

4.4.2. Diseño de PCB

Una vez realizado los cambios en el preamplificador simulados en el anterior apartado se modificó la colocación de R_4 , C_5 y R_6 , colocándolas por duplicado a la salida del sistema, entre el encapsulado DVR134 y las salidas para los conectores XLR (ver fig. 4.17). De este modo, se adecua el sistema al siguiente equipo a conectar y se protege de una posible alimentación phantom.

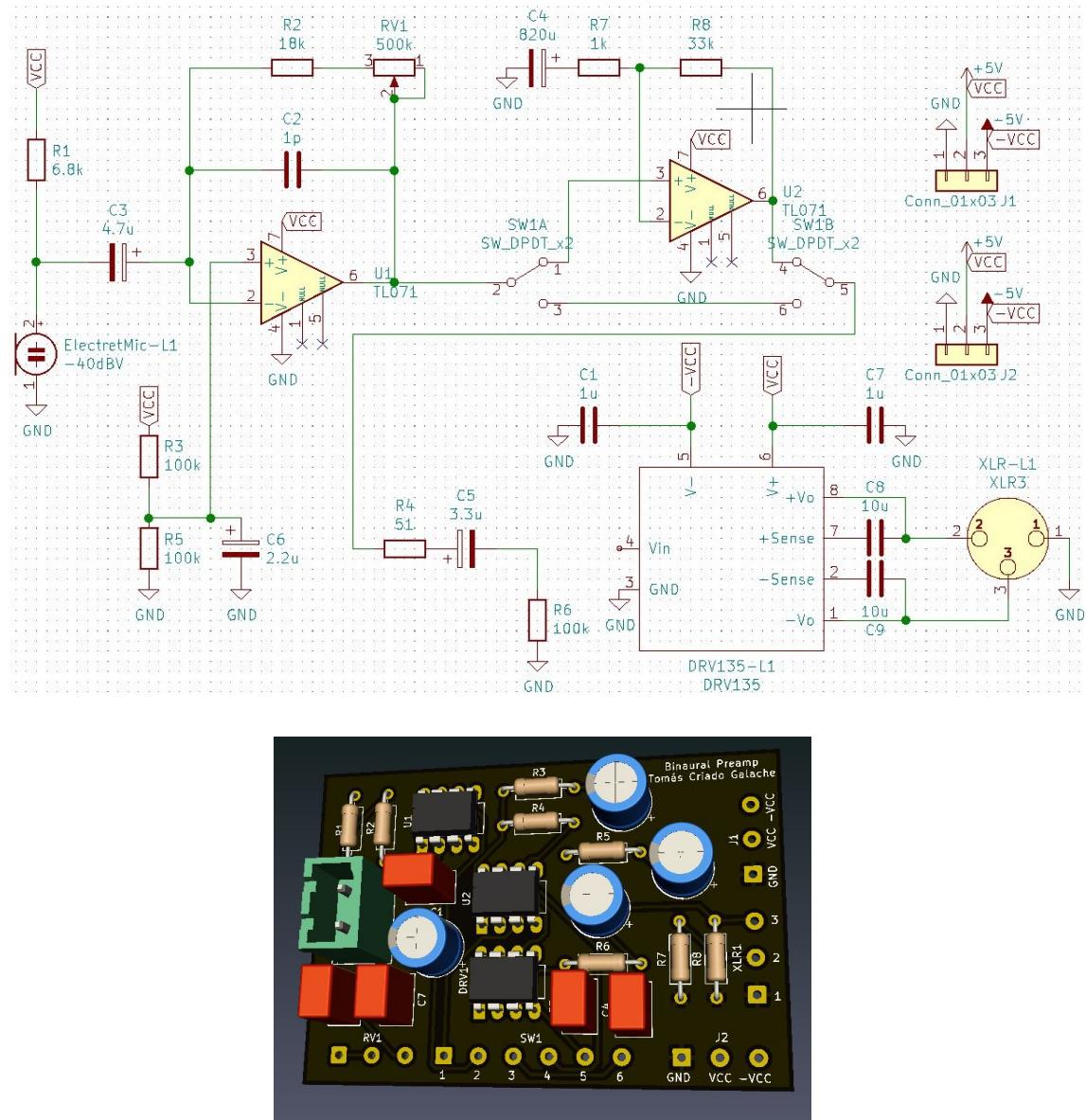


Fig. 4.17. PCB prototipo final. En la imagen superior se representa el esquemático del circuito final implementado. La imagen inferior representa la vista 3D de la PCB final

Para el diseño del circuito y la PCB (fig. 4.18), se usarán como componente principal dos reguladores de tensión: el LM7805 [48] para conseguir 5V y el LM7905 [49] para conseguir -5V. Por consiguiente, el diseño se basa en un divisor de tensión que alimenta a los reguladores y genera un nuevo punto de referencia. Para seleccionar si la fuente a usar

es una fuente de alimentación externa o la alimentación phantom del dispositivo donde se ha conectado, se añade un conmutador. En la parte del circuito que considera la alimentación phantom, extrae la tensión del mismo modo que simulamos con anterioridad.

