



Diseño y construcción de un *array de tweeters.* Aplicación a zonas personales de sonido.

Autor: **Javi García Morant**

Tutora: **Gema Piñero Sipán**



Trabajo Fin de Máster presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Máster en Ingeniería Telecomunicación

Curso 2018-2019

Valencia, X de julio de 2019



Agradecimientos

Me gustaría agradecer todo el apoyo y ayuda a mi tutora Gema Piñero por tanto conocimiento, paciencia y comprensión demostradas durante el desarrollo de todo el trabajo, así como por darme la oportunidad de realizar las prácticas de empresa en el GTAC.

También me gustaría agradecer la enorme ayuda brindada por Vicent Molés, a quien debo gran parte de todo este trabajo y sin el cual hoy no estaría escribiendo este apartado.

A mis compañeros del GTAC: Pablo, Juan, Marian y Laura, por la ayuda a través de las charlas serias, las menos serias, y por haberme permitido formar parte de su pequeña familia.

También quisiera agradecer a Enrique Sánchez la tormenta de ideas que me lanzó como posibilidades de trabajo de fin de máster, entre las cuales se encontraba el proyecto realizado.

Por último, me gustaría dar las gracias a mis compañeros de banda, La Tribu, por proporcionarme paz y tranquilidad volviendo de los conciertos en furgoneta, pudiendo trabajar en esta memoria gracias a su profundo sueño.



Resumen

Las zonas personales de sonido, en inglés *Personal Sound Zones* (PSZ), posibilitan la escucha de distintas señales sonoras en distintas zonas de un mismo espacio acústico con el menor nivel posible de interferencias entre ellas. El fundamento en el que se basan los algoritmos de PSZ, es en crear interferencias constructivas y destructivas en determinadas zonas del espacio. Para ello, es necesario utilizar un *array* de altavoces y filtrar la señal de audio que se reproduce desde cada altavoz con un filtro que modifique su amplitud y su fase, para ser capaces de crear las mencionadas interferencias. Una de las principales limitaciones a la hora de crear PSZ es la distancia necesaria entre dos elementos consecutivos del *array*, ya que dicha distancia determina la frecuencia máxima para la cual no se produce *aliasing* espacial en la reproducción. Así, para poder producir PSZ con el rango frecuencial típico de una señal de audio es necesario utilizar un *array* donde la distancia entre altavoces sea muy pequeña. Esta limitación hace que el equipamiento disponible en el laboratorio del Grupo de Tratamiento para Audio y Comunicaciones (GTAC) no sea adecuado para crear PSZ. Motivado por dicha limitación, la principal contribución de este trabajo es la construcción de tres *arrays* de ocho altavoces *tweeters* cada uno para minimizar el efecto del *aliasing* espacial y poder así crear PSZ que abarquen mayor rango frecuencial que el equipamiento del GTAC. El correcto funcionamiento del *array* será evaluado con algoritmos de *beamforming*.

Palabras clave: Zonas personales de sonido, *tweeters*, construcción altavoces, *beamforming*, sonido espacial, *aliasing* espacial.



Abstract

Personal Sound Zones (PSZ) allow listening to different audio signals in different areas of the same acoustic space with the minimum interference level between them. The main idea behind PSZ is to create constructive and destructive interferences in certain positions of the space. In order to create those aforementioned interferences, an array of loudspeakers must be used. Moreover, for each loudspeaker the audio signal should be filtered to modify its phase and magnitude. One of the main limitations of PSZ is the required distance between consecutive array elements, as this distance is directly related with the maximum frequency for which there is no spatial aliasing during playback. Thus, to provide PSZ that cover the typical audio frequency range, an array with short distance between consecutive speakers is needed. Due to this limitation, the equipment in the laboratory of Audio and Communications Signal Processing Group (GTAC) is not suitable to create PSZ. Motivated by this limitation, the main contribution of this work is the manufacturing of two arrays of eight tweeter speakers each one aiming to minimize the spatial aliasing. The proper functioning of the arrays will be evaluated with beamforming algorithms.

Keywords: Personal sound zones, loudspeaker manufacturing, tweeters, beamforming, spatial sound, spatial aliasing.



Resum

Les Zones Personals de So, en anglés *Personal Sound Zones* (PSZ), possibiliten l'escolta de distintes senyals sonores en distintes zones d'un mateix espai acústic amb el menor nivell possible d'interferències entre elles. El fonament en el que es basen els algoritmes de PSZ és en crear interferències constructives i destructives en determinades zones de l'espai. Per això, és necessari utilitzar un *array* d'altaveus i filtrar la senyal d'àudio que es reproduïx des de cada altaveu amb un filtre que modifique l'amplitud i la fase per a ser capaços de crear les mencionades interferències. Una de les principals limitacions a l'hora de crear PSZ és la distància necessària entre dos elements consecutius de l'*array*, ja que dita distància determina la freqüència màxima per a la qual no es produeix *aliasing* espacial en la reproducció. Així, per a poder produir PSZ amb el rang freqüencial típic d'una senyal d'àudio és necessari utilitzar un *array* on la distància entre altaveus siga molt xicoteta. Aquesta limitació fa que el equipament disponible en el laboratori del Grup de Tractament per a Àudio i Comunicacions (GTAC) no siga adequat per a crear PSZ. Motivat per dita limitació, la principal contribució d'aquest treball és la construcció de dos *arrays* de huit altaveus *tweeters* cadascun per a minimitzar l'efecte de l'*aliasing* espacial i poder així crear PSZ que compreguen un major rang freqüencial que el equipament del GTAC. El correcte funcionament dels *arrays* serà avaluat amb algoritmes de *beamforming*.

Paraules clau: Zones personals de so, construcció d'altaveus, *tweeters*, *beamforming*, so espacial, *aliasing* espacial.



Índice

Capítulo 1.	Introducción.....	3
1.1	Motivación.....	3
1.2	Objetivos.....	3
1.3	Gestión del proyecto	4
1.4	Diagrama temporal, tareas y sub-tareas	4
1.5	Estructura de la memoria	5
Capítulo 2.	Zonas personales de sonido.....	6
2.1	Descripción del problema.....	6
2.2	Aplicaciones, ventajas e inconvenientes	8
2.3	<i>Beamforming</i>	9
2.3.1	Modelo de señal [12].....	9
2.3.2	Algoritmos de beamforming	10
Capítulo 3.	<i>Arrays</i> de altavoces	14
3.1	Limitaciones de la respuesta de un <i>array</i> de altavoces	14
3.2	<i>Array</i> del GTAC.....	15
3.3	<i>Arrays</i> contruidos.....	16
3.3.1	Diseño.....	16
3.3.2	Materiales y componentes.....	17
3.3.3	Construcción.....	18
3.3.4	Problemas y mejoras	24
Capítulo 4.	Resultados.....	26
4.1	Respuestas al impulso de los altavoces	26
4.2	Algoritmos de PSZ.....	28
4.2.1	Delay and sum	30
4.2.2	Pressure matching.....	32
4.2.3	Contraste acústico.....	32
Capítulo 5.	Conclusiones y trabajo futuro	34
5.1	Conclusiones	34



5.2	Trabajo futuro.....	34
Capítulo 6.	Bibliografía	36



Capítulo 1. Introducción

1.1 Motivación

Las zonas personales de sonido se basan en conseguir que usuarios situados en dos o más zonas de un mismo espacio se puedan escuchar señales sonoras distintas. Para conseguir este efecto es necesario emplear un *array* de altavoces situados en una parte de la zona, por ejemplo, en las paredes o en el techo de la sala.

En la actualidad, las PSZ se están implementando en turismos y además se está estudiando su instalación en museos, oficinas con anuncios y vestíbulos de hoteles. Por lo tanto, existe una inquietud por parte de empresas e instituciones para implementar este tipo de tecnología, lo cual repercute también en la investigación universitaria dado que esta solución no existe actualmente en el mercado.

Una de las principales limitaciones a la hora de crear PSZ es que la máxima frecuencia a la que un *array* es capaz de operar correctamente depende de la dirección para la cual se implementa el *beamformer* y de la separación entre las fuentes de sonido. A partir de dicha frecuencia se produce el fenómeno conocido como *aliasing* espacial. Este fenómeno ocurre cuando las ondas sonoras se emiten en intervalos uniformes en el espacio, creando múltiples haces o *beams* principales [1] en direcciones no deseadas, lo que hace imposible la creación de PSZ a partir de esta frecuencia de *aliasing*.

La necesidad de construir unos *arrays* de altavoces nace de la limitación existente en el *array* del laboratorio del GTAC, el cual tiene una separación entre altavoces tal que sólo permite reproducir hasta frecuencias medias cuando se generan las PSZ. Por ello, la construcción de un *array* con los altavoces más juntos posibilita la reproducción de frecuencias altas, complementando al equipo existente en el laboratorio.

1.2 Objetivos

En el presente trabajo se construirán dos *arrays* de ocho altavoces *tweeters* (empleados generalmente para la reproducción de frecuencias medias-altas) cada uno para conseguir la reproducción de dichas frecuencias en la generación en PSZ. Se emplearán algoritmos de *beamforming* para comprobar que los *arrays* funcionan correctamente, con pruebas subjetivas a personas y medidas objetivas con micrófonos para confirmar que se reproducen las frecuencias deseadas aplicando los algoritmos de *beamforming*. Las pruebas se realizan en el laboratorio de audio del GTAC, perteneciente al Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTeam) de la Universitat Politècnica de València.

Con todo ello, los objetivos de este estudio son los siguientes:

- Dar a conocer los aspectos básicos y fundamentales de las PSZ.
- Construir dos *arrays* de altavoces que permitan aumentar la máxima frecuencia de reproducción del sistema ya existente en el GTAC.



- Implementar algoritmos de *beamforming* para crear PSZ y con ellos poder validar el correcto funcionamiento del array construido.
- Discutir los resultados obtenidos y proponer estudios o mejoras futuras del proyecto.

1.3 Gestión del proyecto

Una vez establecidos los objetivos, se divide el proyecto en las siguientes etapas.

- **Búsqueda de bibliográfica:** Estudio sobre el estado del arte relacionado con las PSZ, así como información acerca de la construcción de altavoces y de algoritmos de *beamforming*.
- **Búsqueda de materiales:** Información sobre los mejores materiales y componentes para la construcción de los *arrays*.
- **Diseño y construcción de los *arrays* de altavoces:** Con la información recopilada acerca de la construcción y materiales de los *arrays*, se establece un diseño previo teniendo en cuenta el factor clave del proyecto: la máxima frecuencia de operación al generar PSZ. La construcción se realiza acorde al diseño establecido y sin modificaciones respecto al mismo.
- **Implementación y prueba de algoritmos de *beamforming*:** Se seleccionan dos algoritmos de *beamforming* para implementarlos con el *software* Matlab y realizar las simulaciones y pruebas oportunas con los altavoces ya existentes en el laboratorio para comprobar el correcto funcionamiento de los algoritmos. Una vez construidos los *arrays*, se realizan las pruebas y medidas finales con ellos. En este punto se estudiará si se alcanza el objetivo propuesto, es decir, si se pueden crear PSZ con una mayor frecuencia de reproducción con el *array* construido.
- **Resultados:** Se obtienen los resultados que evalúen que la construcción de los altavoces y los algoritmos han logrado alcanzar el objetivo establecido, así como se abren nuevas proposiciones de trabajos futuros.

1.4 Diagrama temporal, tareas y sub-tareas

En la Figura 1 se puede observar el diagrama de *Gantt* del proyecto, así como las tareas y sub-tareas en las que se ha dividido. La división temporal se ha realizado por semanas, asignando a cada mes las correspondientes cuatro semanas y dividiendo la carga de trabajo en dichas semanas, sin necesariamente estar trabajando todos los días de la semana en la misma sub-tarea.

Se ha añadido en el diagrama el trabajo que realicé, en colaboración con otros miembros del iTeam, para la implementación de una demo de PSZ para la empresa ECLER, aprendiendo en esas semanas a realizar montajes con los equipos del laboratorio, así como realizar medidas de las respuestas al impulso de la sala y depuraciones de códigos ya programados con el *software* Matlab.

