

Proyecto Fin de Grado

Grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación

Diseño y optimización de un sistema de sonido para
el auditorio de la Escuela Técnica Superior de
Ingeniería de la Universidad de Sevilla

Autor: Álvaro Chamizo Banda

Tutor: Iván Durán Díaz

Dpto. Teoría de la Señal y Comunicaciones
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022



Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación

Diseño y optimización de un sistema de sonido para el auditorio de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla

Autor:

Álvaro Chamizo Banda

Tutor:

Iván Durán Díaz

Profesor titular

Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Proyecto Fin de Grado: Diseño y optimización de un sistema de sonido para el auditorio de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla

Autor: Álvaro Chamizo Banda

Tutor: Iván Durán Díaz

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

A mi familia por creer en mí
A mis amigos por acompañarme
A la música por existir

Agradecimientos

Este Trabajo Final de Grado que aquí presento supone el final de una etapa universitaria de la que nada me arrepiento, pues de cada paso he aprendido. Esta etapa me ha hecho madurar en lo académico, pero sobre todo en lo personal. Desde aquí agradezco a todos mis amigos que han podido disfrutar conmigo de este proceso pero sobre todo acompañarme en los duros momentos; sin ellos no habría sido posible. A mis padres, por esforzarse incansablemente en ofrecerme siempre las mejores oportunidades, además de ser un punto de apoyo crucial en mi día a día. A mi hermano, a mi novia y al resto de mi familia, por su cercanía y demostrarme que creen en mí.

Agradecer también a Meyer Sound España (RMS Proaudio), especialmente a su Director Técnico, Álvaro Elena, por sus consejos y estrecha colaboración con este Trabajo; así como a su Director Comercial, Salvador Escobar, por su constante cercanía, predisposición y amabilidad conmigo. Además, agradecerle a mi tutor, Iván Durán, por haber aceptado mi propuesta y guiarme en este proyecto.

Álvaro Chamizo Banda

Sevilla, 2022

Resumen

Este proyecto tiene como núcleo central el auditorio de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla. En esta memoria, se han descrito los procedimientos necesarios para diseñar un sistema de sonido acorde a las necesidades de dicho recinto y que sustituya al actualmente existente. Se trata de una propuesta de mejora que le ofrezca al auditorio la oportunidad de convertirse en un espacio artísticamente polivalente gracias a los medios técnicos que se proponen en este documento. Esto permitiría la explotación del espacio más allá del uso actual del mismo, pudiendo albergar eventos de todo tipo; donde no solo predomine el uso de la palabra, sino también, eventos con música en directo.

Para alcanzar la consecución de los objetivos marcados, se procede en primer lugar con el diseño del sistema de sonido y para ello, será necesario el uso de una herramienta de simulación en tres dimensiones que permita comprobar a tiempo real los resultados obtenidos tras la toma de cada decisión. El diseño está compuesto por un sistema principal, que cuenta con dos line arrays y un arreglo volado de subgraves, permitiendo el control del rango completo de frecuencias audible. Además, se han implementado una serie de fuentes puntuales de sonido que se complementan con el sistema principal para poder ofrecer una cobertura homogénea en todo el recinto y sobre todo el rango de frecuencias. Estos elementos de refuerzo están pensados para atender aquellas zonas de la audiencia donde no abarque la cobertura del sistema principal.

Asimismo, esta memoria cuenta con un importante segundo bloque dedicado a la optimización del sistema de audio diseñado anteriormente. Gracias a dicha optimización, es posible alcanzar una correcta interacción entre los equipos instalados, persiguiendo el objetivo de obtener interferencias constructivas en aquellas zonas de la audiencia donde se sufren cancelaciones acústicas como consecuencia del retraso temporal entre fuentes de sonido. Con el fin de mejorar la experiencia auditiva del usuario, se propone en último lugar, la instalación de un arreglo de fuentes puntuales de audio que se integren con el conjunto del diseño mencionado anteriormente. Tanto el software de simulación, como el procesador utilizado y los diferentes altavoces con los que cuenta el diseño, pertenecen al fabricante de audio Meyer Sound Laboratories®.

Para finalizar, se presentan las conclusiones obtenidas tras el desarrollo de este proyecto, además de introducir posibles líneas de trabajo que puedan tener lugar en un futuro.

Abstract

The central core of this project is the auditorium of the School of Engineering at the University of Seville. In this document, we have described the necessary procedures to design a sound system according to the needs of the auditorium, with the purpose to replace the existing sound system. It is an improvement proposal, that offers the auditorium the opportunity to become a multipurpose artistic space, thanks to the technical equipment mentioned in this document. This would allow the space for wider use, beyond its current use of it; being able to host events of all types, where not only predominates speech events but also live music events could occur.

To achieve the goals set, we proceed first with the design of the sound system, so it will be necessary to use a three dimensions simulation software, that allows us to check in real time the results obtained after taking each decision. The design is composed of a main system, which has two line arrays and two flown subwoofers arrays, allowing the control of the full range of audible frequencies. Moreover, a series of sound point sources have been implemented to complement the main system, in order to provide homogeneous sound coverage throughout the audience area and over the entire frequency range. These reinforcement elements are designed to provide sound to those audience areas where the coverage of the main system does not reach.

In addition, this report also includes an important chapter dedicated to the optimization of the previously designed audio system. Due to the system optimization, it is possible to achieve a correct interaction between the installed equipment. This will facilitate the objective of obtaining constructive interferences in those audience areas where acoustic cancellations are suffered, as a consequence of the time delay between sources. In order to improve the user listening experience, it is ultimately proposed the installation of a point source array to be integrated with the above-mentioned sound system. The simulation software, the processor and the different loudspeakers used in the design, belong to the audio manufacturer Meyer Sound Laboratories®.

Finally, the conclusions obtained after the development of this project are presented, as well as some possible lines of work that may take place in the future.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Figuras	xvi
Notación	xviii
1 Motivación y objetivos	1
1.1 Estructura del trabajo	2
2 Estado del arte	1
2.1 Introducción al diseño de sistemas	1
2.2 Herramientas de simulación	2
2.3 Fuentes de sonido	4
2.3.1 Control de las medias y altas frecuencias.	4
2.3.2 Control de las bajas frecuencias	6
3 Descripción del auditorio	9
4 Diseño del sistema de audio	13
4.1 Software de simulación	13
4.1.1 Introducción a MAPP 3D	13
4.2 Modelado 3D del auditorio	16
4.3 Control de medias y altas frecuencias	18
4.4 Control de bajas frecuencias	21
4.4.1 Configuración de subgraves 750-LFC en cardioide volados en L y R	21
4.4.2 Configuración de subgraves 900-LFC en cardioide volados en línea	25
4.5 Refuerzo con Front fill	28
4.6 Refuerzo en palco	30
5 Optimización del sistema de audio	33
5.1 Herramientas de medición y ajuste	33
5.2 Selección del Delay Integration	34
5.3 Alineamiento del sistema principal: Line arrays LINA™ y subgraves 900-LFC	34
5.4 Alineamiento del sistema principal con el Front fill	38
5.5 Alineamiento del sistema principal con el refuerzo en palco	40
6 Incorporación de un cluster central	43
6.1 Diseño del cluster	43
6.2 Ajuste temporal del cluster central	45
6.3 Predicción completa del sistema de audio diseñado	47
6.4 Parámetros finales del procesador Galileo GALAXY 816	48

7	Conclusiones y líneas futuras	49
7.1	<i>Líneas futuras de trabajo</i>	50
8	Referencias	51
Anexo A.	Predicciones para cada banda de octava	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Estructura básica de un sistema de sonido [1].	1
Figura 2.2 Programa Ease Focus, perteneciente al grupo EASE™ [5].	3
Figura 2.3 Programa MAPP XT de Meyer Sound® [7].	3
Figura 2.4 Direccionabilidad de dos fuentes separadas entre ellas [9].	5
Figura 2.5 Line array Bose volado [11].	5
Figura 2.6 (a) Arreglo en cardioide stackado [14]. (b) Arreglo en cardioide End Fire [14].	6
Figura 3.1 Plano general del auditorio.	9
Figura 3.2 Detalle de los palcos del auditorio.	10
Figura 3.3 Frontal del escenario.	11
Figura 4.1 Ventana principal de MAPP 3D.	14
Figura 4.2 (a) Pestaña <i>Processor Settings</i> . (b) Pestaña <i>Measurement View</i> de MAPP 3D.	15
Figura 4.3 Procesador de señal Galileo GALAXY 816 de Meyer Sound® [16].	15
Figura 4.4 Planta del auditorio.	16
Figura 4.5 Modelo 3D del auditorio en MAPP 3D.	17
Figura 4.6 Line array compuesto por el MG-MINA/LINA/750-LFC Multipurpose Grid sobre 6 recintos acústicos LINA™ de Meyer Sound® [19].	18
Figura 4.7 Vista superior de MAPP 3D con los dos line arrays LINA™ de Meyer Sound® dispuestos en L y R.	19
Figura 4.8 Vista lateral de MAPP 3D con los dos line arrays LINA™ de Meyer Sound®.	20
Figura 4.9 Predicción de la octava de 4kHz del line array en MAPP 3D.	20
Figura 4.10 750-LFC de Meyer Sound® [22].	22
Figura 4.11 Disposición del line array LINA™ y el arreglo en cardioide volado de 750-LFC en MAPP 3D.	23
Figura 4.12 Predicción a 63Hz en MAPP 3D del arreglo cardioide con 750-LFC volados en L y R.	24
Figura 4.13 900-LFC de Meyer Sound® [23].	25
Figura 4.14 (a) Arreglo en línea con 900-LFC. (b) Disposición de LINA™ y los 900-LFC en MAPP 3D.	26
Figura 4.15 Predicción a 63Hz del arreglo de cardioide en línea con 900-LFC en MAPP 3D.	27
Figura 4.16 UP Junior-XP de Meyer Sound® [24].	28
Figura 4.17 Predicción a 4kHz en MAPP 3D del arreglo de Front fill con UP Junior-XP (50°x80°).	29
Figura 4.18 Predicción a 4kHz en MAPP 3D del line array LINA™ y el Front fill con UP Junior-XP.	30
Figura 4.19 UP-4XP de Meyer Sound® [25].	31
Figura 4.20 Predicción a 4kHz en MAPP 3D de los refuerzos con UP-4XP de los palcos.	31

Figura 4.21 Predicción a 4kHz en MAPP 3D de los line arrays, Front fill y refuerzos en los palcos.	32
Figura 5.1 Respuesta en frecuencia de LINA™, 900-LFC y comparativa del ajuste de ambos.	35
Figura 5.2 Respuesta de fase de LINA™, 900-LFC y sistema ajustado.	36
Figura 5.3 Filtro Low Pass (Linkwitz-Riley 24dB/oct) a 80Hz del Galileo GALAXY.	37
Figura 5.4 Respuesta al impulso generada por el line array y el Front fill.	39
Figura 5.5 Comparativa de la respuesta en frecuencia del line array LINA™ con el Front fill.	39
Figura 5.6 Ecualización aplicada para el refuerzo en el palco.	41
Figura 5.7 Respuesta en frecuencia de LINA™, UP-4XP y comparativa del ajuste en el palco.	41
Figura 6.1 (a) Cluster compuesto por dos ULTRA-X40™ [29]. (b) Situación del cluster central en MAPP 3D.	43
Figura 6.2 Predicción a 4kHz en MAPP 3D del cluster central compuesto por dos ULTRA-X40™.	44
Figura 6.3 Respuesta en frecuencia de LINA™, cluster ULTRA-X40™ y comparativa del ajuste.	46
Figura 6.4 Predicción a 4kHz en MAPP 3D del sistema completo de sonido.	47
Figura 6.5 Parámetros finales del procesador Galileo GALAXY 816 en MAPP 3D para el sistema diseñado.	48
Figura A.0.1 Predicción de la octava de 31,5Hz en MAPP 3D.	53
Figura A.2 Predicción de la octava de 63Hz en MAPP 3D.	54
Figura A.3 Predicción de la octava de 125Hz en MAPP 3D.	54
Figura A.4 Predicción de la octava de 250Hz en MAPP 3D.	55
Figura A.5 Predicción de la octava de 500Hz en MAPP 3D.	55
Figura A.6 Predicción de la octava de 1kHz en MAPP 3D.	56
Figura A.7 Predicción de la octava de 2kHz en MAPP 3D.	56
Figura A.8 Predicción de la octava de 4kHz en MAPP 3D.	57
Figura A.9 Predicción de la octava de 8kHz en MAPP 3D.	57
Figura A.10 Predicción de la octava de 16kHz en MAPP 3D.	58
Figura A.11 Modelo con el sistema de sonido completo en MAPP 3D.	58

Notación

SPL	Sound Pressure Level (Nivel de presión Sonora).
THD	Total Harmonic Distorsion (Distorsión armónica total).
L y R	Disposición de recintos acústicos ubicados a ambos lados del escenario.
LPF	Low Pass Filter (Filtro paso de bajas frecuencias).
HPF	High Pass Filter (Filtro paso de altas frecuencias).

1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

El oído es uno de los cinco sentidos con los que el ser humano cuenta, este hecho hace que tome especial relevancia en el desarrollo de nuestra vida. Gracias al sentido del oído se pueden llevar a cabo acciones cotidianas, tales como mantener una conversación, percibir la ubicación de un objeto en el espacio, estar en alerta ante un peligro, disfrutar del sonido de la naturaleza o simplemente, escuchar música. En definitiva, gracias al oído se pueden percibir sonidos que pueden causar distintas sensaciones en el ser humano.

El sonido es una herramienta fundamental de comunicación, por ello, juega un papel relevante en el correcto desarrollo de un determinado número de eventos sociales. A lo largo de la historia se han ido creando espacios donde asisten una gran multitud de personas para poder disfrutar de un concierto musical, una conferencia, un espectáculo teatral o un discurso, entre otros. Todos estos eventos cuentan con un punto en común: la percepción del sonido. Pueden darse situaciones en las que la correcta percepción del sonido pueda verse limitada, este hecho conduce a la necesidad de aplicar un refuerzo sonoro.

Este trabajo se centra en el auditorio de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla, ubicada en la Isla de la Cartuja, al noroeste de la ciudad de Sevilla. Su propósito es analizar las necesidades del auditorio, los elementos con los que cuenta y el uso que se le dá actualmente. Dicho análisis, permitirá diseñar una propuesta de mejora en términos de amplificación electroacústica, con el fin de habilitar el recinto como un lugar polivalente y apto para llevar a cabo todo tipo de eventos: desde conferencias, hasta actuaciones con música en directo. Se pretende que el espacio cuente con los medios técnicos, en términos de audio, suficientes para ser explotado económicamente, pudiendo albergar todo tipo de producciones artísticas y eventos científicos o sociales.

El objetivo principal de este proyecto es poder diseñar un sistema de refuerzo sonoro del auditorio, que cumpla con las condiciones anteriormente mencionadas y que permita tener una cobertura lo más homogénea posible en toda la zona de la audiencia y, además, en todo el espectro audible de frecuencias.

Para cumplir con el propósito planteado, será necesario llevar a cabo un proceso donde se planteen numerosas cuestiones de carácter técnico. Dichas cuestiones, deben ser analizadas con una actitud crítica, ofreciendo soluciones a las mismas que permitan un uso eficiente de los recursos, pero que atiendan con total garantía los objetivos marcados.

El trabajo será desarrollado en un software de simulación electroacústica, que permitirá realizar predicciones a tiempo real sobre cada una de las decisiones que se vayan tomando. De esta manera, se invita a cuestionar si las soluciones que se van adoptando son las correctas, de forma que esta memoria pueda arrojar información provechosa a tener en cuenta dentro del proceso de diseño de un sistema de audio, ya que las posibilidades de diseño para cada recinto son ilimitadas.

1.1 Estructura del trabajo

En esta memoria, se ha introducido, en primer lugar, el auditorio sobre el que se centra el trabajo; mencionando su estructura, la distribución de la audiencia sobre el espacio, las limitaciones que presenta el mismo, así como el acondicionamiento con el que cuenta a día de hoy. Seguidamente, se procede a llevar a cabo el diseño del sistema de sonido, mencionando todas las decisiones que se han ido tomando durante el proceso. Dicho proceso, comienza con la selección del software de predicción para poder realizar sobre el mismo un modelado en tres dimensiones del recinto. A continuación, se evalúan las necesidades que debe cubrir el sistema principal de sonido y se procede a decidir cómo será caracterizado para el control de las medias y altas frecuencias, así como para el control de las bajas frecuencias. Debido a la naturaleza del recinto, el sistema principal de sonido requiere de unos elementos de refuerzo; estos son necesarios para las primeras filas de la audiencia (Front fill) y para los palcos más cercanos al escenario.

Tras haber realizado la parte del diseño en su totalidad, se ha procedido a describir el proceso de optimización del sistema. Este, engloba todo el procesado necesario para facilitar la correcta interacción entre los elementos que componen el sistema de audio, permitiendo tener un uso de los recursos más eficiente y pudiendo conseguir que los resultados se adapten de una mejor manera a los objetivos marcados para la zona de la audiencia.

Por último, se presenta una propuesta para ser adherida al diseño realizado, siendo un elemento de mejora para la experiencia del usuario del auditorio. Finalmente, se procede a evaluar los resultados generales obtenidos, introduciendo además, posibles líneas futuras de trabajo.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción al diseño de sistemas

El diseño técnico de un sistema de refuerzo sonoro viene principalmente determinado por los requisitos funcionales que el sistema deba acometer, así como las características que el espacio pueda ofrecer. Un posible esquema general de un sistema de refuerzo sonoro, constaría de tres grandes grupos básicos: entrada de audio, procesamiento y salida de audio. Adicionalmente, se podría incluir un elemento que sirva como sistema de control para la interconexión con el usuario [1].

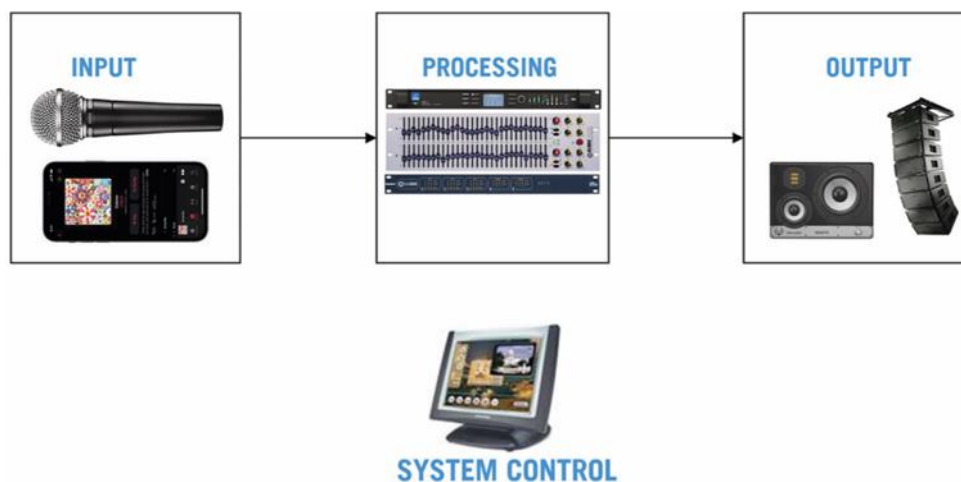


Figura 2.1 Estructura básica de un sistema de sonido [1].