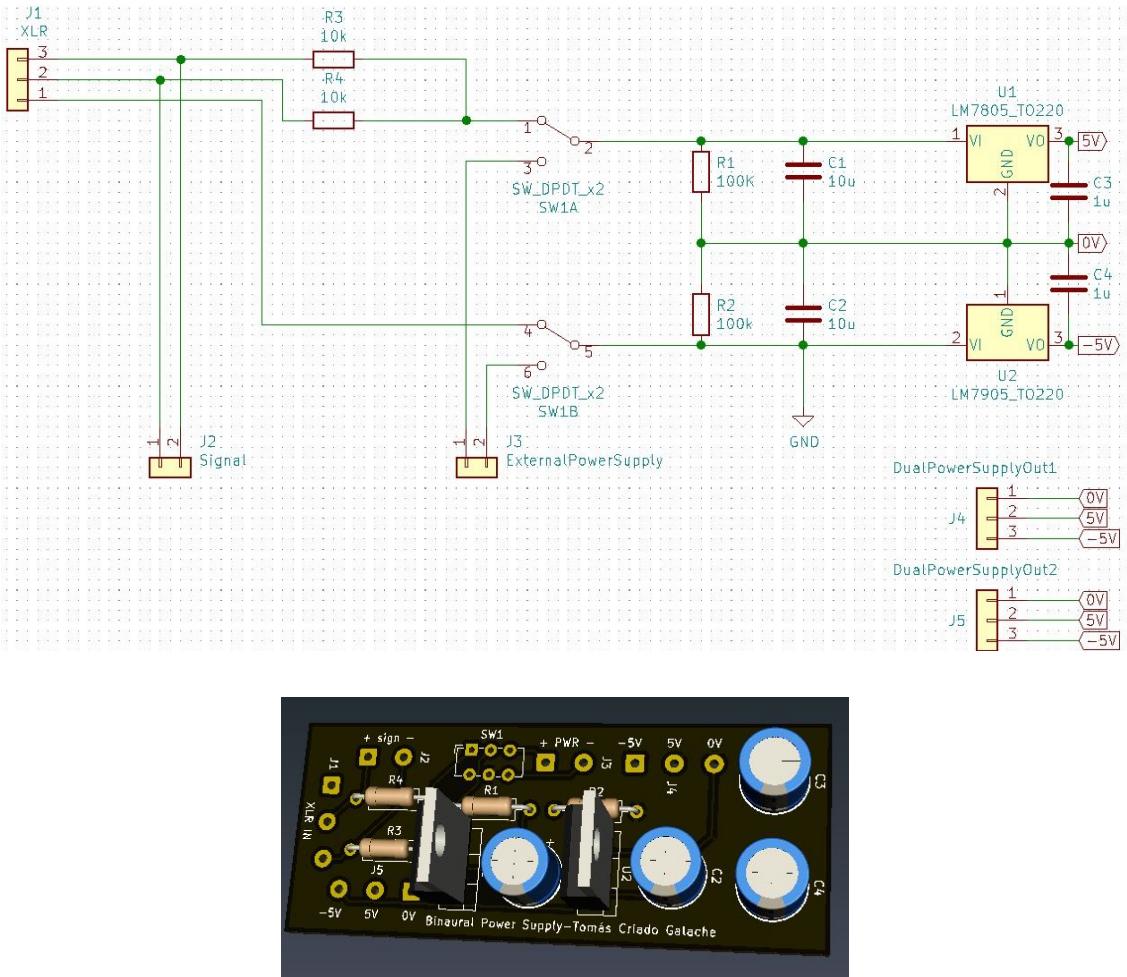


Fig. 4.18. PCB de alimentación. En la imagen superior se representa el esquemático del circuito de alimentación. La imagen inferior representa la vista 3D de la PCB de alimentación

4.4.3. Implementación y resultados

Para el preamplificador en esta ocasión debido a que el excedente de ciertos componentes del anterior prototipo era escaso y a que algunos de ellos no se encuentran en tiendas de electrónica, no se pudo obviar la utilización de ciertos componentes como los condensadores electrolíticos (fig.4.19).

Una vez realizada la construcción de dos preamplificadores y una placa de alimentación (con la que poder alimentar a ambos preamplificadores), se comenzaron los test de funcionamiento. Para poder alternar entre el segundo prototipo y este, se colocaron conectores para el switch y los conectores XLR.

En el caso de los preamplificadores, como era de esperar, el funcionamiento fue el esperado, similar al del segundo prototipo.

Por otro lado, el diseño del circuito de alimentación no funcionó correctamente debido a que el divisor resistivo no se comportó como se esperaba. Como resultado, la salida del circuito era una tensión de 3V/0V/-5V, en lugar de 5V/0V/-5V. Para mitigar este efecto, se sustituyeron las resistencias del divisor de tensión R_1 y R_2 por unos valores más bajos. Finalmente, se utilizaron las resistencias $R_1 = R_2 = 500\Omega$ que, a pesar de no obtener el resultado esperado, daba lugar a un mejor resultado de 4,5V/0V/-5V. El circuito de salida, daba los mismos resultados al conectar una fuente de alimentación de corriente continua de 12V, que la alimentación phantom, en los diferentes modos, por lo que se puede concluir que esa parte del diseño funciona correctamente.

Debido a la utilización de tres encapsulados por cada preamplificador, el consumo de cada PCB es muy alto en comparación a la potencia aportada por la alimentación phantom, por lo que finalmente, se descartó la posible utilización de esta.

Como prueba final se trató de conectar todo el sistema (alimentado mediante la propia PCB de alimentación y una fuente de alimentación continua de 12V y 2A) a la interfaz de sonido como se hizo con anterioridad, y el resultado de la grabación, a pesar de que la alimentación no se estaba realizando de forma óptima, fue correcta.