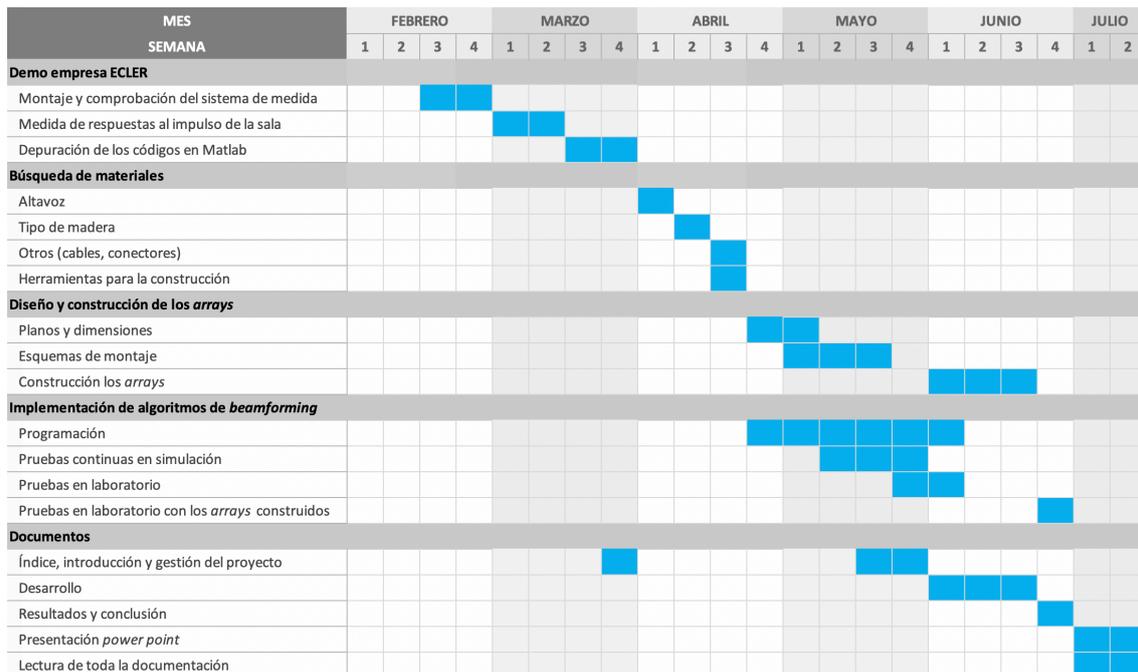


Figura 1. Diagrama de Gantt del proyecto.

1.5 Estructura de la memoria

Para lograr los objetivos mencionados, la memoria se organiza de la siguiente forma:

- El capítulo 2 presenta los conceptos teóricos sobre las PSZ, así como los aspectos físicos que hay que tener en cuenta a la hora de construir un *array* de altavoces que se utilice para generar PSZ. Además, se exponen los algoritmos de *beamforming* más importantes, así como se explican los dos algoritmos que se utilizan para la validación del *array* de altavoces.
- En el capítulo 3 se expondrá el diseño y construcción de los *arrays*, además de los problemas encontrados durante el proceso de construcción.
- El capítulo 4 expone y discute los resultados obtenidos.
- En el capítulo 5 se realizará una conclusión del proyecto, así como se propondrán trabajos futuros.

Capítulo 2. Zonas personales de sonido

2.1 Descripción del problema

El principal objetivo de las PSZ es maximizar la diferencia de presión sonora entre la zona donde se quiere reproducir un cierto sonido, llamada zona brillante, y la zona donde se quiere conseguir mínima interferencia, llamada zona oscura [2]. Una forma de conseguirlo es mediante *arrays* de altavoces y técnicas de *beamforming*, es decir, algoritmos que permiten direccionar el campo sonoro en un cierto ángulo (y de esta forma obtener una zona brillante en esta dirección).

Un *beamformer* es un procesamiento de señal que es capaz de realizar filtrados espaciales, de forma que cuando un *array* de altavoces reproduce las señales filtradas, se suman en el espacio para conseguir la señal deseada en una zona (interferencias constructivas) y no en la otra (interferencias destructivas) [3].

El concepto de PSZ puede ser descrito más extensamente considerando un escenario específico como el mostrado en la Figura 2, en el que existen dos zonas, A y B, en la que por ejemplo se podría estar escuchando una misma película en inglés en la zona A y en español en la zona B [4].

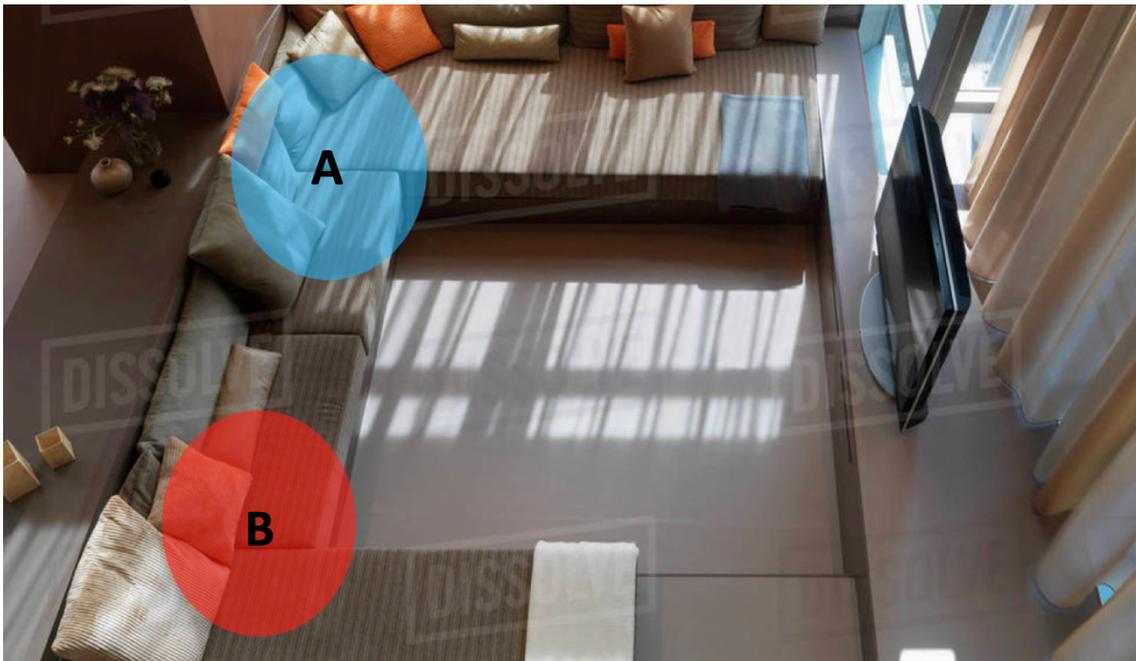


Figura 2. Escenario con dos zonas personales de sonido.

En este escenario, una posición para los altavoces podría ser en el mismo mueble de la televisión, situados en forma de *array* lineal horizontal. Las zonas de sonido se conseguirían filtrando cada una de las señales para que una vez se reproduzcan por el *array* se consigan las interferencias constructivas y destructivas necesarias [5].

La obtención de los filtros necesarios para cada altavoz se puede realizar de dos formas:

- Medir respuestas al impulso de la sala (en inglés, *Room Impulse Response*, RIR): Con estas medidas se puede definir el campo acústico deseado en las posiciones donde se ha medido la RIR.
- Medir y calcular las posiciones geoméricamente: Con las distancias entre cada altavoz y cada zona se pueden obtener las posiciones donde se definirá el campo sonoro deseado. De esta forma no se tiene en cuenta el efecto de la sala puesto que se supone campo libre.

El objetivo de los algoritmos de PSZ es obtener los filtros óptimos que permiten la reproducción de las señales de audio en las distintas zonas. El escenario de dos zonas como el de la Figura 2 es el considerado a lo largo de toda la memoria, aunque es posible escalar el problema para tres o más zonas. Para el caso de dos zonas, el objetivo será crear interferencias constructivas para la señal azul en la zona A y destructivas en la zona B, así como interferencias constructivas para la señal roja en la zona B y destructivas en la zona A. Para conseguir este efecto, primero se considera que la zona A es la brillante y B la oscura, y se calculan los filtros para cada altavoz que consigan que la señal transmitida hacia A sea idealmente inaudible en B. A continuación, la zona B es considerada la brillante y A la oscura, y los filtros se calculan para conseguir que la señal transmitida hacia B sea idealmente inaudible en A. Superponiendo ambas situaciones (sumando las dos señales filtradas en cada altavoz) se consigue el efecto de las zonas personales de sonido (Figura 3). El buen funcionamiento de las PSZ depende fundamentalmente del contraste acústico conseguido en el caso de zona brillante-zona oscura y zona oscura-zona brillante [5], de forma que al sumar ambas señales filtradas se obtendrá mínima interferencia de la señal azul en B y de la señal roja en A (véase código de colores de la Figura 3).

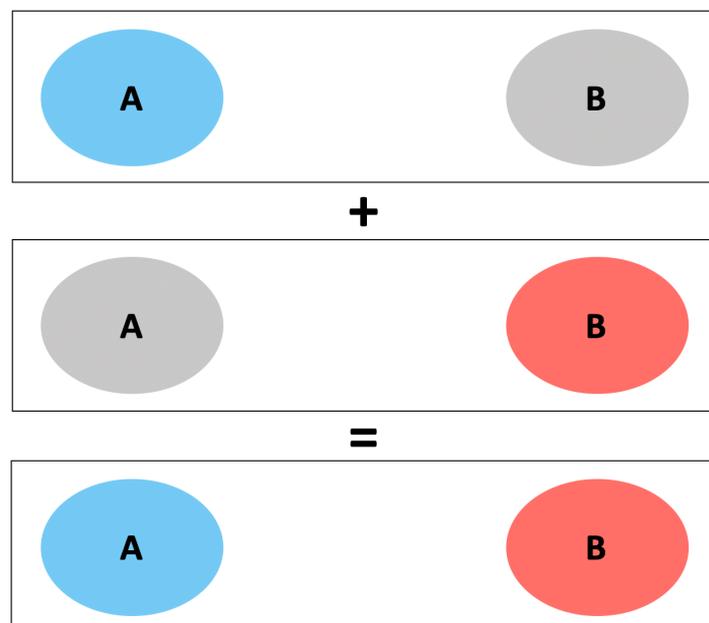


Figura 3. Resultado de la superposición de zona brillante-zona oscura y zona oscura-zona brillante.

2.2 Aplicaciones, ventajas e inconvenientes

Una de las aplicaciones más importantes de las PSZ es la que Harman® está estudiando actualmente para su aplicación en turismos, que es una solución basada en una matriz de filtros además de en una configuración óptima de mini-altavoces distribuidos (Figura 4) [6].

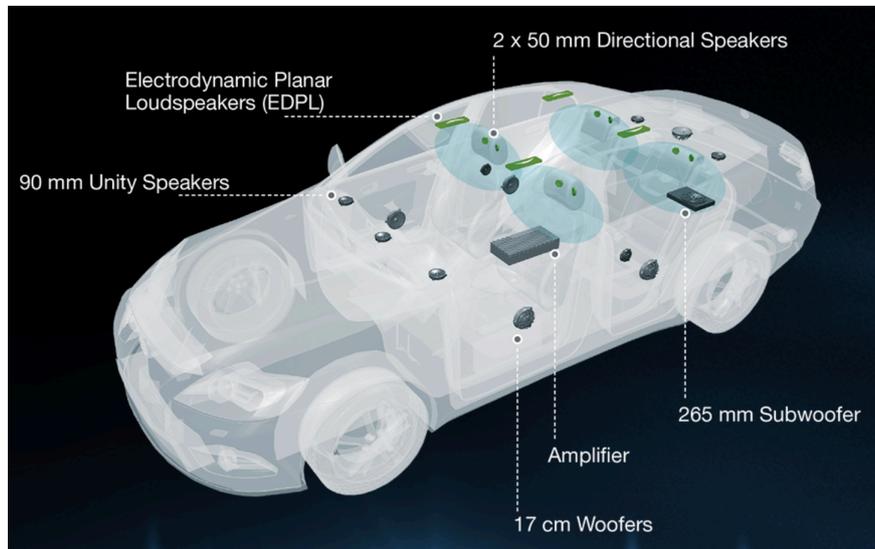


Figura 4. Diseño por módulos de Harman® para crear PSZ en turismos [6].

Además, bancos como LaCaixa o Santander quieren implementar un sistema de PSZ para evitar que los sonidos de anuncios puestos en las pantallas de las oficinas afecten a los trabajadores y sólo puedan ser escuchados delante de la pantalla por los clientes ahí situados. Este sería un problema de zona brillante-zona oscura. Otra aplicación puede ser dividir la barra del bar de, por ejemplo, un hotel, en zonas de música por géneros, de forma que en un área se pueda escuchar un tipo de música y en otra área más alejada, otro género distinto. También es posible emplear las PSZ para la reproducción de información en distintos idiomas sin necesidad de auriculares, como por ejemplo delante de esculturas o cuadros en un museo, proporcionando dos idiomas distintos en el espacio delante de la obra.