Todo diseño de cualquier sistema de audio debe partir de unas premisas, es decir, unas condiciones iniciales que establezcan los requisitos a cumplir. Estas pueden ser de carácter técnico, pero también de carácter económico. Pese a ello, los sistemas de sonido no solo deben ser diseñados para satisfacer unas condiciones de carácter técnico como la cobertura, el nivel de presión sonora deseado, la utilidad del recinto o la direccionabilidad del sistema, sino además, deben estar diseñados para ofrecer al espectador la mejor experiencia auditiva posible. No hay mejor sistema para la medición de la experiencia auditiva, que el ser el humano [2].

El ingeniero acústico Leo Beranek, es considerado como una de las grandes referencias para el diseño de sistemas de sonido. En 1962 publicó *Music Acoustics & Architecture*, y dio lugar a una serie de criterios de evaluación para las salas de conciertos. Su trabajo se centró en medir el rendimiento de numerosas salas de conciertos y auditorios, entrevistando a la vez a críticos del audio y directores de orquesta, para obtener su punto de vista sobre ciertos parámetros. La conclusión fue, que no existen dos salas iguales o que era difícil encontrar un criterio unificado que identificase a un recinto como mejor que otro. Pese a ello, se consideraron dieciocho categorías de percepción subjetiva que permitían correlacionar los datos subjetivos con los datos objetivos obtenidos en base a mediciones del volumen de la sala, tiempo de reverberación, materiales usados, etc.

Algunos de los atributos más significativos de evaluación serían: la viveza (experimentada como plenitud de tonos en el rango de medios y agudos), calidez (plenitud de tono en frecuencias bajas), definición (sonido claro y distintivo), libertad de eco y de ruido (se desea la menor cantidad de estos) o el rango dinámico (rango entre el nivel máximo limitado por unos niveles confortables y el menor ruido ambiente), entre otros.

Este proceso permitió evaluar la experiencia del oyente, facilitando que la acústica arquitectónica y el diseño de sistemas de audio pudiesen guardar una relación más estrecha, con el objetivo de mejorar la experiencia del oyente.

2.2 Herramientas de simulación

Para el diseño de los sistemas de audio existen una serie de herramientas que buscan proporcionar información avanzada sobre el comportamiento de los altavoces en un espacio. Este modelado se fundamenta en los parámetros de rendimiento de los altavoces, la transmisión acústica en el aire y las propiedades reflectantes de los materiales del edificio. Las características se introducen en un motor matemático que simula la interacción de los altavoces en el espacio y que permite acceder al resultado obtenido. El diseño de un sistema de audio se basa en seleccionar el modelo correcto de altavoz, la cantidad de los mismos, el tipo de arreglo, el posicionamiento, el ángulo de enfoque, el tratamiento de la señal y las condiciones acústicas del recinto. Disponer de una herramienta de simulación, facilita tomar decisiones de forma correcta con arreglo a las cuestiones presentadas anteriormente; ya que influirán directamente en la experiencia obtenida por el usuario [2].

Las herramientas tradicionales para el diseño de sistemas de audio han sido el escalímetro, el transportador de ángulos y las hojas con las características técnicas de los fabricantes. Las áreas de cobertura eran proyectadas sobre los planos. Afortunadamente, en los años 80 cambió por completo el sector del diseño de sistemas con la aparición del primer programa de altavoz, introducido por el fabricante de altavoces Bose Inc.[3], que contenía librerías de los propios altavoces de la compañía. Además de Bose, más tarde llegaron numerosos fabricantes con softwares propios, pero no se acogían a ningún estándar, por lo que era difícil realizar comparaciones entre sistemas y programas. Con el paso del tiempo, la industria fue estandarizando los procesos de recolección de datos sobre los altavoces y añadiendo fiabilidad a los diseños, de manera que los diseñadores tenían acceso a librerías de datos de los distintos fabricantes, permitiendo contrastar el comportamiento de los productos [2].

De la mano del ingeniero acústico Wolfgang Ahnert, llegó el primer programa de fabricantes de altavoces que abrió de forma pública sus librerías. Se trata del software EASE™ (Electro-Acoustic simulator for Engineers) y hoy en día está disponible a través de la compañía AFMG [4]. Es considerado una herramienta muy importante dentro de la industria debido a la compatibilidad que presenta con la gran mayoría de fabricantes. Introduciendo las librerías de los fabricantes, es posible realizar diseños de sistemas de audio y llevar a cabo sus simulaciones sobre planos bidimensionales (obsérvese la Figura 2.2). Pese a que es un programa de pago, cuenta con versiones del mismo de acceso gratuito.

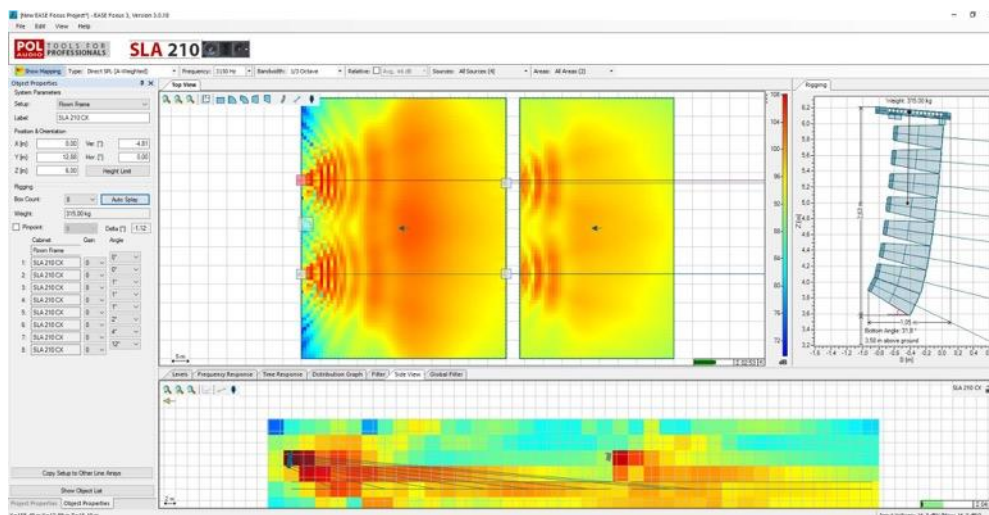


Figura 2.2 Programa Ease Focus, perteneciente al grupo EASE™ [5].

Además, existen numerosos fabricantes con sus propios softwares, entre ellos, también destaca el fabricante americano Meyer Sound Laboratories Inc®. [6]. En 2001 introdujo su primer software de predicción, llamado MAPP Online, que permitía diseñar recintos en 2D de forma gratuita. Dicho programa requería de acceso a internet, debido a que a la hora de realizar las predicciones, accedía de forma remota a los servidores centrales de la compañía, realizaba toda la actividad computacional en los mismos y finalmente representaba por pantalla los resultados obtenidos para cada predicción. Al poco tiempo, se presentó MAPP XT, una versión mejorada de la anterior que contaba con útiles novedades para aquel momento, tales como la muestra del nivel máximo de cada altavoz antes de entrar en un estado de no linealidad o la integración dentro del procesador simulado de nuevas herramientas de alineamiento temporal que hasta el momento no estaban incluidas dentro del mismo software [7].

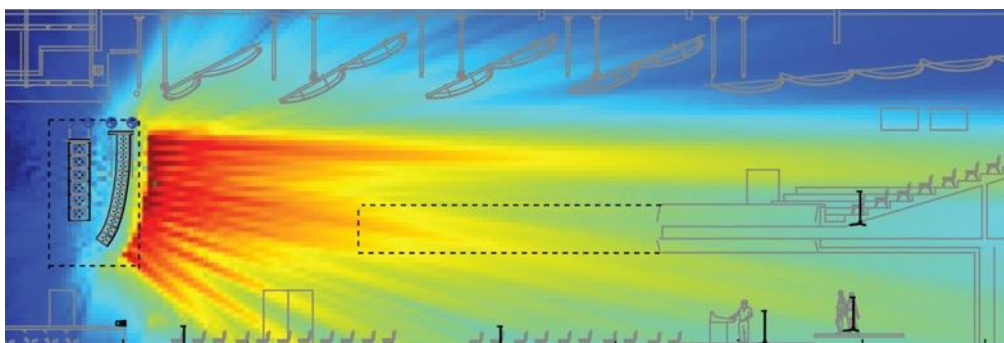


Figura 2.3 Programa MAPP XT de Meyer Sound® [7].

Año tras año, la tecnología se ha ido actualizando, siendo más precisa y permitiendo desarrollar entornos de simulación más atractivos. Meyer Sound®, entre otros, fue uno de los pioneros en introducir un modelado en tres dimensiones del recinto a tratar, pudiendo ofrecer una visión más realista y a escala de los diseños. En 2020, fue publicado el nuevo programa de Meyer Sound®, MAPP 3D. Se trata de un software de acceso gratuito que permite representar sobre planos tridimensionales el comportamiento de un sistema de audio, además, incorpora complejas herramientas enfocadas a la optimización de sistemas. Esto permite no solo diseñar el sistema en sí mismo, sino procesar su señal de salida para poder optimizar el sistema, ecualizándolo, añadiendo tiempo de Delay y enrutando su señal [8].

La principal ventaja de utilizar softwares de predicción como los pertenecientes al grupo EASE™, es que desde un mismo programa se pueden realizar diseños con sistemas pertenecientes a distintos fabricantes. Esto no es posible en softwares específicos de determinadas marcas como Meyer Sound®, ya que solo permite utilizar los sistemas diseñados por el mismo fabricante. Sin embargo, el uso de programas como EASE™ requiere del uso de librerías que deben ser insertadas con los datos de cada fabricante, esto supone que se debe estar pendiente de tener siempre los datos más actualizados de cada sistema. Por el contrario, trabajar con un software propio de un mismo fabricante garantiza el acceso a las últimas versiones de los datos recolectados por la compañía.

2.3 Fuentes de sonido

La caracterización del tercer bloque presentado en la Figura 2.1, el bloque de salida, cobra un papel fundamental en el diseño de sistemas de sonido. Las fuentes de sonido, también conocidos como altavoces, son los encargados de transformar los impulsos eléctricos recibidos en su entrada, en ondas acústicas capaces de variar de forma local la presión del medio en el que se propagan. En este apartado se van a clasificar los tipos de fuentes de sonido en dos grandes grupos: las encargadas de reproducir desde las medias-bajas frecuencias en adelante (desde 100Hz aproximadamente hasta 20kHz) y las encargadas de las frecuencias subgraves (desde 20Hz hasta 100Hz aproximadamente).

2.3.1 Control de las medias y altas frecuencias.

En este subapartado se van a caracterizar las fuentes de sonido que han sido diseñadas para reproducir todas las frecuencias que no se correspondan con las frecuencias subgraves, es decir, desde los 100Hz aproximadamente, en adelante. A continuación, se procede a clasificar dichas fuentes en dos subgrupos: las fuentes puntuales de sonido y los arreglos compuestos por varias fuentes.

2.3.1.1 Fuente puntual de sonido

Se puede definir una fuente puntual de sonido como una pequeña fuente que radia en todas las direcciones y para todo el rango de frecuencias audibles. Solo se vería afectada por el entorno donde es reproducida, ya que no interactúa con otras fuentes.

Pese a que su definición es el punto de partida, la realidad es bien distinta. Las fuentes puntuales no solo se ven afectadas por otras fuentes, sino que además, su directividad de radiación varía en función de sus características de fabricación. La geometría de la fuente, los filtros con los que cuenta, las posibles guías de onda que use o el tamaño de los altavoces que la conforman, son algunos de los elementos que condicionan el comportamiento directivo y frecuencial de este tipo de fuentes.

La Figura 2.4 muestra las características de radiación de dos fuentes puntuales iguales que vibran en fase. Además, se puntualiza la relación que existe entre la directividad resultante entre las dos fuentes y la distancia entre las mismas. Esta última, dependiendo a su vez de la longitud de onda de la frecuencia reproducida.

Este comportamiento obtenido marca las bases para lo que más adelante se mostrará como arreglos creados por la combinación de distintas fuentes, sirviendo estos, tanto para el control de las bajas como de las altas frecuencias [9].

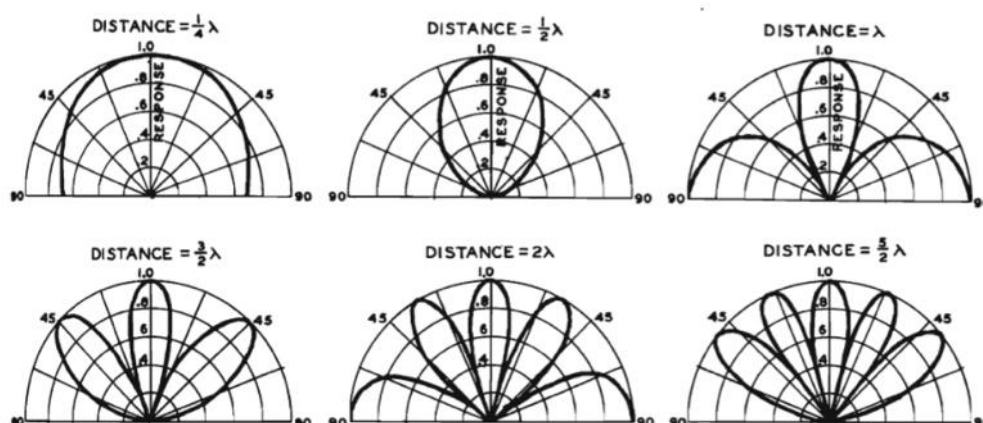


Figura 2.4 Direccionalidad de dos fuentes separadas entre ellas [9].

2.3.1.2 Arreglos en línea

Cuando se disponen de más de una fuente puntual de sonido, interaccionando entre sí con el objetivo de controlar la directividad y la cobertura ofrecida por el sistema en su conjunto, se dice que se trata de un arreglo en línea.

Los arreglos en línea, si son para el control de las medias y altas frecuencias, también son conocidos como line arrays (obsérvese la Figura 2.5). Su objetivo es que el conjunto se comporte como una única fuente sonora. Su comportamiento es posible gracias a la estructura horizontal de los recintos que lo componen, así como la distancia entre los altavoces, las frecuencias de corte de los mismos y el diseño de las guías de onda de los agudos [10].



Figura 2.5 Line array Bose volado [11].

Lo verdaderamente interesante del uso de los line arrays es que cuentan con un importante control de la directividad, especialmente en su cobertura vertical. Esto se consigue gracias al acoplamiento eficaz entre los elementos que lo componen, fruto de la distancia entre ellos. El principal uso para lo que están diseñados es para ser volados como arreglos verticales, gracias a que ofrecen un cobertura de salida muy ajustada y directiva.

Para que un line array funcione de forma óptima, cumpliendo su propósito en términos de directividad, es importante que la longitud del mismo sea mayor que la longitud de onda de la frecuencia más baja que pueda reproducir. Además, la directividad de los line arrays se obtiene generando interferencias constructivas y destructivas producidas entre los altavoces que lo forman, dando como resultado zonas de máximo nivel de emisión y zonas donde las interferencias destructivas son más notorias y favorecen a la directividad del mismo [12].

Entre las principales ventajas con las que cuenta el uso de arreglos en línea como los line arrays es su alta capacidad de directividad. Por el contrario, el uso de fuentes puntuales tiene mayores limitaciones a la hora de trabajar con la directividad de las mismas. Para estas últimas, la directividad no es un factor tan relevante como para los line arrays debido a que ya viene preestablecida de fábrica. Como desventaja, al añadir más altavoces a los line arrays, lo que se consigue es que el contenido en las bajas frecuencias del arreglo aumente, como consecuencia del acople entre sus conos. Este hecho, obliga a utilizar ecualizadores que permitan el control de la respuesta en frecuencia obtenida, aunque en muchos casos, los propios sistemas cuentan con unos *pressets* que dependen del número de elementos insertados en el arreglo.

2.3.2 Control de las bajas frecuencias

Para el control de las bajas frecuencias, las marcas comerciales han ido desarrollando a lo largo de la historia unos recintos acústicos denominados subwoofers o subgraves que permiten la reproducción de las más bajas frecuencias del espectro audible. Estas van en su mayoría, desde los 20Hz hasta los 100Hz, reproduciendo aproximadamente un rango de tres octavas de frecuencia. Dada la longitud de onda con la que trabajan en comparación con el tamaño de la fuente, se considera que el patrón de radiación de los subgraves es omnidireccional.

De forma similar a los fundamentos descritos anteriormente para las fuentes puntuales, al realizar arreglos combinando más de un subgrave, existirán acoplamientos entre ellos que permitirán generar una serie de lóbulos de energía. Dichos lóbulos darán como resultado un patrón direccional para el arreglo de subgraves.

El control direccional del arreglo depende directamente de una serie de condiciones, tales como el número de subgraves utilizados, la separación entre ellos, la frecuencia máxima que se pretende reproducir, el nivel relativo entre ellos o el retraso temporal/espacial existente entre los distintos elementos [13].

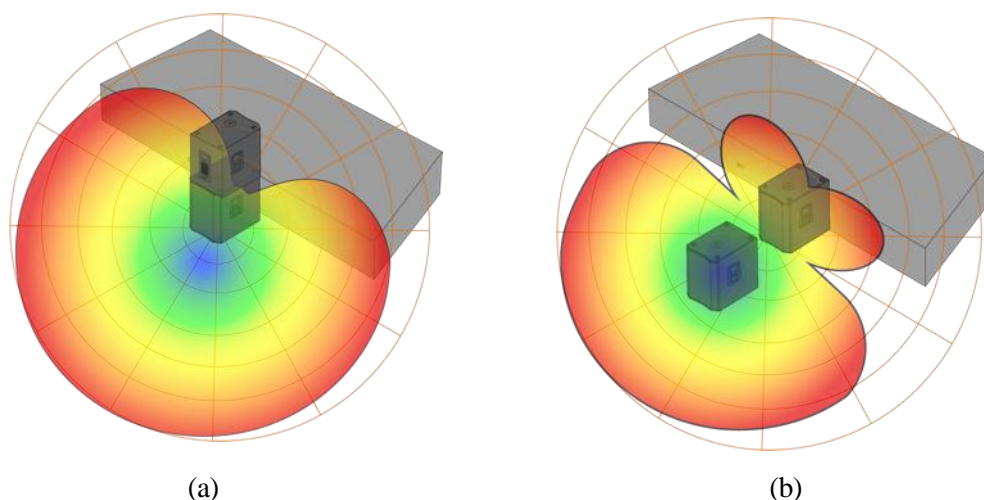


Figura 2.6 (a) Arreglo en cardioide stackado [14]. (b) Arreglo en cardioide End Fire [14].