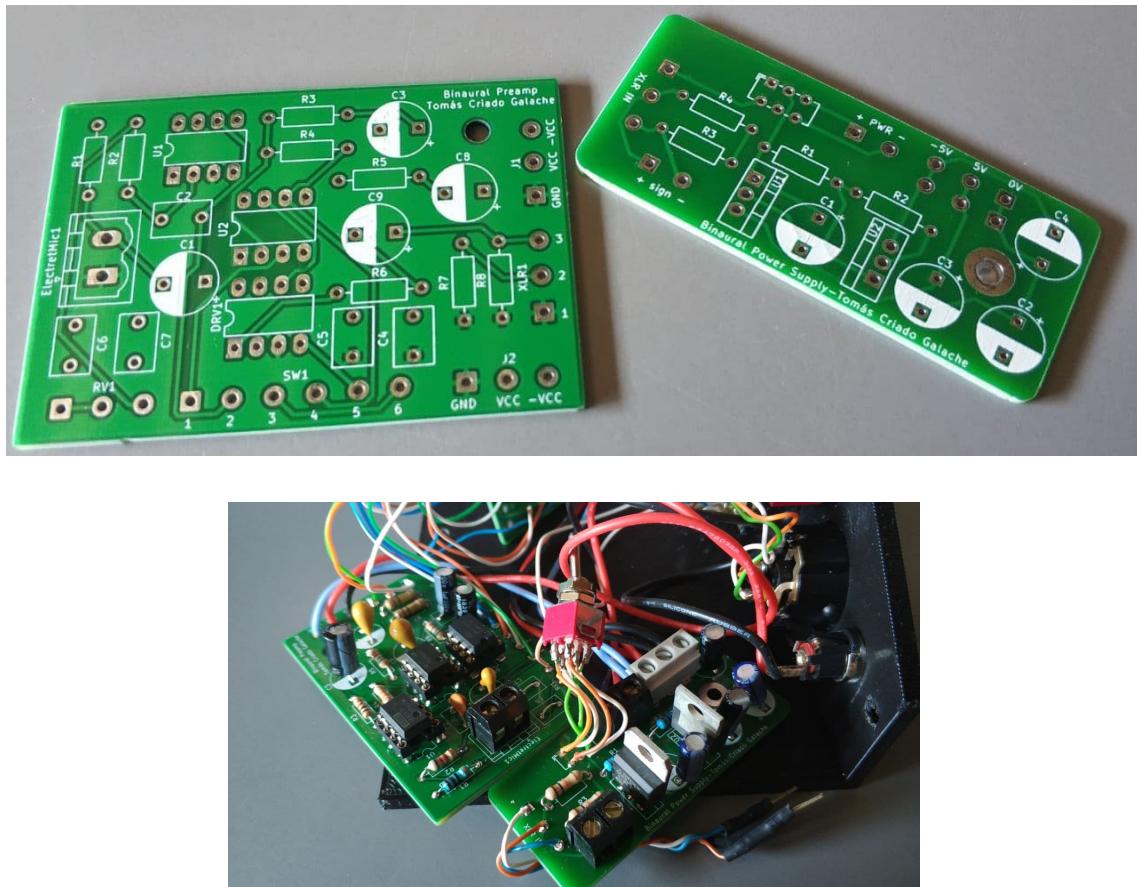


Fig. 4.19. En la imagen superior, PCB del preamplificador a la izquierda y PCB de alimentación a la derecha. En la imagen inferior, prototipo final ensamblado.

5. PRUEBAS Y CONCLUSIONES

Dentro del entorno de pruebas de laboratorio se consiguió finalmente realizar una serie de grabaciones biaurales a partir de las cuales se puede verificar el funcionamiento del dispositivo y el cumplimiento de los objetivos propuestos.

Para realizar las grabaciones se utilizó un ordenador portátil junto al DAW “Reaper”, una interfaz de sonido Focusrite Scarlett 2i4, dos cables XLR y una fuente de alimentación con la que se alimentó el dispositivo, además del micrófono biaural (fig. 5.1).

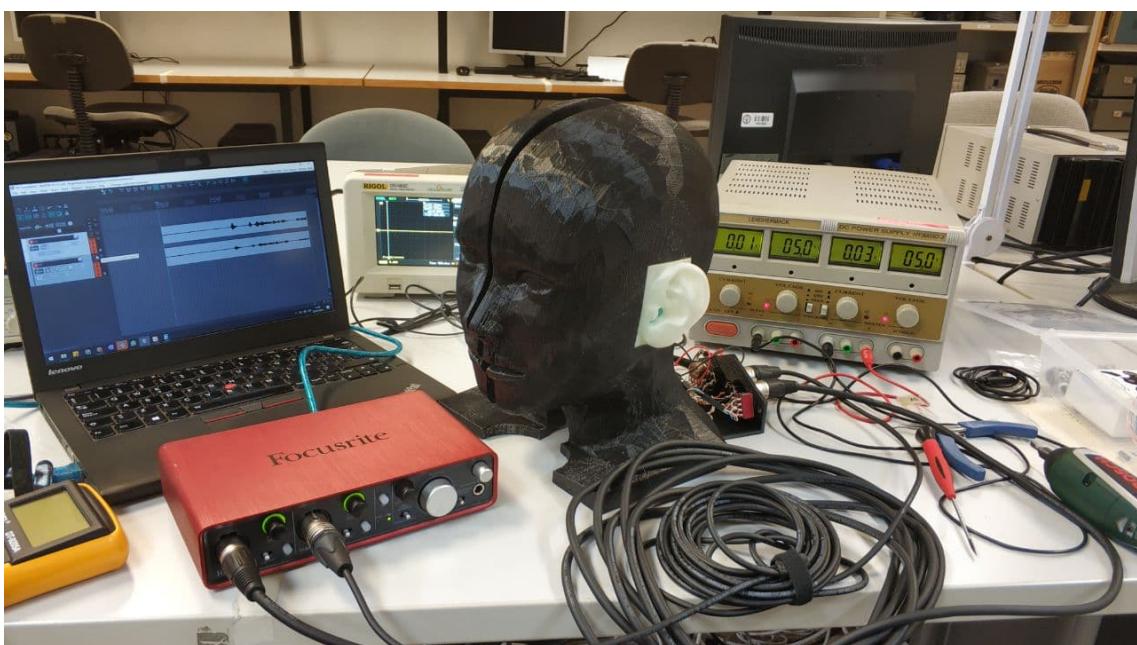


Fig. 5.1. Setup de grabación. De derecha a izquierda: ordenador portátil grabando con el software Reaper, interfaz de sonido, micrófono biaural y fuente de alimentación

A continuación se presenta una enlace a las diferentes grabaciones realizadas⁴:

<https://youtu.be/ZWAR-ZuT80Q>

En las grabaciones se pueden escuchar con claridad el efecto biaural tratado en este trabajo. En ellas se realizan diferentes tipos de pruebas con las que podemos experimentar diferentes sensaciones y verificar si las sensaciones son similares a como las percibiríamos en la realidad⁵.