Por una parte, la principal ventaja de las PSZ es la comodidad que brinda a los usuarios el poder escuchar una señal distinta a la que se está escuchando en otra posición del mismo entorno sin que interfieran entre ellas, o en el caso de zona brillante y zona oscura, evitar la posible molestia de la señal deseada limitando su reproducción a un área específica, todo ello sin emplear ningún dispositivo auricular.

Por otra parte, el principal inconveniente es la limitación frecuencial. La máxima frecuencia a la que un *array* es capaz de crear PSZ depende de la dirección para la cual ha sido diseñado el *beamformer* y de la separación entre las fuentes de sonido. A partir de dicha frecuencia se produce el fenómeno conocido como *aliasing* espacial. Este fenómeno ocurre cuando las ondas sonoras se emiten en intervalos uniformes en el espacio, creando múltiples haces o *beams* principales [1] en direcciones no deseadas, lo que hace imposible la creación de PSZ a partir de

esta frecuencia de *aliasing*. A menor distancia entre los altavoces, mayor es la frecuencia a la que se pueden generar PSZ sin *aliasing* espacial y a mayor ángulo de dirección del *beamformer* menor es dicha frecuencia.

Además, los elementos de la sala introducen reflexiones que pueden afectar al funcionamiento de las PSZ, con lo que si se modifican dichos elementos como pueden ser muebles, biombos, sofás, etc., es posible que haya que volver a medir las RIR.

2.3 Beamforming

La conformación de haces, comúnmente conocida como *beamforming*, es una técnica de procesado de señal que utilizada en conjunto con un *array* de sensores proporciona una forma de focalizar la ganancia (ya sea de transmisión o recepción) en ciertas direcciones del espacio [7]. Las técnicas de *beamforming* han sido extensamente estudiadas en el campo de *arrays* de sensores [7] y en el campo de antenas de alta ganancia [8] [1]. En el contexto de las PSZ se han presentado varias estrategias:

- Maximización de la zona brillante, o en inglés *Brightness Control* (BC) [9].
- Maximización del contraste acústico, o en inglés *Acoustic Contrast Control* (ACC) [9].
- Maximización de la diferencia de energía, o en inglés *Energy Difference Maximization* (EDM) [10].
- Filtros inversos de mínimos cuadrados, conocida comúnmente en inglés como *Pressure Matching* (PM) [11].
- Retardo y suma, o en inglés *Delay and sum* [5].

Todas estas técnicas emplean el *beamforming* en banda ancha, que es el adecuado para el contexto de zonas personales. Las técnicas más investigadas son la maximización del contraste acústico y los filtros inversos de mínimos cuadrados [1]. En este proyecto los algoritmos empleados han sido el *delay and sum* y el *pressure matching*.

2.3.1 Modelo de señal [12]

Se supone una señal de audio $x(n)$ que se desea focalizar en una zona determinada. Para ello, la señal se envía a un número de altavoces M que se utilicen para la generación de PSZ. Antes de llegar a cada altavoz, cada señal se filtra por un filtro de respuesta al impulso finita (en inglés, *Finite Impulse Response*, FIR), cuyos coeficientes para el filtro del altavoz m -ésimo son los elementos del vector $\mathbf{w}_m(n)$ definido como:

$$\mathbf{w}_m = \begin{pmatrix} \mathbf{w}_1(n) \\ \mathbf{w}_2(n) \\ \vdots \\ \mathbf{w}_L(n) \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 1}$$

Siendo L la longitud del filtro. La señal a la salida del filtro es la señal $\mathbf{y}_m(n)$ que alimenta dicho altavoz m -ésimo y se calcula según la siguiente expresión:

$$y_m(n) = x(n) * w_m(n)$$

Ec. 2

Donde el símbolo * es la suma de convolución.

Con todo ello, el esquema genérico del procesado con *beamforming* para una señal de audio es el mostrado en la Figura 5.

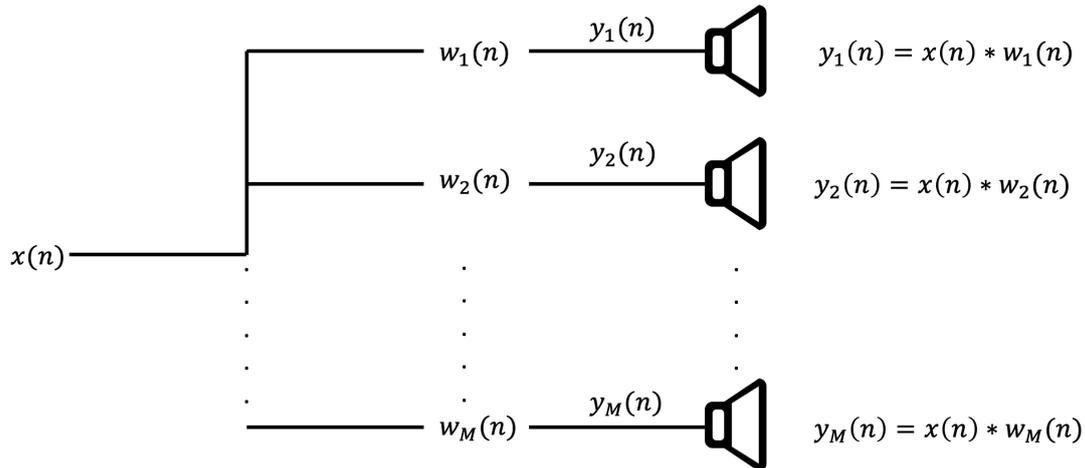


Figura 5. Bloques para el procesado de *beamforming* en el dominio temporal.

Aunque los *beamformer* se pueden diseñar en el dominio temporal usando filtros FIR/IIR (por sus siglas en inglés, *Infinite Impulse Response*) en el dominio de tiempo discreto, a lo largo de este proyecto se diseñarán en el dominio de la frecuencia.

Para cada algoritmo de *beamforming* empleado, se calcularán los filtros o vectores de pesos $w_m(n)$ para cada uno de los altavoces. Además, teniendo en cuenta la simetría al realizar la transformada de Fourier, es posible optimizar el procesado filtrando la mitad de las muestras, siendo necesaria la reconstrucción de la señal antes de realizar la transformada inversa de Fourier.

2.3.2 Algoritmos de *beamforming*

Delay and sum

Una de las formas más sencillas de realizar un *beamforming* es retardando la señal de cada altavoz con respecto a los adyacentes, de forma que se compensen las diferencias de fase entre ellos y se creen zonas de interferencia constructiva en la dirección deseada. Aplicaciones de este tipo de *beamforming* para *arrays* de sensores se han desarrollado en tecnología RADAR, localización de fuentes e imagen biomédica. Aunque se apliquen a sensores, esta técnica se puede emplear en *arrays* de altavoces por reciprocidad. En general el *delay and sum* se considera la línea base de los *beamforming* debido a su simplicidad [5]

El vector de pesos del *delay and sum* viene dado por el *steering vector*, que se define de la siguiente forma:

$$\mathbf{w}(\theta, \omega_k) = \mathbf{a}(\theta, \omega_k)^* = \begin{pmatrix} e^{-j\omega_k\tau_1(\theta)} \\ e^{-j\omega_k\tau_2(\theta)} \\ \vdots \\ e^{-j\omega_k\tau_M(\theta)} \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 3}$$

y la componente de fase $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_M$ vienen dadas por

$$\tau_m = \frac{r_{max} - r_m}{c_0}; \quad m = 1, 2, \dots, M \quad \text{Ec. 4}$$

donde $r_{max} = \max \{r_m\}$, r_m es la distancia entre el altavoz m -ésimo y el punto de referencia (comúnmente es un micrófono situado en el centro de la zona brillante) y c_0 es la velocidad de propagación del sonido.

El esquema del algoritmo es análogo al mostrado en la Figura 5 pero en el dominio frecuencial (Figura 6), siendo los pesos \mathbf{W} los definidos en la ecuación 3.

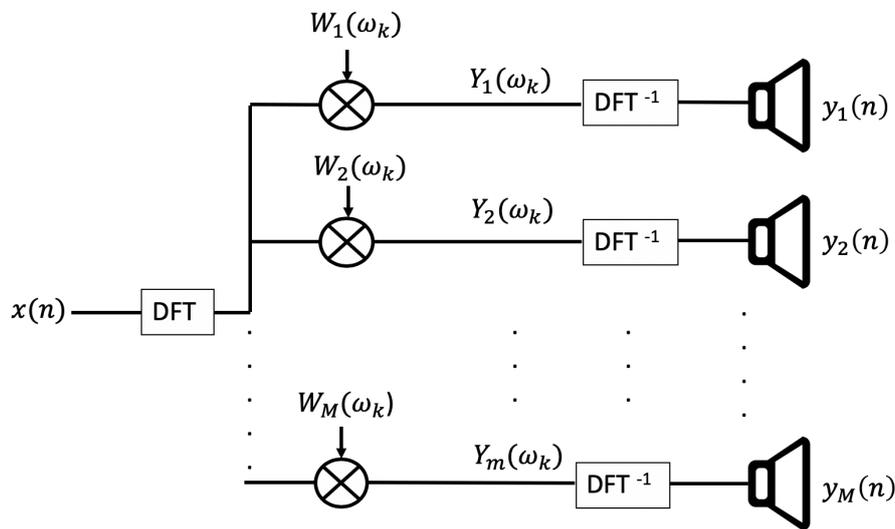


Figura 6. Esquema de bloques del procesado en frecuencia del *delay and sum*.

Pressure matching [13]

Este algoritmo se basa en la maximización de la presión acústica entre la zona brillante y la zona oscura, siendo la brillante la de mayor presión acústica y la oscura la de menor presión acústica. Los filtros implementados se crean empleando un enfoque de filtros inversos de mínimos cuadrados [11] que maximiza la diferencia de presión acústica entre dos zonas. Cada filtro se expresa como una suma de elementos de ganancia y retardos variantes en tiempo obtenida de la descomposición de la solución del problema inverso de mínimos cuadrados.

Este algoritmo se puede explicar partiendo del escenario mostrado en la Figura 7.

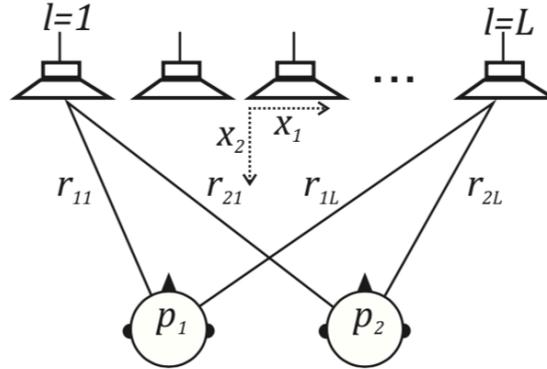


Figura 7. Escenario de zonas personales [13].

La Figura 7 representa una situación de $J = 2$ zonas personales empleando L altavoces situados a cierta distancia de los oyentes r_{jL} , donde se quiere conseguir unas presiones p_1 y p_2 . Se puede definir \mathbf{p} en forma de vector como

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 5}$$

Las funciones de transferencia entre los altavoces y las zonas se pueden expresar en forma matricial como

$$\mathbf{c} = \begin{pmatrix} \mathbf{c}_1^T \\ \mathbf{c}_2^T \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 6}$$

Si asumimos campo libre a la hora de definir las zonas (es decir, mediante geometría de la sala), se puede definir el vector columna \mathbf{c}_m de la siguiente forma:

$$\mathbf{c}_j = \left(c_{j1} e^{-j\frac{\omega}{c_0} r_{j1}}, \dots, c_{jL} e^{-j\frac{\omega}{c_0} r_{jL}} \right)^T \quad \text{Ec. 7}$$

Siendo $c_{jL} = \frac{1}{r_{jL}}$ un factor de atenuación y c_0 la velocidad de propagación del sonido.

Las funciones de transferencia se han calculado asumiendo campo libre, sin embargo, si por el contrario se miden las RIR de la sala, como funciones de transferencia se emplean las medidas realizadas.