Como puede observarse en la Figura 2.6, es posible crear arreglos direccionales combinando distintas unidades de subgraves. Los que se representan en dicha figura son solo algunas de las configuraciones que se pueden llevar a cabo. La Figura 2.6 (a), muestra una configuración en cardioide stackado sobre el suelo, para ello, será necesario darle la vuelta a uno de ellos, retrasarlo electrónicamente para que genere una interferencia constructiva con el otro y para finalizar, invertirlo la fase. Este último paso, consigue una interferencia destructiva en la parte trasera del arreglo (correspondiente con el escenario), lo que permite ofrecer en su totalidad un patrón cardioide. El arreglo en End Fire correspondiente a la parte (b) de la Figura 2.6, muestra como con una disposición distinta de los elementos, puede obtenerse un resultado que también forme un patrón cardioide. El principal objetivo de este tipo de diseños es eliminar aquella energía que sea emitida en zonas indeseadas, ya sea sobre el escenario o en espacios del recinto donde no tenga sentido ofrecer cobertura para este rango de frecuencias.

Los primeros altavoces diseñados en la historia, contaban en su interior con elementos para la reproducción de las bajas frecuencias. Sin embargo, con el paso del tiempo, se ha optado por diseñar elementos independientes para el control de dichas frecuencias. Este hecho ha ofrecido numerosas ventajas al sector del diseño de sistemas; la primera, es la posibilidad de crear arreglos que ayuden a gestionar la directividad de la energía emitida. Otra ventaja es que trabajan con longitudes de onda relativamente largas, que son capaces de difractarse alrededor de objetos contiguos sin que la señal percibida sufra atenuaciones notorias. Este último hecho, ofrece la oportunidad de generar arreglos no solo ubicados en el suelo (stackados), sino también siendo suspendidos en el aire rodeados de otros elementos que no afectarían en gran medida al resultado obtenido [2].

3 DESCRIPCIÓN DEL AUDITORIO

El objeto de estudio de este trabajo es el auditorio de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla. Este centro, se encuentra situado al noroeste de la ciudad de Sevilla (Provincia de Sevilla, España), cuya dirección es *Camino de los Descubrimientos s/n*, en la Isla de la Cartuja.

El edificio tiene su origen en la Exposición Universal celebrada en la ciudad de Sevilla en el año 1992, donde fue construido el entonces pabellón Plaza de América. En aquel momento, el pabellón fue dotado con un gran auditorio en el que se celebraron importantes y numerosos actos culturales durante los meses de duración de la Exposición. Con el fin de la misma, el edificio sufrió una serie de cambios y adaptaciones para poder convertirse en lo que a día de hoy se conoce como la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, anteriormente situada en el actual edificio de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática, en la Avenida de la Reina Mercedes de Sevilla. Se trata de un centro completamente adecuado para el ejercicio de la enseñanza universitaria y que además cuenta con distintos servicios u oficinas para los departamentos de la universidad.

El auditorio está gestionado por la propia Escuela Técnica Superior de Ingeniería y cuenta con un total de 709 butacas instaladas, distribuidas entre el patio de butacas y los seis palcos ubicados a ambos lados del patio de butacas (tres a la izquierda del escenario y otros tres en la derecha).

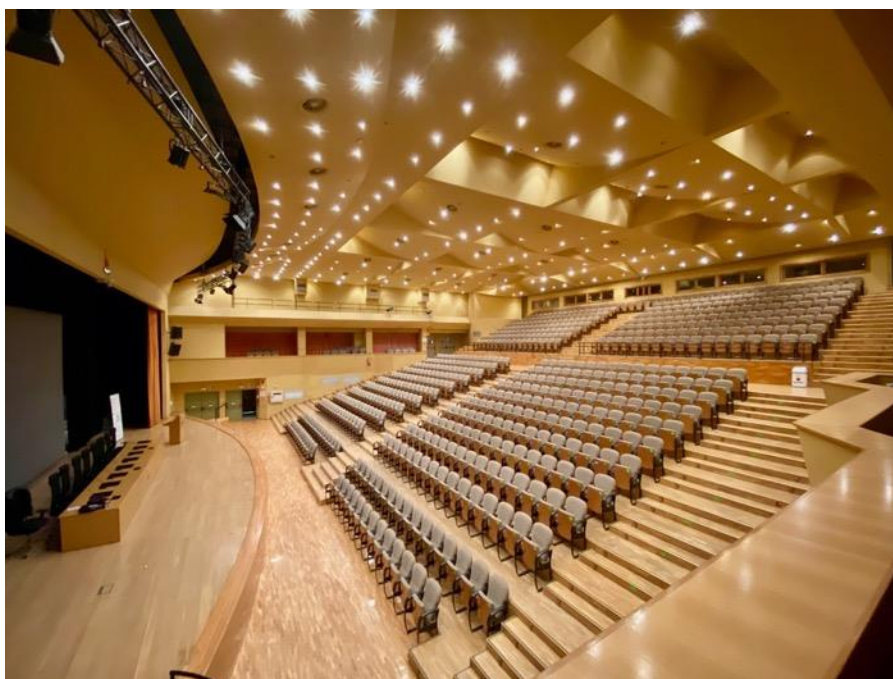


Figura 3.1 Plano general del auditorio.

La distribución del auditorio es completamente simétrica. Como se observa en la Figura 3.1, la audiencia se distribuye entre una zona de audiencia alta con un total de 277 butacas (136 en cada sección lateral y 5 al final de la escalera central) y una zona de audiencia baja más próxima al escenario, que cuenta con un total de 378 butacas. La altura total del auditorio en la zona del patio de butacas es de 10 metros y ocupa una superficie total de 700 m²; de los cuales, 155m² corresponden a la audiencia superior, 195m² a la audiencia inferior y el resto son pasillos y escaleras de acceso. Esta distribución de la zona de audiencia en el patio de butacas facilita notablemente un campo de visión global del escenario, debido a que existe un desnivel constante a lo largo de todo el auditorio, aumentando así, la altura de una fila respecto a la anterior. Este hecho, además puede simplificar la venta de entradas ya que la densidad de butacas por superficie es la misma en todo el patio de butacas y en todas ellas se ha facilitado la visión de la misma manera.

Los seis palcos laterales (obsérvese la Figura 3.2) cuentan con un total de 54 butacas instaladas, siendo 8 las ubicadas en cada uno de los palcos más próximos al escenario, 12 en los palcos medios y 8 en los más lejanos del escenario. Los palcos cuentan con una altura total de 2,7m y una superficie útil para audiencia de 12,5m² para el caso del más próximo al escenario y 16,5m² aproximadamente en cada uno de los restantes.



Figura 3.2 Detalle de los palcos del auditorio.

Por último lugar, el escenario se encuentra situado a 1 metro de altura respecto al nivel del suelo y cuenta con una distancia total de boca de escenario de 23,5m. Se trata de un escenario particularmente ancho en cuanto a las dimensiones de su boca, en proporción con las dimensiones del patio de butacas. Ello conlleva algunas ventajas e inconvenientes.

La principal ventaja de estar ante un escenario con estas dimensiones es que permite albergar producciones audiovisuales que requieran, no solo de una gran boca de escenario, sino también de una profundidad considerada como es la de dicho escenario, de 11,5 metros de profundo.

Sin embargo, un escenario particularmente largo como este, obliga a que el sistema de sonido permanezca instalado a ambos lados, concretamente sobre las paredes laterales del mismo, tal y como se encuentra ubicado el sistema de sonido actual (obsérvese la Figura 3.3). Esta disposición del sistema de audio, hará que aquellas zonas de la audiencia que se encuentren fuera del eje central del patio de butacas, distingan por proximidad, el sonido procedente de uno de los laterales del escenario. Por el contrario, las personas situadas sobre las butacas próximas al eje central percibirán el sistema de audio como una única fuente central y procedente del frente. Este último, sería el comportamiento más lógico a percibir: observar a la fuente de sonido en el frente (orador, grupo musical, vídeo, etc) y percibir su sonido (tras la amplificación) proviene también del frente.

Habría que ir analizando cuál es el comportamiento del sistema de audio según se vaya desarrollando el diseño del mismo, pero cabe esperar la posibilidad de incluir algún elemento de refuerzo sobre el centro superior del escenario para que facilite, en cierto modo, el efecto de precedencia de la fuente de sonido. En un capítulo de este trabajo se describirá el efecto de precedencia y se evaluará una propuesta para el acondicionamiento del mismo, como un elemento de mejora añadido al sistema de sonido principal.

El auditorio permaneció prácticamente intacto desde su construcción hasta el año 2009, que sufrió una serie de obras y acondicionamientos para poder tener un dispositivo audiovisual más actualizado. Entre otros detalles, se modificó el sistema de sonido, junto con la micrófona y distintos elementos de la sala de control de sonido.

Fundamentalmente, el auditorio está destinado a la celebración pública o solemne de eventos de carácter académico como son actos de graduación o conferencias, aunque también se celebran audiciones de orquestas de música o conciertos de cámara donde no es necesario un extenso sistema de amplificación de sonido.



Figura 3.3 Frontal del escenario.

Como se puede observar en la Figura 3.3, el sistema de sonido con el que cuenta el auditorio actualmente está compuesto por cuatro fuentes puntuales (dos a cada lado del escenario) de dos vías: cono de mayor dimensión para las medias y bajas frecuencias y bocina para las altas frecuencias. Este sistema, podría resultar útil para eventos donde predomina el uso de la palabra, pero, en contraposición, supone una limitación debido a que no cubriría todas las necesidades necesarias para capacitar al auditorio como un recinto apto para el desarrollo de eventos de todo tipo. Algunas de estas limitaciones serían: la falta de cobertura homogénea del sistema en gran parte de la audiencia o un nivel en dB (decibelios) de SPL (Sound Pressure Level, nivel de presión sonora) no lo suficientemente elevado como para llevar a cabo conciertos de música en directo.

4 DISEÑO DEL SISTEMA DE AUDIO

El diseño de un sistema de sonido está compuesto por dos partes; una parte de diseño del sistema y otra de optimización del mismo. Para llevar a cabo la parte del diseño, es necesario tener en cuenta los elementos estructurales que componen el recinto a tratar, la previsión de uso del recinto y la distribución de la audiencia para poder hacer un diseño acorde a las necesidades presentadas.

El objetivo “ideal” del diseño de un sistema de audio es tener una respuesta en frecuencia lo más plana posible para todo el rango de frecuencias audible y, además, hacer que esto ocurra en cualquier punto de la audiencia [2]. En la práctica, habrá distintos elementos que dificulten obtener dichos resultados, pero se debe realizar el diseño intentando perseguir este objetivo.

En este capítulo se describe el proceso llevado a cabo para diseñar el sistema de audio del auditorio de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Además, se señalan cuáles han sido las dificultades encontradas durante el proceso y qué decisiones se han tenido que tomar para ejecutar el diseño.

4.1 Software de simulación

Para el diseño del sistema de audio será necesario utilizar un software de simulación que permita obtener una predicción certera de la distribución de energía emitida por el sistema para cada banda de frecuencias. Existen distintos softwares de predicción disponibles en el mercado pertenecientes a distintos fabricantes de sistemas de audio. La gran mayoría de ellos realizan las predicciones sobre recintos modelados en planos bidimensionales. Con el objetivo de obtener unas representaciones visualmente más realistas en este trabajo, se ha decidido optar por un software de simulación que permita el modelado de recintos en tres dimensiones. Este hecho simplificaría mucho la manera de entender y visualizar la distribución espacial de los equipos a instalar, teniendo una percepción más realista y natural de su distribución en el recinto.

4.1.1 Introducción a MAPP 3D

Para el desarrollo de este trabajo se va a utilizar el software de predicción MAPP 3D, que pertenece al fabricante Meyer Sound Laboratories, Incorporated® [6] con sede en Berkeley, California (Estados Unidos de América). MAPP 3D es una herramienta de reciente creación para realizar diseños de sistemas de sonido con opción de integrarlos en recintos modelados tridimensionalmente. Se ha considerado que MAPP 3D puede ser una buena herramienta para este trabajo debido a que cuenta con una exhaustiva base de datos con más de 65000 mediciones de 1/48 de octava tomadas en la cámara anecoica de Meyer Sound® de todos los altavoces creados de dicho fabricante. Este hecho ofrece la posibilidad de realizar predicciones de cada altavoz de forma tridimensional [8].

En la Figura 4.1 se puede observar la ventana principal de MAPP 3D. La columna situada a la derecha de la pantalla ofrece las herramientas más características de cualquier software CAD para poder crear geometrías planas u objetos volumétricos, así como ofrecer una estructura de capas para facilitar la organización de los elementos. Además, cuenta con distintas herramientas de modificación de los elementos geométricos creados, así como alguno de los “Modificadores” más famosos para utilizar con los elementos geométricos. Dicha sección ubicada a la derecha, es uno de los principales atractivos de MAPP 3D, ya que permite diseñar complejos modelos simulando los recintos de trabajo en tres dimensiones sobre la pestaña *Model View*.

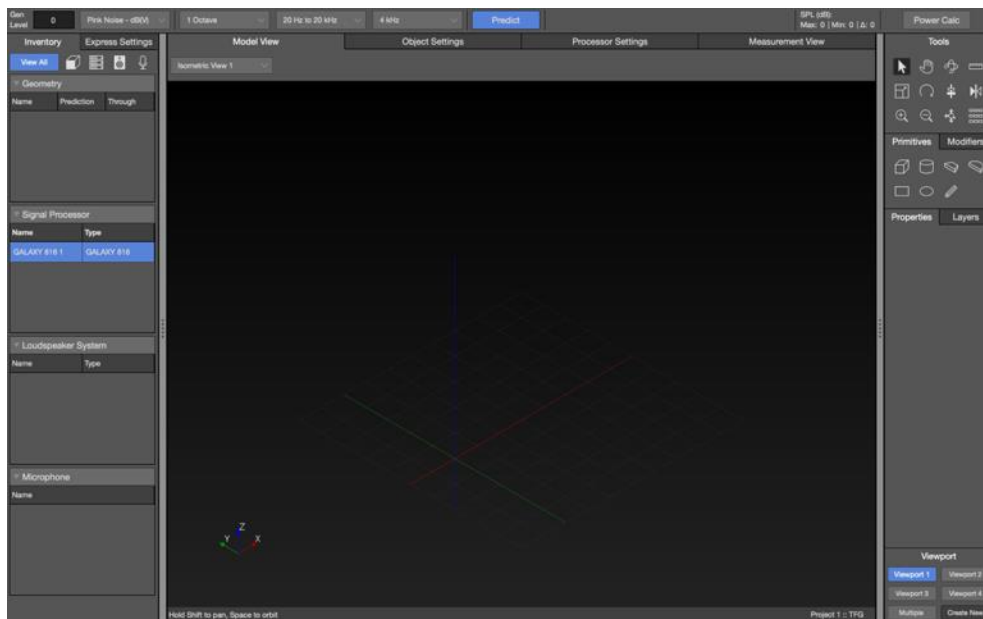
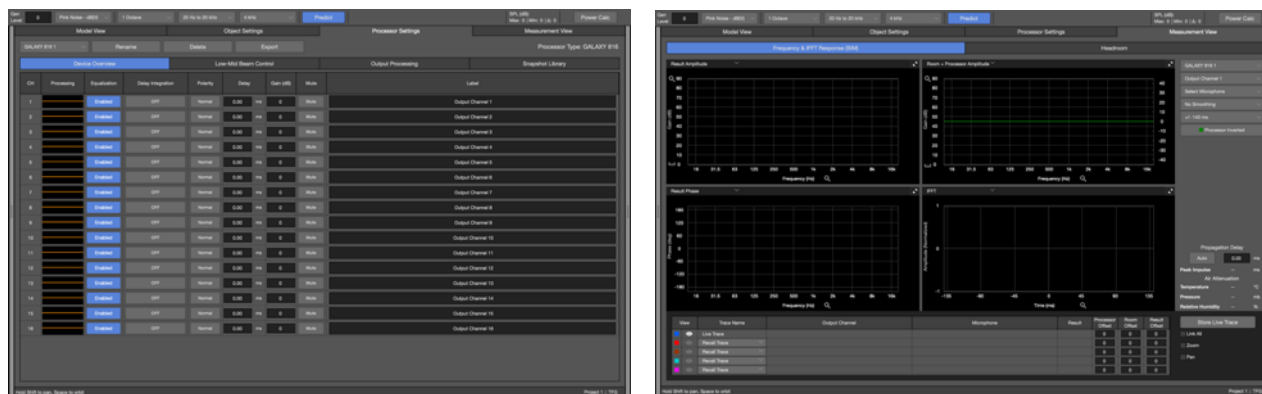


Figura 4.1 Ventana principal de MAPP 3D.

A la izquierda de la ventana principal se encuentra el inventario de los elementos que se van a ir insertando en el proyecto. Estos están agrupados por categorías: geometrías, procesadores, altavoces y micrófonos de medición. Junto al inventario se encuentra una pestaña de acceso rápido a cada elemento insertado para poder modificar sencillamente parámetros como la posición o algunos ajustes de angulación.

La sección superior de la ventana alberga el generador de señal que excitará el sistema de audio. Ofrece una ganancia de entrada además de tres señales diferentes para testear el sistema: Ruido Rosa, M-Noise y B-Noise. A la derecha del generador de señal se encuentra el selector de frecuencias que serán mostradas en la predicción. Es posible seleccionar una precisión de 1/24 de octava desde 20Hz hasta 20kHz.

Situado en el centro de la pantalla está el bloque de trabajo, permitiendo pasar entre cuatro pestañas diferentes: *Model View*, *Object Settings*, *Processor Settings* y *Measurement View*. La pestaña *Model View* ofrece el entorno de trabajo necesario para diseñar el recinto y poder visualizar todos los elementos que componen el diseño; además de representar las predicciones sobre los planos de predicción. *Object Settings* permite la edición de forma de cada una de las geometrías o los altavoces que han sido insertados en el diseño.



(a)

(b)

Figura 4.2 (a) Pestaña *Processor Settings*. (b) Pestaña *Measurement View* de MAPP 3D.

Según se muestra en la Figura 4.2 (a), MAPP 3D permite insertar un procesador de señal cuyas salidas van a ir conectadas a cada uno de los elementos que compongan el sistema de audio. Para este trabajo, se va a utilizar el procesador digital Galileo GALAXY 816 de Meyer Sound® que cuenta con 8 entradas, 16 salidas de audio y la posibilidad de conectarlo a otros procesadores de señal mediante red. Se trata de un procesador muy versátil que permite insertar un complejo ecualizador en el proceso, además de generar retrasos o ajustar la ganancia de salida para cada una de las salidas del procesador. También permite la inversión de la polaridad de la fase de cada una de las salidas, además de insertar una serie de *prests* llamados *Delay Integration* que simplificarán la optimización del sistema modificando la respuesta de fase de cada salida para cada tipo de altavoz que se utilice. Esto facilitará la interacción entre altavoces [15].



Figura 4.3 Procesador de señal Galileo GALAXY 816 de Meyer Sound® [16].