⁴Se recuerda al lector que para una correcta escucha de la grabación se requiere el uso de auriculares. Dado a que las grabaciones se han realizado considerando el canal auditivo, es preferible una escucha con auriculares de tipo in-ear.

⁵En la descripción del vídeo se pueden localizar los intervalos temporales de las pruebas junto a una pequeña descripción.

Se ha tratado de recrear diferentes escenarios situando la fuente emisora en diferentes puntos de una sala, generalmente en movimiento y a diferentes distancias con el objetivo de poder verificar el funcionamiento en diversas situaciones. Además, se ha tratado de verificar la capacidad de diferenciar si la fuente está situada en frente o detrás del sujeto, ya que esto suele ser una problemática muy habitual.

Subjetivamente hablando, las grabaciones indican un muy buen funcionamiento sobre el terreno práctico, siendo estas muy nítidas. Las sensaciones recreadas son similares a las experimentadas con otros sistemas comerciales y se reconoce fácilmente lo que se trata de captar con cada prueba.

Por otro lado, se ha realizado un pequeño test mediante el cual, sujetos externos a la realización de este proyecto han realizado la escucha de estas grabaciones y han expresado su opinión sobre las sensaciones recreadas. Todas ellas han sido muy satisfactorias, haciendo ver que los resultados obtenidos concuerdan con el resultado esperado.

Respecto al diseño 3D el resultado ha sido el esperado, siendo posible mejorar el acabado final de la impresión, debido a un posible error en la calibración de las dimensiones en una de las impresoras.

En vista al resultado obtenido en las grabaciones, la electrónica del sistema cumple todas las características y requisitos buscados, siendo los puntos más débiles la capacidad de ser alimentado con fuentes externas a la del laboratorio y la segunda etapa de amplificación, ya que en vista de las pruebas realizadas, su utilización no es especialmente práctica.

Recapitulando, se ha logrado la construcción de un prototipo que cumple con el requisito principal, poder realizar grabaciones biaurales, obteniéndose resultados satisfactorios a pesar de los puntos débiles anteriormente mencionados. Por consiguiente, teniendo en cuenta los pros y contras, se puede concluir que el sistema funciona de manera correcta, cumpliendo con los requisitos y objetivos marcados.

6. TRABAJOS FUTUROS

A raíz de este TFG, se puede realizar una serie de futuras líneas de trabajo.

Desde el punto de vista electrónico, en primer lugar, se podría realizar una simplificación y corrección del diseño, reduciendo el coste en materiales y garantizando un mejor funcionamiento. Esto se podría lograr mediante la integración de encapsulados con varios amplificadores operacionales, por ejemplo. De este modo se conseguiría un mejor SNR y se reduciría el consumo del circuito. Otra opción a contemplar es la integración de las diferentes PCBs en tan solo una.

Por otro lado, se ha tratado de diseñar una etapa de alimentación primitiva con el objetivo de poder llevar el sistema fuera del entorno de trabajo de laboratorio. Sin embargo, para un mejor y correcto funcionamiento, se requeriría diseñar un sistema de alimentación más completo, garantizado el buen funcionamiento del dispositivo final. Para ello, se debería incluir la posibilidad de utilizar una alimentación phantom, muy común en interfaces de sonido y mesas de mezclas, dotando al sistema de una mayor versatilidad y practicidad. Para ello se podría usar un regulador CC/CC con el que pasar de los 48V de la alimentación phantom a los $\pm 5V$ de los que se alimenta el circuito de una manera más eficiente a la realizada con reguladores de tensión, consiguiendo la suficiente corriente para alimentar los circuitos sin problemas.

La inclusión de una monitorización propia en el micrófono biaural podría ser una mejora práctica a la hora de usar el sistema. Para ello se podría incorporar en el sistema una nueva etapa por la cual obtener una señal estéreo a partir de las dos señales de cada cápsula microfónica. De este modo, podría instalarse un conector de tipo minijack en el panel trasero para conectar directamente unos auriculares y verificar en todo momento la señal obtenida.

Desde el punto de vista de análisis sería de especial interés realizar la caracterización del micrófono biaural en un entorno controlado como puede ser la cámara anecoica. De este modo, se podrían valorar las características del diseño, realizándose las mejoras de diseño pertinentes y se podría verificar el cumplimiento de las normativas mencionadas en el marco regulador.

Para verificar el correcto funcionamiento del sistema, se podría realizar una prueba subjetiva. En esta, diferentes sujetos deberán anotar las sensaciones que experimentan al escuchar varios audios grabados a partir del micrófono biaural construido. Para que este estudio sea más completo, podría suponerse un sistema de referencia profesional, a modo de punto de comparación, como puede ser el micrófono KEMAR de la compañía GRAS (fig. 1.1) [6].