Para enviar cada señal a la zona correspondiente se define una matriz de presiones objetivo:

$$\mathbf{p}_T = (\mathbf{p}_{T1} \quad \mathbf{p}_{T2}) = \begin{pmatrix} e^{-j\frac{\omega}{c_0} R} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{\omega}{c_0} R} \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 8}$$

Siendo R un modelado de la distancia de propagación entre la zona y el altavoz más alejado para asegurar causalidad.

La matriz de filtros \mathbf{W} puede obtenerse resolviendo la siguiente ecuación:



$$\mathbf{W} = \mathbf{C}^H (\mathbf{C}\mathbf{C}^H + \beta\mathbf{I})^{-1} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde β es un parámetro determinado de regularización que controla la energía empleada por los filtros del *array* de altavoces.

Los filtros de control para cada zona pueden obtenerse multiplicando la matriz \mathbf{W} por las presiones objetivo definidas en la ecuación 9, de forma que

$$[\mathbf{W}_1 \ \mathbf{W}_2] = \mathbf{W} \mathbf{p}_T \quad \text{Ec. 10}$$

Capítulo 3. Arrays de altavoces

3.1 Limitaciones de la respuesta de un array de altavoces

La directividad de un *array* depende de su tamaño comparado con la longitud de onda del sonido que genera. Cuanto mayor sea respecto la longitud de onda, más direccional resultará el *beam* o haz producido por el *array*.

Debido al principio de Huygens-Fresnel, la respuesta direccional de un *line array* depende de la frecuencia, con un elevado rendimiento en un rango de frecuencias estrecho. Para frecuencias mayores a ese rango la respuesta direccional decrece y aparecen lóbulos secundarios en el patrón de radiación, con lo que un *array* tiene un límite superior de frecuencias que es capaz de reproducir de forma direccional. Esto es debido a la separación física que existe entre los altavoces y se denomina *aliasing* espacial [1], y ocurre cuando las ondas de sonido que generan los altavoces se emiten en intervalos temporales uniformes y produce múltiples zonas de respuesta máxima [14]. La condición anti-*aliasing* viene dada por

$$f_{AL} = \frac{c_0}{d |1 + \sin \theta|} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde c_0 es la velocidad del sonido (344 m/s), d la distancia (en metros) entre dos altavoces consecutivos y θ la dirección a la que se genera el *beam*. Por tanto, la relación descrita permite establecer una frecuencia máxima de reproducción en función de la dirección θ [1]. Por encima de esta frecuencia el *array* tendrá más de un *beam* principal, resultando en un problema para la creación de PSZ. En la Figura 8 se muestra un ejemplo de un *array* que radia a $f = f_{AL}$. Se observa como hay dos haces principales a izquierda y derecha.

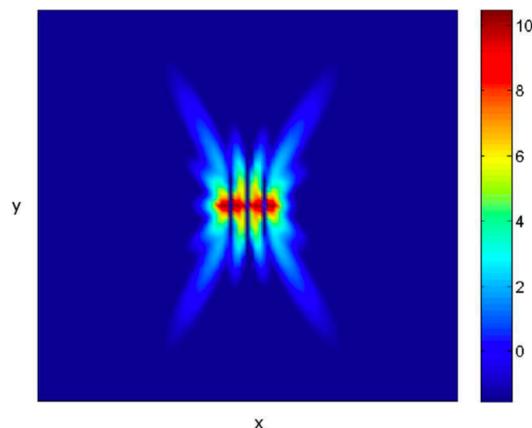


Figura 8. Mapa de presiones creado por un *array* de 4 fuentes monopolo onmidireccionales radiando a una frecuencia por encima de su frecuencia de *aliasing* [1].

Por otra parte, la frecuencia mínima a la que se puede obtener directividad en un *array* viene determinada por la apertura del mismo, y viene dada por la siguiente expresión:

$$f_{min} = \frac{c_0}{L}$$

Ec. 12

Siendo L la distancia entre los centros de los altavoces extremos del *array*.

Para minimizar el efecto del *aliasing* espacial, habitualmente se realiza un filtrado paso bajo de las señales previo a su reproducción por los altavoces. Esto es debido a que las altas frecuencias producen mayor interferencia al crear PSZ, pudiendo distinguir la señal de la zona brillante en la zona oscura (o para el caso de la Figura 3, la señal de la zona brillante A en la zona brillante B y viceversa). Dependiendo de la distancia entre los altavoces del *array*, la frecuencia de corte es mayor o menor. Como el objetivo de este trabajo es lograr minimizar el *aliasing* espacial para poder aumentar dicha frecuencia de corte, la principal tarea es reducir la distancia entre altavoces, con lo cual la frecuencia anti-*aliasing* será mayor.

3.2 Array del GTAC

El *array* empleado para generar PSZ en el laboratorio del GTAC es de veinticuatro altavoces con una separación entre elementos consecutivos de 18 centímetros. Esto permite una reproducción direccional a partir de 82 Hz aproximadamente según la ecuación 12. Para el límite superior es necesario definir la distancia entre zonas. Para ello se tiene en cuenta la geometría de la sala, mostrada en la Figura 9.

Si consideramos una separación entre zonas de 2.70 metros, podemos calcular el ángulo al que se direccionará el *beam* de la siguiente forma (teniendo en cuenta el esquema de la Figura 9):

$$\tan(\theta) = \frac{D_{centro\ array-zonas}}{D_{array-zonas}}$$

Ec. 13

Calculando el arco tangente de la expresión anterior obtenemos un ángulo de 35 grados aproximadamente. Con ello, podemos determinar la frecuencia máxima para la reproducción direccional con la ecuación 11, obteniendo un valor de 1.2 kHz.

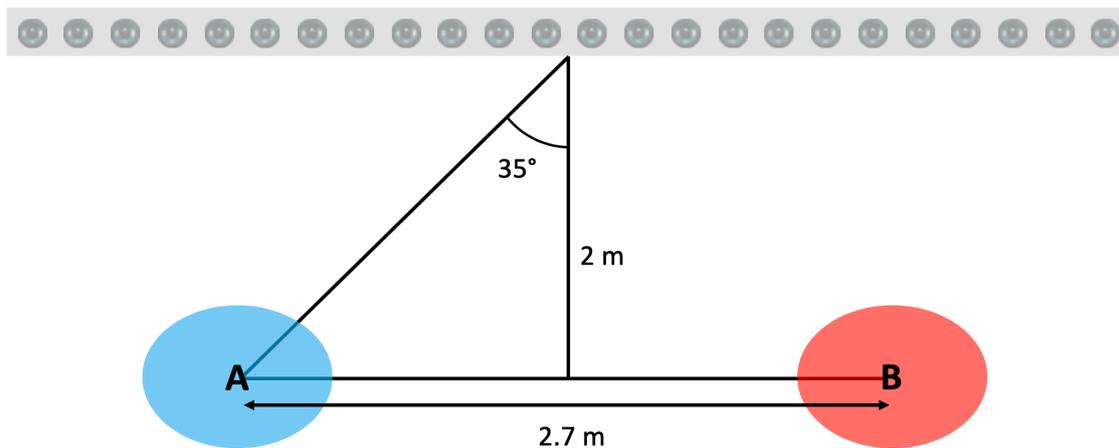


Figura 9. Esquema de la geometría de la sala.

3.3 Arrays contruidos

Puesto que los *arrays* del laboratorio cubren el rango de frecuencias graves-medias al generar PSZ, los *arrays* a construir contarán con *tweeters* para la reproducción de frecuencias medias-altas. El límite inferior viene determinado por la apertura del *array*, es decir, la distancia entre los centros de los altavoces más alejados del mismo. Empleando la ecuación 12 se puede determinar dicha apertura de la siguiente forma:

$$L = \frac{c_0}{f_{min}} \quad \text{Ec. 14}$$

Tomando como frecuencia mínima la máxima del *array* del laboratorio, se obtiene que la distancia mínima entre los altavoces más alejados debe ser de 32 centímetros aproximadamente.

Por otra parte, para la distancia mínima entre altavoces se fija la frecuencia máxima para la generación de zonas en 4.5 kHz, ya que dentro de ese rango se abarca gran parte del contenido agudo de los instrumentos musicales que se pueden encontrar en una grabación (en un piano convencional de 88 teclas, la nota Do más aguda tiene una frecuencia de 4.18 kHz aproximadamente). Empleando la ecuación 11 se puede determinar la distancia mínima entre altavoces de la siguiente forma:

$$d = \frac{c_0}{f_{AL} |1 + \sin(\theta)|} \quad \text{Ec. 15}$$

Con ello se obtiene una distancia entre altavoces de unos 4.8 centímetros.

A la luz de estos resultados, se determina que se construirán dos *arrays* de 8 altavoces para una mayor directividad, con una distancia de 31.5 centímetros entre los elementos más alejados y de 4.5 centímetros entre elementos consecutivos. Al ser dos *arrays*, la distancia entre los altavoces más alejados es de 63 centímetros, lo cual proporciona una frecuencia mínima de 546 Hz. A su vez, para una separación de 4.5 centímetros entre altavoces consecutivos se obtiene una frecuencia máxima de reproducción direccional de 4.9 kHz, con lo cual se cumplen con holgura los objetivos establecidos.

3.3.1 Diseño

Debido a que el rango de frecuencias en el que trabajan los altavoces es propio de *tweeters* (frecuencias medias-altas), la caja que los contendrá no necesita unas dimensiones calculadas a partir de los parámetros de *Thiele-Small* [15] como sí requieren los *woofer* y *sub-woofer* (que son altavoces empleados para la reproducción de frecuencias graves). De tal forma, las dimensiones de los *arrays* se han establecido siguiendo los cálculos realizados en el apartado anterior, quedando como dimensiones las que se pueden ver en la Figura 10, expresadas en centímetros.

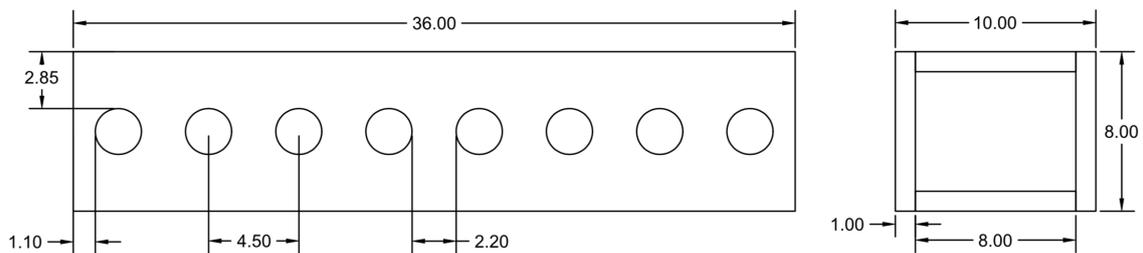


Figura 10. Dimensiones de los *arrays* de altavoces. Vista frontal y perfil.

Cada *array* consta de 8 *tweeters* soldados al cable de pares correspondiente. En el interior hay separadores de madera creando zonas que independizan un altavoz de los altavoces contiguos. En la parte posterior de cada *array* se acoplan dos conectores *speakon* hembra de 8 conductores a los cuales se conectarán los cables de pares de cada altavoz. Dichos cables se concentran en cada una de las dos zonas donde están los *speakon* hembra acoplado, de tal forma que pasan a través de las separaciones de madera mediante un agujero taladrado y sellado para minimizar posibles reflexiones y pérdidas de presión generadas por los agujeros. Además, en la parte trasera de cada zona se inserta aislante acústico para evitar reflexiones en el fondo de la caja. A cada *speakon* de 8 conductores solo es posible conectar 4 altavoces (cada altavoz emplea un par de cables), con lo cual el esquema de montaje queda como se representa en la Figura 11.