Con el objetivo de obtener gráficamente la respuesta en frecuencia y en fase del sistema, MAPP 3D permite situar varias micrófonos de medición omnidireccionales. En la pestaña *Measurement View* (obsérvese la Figura 4.2 (b)) es posible obtener gráficamente las distintas respuestas en frecuencia y fase que en cada momento están recogiendo los micrófonos, además de la IFFT (Inverse Fast Fourier Transform, Transformada rápida inversa de Fourier) para poder calcular la respuesta al impulso recibida.

4.2 Modelado 3D del auditorio

Una vez decidido el software de simulación a utilizar, se procede a llevar a cabo el modelado del auditorio en tres dimensiones. Para ello será necesario haber obtenido previamente las medidas reales del recinto o los planos con las dimensiones. En este caso se ha generado un plano de la planta del auditorio (obsérvese la Figura 4.4) en Autocad.

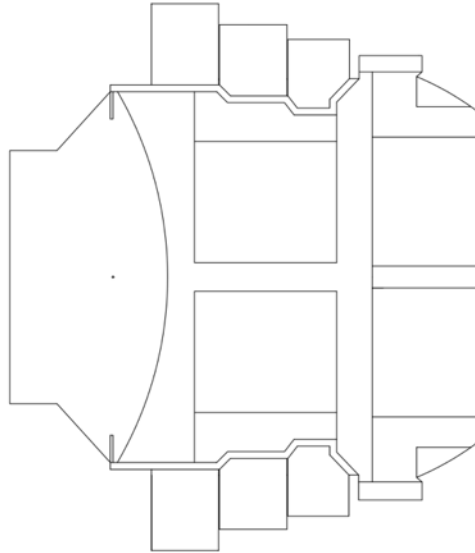


Figura 4.4 Planta del auditorio.

Es importante mencionar que el plano debe estar a escala y en metros. Además, se debe situar el punto del origen de coordenadas ($x=0$, $y=0$, $z=0$) con precaución ya que este archivo .dxf que se genere desde Autocad será importado en MAPP 3D y tomará como centro de coordenadas el que traiga el archivo de importación. Dicho centro de coordenadas será el punto de partida para la posición de cada uno de los elementos que se dispongan en el modelo. Para este proyecto se ha situado el origen de coordenadas sobre el escenario, en un punto de intersección entre las paredes frontales del escenario (donde se encuentra ubicado el sistema de sonido actual) y el eje transversal del plano. Dicho punto se encuentra marcado con una pequeña cruz en la Figura 4.4.

Como se puede observar en la Figura 4.5, el modelado tridimensional del recinto se ha de realizar fundamentalmente mediante la composición de distintas formas geométricas. Como elementos principales se encuentran las cuatro zonas de audiencia ubicadas en el patio de butacas y los seis palcos distribuidos a ambos lados del patio de butacas.

Con el objetivo de percibir de una manera más sencilla las proporciones de tamaño entre los distintos elementos del auditorio, se han añadido también otros elementos arquitectónicos como las escaleras de acceso, los pasillos, los balcones y techos de los palcos, las paredes laterales y el escenario. Este último tomará un papel relevante a la hora de realizar la predicción sobre él para calcular la cantidad de SPL en un determinado rango de frecuencias con el objetivo de reducir emisiones innecesarias en esta zona.

MAPP 3D necesita reconocer cuales serán las superficies pertenecientes al modelo sobre las que se realizarán las predicciones. Sobre estas superficies, se mostrarán las distribuciones de energía para cada banda de frecuencias. En este caso, las superficies de predicción son las dos audiencias superiores, las dos audiencias inferiores y los seis palcos. Para ello, se deben seleccionar cada una de las formas geométricas que contienen dichas superficies y en la pestaña de *Object Settings* indicar que serán superficies de predicción. Una vez hecho esto, las superficies de predicción pasarán a color rosa, como puede observarse en la Figura 4.5.

Por último lugar, se añadirá un *offset* de elevación de 1,2 metros a las superficies seleccionadas como superficies de predicción. Dicho *offset* corresponde a la altura media de la cabeza de una persona que permanece sentada sobre una butaca, ya que se prevee que la audiencia va a permanecer sentada durante el desarrollo del evento.

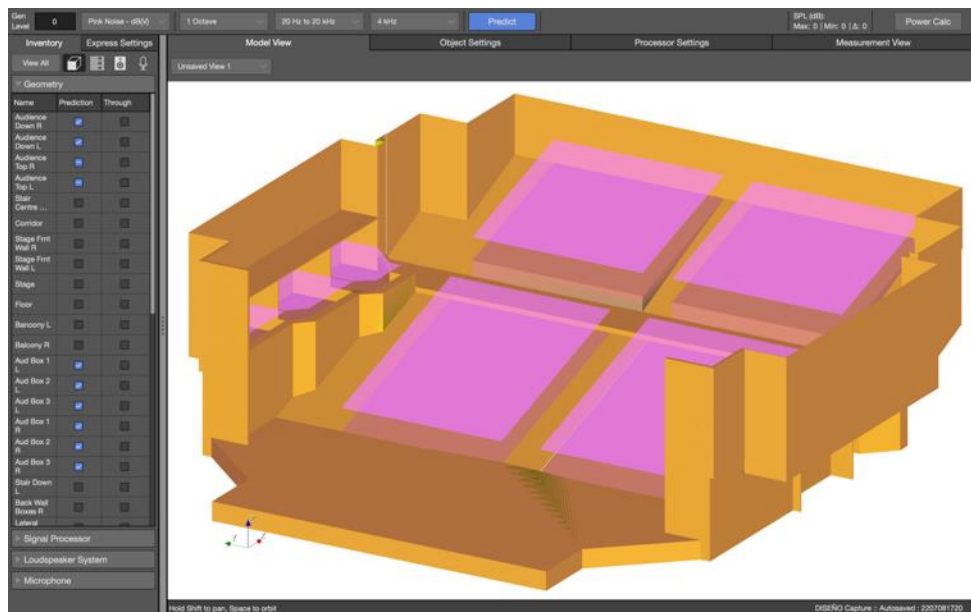


Figura 4.5 Modelo 3D del auditorio en MAPP 3D.

MAPP 3D cuenta con una limitación que podría afectar en algunos aspectos concretos el diseño que se va a llevar a cabo. Los palcos del auditorio están separados unos de otros por una pared, como puede observarse en la Figura 3.2. Aunque esta pared no llega hasta el frontal del palco, es decir, hasta el balcón del mismo, podría generar ciertas zonas tras ellas donde no se perciba directamente el sonido del sistema instalado. Esto podría generar un efecto de “sombra” sobre algunas butacas. MAPP 3D no permite introducir objetos que generen cierto aislamiento tras ellos como podría ocurrir con las paredes que separan los palcos, por tanto, la simulación de este proyecto no tendrá en cuenta el efecto “sombra” que podrían generar ciertas paredes. Se propone como línea futura de trabajo, si el sistema un día fuese instalado en el auditorio, el realizar mediciones sobre estas zonas y contemplar la opción de introducir alguna fuente puntual para estas secciones del recinto.

Tras el modelado del auditorio, se podrá comenzar a insertar los distintos tipos de altavoces para continuar con el diseño.

4.3 Control de medias y altas frecuencias

Según fue descrito en el Capítulo 3, el recinto cuenta con una serie de características en las que hay que prestar especial atención a la hora de realizar el diseño. Entre ellas destacan que la boca de escenario es especialmente grande en comparación con el resto del recinto. Esto hará que para evitar que el sistema de sonido interfiera en la visión del escenario, habrá que situarlo a ambos lados del mismo frente a las paredes laterales del frente de escenario. Otra característica es que existe una diferencia de altura relevante entre las primeras filas de la audiencia baja y las últimas filas de la audiencia alta, esto lleva a diseñar un sistema de sonido cuya cobertura vertical sea amplia. Mencionar también, que la diferencia de distancia entre las butacas más próximas a cada una de las ubicaciones de instalación del sistema de sonido y las butacas más lejanas al mismo es significativa. Por tanto, el sistema de sonido debe permitir generar niveles superiores de SPL en aquellas zonas de la audiencia más lejanas al mismo, pero a la vez controlar el SPL en las zonas más próximas al sistema de sonido. En definitiva, será necesario diseñar un sistema que permita el control de la cobertura vertical, permitiendo que esta sea amplia para las medias y altas frecuencias, además de un control de la energía emitida.

Se propone implementar un arreglo volado en line array, que será suspendido desde la estructura del techo con la ayuda de uno o varios motores de elevación. Se trata de una estructura compuesta por sucesivos altavoces dispuestos verticalmente que permiten obtener una directividad vertical muy direccionable para las altas frecuencias. Esta directividad se ve afectada significativamente por los ángulos de separación entre los altavoces. Respecto a la directividad horizontal, también es muy direccional, pero permanece fija para todas las frecuencias [17]. Esto tiene una serie de condiciones de fabricación, entre ellas, que la separación entre las distintas fuentes no puede ser superior a 50mm. Esta separación, dependerá también de la longitud de onda mínima reproducida [18]. Se trata de una configuración muy interesante para el auditorio de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería debido a que una vez situado en una posición elevada, permitirá cubrir considerablemente gran parte de la audiencia.

Debido a sus características, la estructura de line array que se va a implementar en el diseño del auditorio estará formado por altavoces modelo LINA™ del fabricante Meyer Sound®. LINA™ es el modelo de altavoz para arreglos en line array más pequeño perteneciente a la familia LEO® de Meyer Sound®. Se trata de un altavoz compacto y de respuesta lineal que proporciona un nivel máximo de 138 dB SPL (medido en campo libre a 1 metro de distancia) con un rango de frecuencias de trabajo que van desde los 65Hz hasta los 18kHz, ofreciendo una THD (Total Harmonic Distorsion, distorsión armónica total) inferior al 0,02% [19].



Figura 4.6 Line array compuesto por el MG-MINA/LINA/750-LFC Multipurpose Grid sobre 6 recintos acústicos LINA™ de Meyer Sound® [19].

LINA™ cuenta con un amplificador clase D de triple vía con una potencia de 1950 W que serán distribuidos entre los dos altavoces de 6,5 pulgadas y el driver de compresión de 3 pulgadas que lo componen. Ofrece una cobertura horizontal de 100°, la cobertura vertical varía dependiendo de la longitud del array que se forme y de su configuración [19].

En definitiva, se considera que el modelo LINA™ podría cubrir las necesidades del auditorio en base a sus características. Como en cualquier diseño, este debe ser testeado y simulado en todo el rango de frecuencias. De no cumplir con los objetivos o no obtener unos resultados aceptables dentro de la naturaleza de este tipo de sistemas, habría que seguir probando otras configuraciones.

Como se puede observar en la Figura 4.7, los dos line arrays han sido dispuestos en una configuración en L y R. Esto quiere decir que son ubicados a ambos lados del escenario, a la izquierda y derecha según el punto de vista de la audiencia, permitiendo ofrecer una imagen estéreo del sonido. Sus posiciones han sido $\{x=1,5m; y=11,7m\}$ y simétricamente $\{x=1,5m; y=-11,7m\}$, ambos sistemas a una altura de 8,4 metros desde el suelo.

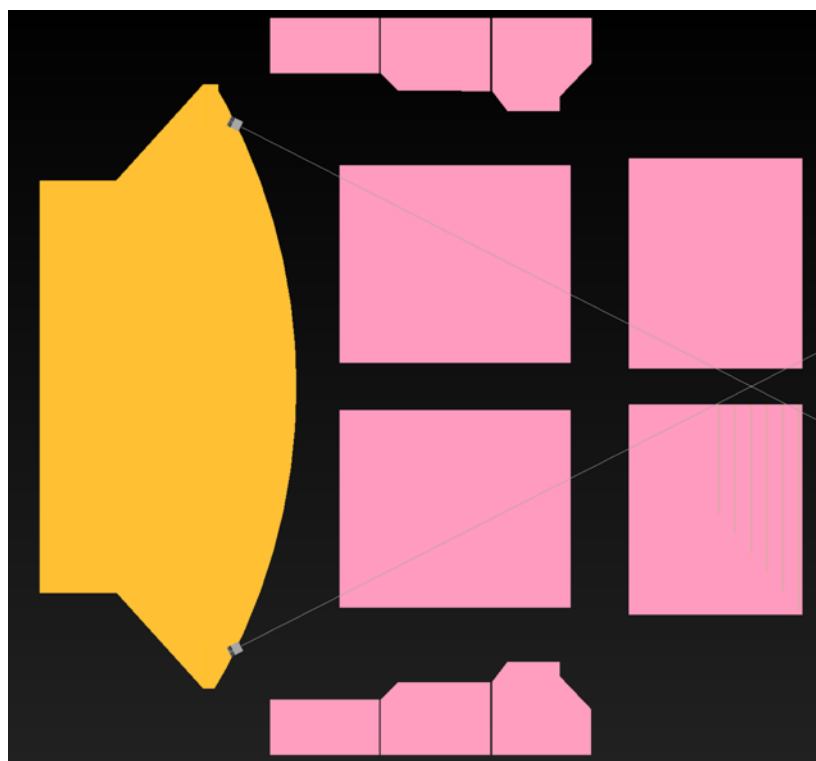


Figura 4.7 Vista superior de MAPP 3D con los dos line arrays LINA™ de Meyer Sound® dispuestos en L y R.

Según la disposición mostrada en la Figura anterior, se puede observar que ambos sistemas cuentan con una rotación simétrica respecto al eje Z de 27°. Esta angulación hace que el punto donde confluyen ambos line arrays sea el centro de la zona de audiencia superior. Si esta angulación fuese mayor o menor, se estaría perdiendo energía tanto en las zonas de la audiencia superior más lejanas del centro, o bien, emitiendo energía en zonas que no son de interés como las escaleras laterales.

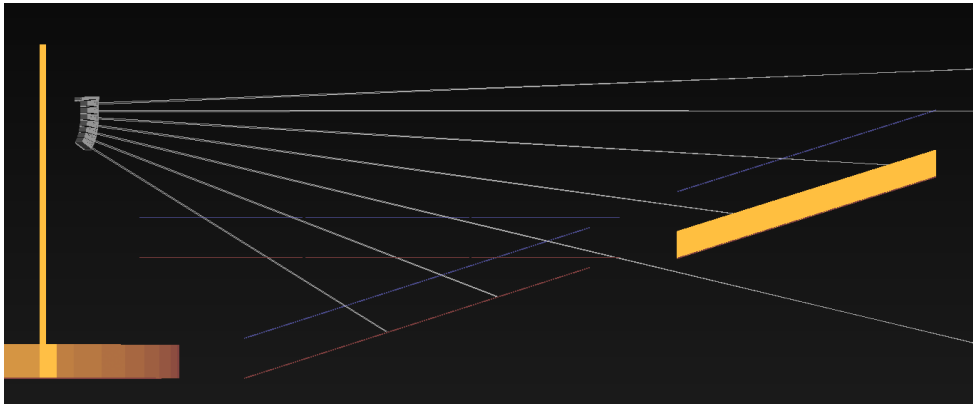


Figura 4.8 Vista lateral de MAPP 3D con los dos line arrays LINA™ de Meyer Sound®.

En la Figura 4.8 se ofrece la vista lateral del entorno de simulación de MAPP 3D donde se puede observar cual ha sido la angulación de los elementos que componen el line array gracias a que cada altavoz se muestra una línea que describe su trayectoria. Para poder tener una cobertura lo más uniforme posible (obsérvese el ejemplo de predicción de la Figura 4.9) ha sido necesario componer cada line array de siete recintos acústicos LINA™.

La angulación del accesorio metálico *MG-MINA/LINA/750-LFC Multipurpose Grid* sobre el que quedarán suspendidos los altavoces tiene una angulación de -2° respecto al eje Y, esto permite que los altavoces superiores puedan ofrecer cobertura en la zona más elevada de la audiencia superior. Los altavoces cuentan con una angulación respectiva de 0° , 2° , 3° , 4° , 5° , 6° y 7° respectivamente, desde los superiores hasta los inferiores. En la Figura 4.8 se puede apreciar como la primera caja del array queda fuera de la superficie de audiencia (marcada en la figura en azul) y la segunda caja si se encuentra justo sobre el límite de la superficie de predicción. Tras determinadas pruebas, esta ha sido la manera de garantizar la cobertura en las últimas filas de la grada alta (obsérvese la predicción de la Figura 4.9).

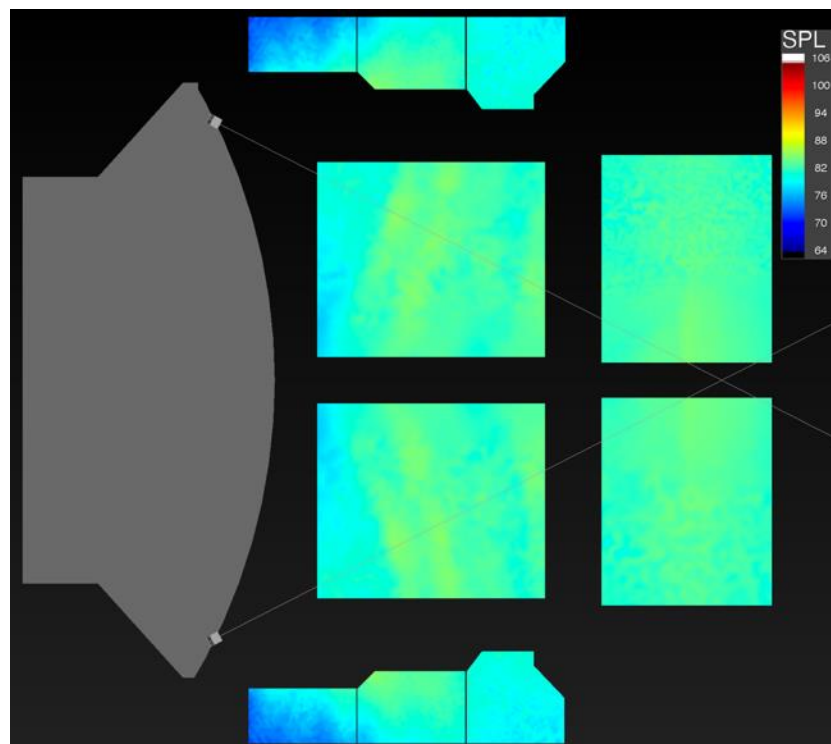


Figura 4.9 Predicción de la octava de 4kHz del line array en MAPP 3D.

En la predicción mostrada en la Figura 4.9, cabría objetar que las primeras filas de las gradas inferiores cuentan con una diferencia de SPL respecto al resto de la audiencia del patio de butacas de 6 dB. Una diferencia de 6 dB sobre distintos puntos de la audiencia excede los límites de SPL marcados para este trabajo debido a que supone una diferencia del doble de potencia entre los puntos. Cabe pensar que una posible solución sería añadir más altavoces al line array, así se ganaría cobertura en la zona inferior de la grada. Como primera aproximación, podría ser una solución perfectamente implementable. Tras determinadas pruebas, se ha llegado a la conclusión de que no interesa introducir más elementos en la parte inferior del array debido a que la relación entre la energía emitida y la energía útil que será recibida en la audiencia es muy baja porque se perdería mucha cobertura horizontal por la zona de las escaleras. Como posible solución a este problema de nivel en las primeras filas, se implementará un sistema de Front fill para el frente del escenario, para ofrecer así cobertura a esta zona.