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Kleiner, B. I. Dalebäck y P. Svensson, *Auralization - An Overview*. [En línea]. Disponible en: https://www.yumpu.com/%20Auralization%20An%20Overview*%20-%20Matt%20Montag.%20yumpu.com.%20Retrieved%20from%20https://www.yumpu.com/en/document/read/9362343/auralization-an-overview-matt-montag.
- [2] J. Sodnik, R. Sušnik, M. Štular y S. Tomažič, *Spatial sound resolution of an interpolated HRIR library*, mayo de 2005. [En línea]. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X05000460?casa_token=rc6INzL5zDQAAAAA:h-ffI-hphpHfTUxfbv8HtT_1VLb10BbrFcoipd7ooz-13C3GhC0rgwGlwbo1U_WRQXEyqp4Jtw.
- [3] C. Commons. [En línea]. Disponible en: <https://creativecommons.org/>.
- [4] E. Vega, *Definición y orígenes del audiovisual*. [En línea]. Disponible en: <http://www.eugeniovega.es/asignaturas/audio/01.pdf#:~:text=El%20origen%20del%20audiovisual%20est%C3%A1%20en%20el%20cine,%20&%20text%20=%20La%20fecha%20oficial%20del%20nacimiento,%20parece%C3%ADa%20salirse%20de%20la%20pantalla>.
- [5] T. Lentz, D. Schröder, M. Vorländer e I. Assenmacher, “Virtual reality system with integrated sound field simulation and reproduction,” *EURASIP journal on advances in signal processing*, vol. 2007, pp. 1-19, 2007.
- [6] GRAS, *KEMAR ® Manikin Type 45BA*. [En línea]. Disponible en: <https://www.ee.bgu.ac.il/~acl/Equip/KEMAR.pdf>.
- [7] Neumann, *KU 100*. [En línea]. Disponible en: <https://en-de.neumann.com/ku-100>.
- [8] Soundman, *Soundman Dummy Head*. [En línea]. Disponible en: https://www.thomann.de/es/soundman_dummy_head_333359.htm.
- [9] B. Enthusiast, *B1-E Dummy Head*. [En línea]. Disponible en: <https://binauralenthusiast.com/product/b1-e-dummy-head-with-be-p1-binaural-microphones-xlr-adapter/>.
- [10] 3Dio, *3Dio FS Series Binaural Microphones*. [En línea]. Disponible en: <https://3diosound.com/collections/fs-series-microphones>.
- [11] C. G. Saura, *OpenBinaural*. [En línea]. Disponible en: <https://github.com/CarlosGS/OpenBinaural>.
- [12] Jonny, *Binaural Microphone*, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.thingiverse.com/thing:499001>.

- [13] buster2006, *Binaural Head*. [En línea]. Disponible en: <https://www.thingiverse.com/thing:2690657>.
- [14] D. O'Connor y J. Kennedy, “An evaluation of 3D printing for the manufacture of a binaural recording device,” *Applied Acoustics*, vol. 171, p. 107610, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107610>. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X20307143>.
- [15] hofx, *Artificial head for binaural recordings*. [En línea]. Disponible en: <https://www.thingiverse.com/thing:4312688>.
- [16] IEC TS 60318-7:2017. [En línea]. Disponible en: <https://webstore.iec.ch/publication/34383>.
- [17] ANSI, *ANSI S3.36-1985 (R2006)*. [En línea]. Disponible en: <https://webstore.ansi.org/standards/asa/ansis3361985r2006>.
- [18] Jobted, *Sueldo del Ingeniero de Telecomunicaciones en España*. [En línea]. Disponible en: <https://www.jobted.es/salario/ingeniero-telecomunicaciones#:~:text=El%20sueldo%20de%20un%20Ingeniero,100.000%20%E2%82%AC%20brutos%20por%20a%C3%B1o>.
- [19] Rae, *biaural: Diccionario de la lengua española*. [En línea]. Disponible en: <https://dle.rae.es/biaural>.
- [20] D. R. Begault y L. J. Trejo, “3-D sound for virtual reality and multimedia,” 2000. [En línea]. Disponible en: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20010044352/downloads/20010044352.pdf?attachment=true>.
- [21] J. I. Arribas, *Determinación del ángulo lateral (azimut)*. [En línea]. Disponible en: https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_05_06/ios/public_html/2.2.htm.
- [22] G. S. Kendall, “A 3-D Sound Primer: Directional Hearing and Stereo Reproduction,” *Computer Music Journal*, vol. 19, n.º 4, pp. 23-46, 1995. [En línea]. Disponible en: <http://www.jstor.org/stable/3680989>.
- [23] D. de la Prida, “Sistema Auditivo Humano,” *Tecnologías del audio para realidad virtual*,
- [24] K. Watanabe, K. Ozawa, Y. Iwaya, Y. Suzuki y K. Aso, “Estimation of interaural level difference based on anthropometry and its effect on sound localization,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 122, n.º 5, pp. 2832-2841, 2007. doi: [10.1121/1.2785039](https://doi.org/10.1121/1.2785039). eprint: <https://asa.scitation.org/doi/pdf/10.1121/1.2785039>. [En línea]. Disponible en: <https://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/1.2785039>.

- [25] Y. Kahana y P. A. Nelson, “Numerical modelling of the spatial acoustic response of the human pinna,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 292, n.º 1, pp. 148-178, 2006. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.07.048>. [En línea]. Disponible en: <http://resource.isvr.soton.ac.uk/staff/pubs/PubPDFs/Pub8568.pdf>.
- [26] C. Brown y R. Duda, “A structural model for binaural sound synthesis,” *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, vol. 6, n.º 5, pp. 476-488, 1998. doi: [10.1109/89.709673](https://doi.org/10.1109/89.709673). [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=709673>.
- [27] S. Röttger, E. Schröger, M. Grube, S. Grimm y R. Rübsamen, “Mismatch negativity on the cone of confusion,” *Neuroscience Letters*, vol. 414, n.º 2, pp. 178-182, 2007. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2006.12.023>. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304394006013371>.
- [28] T. Letowski y S. Letowski, “Auditory Spatial Perception: Auditory Localization,”
- [29] h. møller henrik, m. f. sorensen michael friis, c. b. jensen clemen boje y d. hammershøi dorte, “binaural technique: do we need individual recordings?” *journal of the audio engineering society*, vol. 44, n.º 6, pp. 451-469, jun. de 1996.
- [30] Lehthanis, *Full Size Human Head Model for resting headsets on*, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.thingiverse.com/thing:758647>.
- [31] EarBuddies, *Anatomía de la Oreja*. [En línea]. Disponible en: <https://earbuddies.com/pages/anatomy>.
- [32] E. Britannica, *External auditory canal*. [En línea]. Disponible en: <https://www.britannica.com/science/external-auditory-canal>.
- [33] holoxica, *Ear Anatomy - 3D model*. [En línea]. Disponible en: <https://sketchfab.com/3d-models/ear-anatomy-468e2039bde34a3fabb9e90bff9cd56b>.
- [34] *The External Ear*. [En línea]. Disponible en: <https://teachmeanatomy.info/head/organs/ear/external-ear/>.
- [35] Loudity, “Loudity LD-MC-6035W Datasheet,” *tme.eu*, [En línea]. Disponible en: https://www.tme.eu/Document/228e18b7dab5b20e6dded0a784c352bc/LD-MC-6035W_DTE.pdf.
- [36] “Single-Supply, Electret Microphone Pre-Amplifier Reference Design,” *Texas Instruments*, [En línea]. Disponible en: https://www.ti.com/lit/ug/tidu765/tidu765.pdf?ts=1612331325542&ref_url=https://www.google.com/.
- [37] *LTspice*. [En línea]. Disponible en: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html#>.