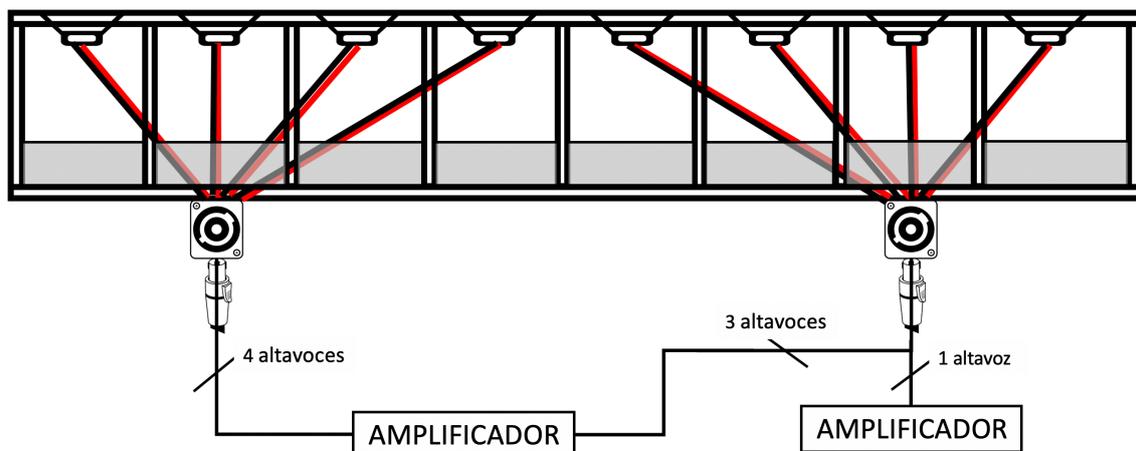


Figura 11. Vista superior del *array* y esquema de conexiones con los amplificadores.

Como los amplificadores empleados son de siete canales, cada *array* emplea todos los canales de un amplificador además de un canal de otro amplificador.

3.3.2 Materiales y componentes

Los materiales y componentes empleados en la construcción de cada *array* son los siguientes:

- **Medium-Density Fretboard:** Conocida como madera MDF, es un material duro compuesto por fibras de otras maderas pegadas entre sí mediante diversos productos a alta presión y temperatura. Tiene como ventaja la capacidad de ser cortada y perforada



sin estropear la superficie al estar formada por pequeñas fibras. Además, se puede pegar fácilmente diversos tablonces entre sí con cola blanca.

- **Altavoz:** Siendo el principal objetivo conseguir aumentar la máxima frecuencia de reproducción al crear zonas personales de sonido, los altavoces deben ser capaces de trabajar en un rango de frecuencias medio a medio alto (1 kHz – 5 kHz, en esta aplicación) y tener unas dimensiones óptimas para que la distancia entre ellos sea la establecida en el apartador anterior. Con todo ello, se ha seleccionado el altavoz *Visaton K23* de 23 mm. de diámetro, impedancia de 8Ω y un rango en frecuencia de 420 a 20.000 Hz.
- **Cable de pares:** Se emplea para conectar los altavoces a los conectores acoplados a cada *array*. El cable seleccionado es de 0.25 mm^2 de sección, adecuado para las instalaciones en equipos de audio de poca tirada de cable y terminales de soldadura pequeños.
- **Conectores *speakon* hembra (8 terminales):** Se acoplan a cada *array* para conectar los cables de pares de los altavoces.
- **Conectores *speakon* macho (8 terminales):** Se conectan a los conectores *speakon* hembra.
- **Cable de 8 conductores:** Interconectan los *arrays* con los amplificadores.
- **Aislante acústico:** Situado en la parte posterior del interior de cada *array*, evita las reflexiones con el fondo de las cajas.

Para el montaje final se emplean los cables de ocho conductores con los *speakon* correspondientes que hay en el laboratorio del GTAC, así como los amplificadores e interfaces de audio del mismo.

3.3.3 Construcción

En primer lugar, se dibujan los contornos de las cajas y posiciones de los altavoces con las medidas determinadas teniendo en cuenta que el grosor de la máquina empleada para cortar la madera es de tres milímetros (Figura 12).

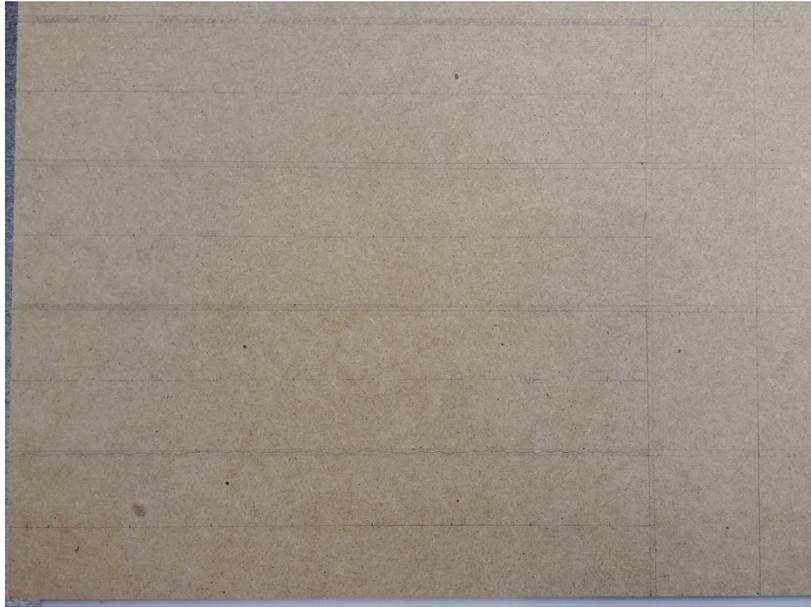


Figura 12. Contorno de algunas piezas de los altavoces trazado sobre la madera.

En segundo lugar, se cortan las maderas y se realizan los agujeros para los altavoces (Figura 13) y los *speakon* en las posiciones previamente determinadas, así como los taladros necesarios en los separadores para pasar el cable de pares de una cavidad a otra a través de ellos. Además, se recortan los absorbentes acústicos que se sitúan en el fondo de cada cavidad (Figura 14).



Figura 13. Agujeros para los altavoces.



Figura 14. Absorbentes acústicos.

En tercer lugar, se encajan los fastones con los cables de cables de pares en ellos y (Figura 15).

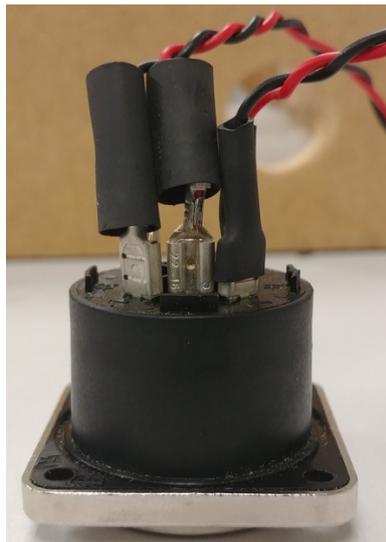


Figura 15. Cables de pares acoplados a los conectores *speakon* hembra.

En cuarto lugar, se pegan la tapa frontal y la tapa inferior de la caja (Figura 16).



Figura 16. Tapa frontal e inferior pegadas y fijadas con gatos.

En quinto lugar, se pegan los separadores (Figura 17), y una vez seco, la tapa trasera para finalmente obtener la estructura de la caja a falta de la tapa superior (Figura 18).

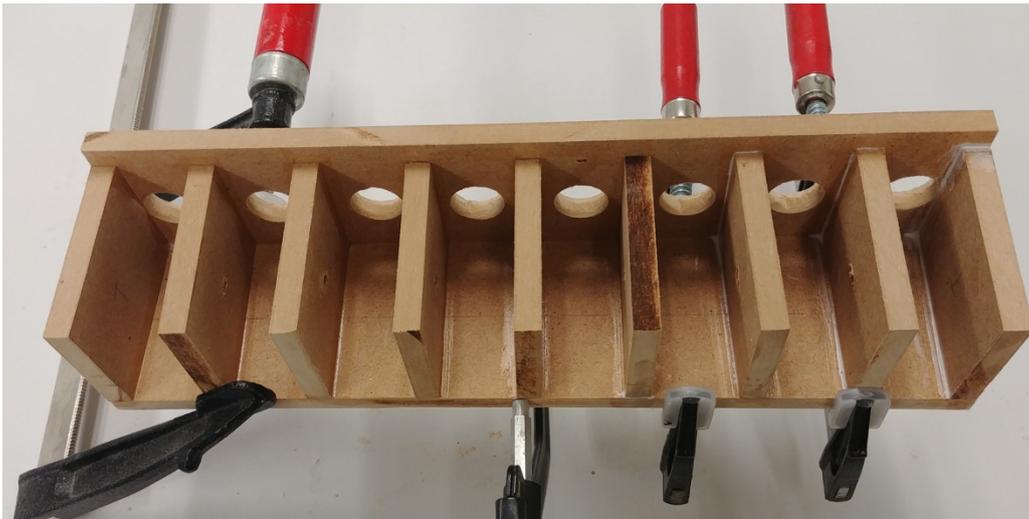


Figura 17. Separadores pegados y fijados con gatos.



Figura 18. Estructura de la caja a falta de la tapa superior.

En quinto lugar, se introducen los conectores *speakon* en la tapa trasera (Figura 19) y se sueldan los cables de pares a los altavoces por la parte delantera (Figura 20).



Figura 19. Estructura con los conectores *speakon* fijados y los cables de pares estañados para ser soldados.

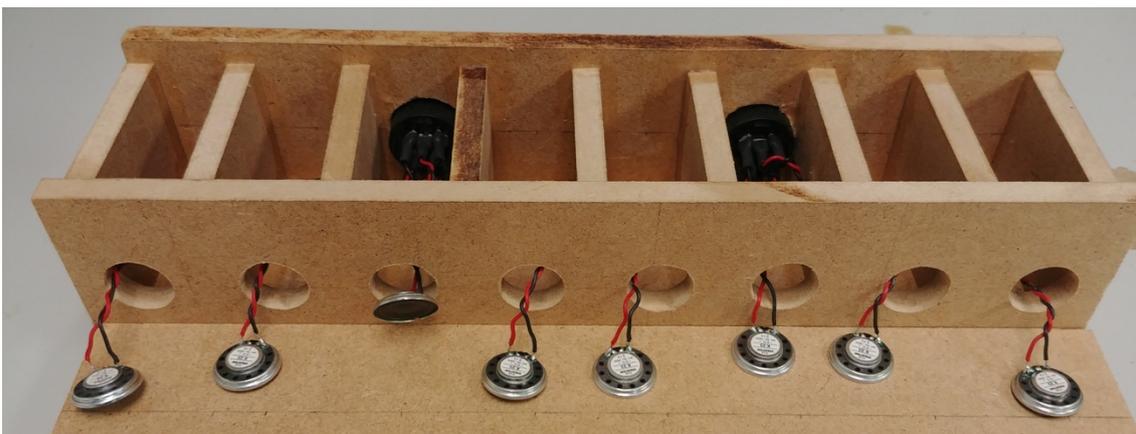


Figura 20. Altavoces soldados por la parte delantera.

En sexto lugar, se pegan los altavoces a la tapa frontal con pegamento instantáneo, asegurando que están correctamente sellados (Figura 21).



Figura 21. Altavoces pegados y sellados.

Finalmente, se introducen los absorbentes acústicos en la parte trasera de cada cavidad (Figura 22) y se acopla la tapa superior (Figura 23).



Figura 22. Caja terminada a falta de acoplar la tapa superior.

En este punto, se testea cada caja con los amplificadores de la sala de audio y se comprueba que todos los altavoces emiten sonido.



Figura 23. Array terminado con la tapa superior acoplada.

En la Figura 24 se puede observar el esquema de montaje seguido para la utilización de los *arrays* para generar PSZ.

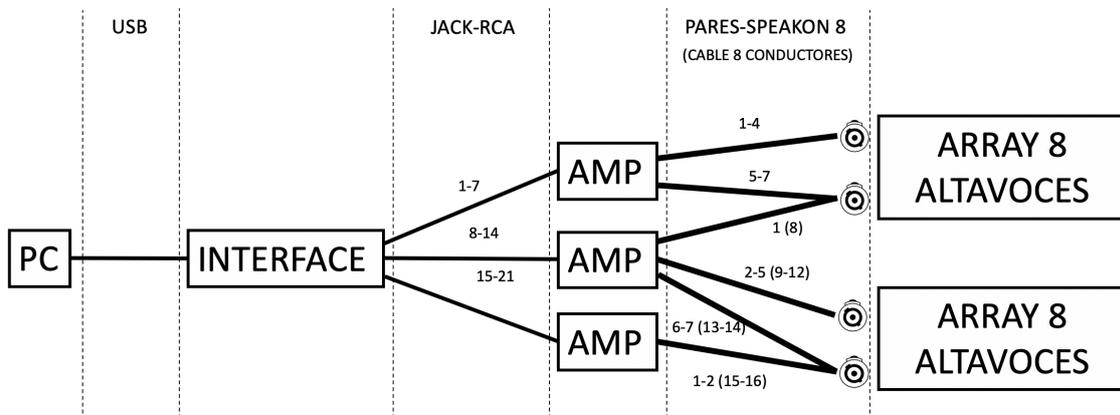


Figura 24. Esquema del montaje completo.