Respecto a los palcos, debido a su proximidad a cada uno de los line arrays, la predicción muestra un nivel que no dista mucho del obtenido en el resto del patio de butacas, al menos en los cuatro palcos más lejanos del escenario. En los palcos que más cerca están del escenario (uno a cada lado) si se obtiene una diferencia de nivel más significativa respecto al resto de la audiencia, por lo que se propone diseñar una solución a medida para estos dos palcos en otra sección de este mismo capítulo.

Tal y como ha ocurrido en la predicción de la Figura 4.9, una predicción de una octava a 4 kHz se considera, en general, representativa para obtener la cobertura en las altas frecuencias. Del mismo modo, para las frecuencias medias, se considera representativa la predicción de una octava a 250Hz. Para el caso de las bajas frecuencias mediante el empleo de subgraves, las predicciones de 1/3 de octava desde los 100 Hz hasta las frecuencias más bajas son eficaces para poder analizar la interacción entre altavoces y la cobertura ofrecida [20]. Esta recomendación ofrecida por el fabricante, será tomada en cuenta para las predicciones durante el desarrollo del trabajo.

4.4 Control de bajas frecuencias

El sistema line array compuesto por altavoces modelo LINA™, debido a la naturaleza de este tipo de altavoz, no trabajará en el rango de frecuencias inferiores a los 65Hz, este hecho imposibilita la reproducción de las bajas frecuencias. Esto hace que se deban incluir en el diseño otro tipo de recintos acústicos que extiendan la respuesta en frecuencia del sistema para el rango de las bajas frecuencias.

LINA™ está diseñado para trabajar en modo nativo con los modelos de subgraves 750-LFC y 900-LFC de Meyer Sound®, este último, para casos en los que se necesite un SPL superior. Se trata de unos subgraves que se integran fácilmente en sistemas que cuentan con elementos LINA™ y que pueden ser volados [19].

4.4.1 Configuración de subgraves 750-LFC en cardioide volados en L y R

Como se ha mencionado anteriormente, la configuración propuesta por el fabricante es complementar los line arrays de LINA™ con subgraves de los modelos 750-LFC o 900-LFC si fuese necesario más SPL [19]. La disposición de los subgraves podría ser en *Groundstack*, es decir, estacados sobre el suelo; otra opción sería incluirlos en el mismo sistema array ubicándolos encima de los elementos LINA™ (esto sería posible usando el mismo *Multipurpose Grid*). Por último, también podrían generarse dos array independientes de subgraves, en L y R. Independientemente de la configuración que se vaya adoptar, en total serían necesarios unos seis subgraves modelo 750-LFC para guardar una relación aproximada de un subgrave por cada dos altavoces LINA™ [21].

Los subgraves 750-LFC de Meyer Sound® cuentan con un altavoz de 15 pulgadas y un amplificador clase D de 3100 W. Su rango de respuesta en frecuencia va desde los 37Hz hasta los 110Hz, con un THD inferior al 0,02% y un nivel SPL de pico de 130,5 dB [22].



Figura 4.10 750-LFC de Meyer Sound® [22].

Lo ideal sería que todos los subgraves se encontrasen juntos y en el frontal del escenario, esto generaría un mayor nivel SPL y una cobertura más homogénea en todo el recinto. Sin embargo, el nivel sería muy elevado (podría resultar molesto) para las filas más próximas al bloque de subgraves. Además, esta configuración resulta complicada de implementar debido a que el espacio del pasillo en el frente del escenario es reducido.

La segunda opción propuesta podría ser implementable, pero se prefiere descartarla debido a que la longitud del line array sería considerable y la presencia visual del sistema de audio sería palpable. Se pretende que el diseño del sistema de audio cubra todas las necesidades presentadas, pero también en la medida de lo posible, se intenta preservar el impacto visual del espectador sobre la escena.

4.4.1.1 Descripción del arreglo

La última opción presentada resulta ser la más interesante para el auditorio sobre el que se está realizando el diseño. Se considera implementar un arreglo en line array de 3 unidades de subgraves 750-LFC por lado, en L y R. La disposición de los subgraves sería tras el array de LINA™, de esta manera quedarían ocultos tras él y se disimularían más. Además, la pérdida de nivel por encontrarse tras el array sería completamente despreciable.

Los subgraves irían volados en line array utilizando el mismo accesorio *MG-MINA/LINA/750-LFC Multipurpose Grid* que LINA™ y apilados uno sobre otro. Esto haría que cada array de subgraves actuase en su conjunto como una fuente omnidireccional. Sin embargo, con el objetivo de reducir las emisiones en direcciones indeseadas y evitar en cierto modo la contaminación acústica en aquellas zonas donde no se desea que exista emisión de sonido, se va a optar por hacer un arreglo con patrón polar cardioide con cada array de subgraves. Este arreglo se centraría en generar mayor nivel SPL (generando interferencias constructivas) frente a cada array de subgraves y trataría de generar cancelaciones de nivel (mediante interferencias destructivas) en las zonas traseras a los mismos.

Para tratar de generar un arreglo en cardioide con tres elementos 750-LFC volados en line array, Meyer Sound® propone apilarlos verticalmente pero haciendo que la unidad que se encuentra en el medio quede orientada en la dirección opuesta (obsérvese la Figura 4.11). Seguidamente, hay que aplicar un retardo de 2,9 ms al subgrave del medio respecto al resto de unidades que se encuentran orientadas hacia delante. Aunque el retraso aplicado a dicho subgrave sea de 2,9 ms, al realizar el diseño, MAPP 3D avisará de que el delay a aplicar debe ser de 2,5 ms. Para la predicción sobre MAPP 3D, se debe usar un retraso de 2,5 ms aunque una vez instalado el sistema, al realizar mediciones “in situ” se observaría que verdaderamente el retraso a aplicar es de 2,9 ms. Este hecho se debe a que MAPP 3D calcula el retraso mediante la diferencia de distancia lineal que hay entre los elementos, mientras que realmente los subgraves actúan como una fuente omnidireccional con un frente de ondas esférico.

Por último, si se aplica dicho retraso al subgrave con la orientación cambiada, se generará una interferencia constructiva o suma acústica en la parte trasera. Para obtener la interferencia destructiva o cancelación acústica deseada en la parte trasera del arreglo, se debe invertir la polaridad del subgrave con orientación trasera [21].

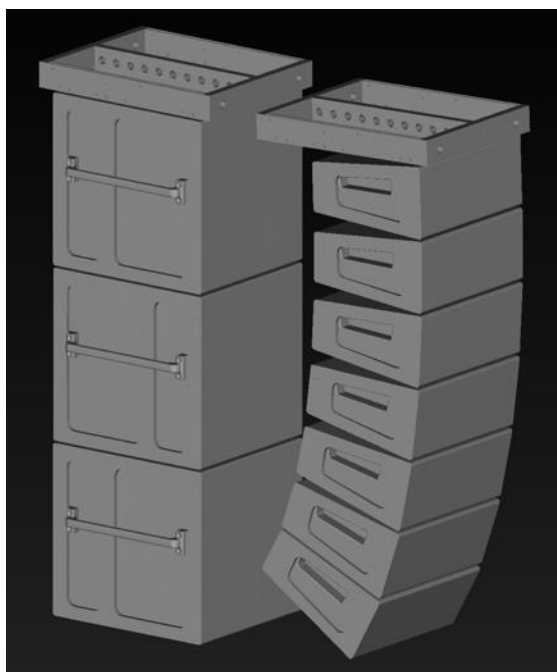


Figura 4.11 Disposición del line array LINA™ y el arreglo en cardioide volado de 750-LFC en MAPP 3D.

4.4.1.2 Evaluación de la predicción

La Figura 4.12 muestra la predicción del arreglo generado con los subgraves 750-LFC en cardioide para una frecuencia de 63Hz. Como puede observarse, el nivel SPL tiende a caer a una razón de 6 dB cada vez que se dobla la distancia, esto es algo completamente normal, por eso se observa la diferencia de nivel que existe entre las primeras y las últimas filas; aunque al tener los subgraves volados en line array este efecto consigue suavizarse.

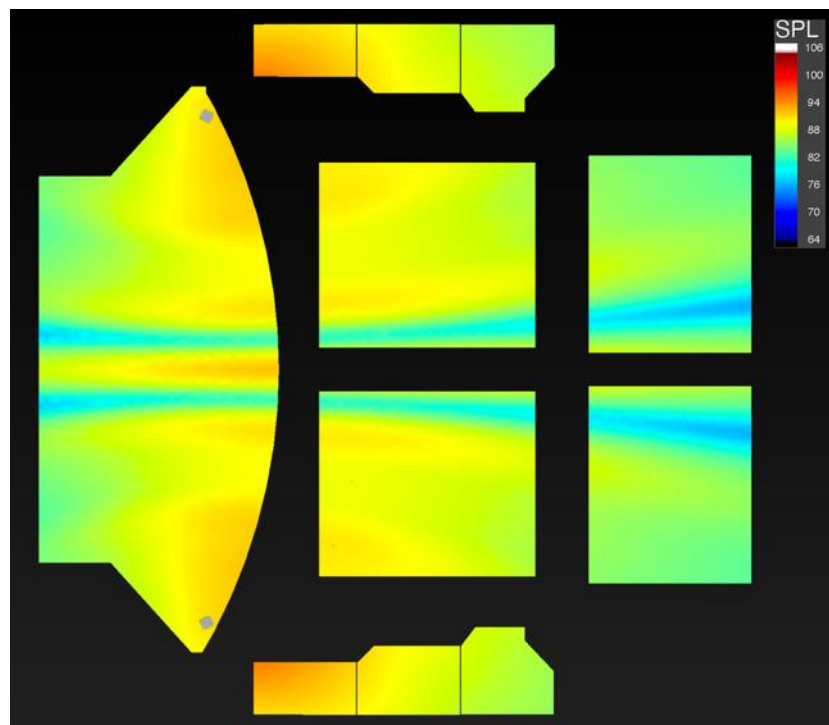


Figura 4.12 Predicción a 63Hz en MAPP 3D del arreglo cardioide con 750-LFC volados en L y R.

Para esta predicción, también se ha incluido la superficie del escenario con el objetivo de comprobar cuál es el nivel SPL generado por el sistema en el escenario. Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo de este trabajo se encuentra en trabajar por y para la zona de butacas, aunque también se pretende tener en cuenta la eficiencia en el comportamiento del sistema, evitando en la medida de lo posible que haya niveles SPL elevados en zonas donde no debería. En este caso, la presencia de los subgraves notable en la mayoría de la superficie del escenario, especialmente, en las zonas cercanas a ambos arrays.

Además, es posible observar como se generan dos pasillos de cancelación que recorren el patio de butacas de arriba a abajo como consecuencia de las interferencias destructivas generadas por la separación existente entre ambos arrays de subgraves. La diferencia de nivel SPL entre los puntos de suma acústica y los pasillos de cancelación es mayor a 6 dB por lo que podría percibirse por el espectador.

Aunque el porcentaje de personas que se encontraría ubicado en los pasillos de cancelación de subgraves no es muy elevado en comparación con el total, se propone diseñar una alternativa para la configuración de los subgraves que permita obtener una cobertura más uniforme en todo el recinto. Sin duda alguna, las pérdidas por distancia son inevitables, pero las pérdidas de nivel derivadas por la interacción del equipo deben examinarse y evaluar si existe alguna alternativa implementable. Se pretende evitar, en la medida de lo posible, que exista una gran disparidad de niveles entre las personas ubicadas en zonas de cancelación y las ubicadas en zonas de suma acústica.

En el siguiente subapartado se evaluará una nueva propuesta de configuración para los subgraves, con el objetivo de conseguir una cobertura más uniforme en la zona de la audiencia. Además, como se ha realizado anteriormente, se intentará tomar en cuenta la energía que, de forma indeseada, ha sido emitida hacia el escenario.

4.4.2 Configuración de subgraves 900-LFC en cardioide volados en línea

La nueva propuesta para la configuración de los subgraves parte de la idea de evitar pasillos de cancelación en la zona de la audiencia, además de reducir el nivel en las frecuencias relativas a los subgraves en el escenario. Se propone situar los subgraves en el centro del eje generado por los line arrays LINA™, pero en vez de situarlos en el suelo obstaculizando el paso, se propone volarlos suspendidos desde el techo, tal y como se propuso en la opción descrita en el subapartado anterior.

En total, serían dos arrays volados de tres unidades cada array de subgraves y quedarían situados a la altura del cartel del logo de la Escuela, entre la pared y los trusses de iluminación frontal (obsérvese en la Figura 3.3). Esta opción presenta un inconveniente, debido a que la longitud de los arrays obstaculizaría la visión ya que la distancia de la pared superior del frontal del escenario es limitada. Para reducir la longitud del array de subgraves, en lugar de utilizar tres unidades de 750-LFC por array, se utilizarán 2 unidades de 900-LFC.

El modelo 900-LFC (obsérvese la Figura 4.13) es igualmente compatible con LINA™. Aunque ambos modelos ofrecen la misma potencia de salida de 3100 W, el modelo 900-LFC ofrece un nivel de SPL superior, siendo este de 133 dB. Gracias a su cono de 18 pulgadas, cuenta con una respuesta en frecuencia que va desde los 32 Hz hasta los 115 Hz y con una THD inferior al 0,02% [23].



Figura 4.13 900-LFC de Meyer Sound® [23].

En total, la configuración de subgraves constaría de dos arrays volados con dos unidades del modelo 900-LFC cada uno y estarían centrados en el frontal del escenario, entre la pared frontal y los trusses de iluminación. Ahora, la longitud total de cada array es inferior a la anterior, por lo que en ningún caso se interfiere en la visión del espectador. Para volar los 900-LFC es necesario utilizar el *MG-LEOPARD/900 Multipurpose Grid* [23].

4.4.2.1 Descripción del arreglo

Persiguiendo el mismo objetivo que en el apartado anterior, se pretende generar un arreglo en cardioide que permita controlar la directividad en bajas frecuencias del arreglo. Se busca generar una interferencia destructiva en la parte trasera del arreglo, es decir, en el escenario; mientras se trata de mantener el nivel en el frente. A diferencia del caso anterior, ahora solo se cuentan con dos subgraves por array, por lo que no se puede generar un patrón direccional cardioide de la misma manera que en la configuración anterior que rotaba, retrasaba e invertía la polaridad del subgrave del medio.

Esta nueva configuración de subgraves se va a llevar a cabo utilizando un arreglo en línea de los dos arrays de subgraves. Esta técnica consiste en situar un array delante del otro (de manera que el espectador solo vería uno de ellos, el otro se oculta tras el primero) separados por una distancia igual a $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda de la frecuencia de trabajo [2]. Seguidamente se debe hacer un ajuste de nivel en el punto donde se quiera generar la interferencia destructiva, reduciendo levemente el nivel del array de subgraves más próximo al punto de cancelación deseado. De esta forma ambas fuentes llegarán con la misma magnitud al punto de trabajo. Tras el ajuste de niveles entre ambos arrays, el procedimiento a realizar es el mismo que para el arreglo en cardioide del subapartado anterior. Bastaría con aplicar un retraso al array de subgraves trasero para que ambos frentes de onda solapen y generen una suma acústica. Por último, se invierte la polaridad del array trasero para convertir la suma acústica generada en una interferencia destructiva.

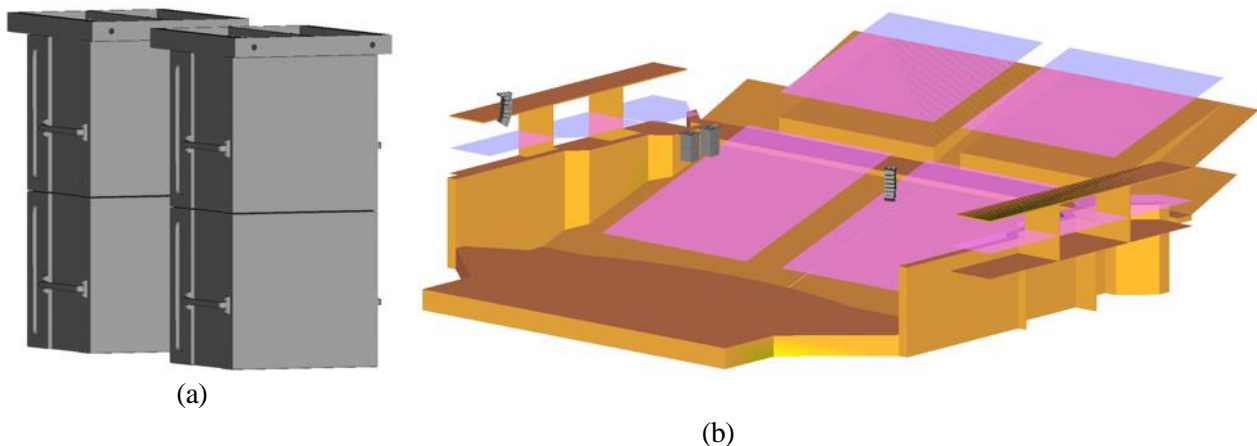


Figura 4.14 (a) Arreglo en línea con 900-LFC. (b) Disposición de LINATA™ y los 900-LFC en MAPP 3D.

Para poder comprobar la efectividad del ajuste sobre MAPP 3D, es necesario introducir un micrófono de medición sobre el plano de predicción. Como lo que se pretende es generar una suma acústica mediante los dos arrays de subgraves para después invertir la polaridad de uno de ellos y generar una cancelación en el escenario, se va a situar el micrófono de medición sobre el escenario. La posición del micrófono define el punto de trabajo y por tanto, el punto del escenario donde la cancelación será más efectiva. Este se encontrará sobre el centro del escenario a una altura de 1,2 metros sobre el mismo, que se corresponde con el *offset* del plano de predicción creado para el escenario.

Como los subgraves 900-LFC trabajan en un rango de frecuencias desde los 32 Hz hasta los 115 Hz, se va a considerar como frecuencia de trabajo 60 Hz, debido a que esta frecuencia podría situarse sobre el punto central de la respuesta en magnitud de los subgraves. La frecuencia de 60 Hz tiene una longitud de onda de 5,73 metros, por lo que $\frac{1}{4}$ de su longitud de onda son 1,43 metros; que es la distancia de separación que tomarán ambos arrays de subgraves. A continuación, observando la gráfica de la fase de ambos arrays, se ha de aplicar un retraso en el más próximo al micrófono. Son necesarios 2,45ms de retraso para conseguir un solape total de las fases en torno a la frecuencia de 60 Hz. Finalmente, solo será necesario invertir la polaridad del array trasero (el mismo que ha sido retrasado), para obtener completamente la interferencia destructiva deseada.