- [38] “Non-inverting amplifier circuit,” *Texas Instruments*, [En línea]. Disponible en: https://www.ti.com/lit/an/sboa271a/sboa271a.pdf?ts=1614645801267&ref_url=https://www.ti.com/design-resources/design-tools-simulation/analog-circuits/amplifier-circuits.html.
- [39] W. electronica, *Amplificador operacional con fuente única*, ene. de 2017. [En línea]. Disponible en: <https://wilaebaelectronica.blogspot.com/2017/01/amplificador-operacional-con-fuente-unica.html>.
- [40] *DRV13x Audio-Balanced Line Drivers*. [En línea]. Disponible en: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv134.pdf?ts=1623467604217&ref_url=https://www.google.com/.
- [41] *KiCad*. [En línea]. Disponible en: <https://www.kicad.org/>.
- [42] *TL08xx FET-Input Operational Amplifiers*. [En línea]. Disponible en: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl081.pdf?ts=1623514496813&ref_url=https://www.ti.com/product/TL081.
- [43] *TL07xx Low-Noise FET-Input Operational Amplifiers*. [En línea]. Disponible en: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl071.pdf?ts=1623524659541&ref_url=https://www.ti.com/product/TL071.
- [44] *OPAx22x High Precision, Low Noise Operational Amplifiers*. [En línea]. Disponible en: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa227.pdf?HQS=dismous-null-mousermode-dsf-pf-null-wwe&ts=1623577911656&ref_url=https://www.mouser.es/.
- [45] Primo, *Primo Electret Condenser Microphone EM172Z1 Technical Data*. [En línea]. Disponible en: <http://www.micbooster.com/documents/EM172Z1%20July%202015.pdf>.
- [46] R. E. E. S. Products, *48V Phantom Feed Supply for Microphones*. [En línea]. Disponible en: <https://sound-au.com/project96.htm>.
- [47] Jonathan, *Electret Phantom Power Supply*. [En línea]. Disponible en: <https://www.making-sound.co.uk/projects/electret-phantom-power-supply.html>.
- [48] *LM340, LM340A & LM7805 Family Wide VIN 1.5-A Fixed Voltage Regulators*. [En línea]. Disponible en: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm340.pdf>.
- [49] *LM79XX Series 3-Terminal Negative Regulators*. [En línea]. Disponible en: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm79.pdf?ts=1623588737725&ref_url=https://www.google.com/.
- [50] B. Gold, N. Morgan y D. Ellis, *Speech and audio signal processing: processing and perception of speech and music*. Wiley, 2011.
- [51] *RS Components*. [En línea]. Disponible en: <https://es.rs-online.com/web/>.
- [52] *Mouser Electronics*. [En línea]. Disponible en: <https://www.mouser.es/>.

ANEXO 1. ABSTRACT

This document explains the design and construction process of a 3D printed binaural microphone. It can be found the fundamentals of the binaural audio, the design of the 3D model and the 3D print process, the electronic decisions, the PCB configuration and the results offered by the system.

Since the origins of the audiovisual world the human being has tried to reproduce the world as people perceive it. Over time, technology was increasing its potential and, nowadays, virtual reality and augmented reality are experiencing a growth. The sense of sight and hearing plays a very important role in this purpose. The sense of sight may be considered enough but researches indicate that the sense of hearing is very important in order to get much better results and much better immersive experience.

Nowadays, it's easy to find several products on the market to obtain binaural audio but they are expensive, limiting the access to that technology. The main objective of this final degree project is to create a diy binaural microphone easy to reproduce and low cost, based in 3D print technology.

The stipulated targets are:

- 3D design of human head and external ear in 1:1 scale.
- Modularity of the design for the simulation of different conditions.
- Construction in 3D printing.
- Balanced output signal in order to obtain compatibility with professional audio equipment.
- Gain adjustment.
- Record binaural audios.

The fundamentals of binaural audio are based on the human head, the external ear and the evolution of those characteristics. The form and the parallel position of the ears is related to the hearing experience and that is the reason for which humans can localize objects in the space in the horizontal plane without difficulties. The duplex theory, by Lord Rayleigh, explains that the localization of objects is related to two physical phenomena; the interaural time difference (ITD) and the interaural level (or intensity) difference (ILD).

The ITD explains that for low frequencies (lower than 1500Hz), the difference of distance between a sound source and the two ears incites a delay in time that affects the phase of the received signals (if considered a sinusoidal tone). That difference is traduced by the human brain and obtains as a result the localization of the object in space.

Otherwise, the ILD is the difference of levels between the ears and the same sound source. The mechanic of the problem is that the sound signals are attenuated by the distance and the obstacles, then for high frequencies (higher than 2000Hz) diffraction phenomenon is much more evident. In conclusion, the form of the human face, the noise, the ears and the orientation of the subject can influence the level of the signals at high frequencies.

Those two parameters are integrated by the brain and because of personal experience and years of evolution, the human can interpret those variations as localizations in the horizontal plane.

Moreover, the ITD and the ILD can be the same at different positions, which it is a problem. These points are situated at the confusion cone.

Recognition in the vertical plane is more problematic than in the horizontal plane because of the orientation and the position of the ears. Anyway, the recognition in the vertical plane is possible due to the reflections on shoulders and torso and the cavities and form of the pinna.