Se emplea un cable de instrumento para la conexión entre la interfaz y los amplificadores, con dos conductores (vivo y masa) y conectores Jack-RCA respectivamente, mientras que para la conexión amplificador-*array* se utiliza uno de ocho conductores, para poder tener cuatro canales del tipo vivo + masa. Además, el ordenador se conecta a la interfaz mediante un cable USB.

3.3.4 Problemas y mejoras

El principal problema a la hora de la construcción de las cajas ha sido el tamaño y delicadez de los altavoces, así como el error en utilizar inicialmente un cable de pares de 1.5 mm^2 de sección. Los terminales del altavoz (Figura 25) se encuentran en una placa sujeta al mismo mediante pegamento, el cual aplicando el suficiente calor a la hora de soldarlo y debido a la rigidez de los

cables inicialmente empleados, se deshacía provocando que la placa se despegara del altavoz y no transmitiera diferencia de voltaje.



Figura 25. Parte frontal y trasera del altavoz Visaton K23. Se puede observar la placa en la parte inferior de la vista trasera.

Además, teniendo en cuenta que el grosor de la madera es de un centímetro, el cable hay que soldarlo verticalmente al terminal para que pudiese entrar en la caja sin que la madera lo obstaculizara, lo cual supone una complicación más al tener que realizar una soldadura perpendicular, como se ve en la Figura 26.

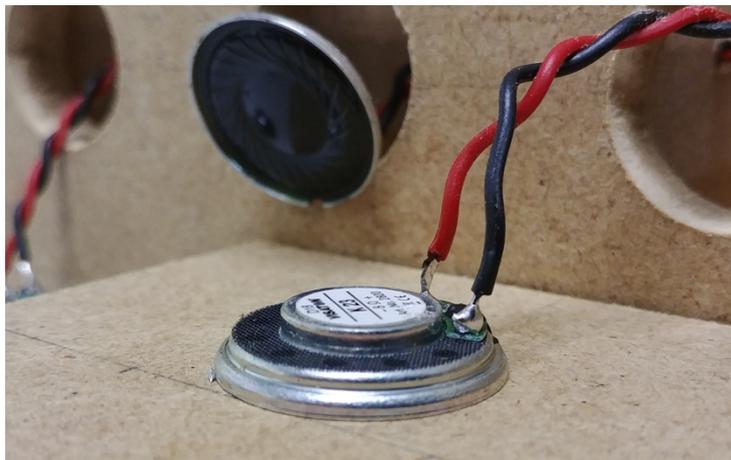


Figura 26. Detalle de la soldadura vertical.

Además, el acople y sellado de los altavoces es especialmente complicado ya que es necesario sellarlos por la parte delantera para minimizar las posibles pérdidas por los bordes y si se manipula en exceso la membrana o si cae pegamento en ella, el altavoz dejaría de funcionar como se debería.

En cuanto al tamaño de la madera empleada, tener unos separadores de un centímetro de grosor ha sido muy justo en relación a la distancia entre altavoces establecida y las dimensiones de los conectores *speakon* hembra. Una mejor aproximación futura sería reducir el grosor a medio centímetro y comparar el funcionamiento con las cajas ya construidas.

Capítulo 4. Resultados

4.1 Respuestas al impulso de los altavoces

Para comprobar el correcto funcionamiento de los altavoces, se mide su respuesta al impulso. Puesto que el laboratorio no es una cámara anecoica, las medidas realizadas son del tipo RIR. Para realizar las medidas se emplea un micrófono de medida de la empresa *Earthworks* situado a una distancia de unos 2 metros apuntando al centro del *array* como se ve en la Figura 27. El esquema de bloques es el mostrado en la Figura 28.

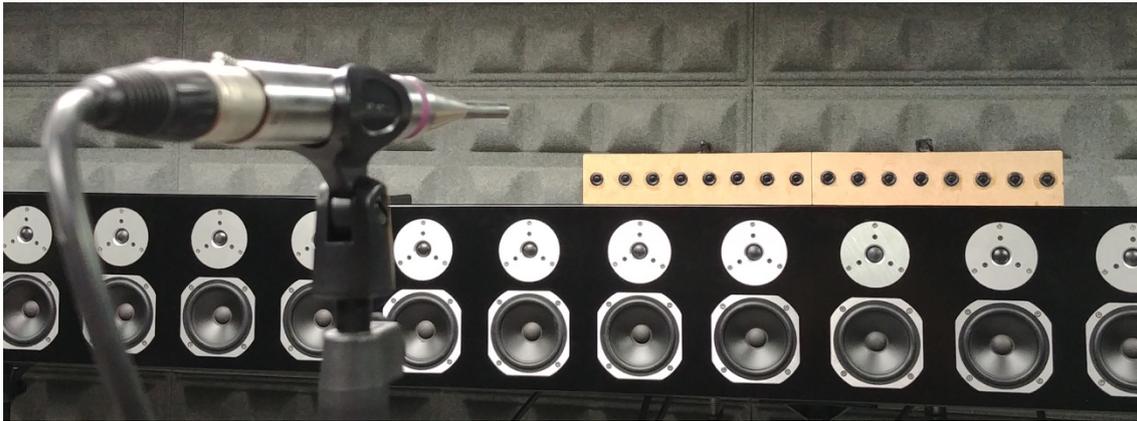


Figura 27. Micrófono *Earthworks* midiendo los *arrays* construidos.

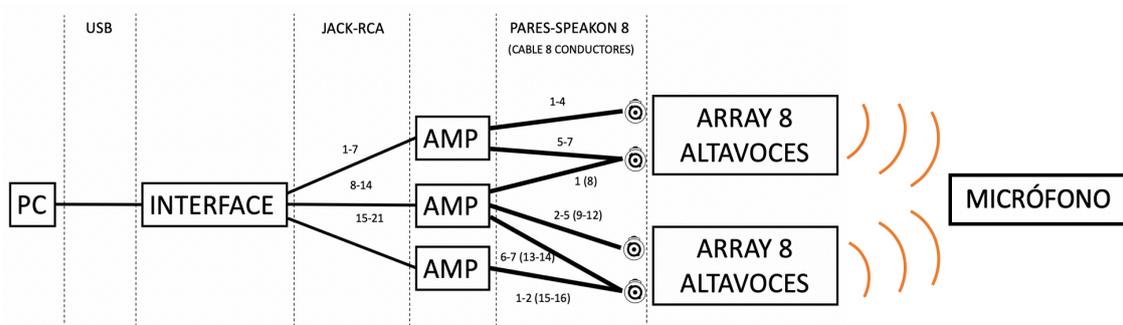


Figura 28. Esquema de bloques de las medidas de la respuesta de los altavoces.

En la Figura 29 se representa la RIR medida para el altavoz número 8 del primer *array*, siendo todas ellas similares.

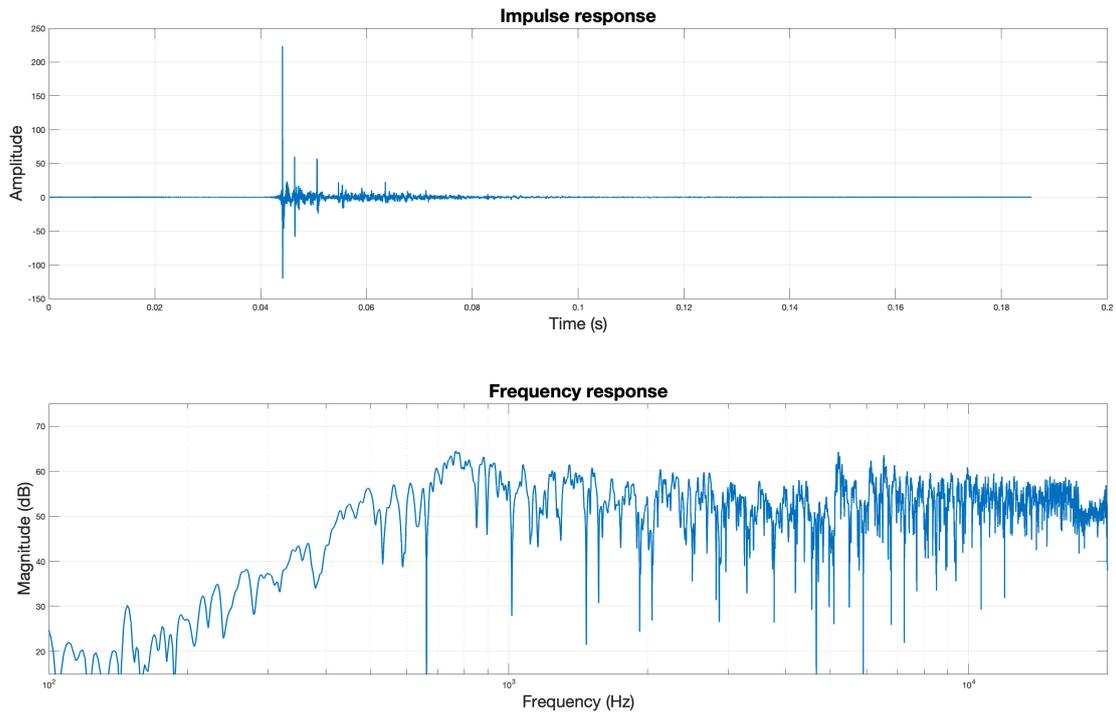


Figura 29. Respuesta al impulso y respuesta en frecuencia de un altavoz del *array*.

Como lo que se quiere comprobar es la respuesta del altavoz minimizando el efecto de la sala, se recorta la RIR para eliminar todas las reflexiones posibles, obteniendo así un espectro más limpio, mostrado en la Figura 30.

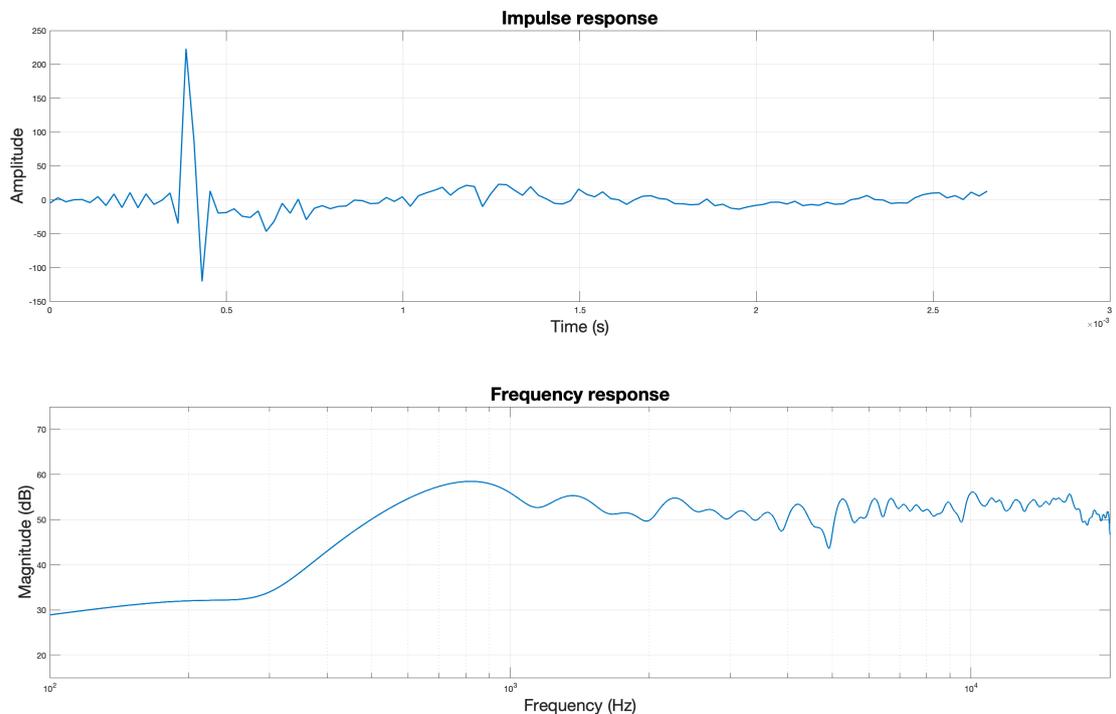


Figura 30. Respuesta al impulso recortada y respuesta en frecuencia de un altavoz del *array*.