4.4.2.2 Evaluación de la predicción

La Figura 4.15 muestra el resultado de la predicción realizada sobre las distintas audiencias del auditorio y el escenario. La predicción se ha realizado sobre la banda de octava de los 63Hz y solo teniendo en cuenta el arreglo de cardioide en línea generado con el modelo 900-LFC. A modo de comparativa, puede consultarse la predicción realizada con el arreglo anterior usando el modelo 750-LFC y dispuestos en L y R; relativa a la Figura 4.12.

Según se obtiene en la predicción realizada en la Figura 4.15, puede observarse como la distribución de la cobertura generada por el arreglo de subgraves es mucho más uniforme. Por cercanía, el nivel es superior en las primeras filas, pero va decayendo 6 dB según se va duplicando la distancia al arreglo. Con este arreglo, se ha conseguido el objetivo marcado debido a la problemática del arreglo anterior, que es eliminar los pasillos de cancelación generados por la distancia de separación entre las fuentes. Además, se consigue que el nivel en la zona de la audiencia alta sea algo superior respecto al arreglo anterior.

Respecto a la distribución de energía sobre el escenario, puede observarse que la cancelación generada en la parte trasera por el arreglo en cardioide ha sido efectiva, obteniendo una diferencia de nivel entre la parte frontal del arreglo y la parte trasera de más de 18 dB; siendo bastante superior en la línea que cruza el escenario de izquierda a derecha. Pese a que es evidente que la cancelación obtenida en la parte trasera del arreglo es bastante efectiva, la cantidad de nivel SPL obtenida en la parte delantera del arreglo podría ser ligeramente superior si todos los subgraves estuviesen completamente contiguos unos con otros. Este pequeño coste de eficiencia puede contrarrestarse con la gran ventaja obtenida que ha sido generar dicha interferencia destructiva en la zona trasera del arreglo para las bajas frecuencias.

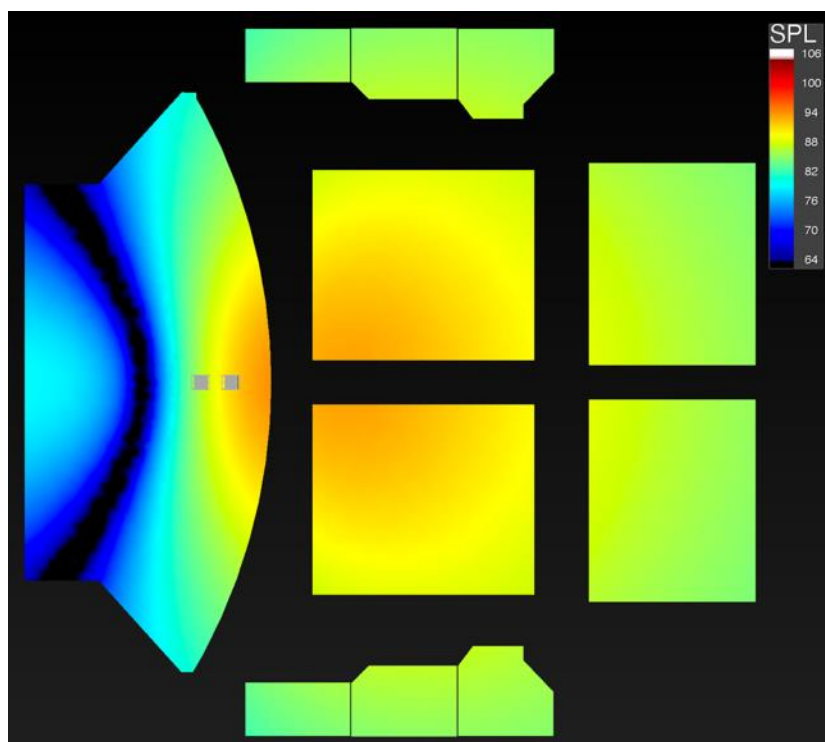


Figura 4.15 Predicción a 63Hz del arreglo de cardioide en línea con 900-LFC en MAPP 3D.

Este arreglo de cardioide en línea que se acaba de describir se le atribuye históricamente a George Ausberger [2] y representa una solución bastante adecuada para el auditorio de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, debido a la manera en que facilita la distribución de la cobertura para las bajas frecuencias a lo largo del mismo. Por ello, de las dos configuraciones de subgraves que han sido presentadas en este capítulo, se considera esta última como la más adecuada para su implementación en el diseño del sistema de sonido sobre el que se está trabajando.

4.5 Refuerzo con Front fill

En el apartado 3.3 de este capítulo, se describen cuáles fueron las decisiones que se tomaron para implementar el sistema principal de sonido relativo a las medias y altas frecuencias. Dicho sistema, consta de siete unidades LINA™ por cada lado, voladas en estructura de line array. Tras la predicción realizada (obsérvese la Figura 4.9), se puede observar como las primeras filas cuentan con un nivel SPL inferior al resto de la audiencia del patio de butacas. Esto es debido a la cobertura horizontal ofrecida por los line arrays como consecuencia de su ubicación.

Para poder obtener mayor nivel SPL en las primeras filas, es necesario introducir una serie de fuentes de puntuales de refuerzo que serán dispuestas a lo largo de la boca del escenario. Este tipo de sistemas de refuerzo para las primeras filas de audiencia es conocido como Front fill y su objetivo es ofrecer cobertura en aquellas zonas de la audiencia donde el sistema principal no lo permita.

Por la cercanía del escenario a las primeras filas, se necesita un altavoz que cuente con una amplia cobertura horizontal. Se propone utilizar el modelo UP Junior-XP de Meyer Sound®, gracias a que cuenta con un motor de compresión para las altas frecuencias de 2 pulgadas, cuyo difusor se puede rotar, alternando entre 80°x50° y 50°x80°, según se requiera. El altavoz se va a situar horizontalmente a pie de escenario, por tanto, el difusor debe estar dispuesto en 50°x80° para poder ofrecer una cobertura horizontal de 80° sobre las primeras filas de audiencia. El modelo UP Junior-XP, además, cuenta con un cono de 8 pulgadas y con un amplificador clase D 580 W, ofreciendo un nivel SPL pico de 121,5 dB [24].



Figura 4.16 UP Junior-XP de Meyer Sound® [24].

Como se puede observar en la Figura 4.17, han sido necesarias cuatro fuentes puntuales UP Junior-XP ($50^{\circ} \times 80^{\circ}$) para obtener la cobertura en las primeras filas necesaria según la predicción de la Figura 4.9. Las cajas han sido dispuestas siguiendo la angulación ofrecida por el escenario e inclinadas respecto al eje Y 10° . La Figura 4.17 muestra solo la predicción del arreglo del Front fill a 4kHz.

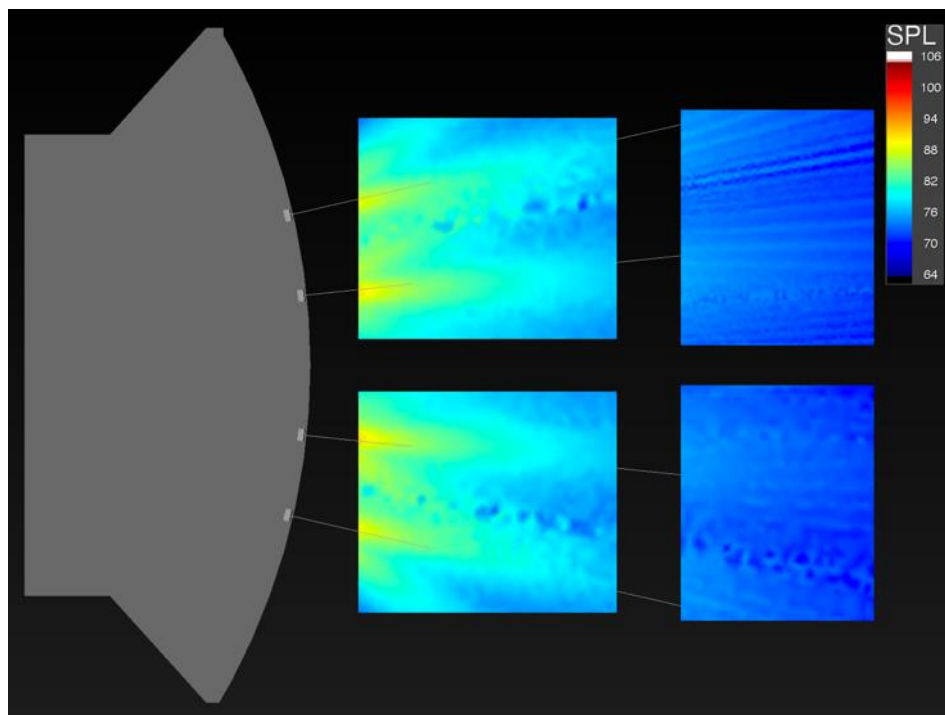


Figura 4.17 Predicción a 4kHz en MAPP 3D del arreglo de Front fill con UP Junior-XP ($50^{\circ} \times 80^{\circ}$).

La Figura 4.18 muestra el resultado global de la predicción obtenida en MAPP 3D del sistema principal de line array compuesto por LINA™ y el arreglo en Front fill compuesto por las cuatro UP Junior-XP. Realizando una comparación con la Figura 4.9, se puede apreciar como el nivel SPL se ha incrementado para las primeras filas de la grada baja, haciendo que la cobertura sea más homogénea en todo el patio de butacas.

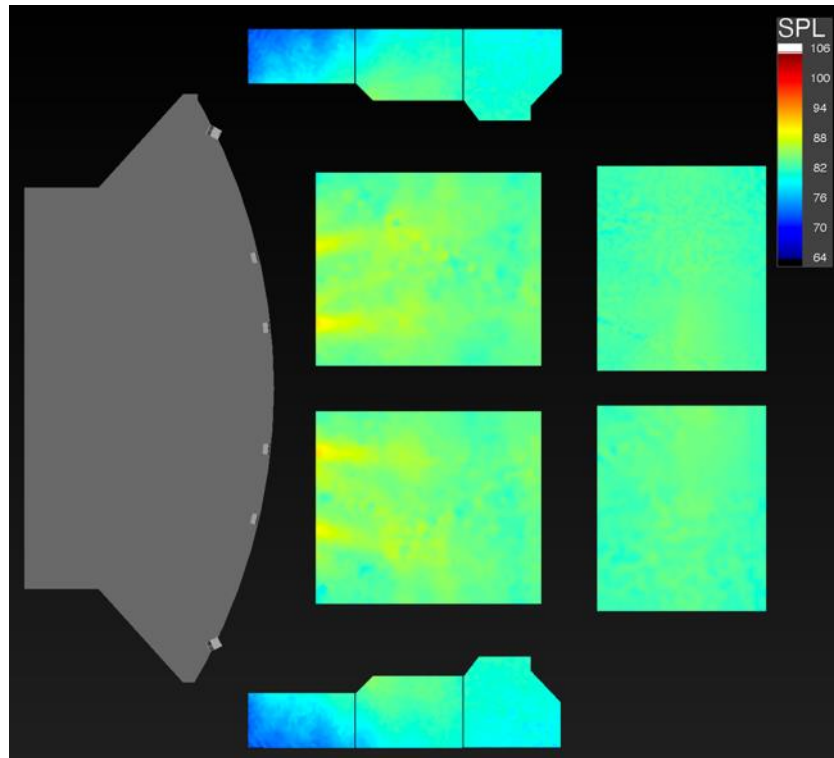


Figura 4.18 Predicción a 4kHz en MAPP 3D del line array LINA™ y el Front fill con UP Junior-XP.

4.6 Refuerzo en palco

Una vez ha sido obtenida la cobertura necesaria en todo el patio de butacas, tanto para las medias y altas frecuencias (line array más Front fill), como para las bajas frecuencias (con el arreglo de subgraves), ahora solo queda centrar el estudio en la cobertura obtenida en los palcos.

En la predicción generada en la Figura 4.18, se puede observar como en los dos palcos más lejanos al escenario se tiene un nivel SPL similar al del resto de butacas. Este nivel, es generado principalmente por la cobertura horizontal que ofrece el line array LINA™, debido a su ubicación respecto a los palcos. Sin embargo, en los palcos más cercanos al escenario se genera un efecto sombra, es decir, el line array más próximo no ofrece la cobertura necesaria debido a la rotación que sufre el mismo con dirección al patio de butacas. Esta diferencia de nivel entre los palcos más cercanos al escenario y los más alejados, debe corregirse introduciendo una fuente puntual de refuerzo para la zona donde el nivel SPL decae en más de 6 dB respecto al resto.

La fuente puntual necesitada para los primeros palcos debe ser de un tamaño reducido para no obstaculizar la visión de la audiencia. Tendría que ir anclada al techo del palco y alineada respecto al line array más cercano para que los espectadores situen la fuente de sonido procedente de la misma dirección. No es necesario que cuente con mucha potencia debido a la cercanía de la audiencia al altavoz.



Figura 4.19 UP-4XP de Meyer Sound® [25].

Se propone introducir dos unidades del modelo UP-4XP de Meyer Sound® (obsérvese la Figura 4.19) en el sistema de sonido, uno por cada palco. Se trata de un altavoz ultra compacto y de pequeñas dimensiones que cuenta con un amplificador clase D de tres vías de 500W. Incluye un tweeter metálico para las altas frecuencias de 1 pulgada y dos altavoces de 4 pulgadas para el rango de las bajas frecuencias, ofreciendo un nivel SPL de pico de 111 dB. Su respuesta en frecuencia va desde los 77Hz hasta los 17,5kHz y ofrece una cobertura bastante adecuada para el palco, siendo esta de 100°x100° [25].

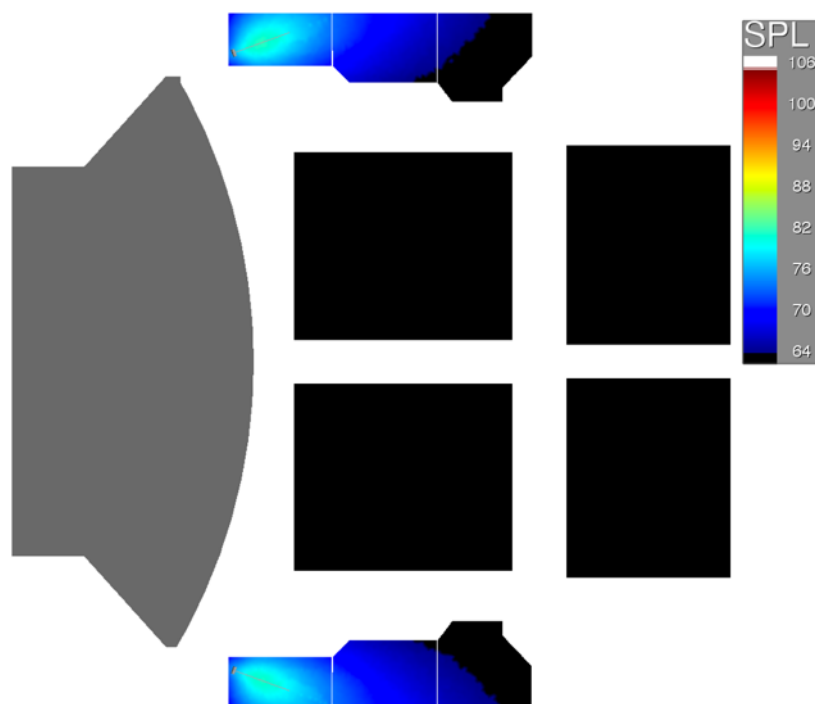


Figura 4.20 Predicción a 4kHz en MAPP 3D de los refuerzos con UP-4XP de los palcos.

En la Figura 4.20 puede observarse la cobertura ofrecida por los altavoces UP-4XP en los palcos cercanos al escenario, que eran los que sufrían una pérdida de nivel respecto al resto; según se pudo analizar en la predicción de la Figura 4.18.

En la Figura 4.21 se obtiene la predicción para las altas frecuencias (4kHz) del sistema al completo, este incluye: los dos line arrays dispuestos en L y R con el modelo LINA™, el Front fill de refuerzo para las primeras filas de la grada baja y los elementos de refuerzo para los palcos más cercanos al escenario.

Puede observarse como el diseño realizado cumple el objetivo de ofrecer una cobertura con un SPL uniforme en gran parte de la superficie de audiencia. Naturalmente, existirán zonas donde haya cierta atenuación de nivel respecto a otras, pero dicha atenuación nunca superará los 6 dB respecto al resto. La predicción también cuenta con el arreglo lineal en cardioide realizado con los subgraves 900-LFC, pero estos no trabajan en las altas frecuencias, por lo que no se puede mostrar su comportamiento en esta predicción. La predicción para las bajas frecuencias puede obtenerse en la Figura 4.15.

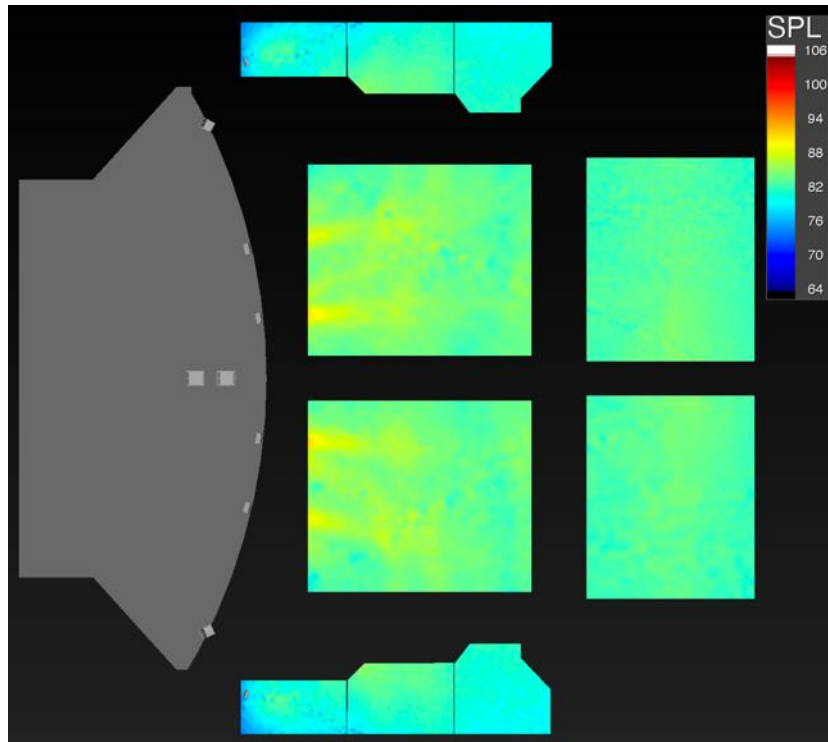


Figura 4.21 Predicción a 4kHz en MAPP 3D de los line arrays, Front fill y refuerzos en los palcos.

5 OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE AUDIO

Si comparas el trabajo de diagnóstico de los profesionales del audio, vídeo y luces con el de los profesionales médicos, los técnicos de vídeo y luces serían los doctores y los técnicos de audio serían los veterinarios. Se necesita mucha más habilidad cuando el sujeto no puede decirte qué va mal.