All these characteristics depend on each human because each human has a different body, which is a technical difficulty because it is not possible to make a generical binaural for each person. The best way to solve this problem is the possibility of interchange and particularitation of different parts of this binaural microphone. It remarks why modularity is a fundamental target of this work.

At the beginning, the idea of this project was to center the work in the preamplifier electronics, and replicate a 3D model but the selected model only considered the creation of the external ear. For this reason, due the importance of the head in order to obtain a better result and consider in such a way the ITD and the ILD parameters, the 3D design was modeled introducing some new considerations. The model was created using other free use models found in Thingiverse with the right of modification.

The software used to realize the modifications and the model design was Tinkercad, a free online tool.

First of all, the selected head model did not have the proper dimensions, then it measured the head size of different people. Once the size is correct, the ear of the head model is replaced by another model. This is due to the importance of considering the pinna's cavities and the low detail of the head model's pinna.

In order to obtain a modular design and have the possibility to interchange different parts of the model for a new one, it was created an independent pinna block in such a way that it can be inserted into the head model. With that improvement it is possible to 3D print different pinna blocks with different pinna models on it and to consider different kinds of pinna for different people. This is an interesting thing because of the previous problem mentioned that indicated that everyone has a different body and the biaural microphone can keep this in mind.

The next step represents another process in the research of a modular design. In order to reproduce different conditions in the ear canal, it is designed an ear canal block that could be replaced. For example, if the audition of the recorded audio is reproduced with on-ear headphones or over-ear headphones and the model always has present the ear canal, there are two considerations of the ear canal: The first in the recording audio and the second one in the reproduction in relation to the subject's ear canal. Then, in that case it is recommended the use of in-ear headphones. Otherwise, if it is not considered the ear canal in the recorded audio and it is using in-ear headphones, there is no consideration of the ear canal, which is an error. In conclusion, with that improvement could be change the considerations and could be simulated some problems in the ear canal like inflammation of the ear canal.

Later, the electronic cavity is created in such a way that all parts of the mechanisms are joined with screws.

Once the 3D modeling process is finished, the process of fabrication is begun. The 3D printers used are a Creality Ender 3 for the pinna block, the ear canal block and the electronic back panel and a Tronxy X5SA for the head, which is printed in two parts. The material used was mostly PLA (polylactic acid), which is a plastic that uses cornstarch as a raw material and it is also biodegradable. For the ears the material used is filaflex, an elastomer thermoplastic in order to have flexible ears similar to the human.

When the 3D printers are adjusted, the first step is to prove the parts that must fit in with others, then little parts are printed in order to check it. Once the parts were correctly printed, the pinna block and the ear canal are printed too. Previous to printing the head, a template is printed in order to check the size of it. As the result is correct, the head is printed and finally all the parts are fit.

In parallel to the 3D modeling and printing process, the electronic design was started.

The first step is to analyze the commercial solutions in order to have an idea of previous projects. Electret omnidirectional capsules are used in all these commercial products because they are cheap, the frequency response is flat, easy to use, of low consumption and its size is small. Then, they are perfect for this proposal. Other characteristics of some products are that they have XLR output connector, which means that the output is balanced and it is prepared to connect to professional audio equipment.

On the other hand, to power the circuit it was decided to use 5V because nowadays it is easy to find 5V transformers, batteries or power banks. Later, some design decisions did not allow that.

The main idea of the circuit is to make a preamplifier in order to process the signal captured by an electret capsule. This kind of microphone capsules are prepolarized and then it does not need a voltage in order to do that, but it has a JFET transistor inside and this must be powered.

Another design decision is to make variable gain amplification in order to use the

system in different kinds of situations, for example, record a binaural concert and stream it or record natural sound like birds in the forest to transport us to that idyllic place. In these examples, it is easy to see that the sound pressure level (SPL) is so different. In a concert, the SPL can be between 80dB and 110dB. Otherwise, in the nature record the sounds usually the SPL can be around 50dB. Because of that, there are two different amplification stages. The first stage is designed with a variable resistor that controls the gain control. The second stage is designed with a fixed value and it can be connected or disconnected with a switch. The maximum pressure level considered is a concert level, so in order to prevent a possible saturation in that situation, the maximum SPL considered is 120dB.

It is aimed to connect the binaural microphone into a mixing board or an audio interface, then the system output must be similar to the typical instruments that are connected into that. Typically that instruments are microphones (in fact, the designed system is still a microphone) and they have balanced signals with XLR connectors, that is what it is going to be used for.

Finally the process of the electronic is divided into three prototypes. Each prototype is made up of 3 parts. Design and simulation of the circuit, design of PCB and implementation and results.

The first prototype involves the most part of the design. In that part it is fixed to the base of the electronics. In order to design the circuit and check it by simulation before implementation, it is used the program LTspice. This software's library does not have a simulation of an electret capsule, so in order to simulate the microphone capsule, it is necessary to implement an alternative circuit that considers the pression of the sound and the transduction of the capsule using different kinds of source generators.

The first step is to power the capsule correctly with the 5V used in the circuit as a power. The next step is to create the first amplification stage. It is important to have in mind that the transduced variation of the sound pressure by the microphone capsule at output is transduced as a variation of current flow. That is the reason because this first amplification stage is made by an operational amplifier (OpAmp) in a transimpedance configuration, which implies an amplification of a current signal at input and it is transformed into a voltage variation at output. Once it is calculated the value of components, it is tested in a protoboard with positive results. The next step is to implement a potentiometer in order to change the gain of this stage. It is considered to use it from 120dB to 90dB. The final step in the design and simulation part is to create a second amplifier stage with an on-off switch. In this case, the circuit design of the OpAmp is a positive feedback configuration.

When the calculations and the simulations are finished the circuit is transferred to the PCB design program, KiCad, a free open source software. At that point a solution was integrated in order to balance the signal. The DVR134 is implemented but there is a problem in the previous decision design because it needs to be fed to $\pm 5V$.

The test of this first prototype begins when the design of the PCB is finished. Then, some errors are detected. The footprint selected for the encapsulated OpAmps is wrong and the input connections to the first amplification stage have been interchanged. Consequently, it is solved and the results are satisfactory. The DVR134 is not debugged in this prototype.