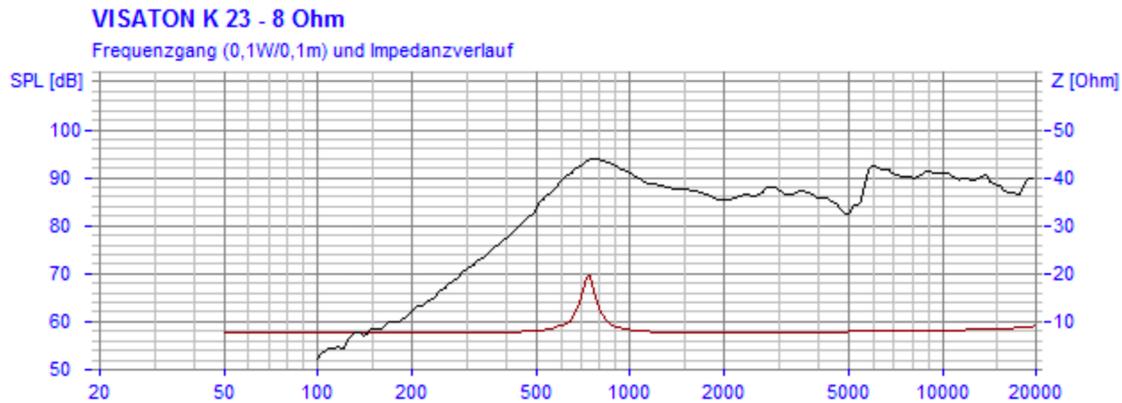


Figura 31. Respuesta en frecuencia del altavoz proporcionada por el fabricante.

Si comparamos con la respuesta que proporciona el fabricante en la Figura 31, se observa que, teniendo en cuenta las condiciones de medida, se aproxima bastante a las medidas realizadas, (véase el aumento de ganancia alrededor de 700 – 800 Hz y la caída alrededor de los 5 kHz).

4.2 Algoritmos de PSZ

Para la medida de los algoritmos se ha empleado el siguiente esquema:

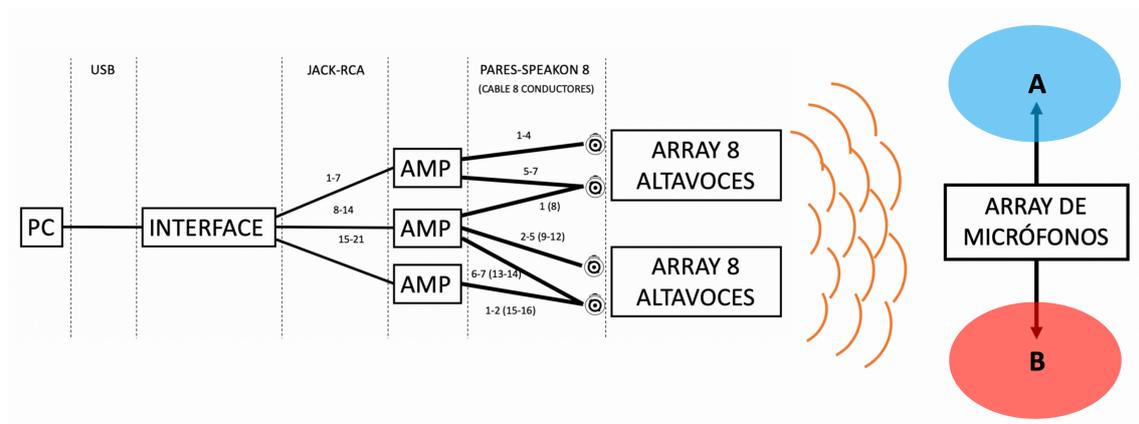


Figura 32. Esquema de bloques empleado para validar el correcto funcionamiento de los algoritmos.

Se utilizan los dos *arrays* construidos (Figura 33) y un *array* cuadrado de micrófonos (Figura 34) para captar el campo sonoro que se escucha en cada una de las zonas, midiendo cada algoritmo tanto en la zona brillante como en la zona oscura desplazando el *array* a la zona que se desea medir.

Por una parte, empleando una señal de ruido blanco, se compararán tanto la zona brillante como la zona oscura para los dos algoritmos implementados, donde se podrá observar la diferencia de niveles, así como se medirá la señal de ruido blanco sin aplicar ningún tipo de filtrado.

Por otra parte, se representará el contraste acústico de ambos algoritmos (es decir, la diferencia de nivel entre zona brillante y zona oscura) así como de la señal de ruido sin filtrar.



Figura 33. Arrays de altavoces contruidos.

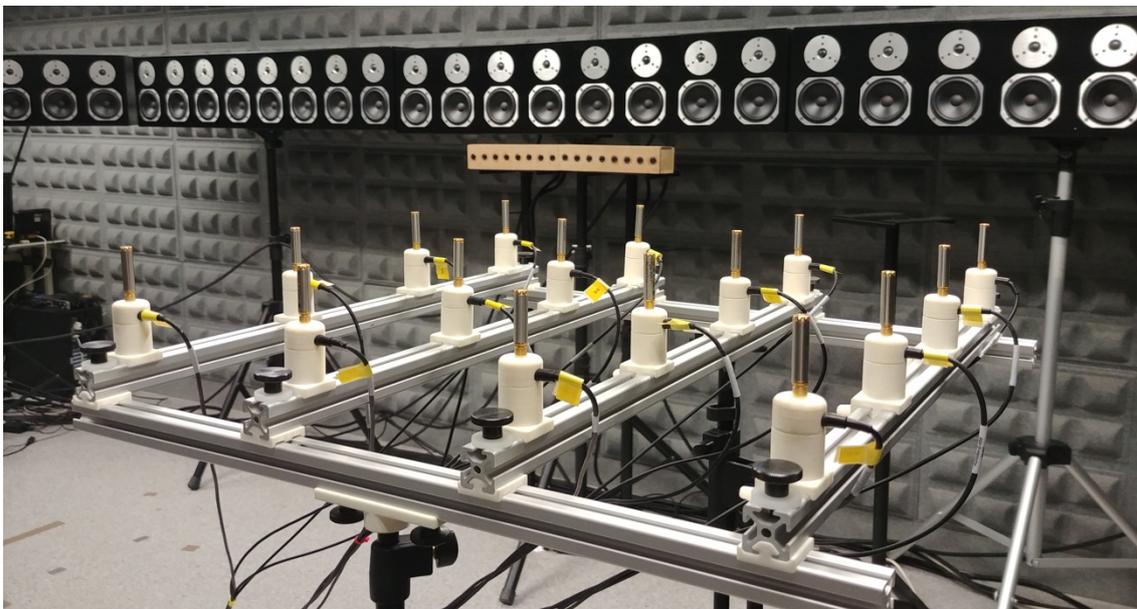


Figura 34. Array de micrófonos situado en una de las zonas.

4.2.1 Delay and sum

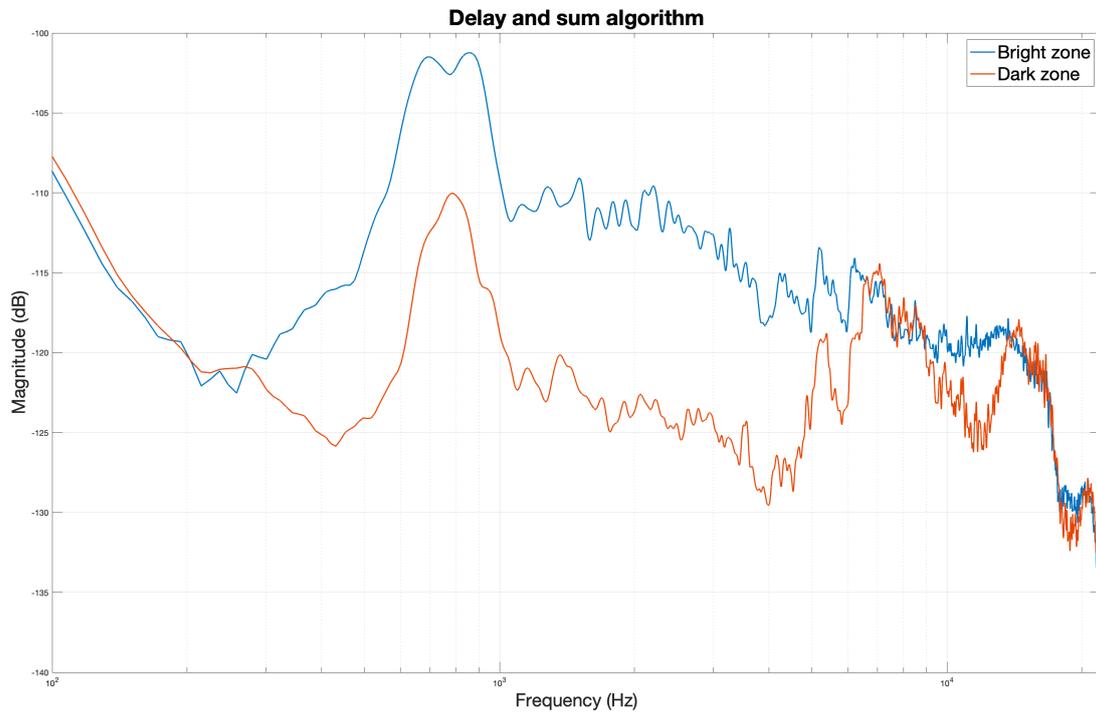


Figura 35. Densidad espectral de potencia del algoritmo *delay and sum*.

En la Figura 35 se observa la densidad espectral de potencia (DEP) calculada mediante el método de *Welch* [16] en cada una de las zonas, representando la magnitud en decibelios. Por una parte, se puede comprobar como a partir de 5 kHz el *aliasing* espacial empieza a afectar a la diferencia de nivel, reduciéndolo hasta que no existe diferencia. Por otra parte, por debajo de 500 Hz la diferencia también se reduce conforme disminuye la frecuencia. Teniendo en cuenta que la banda para la que se han diseñado los altavoces es entre 546 Hz y 4.9 kHz, los resultados obtenidos son coherentes.

Para evidenciar el resultado anterior, se mide ruido blanco sin filtrar en ambas zonas, obteniéndose la DEP representada en la Figura 36.

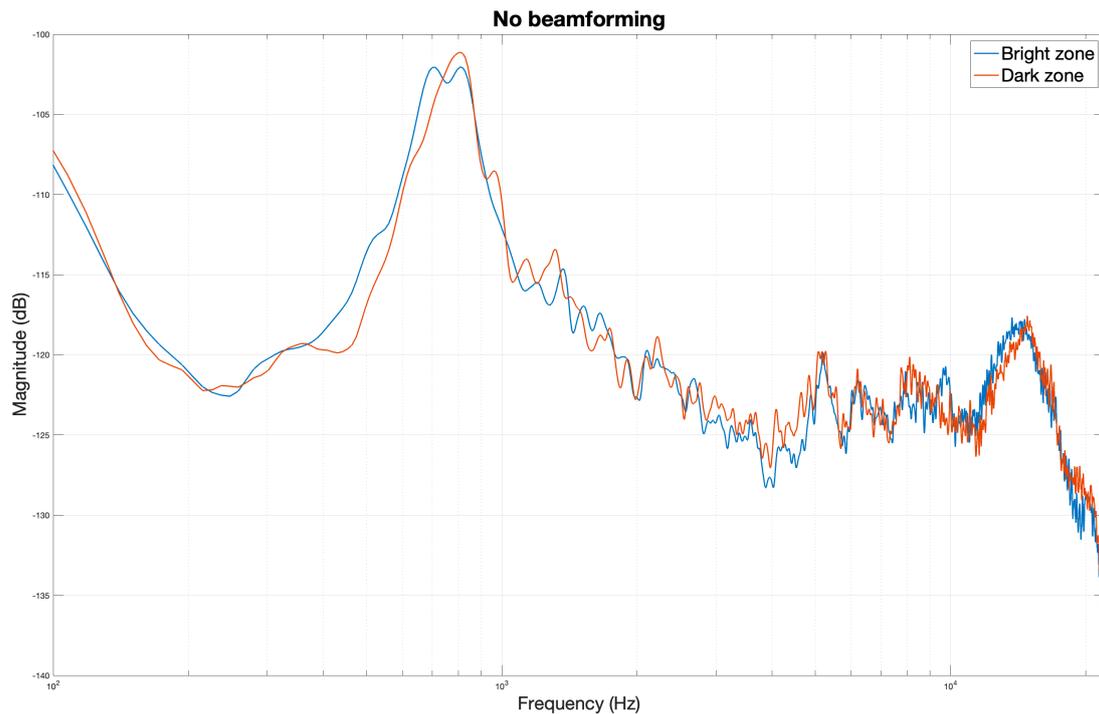


Figura 36. Densidad espectral de potencia del ruido blanco medido en la zona brillante y la zona oscura.