TC Furlong.

En este capítulo se va a analizar la segunda parte del proceso llevado a cabo para implementar un sistema de audio diseñado para un recinto; se trata del proceso de la optimización del sistema. El sistema de audio diseñado en el capítulo anterior ya reúne las condiciones necesarias para proceder con su instalación, sin embargo, todavía no está listo para la operación en su conjunto. Cabe esperar que sea necesario realizar un ajuste más fino del sistema, cuestionando si el diseño y la instalación se han llevado a cabo cumpliendo con las especificaciones planteadas [2].

La parte relativa a la optimización del sistema, está enfocada a obtener un mejor rendimiento del sistema en su conjunto, siendo capaz de sacar el máximo provecho a los recursos que se están utilizando. Además, uno de los principales objetivos de la optimización, es conseguir una buena interacción entre los equipos instalados, buscando obtener interferencias constructivas en aquellos puntos donde varios sistemas confluyan y puedan generar cancelaciones de nivel debido a la diferencia de distancia entre fuentes. Esto se consigue ajustando en fase los distintos equipos en un punto en concreto.

El proceso de optimización debería realizarse *in situ*, una vez el sistema haya sido instalado, pero gracias a las herramientas con las que cuenta MAPP 3D se puede llevar a cabo dicho proceso de manera previa. Esto permite simular el comportamiento del sistema en cualquier punto del recinto, ayudando a prevenir cualquier posible cambio del diseño antes de su instalación.

5.1 Herramientas de medición y ajuste

Para realizar el proceso de optimización, será necesario el uso de una serie de herramientas de medición que permitan examinar el sistema en el punto en que se desee. De forma imprescindible, se debe contar con un micrófono de medición omnidireccional y un analizador de espectro que trabaje con la Transformada de Fourier [2].

MAPP 3D permite insertar tantos micrófonos de medición como se desee en cualquier punto del modelo de simulación creado. Además, en la pestaña *Measurement View* se tiene acceso a la sección *Frequency & IFFT Response (SIM)* que simula el sistema de análisis de audio SIM[®] 3 de Meyer Sound[®].

SIM[®] 3 es un analizador acústico de doble canal en el que la señal de excitación del sistema puede ser completamente independiente del sistema de medición. SIM[®] 3 utiliza algoritmos más rápidos y de alta resolución que reducen considerablemente los errores y consiguen más precisión que las técnicas convencionales de FFT (Fast Fourier Transform, Transformada Rápida de Fourier) duales. De esta forma, se proporciona la información necesaria para verificar los componentes de un sistema de audio, incluyendo la respuesta en frecuencia y fase, polaridad, distorsión, rango dinámico o la respuesta al impulso mediante la IFFT (Inverse Fast Fourier Transform, Transformada Inversa de Fourier) [26].

Desde *Measurement View* también se puede acceder a la pestaña de *Headroom*, donde es posible obtener de forma gráfica la respuesta en frecuencia (de pico o de RMS) de cada uno de los micrófonos de medición insertados. Además, MAPP 3D muestra el nivel de Headroom Δ dB disponible para cada uno de los altavoces insertados.

El indicador de nivel de Headroom Δ dB, muestra la diferencia de nivel que hay entre la señal de excitación de entrada del altavoz simulada por MAPP 3D (en este caso sería Ruido Rosa a 0 dB(V) de ganancia de entrada) y el máximo nivel disponible en el altavoz para permanecer en un estado de linealidad. Si la Δ dB tiene un valor positivo, quiere decir que aún se disponen de esos decibelios como margen hasta llegar al máximo nivel ofrecido por el altavoz. Si Δ dB es negativa, se habrá excedido en los decibelios indicados el estado de linealidad del altavoz. La linealidad de un altavoz hace referencia a que por cada dB que se incrementa su señal de excitación, también aumentará de forma lineal el nivel medido por el micrófono de medición. Cuando no hay linealidad (tras haber excedido el Headroom Δ dB disponible), cabe esperar cierta compresión en el nivel de salida del altavoz [27].

5.2 Selección del Delay Integration

El Delay Integration es una herramienta de alineamiento rápido ofrecida por Meyer Sound® para los procesadores Galileo GALAXY, que permite combinar altavoces de distintas series haciendo coincidir fácilmente sus fases para garantizar una suma coherente entre ellos.

Una vez se ha decidido cuáles serán todos los altavoces que compondrán el sistema de sonido, se debe asignar a cada altavoz o conjunto de altavoces una salida del procesador de audio, según su funcionalidad, ubicación o posible configuración.

Siguiendo las recomendaciones del fabricante Meyer Sound®, a cada canal de salida del procesador se le debe asignar el *preset* de Delay Integration según el modelo de altavoz que esté conectado a cada salida. Dentro del Delay Integration correspondiente que ofrece cada altavoz, se debe seleccionar el ajuste corrección de fase para la frecuencia “*pc-xx*”, eligiendo siempre los valores de “*xx*” más bajos ofrecidos de entre todos los modelos insertados.

Tras observar las correcciones de fase “*pc-xx*” ofrecidas por cada uno de los *presets* se concluye que el más bajo disponible es el *pc-125*, correspondiente al modelo de altavoz UP-JuniorXP utilizado en el Front fill, por tanto todos utilizarán el Delay Integration: “*modeloAltavoz pc-125*”.

5.3 Alineamiento del sistema principal: Line arrays LINA™ y subgraves 900-LFC

En este apartado se va a realizar el ajuste de los elementos que componen el sistema principal de sonido, estos son los arrays compuestos por LINA™ y el arreglo en cardioide de subgraves volados 900-LFC.

En primer lugar, habría que decidir la posición en la que se va a situar el micrófono de medición, pues será el lugar donde la interacción entre ambos sistemas sea óptima. El micrófono se ha situado en el centro de la zona del patio de butacas, concretamente en la zona superior de la grada baja, sobre el eje de simetría del auditorio. En este lugar, el micrófono se encuentra a la misma distancia de cada line array y en línea respecto a los subgraves, siendo sus coordenadas $\{x=13,7\text{m}; y=0\text{m}; z=3,7\text{m}\}$.

Para facilitar posibles modificaciones sobre los line arrays LINA™, se va emplear una salida del procesador para los 4 altavoces superiores y otra para los 3 inferiores que componen cada array. Además de diferenciar entre el array izquierdo y derecho, esto hará que se usen un total de 4 salidas del procesador para los line arrays.

Previo a continuar con el ajuste, se ha comprobado el Headroom Δ dB disponible para los elementos LINA™, así como para los subgraves 900-LFC y se ha subido su ganancia en sus correspondientes salidas del procesador en +3 dB y +9 dB, respectivamente. Esto ofrecerá un nivel SPL superior en la zona de la audiencia, gracias al margen de Headroom Δ dB con el que se contaba.

Para proceder con el ajuste de los line arrays de LINA™ con los subgraves 900-LFC, primeramente, se ha analizado la respuesta en frecuencia y fase obtenida por los line arrays y se ha hecho *Auto* en la parte de *Propagation Delay* para retrasar la señal de referencia generada para que se sincronice con la señal medida por el micrófono. De esta manera, ambas llegarán a “tiempo 0”. Esto diferencia temporalmente los line arrays respecto de otras fuentes sonoras, permitiendo así, obtener la diferencia de distancia (en tiempo de propagación) entre las distintas fuentes para calcular el retraso a insertar en ellas y hacer que lleguen al mismo tiempo. El tiempo de propagación del sonido calculado varía según la atenuación ofrecida por el aire en base a las condiciones de temperatura (en °C), presión atmosférica (en mb) y humedad relativa (en tanto por ciento) que el usuario puede insertar.

En la Figura 5.1 puede observarse la superposición en una misma gráfica de la respuesta en frecuencia obtenida en distintas mediciones que han sido realizadas durante el proceso de ajuste del sistema principal. En primer lugar, se capturó por separado la respuesta en frecuencia de los dos line arrays LINA™ (color cian) y el arreglo de subgraves 900-LFC (color marrón); pudiendo comprobar cual es su rango de frecuencias de trabajo y observar que el punto de cruce de frecuencias entre ambos sistemas está aproximadamente en los 80Hz.

Continuando con las mediciones, se ha medido la respuesta en frecuencia obtenida al operar conjuntamente los line arrays y los subgraves (color rojo). Esto va a permitir comparar la respuesta en frecuencia del sistema antes del ajuste y después del mismo. Puede observarse como al interaccionar ambos sistemas, se obtienen en la medición una serie de cambios abruptos en la respuesta en frecuencia. Concretamente, en forma de interferencia constructiva en torno a los 75Hz, así como una notable cancelación en los 105Hz.

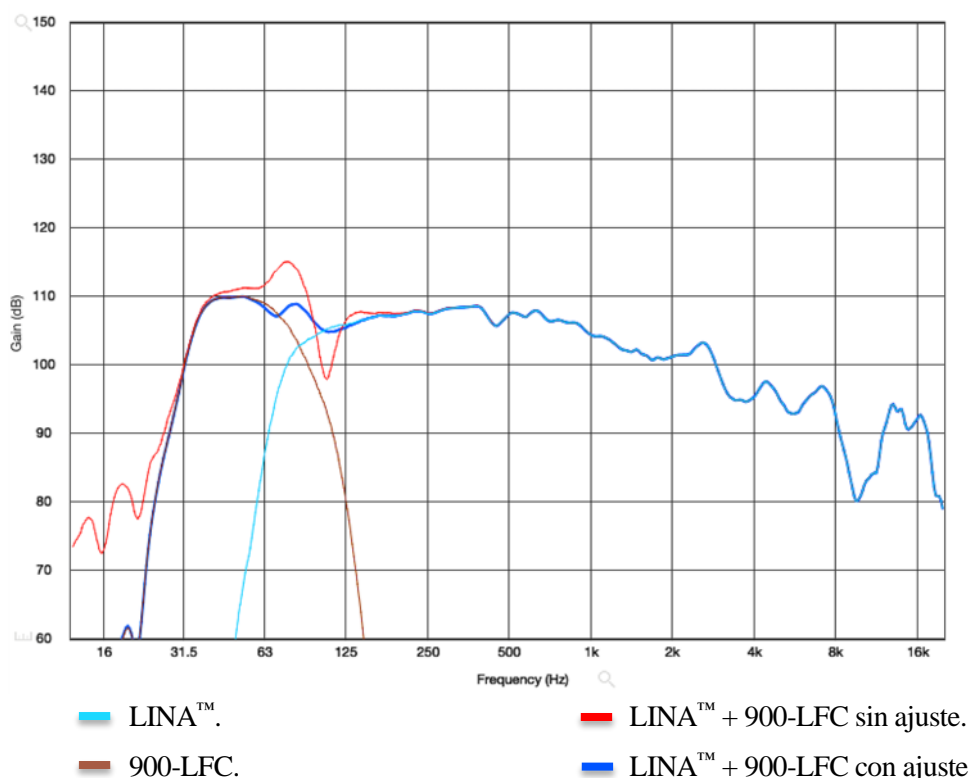


Figura 5.1 Respuesta en frecuencia de LINA™, 900-LFC y comparativa del ajuste de ambos.

El propósito ahora es realizar el procesamiento necesario para hacer que en la zona de cruce de frecuencias entre ambos sistemas exista una transición más suave y natural, persiguiendo el objetivo de conseguir una respuesta lo más plana posible del sistema de audio en su conjunto.

Alcanzado este punto, aún sigue siendo necesario continuar con el procesado del sistema debido a que la respuesta en frecuencia continua siendo poco lineal en la zona de cruce de los subgraves y los line arrays. Una forma de suavizar la interferencia constructiva tan aguda presentada anteriormente, sería generar una cancelación suave y de forma controlada en la zona cruce de frecuencias de ambos sistemas.

Como puede observarse en la Figura 5.1, la frecuencia de cruce se corresponde con los 80Hz, debido a que es el punto en que la respuesta en frecuencia de ambos sistemas confluyen (cruce entre los trazos de color marrón y cian). Esta cancelación propuesta se consigue aplicando un filtro de paso de bajas frecuencias (LPF, Low Pass Filter) para la frecuencia de cruce (80Hz) en los subgraves, además de insertar en los line arrays un filtro de paso de altas frecuencias (HPF, High Pass Filter) para la misma frecuencia [2].

En este caso, para los subgraves se ha aplicado un filtro Low Pass de tipo Linkwitz-Riley de 24dB/octava (obsérvese la Figura 5.3) que retrasa la fase para las frecuencias cercanas e inferiores a los 80Hz y adelanta la fase para las frecuencias inmediatamente superiores. Para los line arrays, se ha aplicado el mismo tipo de filtro con la misma frecuencia, pero de tipo High Pass.

Haber insertado dichos filtros High Pass y Low Pass en los subgraves y en los line arrays, obliga a que en se inserten de la misma manera y con las mismas características los mismos filtros en el resto de altavoces con los que cuenta el diseño del auditorio. Esto hará que todos ellos sufran las mismas modificaciones en su fase, facilitando la interacción entre ellos y simplificando el ajuste entre los distintos elementos. El resto de salidas del procesador que deben contar con el filtro serían las relativas al refuerzo con Front fill y al refuerzo en los palcos.

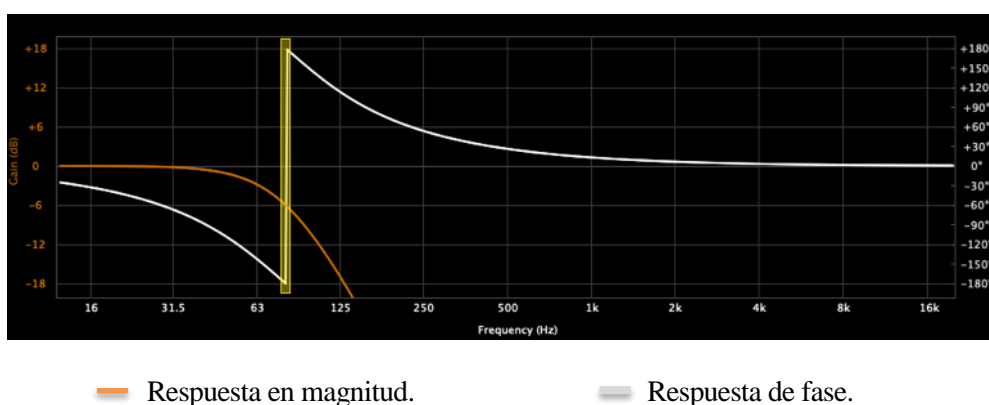


Figura 5.3 Filtro Low Pass (Linkwitz-Riley 24dB/oct) a 80Hz del Galileo GALAXY.

El resultado de haber retrasado el conjunto de subgraves en 6ms y haber introducido los filtros HPF y LPF es bastante satisfactorio debido a que suaviza en gran medida la respuesta en frecuencia obtenida inicialmente antes del ajuste (obsérvese la Figura 5.1 en su trazo color rojo). Sin embargo, la interferencia destructiva que se ha generado a conciencia introduciendo los filtros, ha resultado ser más aguda de lo esperado. Como consecuencia de los retrasos y adelantos generados en la fase, se ha distanciando aún más la fase entre ambos sistemas sobre la frecuencia de los 80Hz. Afortunadamente, este inconveniente tiene fácil solución. Gracias a que invertir la fase del conjunto de subgraves en 180° , hace que dicho distanciamiento de fase se convierta en cercanía entre ambos.

Como resultado de este último proceso, se obtiene una pequeña suma que no destaca sobre el resto de la respuesta en frecuencia, haciendo que esta sea más plana y ofreciendo una correcta interacción entre el bloque de subgraves 900-LFC y los line arrays de LINA™. Puede observarse el resultado final del ajuste del sistema principal en la Figura 5.1, indicada con trazo de color azul, su correspondiente respuesta de fase ha sido representada en la Figura 5.2 también con trazo de color azul.

5.4 Alineamiento del sistema principal con el Front fill

Después de haber alineado los elementos del sistema principal de sonido, que está compuesto por los line arrays LINA™ y el conjunto de subgraves 900-LFC, se deben alinear el resto de elementos que conforman el diseño en su totalidad.

Es importante realizar un alineamiento entre las distintas fuentes para evitar, en la medida de lo posible, que exista el efecto *Comb Filtering* o filtro de peine. Este efecto puede darse en aquellas zonas de la audiencia donde a la señal de audio más próxima recibida, se le añada otra idéntica a ella pero retrasada en el tiempo. Esto puede darse debido a que dichas fuentes de sonido se encuentren retrasadas física o electrónicamente una respecto a la otra. El filtro de peine genera como resultado una serie de interferencias constructivas y destructivas sobre la respuesta en frecuencia conjunta de los elementos, como consecuencia de los cambios producidos en la fase. Además, no solo es detectable mediante un sistema de medición como el de MAPP 3D, si no que también puede ser percibido por el ser humano; sintiendo primeramente falta de definición para las altas frecuencias, seguidamente para las frecuencias medias si el retraso es mayor [2]. El resultado de haber mitigado completamente dicho efecto, sería obtener una respuesta en frecuencia conjunta donde sólo se generen interferencias constructivas.

En este apartado se explica el procedimiento para alinear los altavoces que comprenden el refuerzo para las primeras filas sobre el frontal del escenario o Front fill, respecto al sistema principal de sonido. El Front fill está compuesto por cuatro unidades UP Junior-XP y todas ellas serán controladas desde una única salida del procesador de audio Galileo Galaxy. Para ello, se tomará como punto de partida la configuración anterior realizada para los line arrays, contando con un filtro High Pass Linkwitz-Riley de 24dB/octava. El alineamiento sólo será llevado a cabo junto con los line arrays, excluyendo a los subgraves de este proceso.

El nivel de Headroom Δ dB mostrado para los altavoces del Front fill es de +0,9 dB, de manera que se debe reducir la ganancia de canal de salida del procesador en -0,9 dB para poder reducir el nivel excedido. Además de este valor, se ha decidido reducir el nivel del Front fill hasta -4 dB de salida en total, ya que tras analizar el nivel SPL generado en el diseño sobre la zona de la audiencia, las primeras filas tenían un nivel especialmente superior respecto al resto de la audiencia.

El micrófono de medición se va a situar en un punto donde la interferencia destructiva generada por ambas fuentes sea más notoria, para que tras el ajuste, no exista este fenómeno. El punto de máxima interferencia se encuentra ubicado en ambos laterales, sobre la zona de convergencia entre los ejes de propagación de uno de los line arrays laterales y el altavoz del Front fill más próximo al mismo. Meyer Sound® recomienda ubicar el micrófono de medición sobre el eje del sistema mayor, en este caso uno de los line arrays LINA™, en un punto en el que haya perdido -6 dB de presión¹, y que además, se encuentre dentro del eje del sistema menor, que sería el altavoz UP Junior-XP [27]. Dicho punto, se encuentra ubicado sobre las primeras filas de la grada baja, sobre un lateral de la misma, coincidiendo con la altura de la audiencia en esa zona de la grada y siendo sus coordenadas {x=6,6m; y=-9m; z=1,5m}.