The implementation of the second prototype is done to obtain a functional result after fixing all issues in the first prototype. Then, after some modifications and the implementation of the plate, satisfactory results are achieved. In that part of the project, the balance system is tested and it works as expected. In view of the good results obtained, the entire binaural microphone is assembled and binaural recordings are made with which to test the purpose design.

Finally, the last prototype implies some modifications, the most important thing is that all the OpAmps will be powered by a $\pm 5V$ power supply because it is necessary for the balance stage, and that simplifies the design. Consequently, the system will work better.

In order to have a more functional system, a basic external power supply is designed. With that power supply the system is completed and the system is stand-alone outside the laboratory. The objective of that is to adapt a simple power source to a $\pm 5V$ power source. On one hand, the simple power supply could be a 12V power supply block. On the other hand, the power supply could be a phantom power supply from the mixing board, for example.

In conclusion, the system created is functional and satisfied all the requirements specified. The binaural recorded with the second prototype is heard by a small number of people and the feedback is very positive. All the subjects express surprise when the sensations recreated by the recordings listened to are shown.

In the next video the sound recordings made with the second prototype mentioned can be appreciated:

<https://youtu.be/ZWAR-ZuT80Q>

There are some things to improve that are mentioned for future research. Some circuit designs can be upgraded and the power supply can be designed in other ways for more effectiveness and better results. It can be also interesting to make a comparison test with some commercial systems like the KEMAR of GRAS. And on the other hand, it could be necessary to create a much bigger subjective test in order to have a better check of the functionality of the binaural microphone.

Key words: Binaural Microphone; Preamplifier; 3D Print

ANEXO 2. CÓDIGO MATLAB PARA CÁLCULO DE COMPONENTES

```
1 %% Características de la cápsula (Loudity LD-MC-6035W)
2 S_dB = -40; %Sensibilidad en dB
3 RL = 2200; %Resistencia de Carga (ohm)
4 Vw = 2; %Tensión de trabajo (V)
5 I_max = 0.5e-3; %Corriente máx (mA)
6 SNR_dB = 60; %SNR en dB de la cápsula
7
8 %% Condiciones de diseño
9 SPL = 120; %SPL máximo considerado [dB]
10 p_ref = 20e-6; %Presión de referencia
11 p_max = p_ref * 10^(SPL/20) %presión máxima considerada
12 V_out_rms = 1.228; %Tensión de salida promedio deseada a
    nivel de linea (Vrms)
13 V_out_pk = 1.736; %Tensión de salida promedio deseada a
    nivel de linea (Vpp)
14 Vcc = 5; %Tensión de funcionamiento del circuito
15
16 %% Cálculo Ganancia - R2 y C2
17 S = 10^(S_dB/20) %Sensibilidad (V/Pa)
18 V = S*p_max; %Tensión de salida del micrófono (V)
19 I_in_Pa = S/RL %Salida de la corriente por Pa (A/Pa)
20 I_in = I_in_Pa * p_max; %Salida de la corriente (A)
21 V_Sim = I_max/I_in_Pa % Transducción en la simulación de
    la cápsula
22
23 R2 = V_out_rms*sqrt(2)/I_in %Resistencia del loop de
    realimentación (ohm)
24 fcs = 20000; %Frecuencia de corte superior @ -0.1dB (Hz)
25 G0 = 1;
26 Gfs = 0.989;
27 fps = fcs/sqrt(((G0/Gfs)^2)-1); %Polo del FPB
28 C2 = (1/(2*pi*fps*R2)) %Condensador del loop de
    realimentación (F)
29
30 %% Cálculo de acondicionamiento de la cápsula
```

```

31 R1 = (Vcc-Vw)/I_max %Valor de resistencia MÍNIMO de
   ajuste de tensión de la cápsula (ohm)
32 fci = 5; %Frecuencia de corte inferior (Hz)
33 C3 = 1/(2*pi*(R1)*fci) %Condensador de desacople de la
   continua (F)

34
35 %% Cálculo de acondicionamiento de la cápsula
36 R3 = 100000 %Resistencia del divisor de tensión (ohm)
37 R5 = R3 %Resistencia del divisor de tensión (ohm)
38 i_d = Vcc/(R3+R5) %Intensidad del divisor consumida, nos
   interesa que sea baja

39
40 C6 = 2.2e-6 %Condensador para eliminar el ruido termico
   (F)
41 R3_5 = 1/((1/R3)+(1/R5)); %Paralelo de R3 y R5 (ohm)
42 fcs_n = 1/(2*pi*(R3_5)*C6) %Frecuencia de corte superior
   del filtro PASO BAJO filtra ruido de alta freq

43
44 %% Adaptación de la salida AC
45 R6 = 100000 %Valor de R6 (ohm) Se justifica porque el PA
   tiene en cuenta la impedancia de entrada del siguiente
   equipo
46 %10k, que es el valor que queremos tener en
   cuenta (al estar en paralelo el menor es "
   el que se considera")
47 R4 = 49.9 %Valor de R4 (ohm)
48 Rin_mic_bal = 10000; %Impedancia de entrada de mic
   balanceada en una mesa de mezclas (0hm)
49 R6_inmicbal = 1/((1/R6)+(1/Rin_mic_bal)); %Paralelo de
   R6 y Rin_mic_bal (ohm)
50 R6_inmicbal = 10000; %Aproximamos el resultado
51 Gfi = 0.944;
52 fci_max = 20; %Frecuencia de corte inferior máxima
   permitida (Hz)
53 fpi = fci_max*sqrt(((G0/Gfi)^2)-1);
54 C5 = (1/(2*pi*fpi*R6_inmicbal)) %Condensador de
   desacople en la salida (F)

55
56 %OpAmp
57 SR = 2*pi*fcs*V_out_pk %Slew Rate mínimo con el que
   tiene que cumplir el OpAmp (V/us)

```