Se observa que hay contenido espectral en toda la banda de audio, sin haber diferencias importantes entre el nivel de la zona brillante y el de la zona oscura.

Tanto al aplicar los filtros como sin aplicarlos, existe un aumento de ganancia alrededor de los 700 – 800 Hz que se podrían atribuir a la respuesta del altavoz (Figura 31) así como a algún modo de vibración de la sala.

4.2.2 Pressure matching

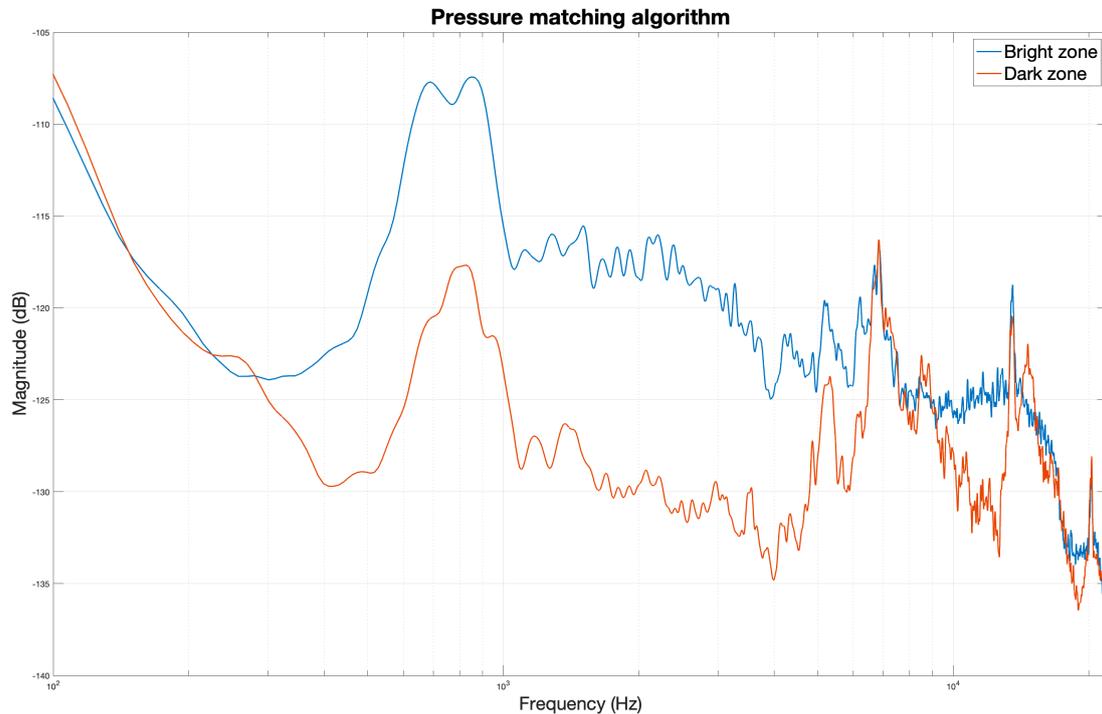


Figura 37. Densidad espectral de potencia del algoritmo *pressure matching*.

Al igual que en el algoritmo anterior, en el *pressure matching* se obtiene una mayor diferencia de nivel en la banda de 500 Hz a 5 kHz, como se puede ver en la Figura 37, reduciéndose hacia frecuencias más bajas y más altas. Con ello se comprueba que el algoritmo funciona correctamente.

4.2.3 Contraste acústico

Como resultado final, se representa el contraste acústico entre las zonas para ambos algoritmos, así como para el ruido blanco medido sin aplicar los filtros, obteniendo la DEP de la Figura 38.

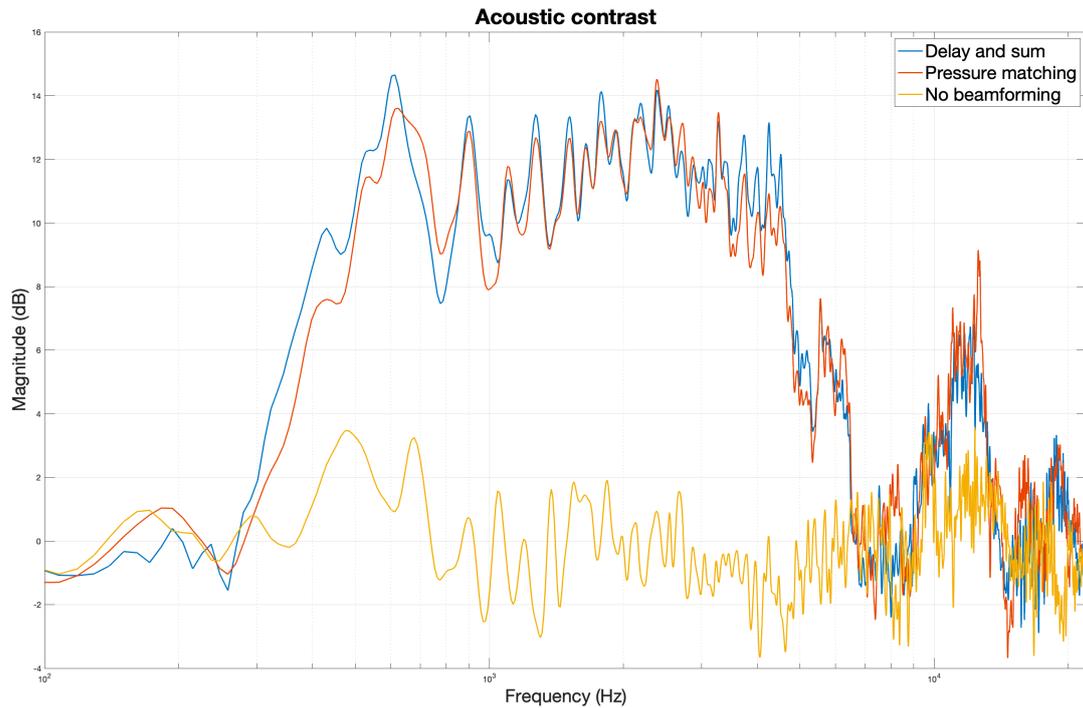


Figura 38. Contraste acústico entre zona brillante y zona oscura para los dos algoritmos y el ruido blanco sin filtrar.

Se puede observar que en ambos algoritmos se obtiene un contraste acústico de una media de 12 dB en la banda en la que trabajan los altavoces (500 – 5000 Hz aproximadamente). Además, el contraste acústico entre zonas cuando no se aplica el filtrado espacial está entorno a cero, que es lo esperado dadas las posiciones simétricas de las zonas.

Capítulo 5. Conclusiones y trabajo futuro

5.1 Conclusiones

En esta memoria se han construido dos *arrays* de ocho altavoces *tweeters* y se ha verificado su correcto funcionamiento para la generación de zonas personales de sonido empleando dos algoritmos de *beamforming* para tal fin. Para ello ha sido necesario emplear el equipo existente en el Grupo de Tratamiento de Audio del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia.

Con ello, se han obtenido unas medidas con las cuales se demuestra que es posible generar PSZ con *arrays* fabricados desde cero, empleando un filtrado espacial mediante algoritmos de *beamforming*, que han permitido observar como fuera de la banda de trabajo de los *arrays* el *aliasing* espacial afecta a la direccionalidad de los mismos. También se ha podido comprobar la limitación de los *arrays* del laboratorio del GTAC, la cual ha supuesto la principal motivación para la realización de este proyecto.

Aunque los resultados han sido expuestos y discutidos en el apartado anterior, la mejor forma de comprobar el correcto funcionamiento de las PSZ es colocándose en cada una de las zonas y, de forma subjetiva, decidir cuán bien funcionan los algoritmos. En este aspecto y después de algunas pruebas subjetivas, se ha determinado que el algoritmo *pressure matching* tiene un mejor rendimiento para una posición muy determinada, si bien es verdad que en términos generales ambos algoritmos funcionan correctamente.

Con todo ello y a la luz de los resultados obtenidos, se puede afirmar que los *arrays* construidos y los algoritmos implementados cumplen con los objetivos establecidos para generar zonas personales de sonido en un cierto rango de frecuencias.

5.2 Trabajo futuro

El presente proyecto podría ser ampliado en el futuro siguiendo varios caminos, como pueden ser:

- Construcción de un tercer *array*, con el cual se lograría una mayor directividad en conjunto con los dos ya fabricados.
- Emplear los *arrays* construidos en consonancia con los *woofers* de los altavoces del laboratorio del GTAC, consiguiendo así obtener una frecuencia mínima de reproducción direccional de 82 Hz y una máxima de 5 kHz aproximadamente.
- Mejorar el diseño de las cajas para poder juntar más los altavoces y poder así aumentar la frecuencia de reproducción direccional (que a su vez podría implicar la búsqueda de altavoces más pequeños).
- Implementar algoritmos de PSZ basados en otras técnicas (por ejemplo, empleando las RIR medidas en una sala) para obtener un mayor contraste acústico entre zonas.



- Transportar las pruebas de laboratorio a un entorno real (por ejemplo, las propias oficinas del iTeam). Esto sería posible gracias al reducido tamaño de los *arrays* construidos, aunque sería necesario emplear tarjetas y amplificadores dedicados.



Capítulo 6. Bibliografía

- [1] M. F. S. Gálvez, *Design of an Array-Based Aid for the Hearing Impaired*, Southampton: University of Southampton, PhD Thesis, 2014.
- [2] J. Chang, C. Lee, J. Park y Y. Kim, «A realization of sound focused personal audio system using acoustic contrast control,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 125, nº 4, p. 2091–2097, 2009.
- [3] P. D. Welch, «The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms,» *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, vol. 15, nº 2, June 1967.
- [4] T. Betlehem, W. Zhang, M. A. Poletti y T. D. Abhayapala, «Personal Sound Zones: Delivering interface-free audio to multiple listeners,» *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 32, nº 2, pp. 81-91, March 2015.
- [5] P. Coleman, *Loudspeaker Array Processing for Personal Sound Zone Reproduction*, Surrey: University of Surrey, PhD Thesis, pp. 3-4, 2014.
- [6] Harman®, «Individual Sound Zones,» Harman®, [En línea]. Available: <https://www.individualsoundzones.com/#technology>. [Último acceso: Junio 2019].
- [7] B. D. V. Veen y K. M. Buckley, «Beamforming: A versatile approach to spatial filtering,» *IEEE ASSP MAGAZINE*, p. 1, 1988.
- [8] H. Cox, R. M. Zeskind y T. Kooij, «Practical supergain,» *IEEE Trans. Acoustic Speech. Signal processing*, nº 34, pp. 393-398, 1986.
- [9] J. W. Choi y Y. H. Kim, «Generation of an acoustically bright zone with an illuminated region using multiple sources,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 111, nº 111, pp. 1695-1700, 2002.
- [10] M. Shin, S. Q. Lee, F. M. Fazi, P. A. Nelson, D. Kim, S. Wang, K. H. Park y J. Seo, «Maximization of acoustic energy difference between two spaces,» *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 128, nº 1, pp. 121-131, 2010.



- [11] O. Kirkeby, P. A. Nelson, H. Hamada y F. O. Bustamante, «Fast deconvolution of multichannel systems using regularization,» *IEEE Transactions on Audio Speech and Language Processing*, vol. 6, nº 2, 1998.
- [12] W. Liu y S. Weiss, *Wideband Beamforming: Concepts and Techniques*, Wiley, 2010.
- [13] M. F. S. Gálvez y F. M. Fazi, « Listener Adaptive Filtering Strategies for Personal Audio Reproduction over Loudspeaker Arrays,» de *Sound field control conference (Audio Engineering Society)*, Guildford, 2016 July 18-20.
- [14] F. Fahy y J. Walker, *Advanced Applications in Acoustics, Noise and Vibration*, London: Spon Press, 2004.
- [15] C. J. Struck, «Determination of the Thiele-Small Parameters Using Two-Channel FFT Analysis,» de *AES Convention*, Londo, 11th March, 1987.
- [16] P. K. Rahi y R. Mehra, «Analysis of Power Spectrum Estimation Using Welch Method for Various Window Techniques,» de *ICRTIET-2014 Conference Proceeding*, Chandigarh, UT, India, 2014.