Para alinear en tiempo el Front fill respecto al sistema principal, se va a añadir tiempo de Delay al Front fill, retrasando su señal de salida del procesador. Por tanto, se va a comenzar haciendo *Auto* en la sección de *Propagation Delay* solo a la señal recibida del line array, esto retrasará la señal de referencia generada y la sincronizará con la medida por el micrófono. A continuación, se analizará la señal recibida únicamente por el altavoz del Front fill y tras comprobar su respuesta al impulso generada (véase la Figura 5.4), se podrá comprobar la diferencia temporal existente entre ambos elementos.

En la Figura 5.4 se puede observar la respuesta al impulso generada por ambos sistemas. La obtenida por el line array LINA™ se encuentra a tiempo cero debido a la sincronización generada anteriormente y de forma adelantada, se encuentra la obtenida del altavoz del Front fill.

¹ En un punto dentro del rango de frecuencias que son direccionables. Estas son normalmente reproducidas por el tweeter agudo, generalmente desde los 2kHz hasta los 20kHz.

Analizando el eje temporal (abscisas), puede observarse como el Front fill se encuentra adelantado en aproximadamente 13,45ms respecto al line array, para el punto en el que se está realizando el alineamiento. Este tiempo, será el Delay a insertar en el canal de salida del procesador relativo al Front fill para poder alinear ambas fuentes.

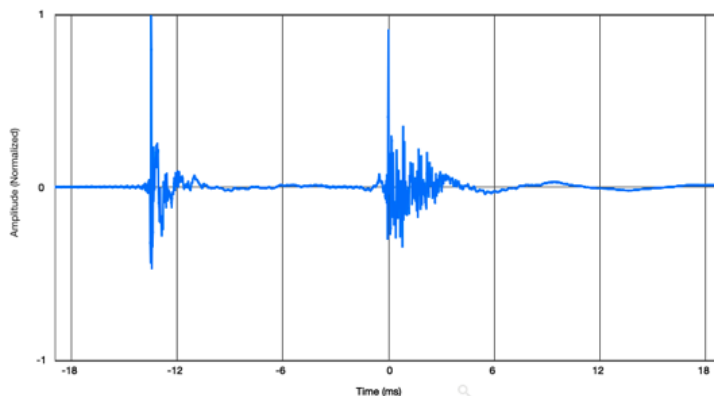


Figura 5.4 Respuesta al impulso generada por el line array y el Front fill.

Una vez se ha retrasado electrónicamente el Front fill, se procede a comprobar la respuesta en frecuencia resultante tras el ajuste y compararla con la obtenida antes del mismo. En la Figura 5.5 se puede observar con trazo de color rojo la respuesta en frecuencia generada por la interacción entre ambos elementos sin haberlos alineado, tan solo, los ajustes en la ganancia de salida mencionados anteriormente. Además, en color azul se muestra el resultado tras haber realizado el ajuste entre ambos elementos. Puede observarse como al haber alineado en tiempo ambas fuentes, se ha obtenido una suma o interferencia constructiva para la gran mayoría de frecuencias, este resultado se considera como positivo, calificando como efectivo el ajuste realizado.

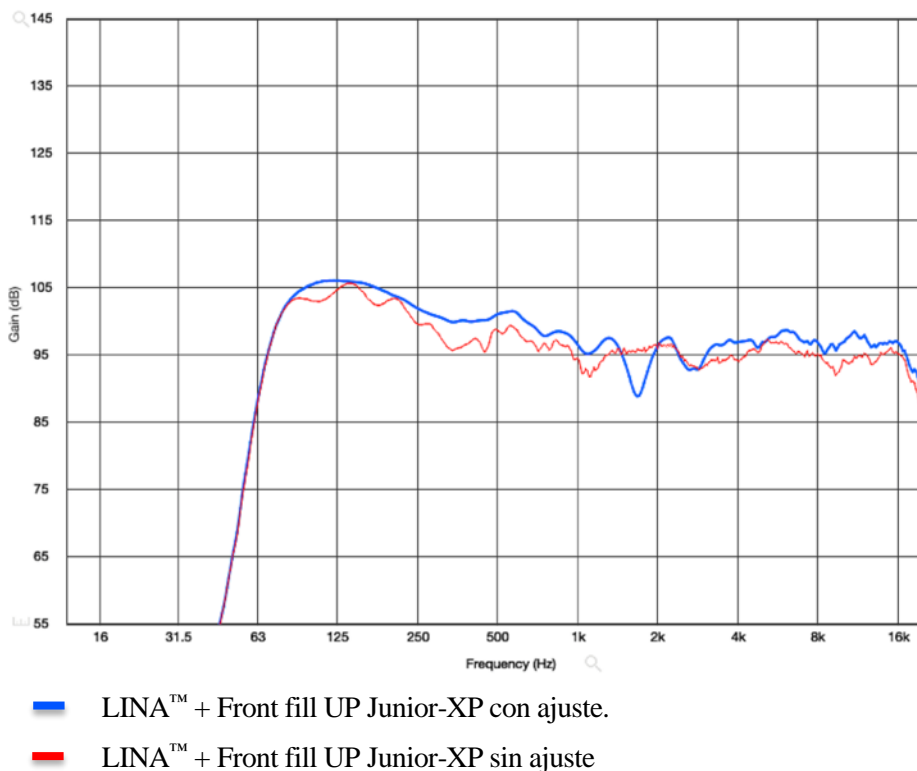


Figura 5.5 Comparativa de la respuesta en frecuencia del line array LINA™ con el Front fill.

5.5 Alineamiento del sistema principal con el refuerzo en palco

Para finalizar con el ajuste de todos los elementos que componen el sistema de audio, habría que alinear también los altavoces modelo UP-4XP que se encuentran anclados al techo de los dos palcos más cercanos al escenario, a ambos lados del mismo. Dichos altavoces, al igual que los instalados en el Front fill, sirven para generar el refuerzo sonoro necesario en ambos palcos, de esta forma, deben ser alineados respecto al sistema principal de sonido, siguiendo el mismo procedimiento descrito en el apartado anterior. Así se evitará la aparición del efecto de *Comb Filtering* que podría ser generado entre el altavoz de refuerzo y el line array de LINA™, ya que ambos ofrecen cobertura en el mismo espacio.

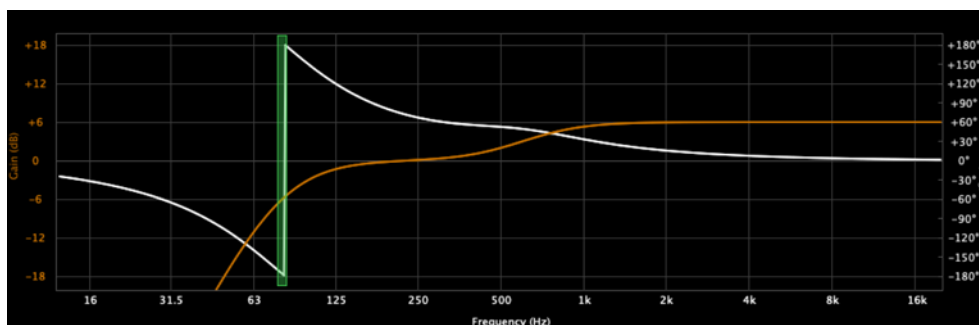
Ambos altavoces UP-4XP serán conectados a la misma salida del procesador, de forma que esta también debe contar en su ecualizador con el mismo filtro High Pass de tipo Linkwitz-Riley de 24dB/octava a 80Hz con el que cuentan el resto de elementos para el paso de las frecuencias medias y altas. Seguidamente, tras comprobar el nivel de Headroom Δ dB para ambos altavoces de los palcos, se observa que exceden en 0,4 dB el máximo para encontrarse en un estado de linealidad. En consecuencia, se procede a reducir la ganancia de salida del procesador en -0,4 dB.

Como el ajuste debe realizarse para mejorar la escucha de la audiencia situada sobre el palco, el micrófono de medición se va a situar en el mismo, en un punto donde reciba cobertura de ambos elementos. Se ha procedido a situar el micrófono en la posición con coordenadas $\{x=5,3m; y=-15,2m; z=4,8m\}$, a la misma altura que el plano de predicción de la audiencia para los palcos.

Seguidamente, se hace *Auto* de la señal recibida únicamente por el line array LINA™, ya que es el elemento que más lejos se encuentra del micrófono de medición. Antes de obtener la respuesta al impulso de ambos elementos para poder calcular la diferencia temporal que existe entre ambos, se procede a hacer una primera comprobación de cómo es la respuesta en frecuencia hasta este momento.

Según se puede observar el trazo de color rojo en la Figura 5.7, la respuesta obtenida para el rango de las frecuencias medias-bajas (desde los 80Hz hasta los 350Hz aproximadamente) es bastante elevada respecto a las medias-altas y altas frecuencias, superior en unos 10 dB. Este realce de dichas frecuencias es originado por el line array, pese a que hay zonas del palco donde la cobertura del line array para las altas frecuencias es más notoria, también existen zonas donde las medias y altas frecuencias no tienen tanta presencia (de ahí el hecho de introducir el altavoz UP-4XP como refuerzo para este área). Sin embargo, las medias-bajas y bajas frecuencias no son tan direccionables como lo son las altas frecuencias gracias a sus tweeters y guías de onda. Por tanto, incluso estando fuera de los ejes de cobertura del line array, es posible percibir bastante nivel de las frecuencias medias-bajas del line array; más si cabe, como consecuencia de estar a apenas 4 metros del mismo.

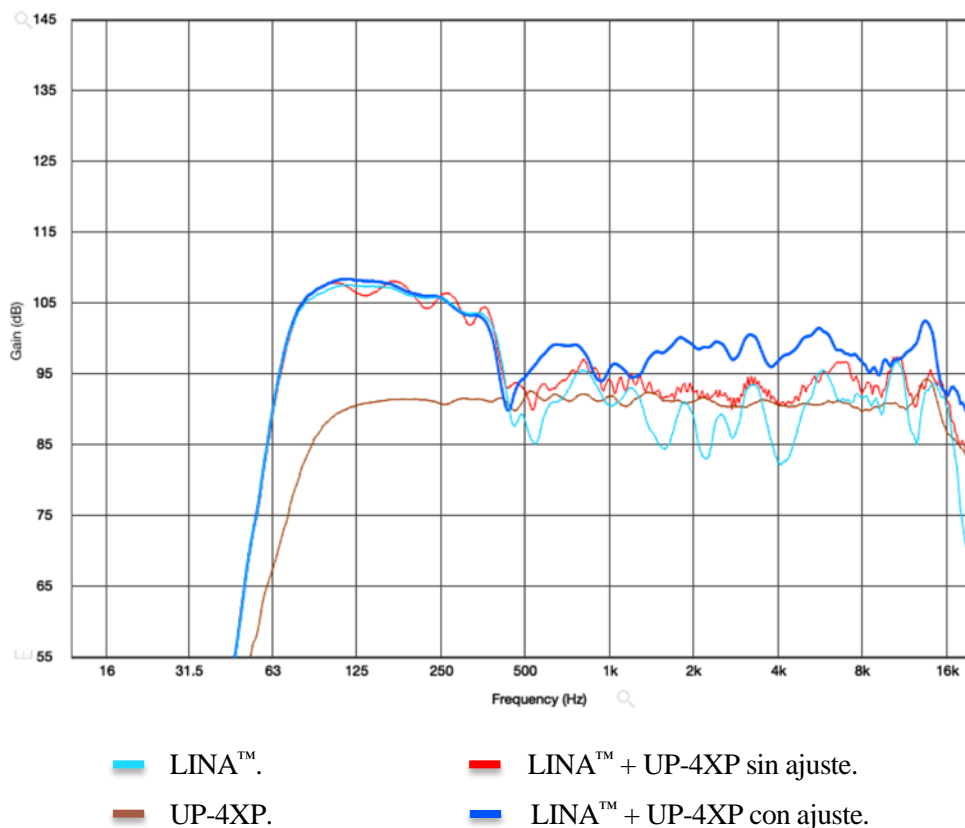
Con el objetivo de suavizar el efecto presentado y conseguir una experiencia sonora más equilibrada, se procede a realzar en el ecualizador las frecuencias desde 1kHz hasta los 20kHz en 6 dB, utilizando la herramienta de *U-Shaping* disponible dentro del ecualizador del procesador. En la Figura 5.6 puede observarse cual sería el proceso aplicado en el ecualizador del canal de salida de los palcos y cual sería el cambio en la fase tras haber modificado su magnitud.



- Respuesta en magnitud.
- Respuesta de fase.

Figura 5.6 Ecuación aplicada para el refuerzo en el palco.

Para obtener la diferencia temporal se recurre a la respuesta al impulso, como se ha realizado anteriormente. Esta indica que el altavoz del palco se encuentra adelantado respecto al line array en 10,2ms. Este es el Delay que se ha procedido a aplicar en el procesador, previamente comprobando valores cercanos al mismo y viendo que al aplicarlo la respuesta en frecuencia mejora de forma óptima.



- LINA™.
- UP-4XP.
- LINA™ + UP-4XP sin ajuste.
- LINA™ + UP-4XP con ajuste.

Figura 5.7 Respuesta en frecuencia de LINA™, UP-4XP y comparativa del ajuste en el palco.

Una vez ajustado el refuerzo en el palco, puede realizarse la comparativa con el resultado obtenido previo al ajuste, con el obtenido posteriormente tras aplicar la ecualización mencionada y el tiempo de Delay. En la Figura 5.7 se puede apreciar la respuesta en frecuencia generada por ambos sistemas alineados (trazo de color azul). Esta, cuenta prácticamente en la totalidad de las medias y altas frecuencias con interferencias constructivas, si se compara con la obtenida antes del ajuste (véase Figura 5.7, trazo de color rojo).

Respecto a las medias-bajas frecuencias (desde los 80Hz hasta los 350Hz aproximadamente), no se obtiene ninguna interferencia constructiva significativa debido a que el nivel ofrecido por el altavoz de refuerzo en el palco (véase Figura 5.7, trazo de color marrón) para dichas frecuencias, es muy inferior comparado con el ofrecido por el line array. Sin embargo, se consigue suavizar la respuesta para esta zona de frecuencias.

Pese a que en las medias-bajas frecuencias el resultado obtenido antes y después del procesado es muy similar debido a la naturaleza del arreglo, el ajuste se considera eficaz gracias a que proporciona un mejor equilibrio en la relación de medias-bajas con respecto a las medias-altas y altas frecuencias, además de haber obtenido interferencias constructivas para el conjunto del arreglo.

6 INCORPORACIÓN DE UN CLUSTER CENTRAL

6.1 Diseño del cluster

El diseño que ha sido realizado hasta ahora cumple con los objetivos que fueron propuestos al inicio del proyecto. Tras adecuar el sistema de sonido configurándolo a medida, se ha conseguido obtener una cobertura homogénea para todo el recinto y con una respuesta en frecuencia estable acorde con la disposición del sistema.

Sin embargo, como se ha mencionado en el capítulo 3, los line arrays LINA™ que forman parte del sistema principal, se encuentran ubicados a ambos lados del escenario. Esto hará que las personas de la audiencia que se encuentren distantes del eje de simetría del auditorio, perciban que el sonido proviene de uno de los laterales del escenario, según se encuentren en la zona de la grada izquierda o derecha. La fuente de audio (músico, cantante, conferenciante, presentación de vídeo, etc) proviene visualmente del centro del escenario; pero en contraposición, el sonido generado por dicha fuente se encuentra escorado sobre los laterales. Es posible que este hecho genere cierta confusión entre la audiencia, afectando a la calidad de experiencia percibida.

Para solucionar este efecto, se propone introducir un cluster central en forma de array, compuesto por dos fuentes puntuales modelo ULTRA-X40™ [28] del fabricante Meyer Sound® (obsérvese la Figura 6.1 (a)). Se ubicarían volados sobre el techo, frente al arreglo en línea generado con los subgraves, en la parte superior del frente escénico (obsérvese la Figura 6.1 (b)). Al estar justo delante de los subgraves, el impacto visual se ve reducido.

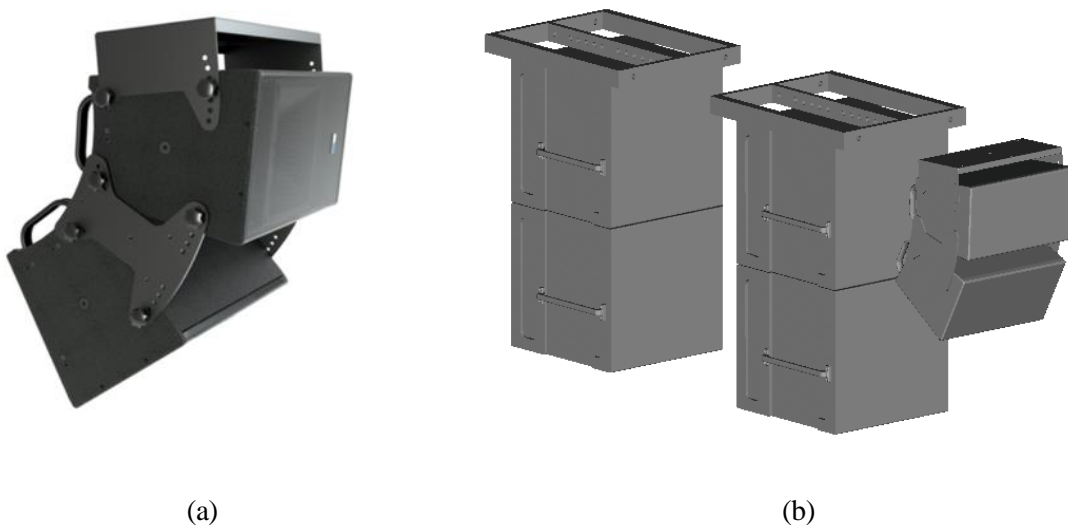


Figura 6.1 (a) Cluster compuesto por dos ULTRA-X40™ [29]. (b) Situación del cluster central en MAPP 3D.

El hecho de ubicar el cluster sustentado sobre la zona central del escenario, persigue el objetivo de generar un efecto de precedencia (también conocido como efecto Haas). Las diferencias interaurales existentes, ayudan a determinar la posición de una determinada fuente de sonido en el plano horizontal, sin embargo, el contenido espectral percibido ayuda a la ubicación en el plano vertical [30]. La intención es que el efecto de precedencia ayude a percibir el sonido como si procediera de donde se ubica visualmente a la fuente principal [2]. Cuando se da una situación donde conviven distintas fuentes emitiendo el mismo sonido pero con diferente ubicación respecto al oyente, la estrategia a seguir para modificar el origen de la señal radica en un ajuste de delay entre las fuentes [30].

El propósito es que el cluster central ayude a generar una sensación de precedencia, de manera que el sonido percibido coincida, en la medida de lo posible, con la ubicación de la fuente principal de dicho sonido. Para ello, será necesario ajustar los tiempo de delay entre el sistema principal de sonido y la fuente que generará el efecto de precedencia. Haciendo que esta última tenga un adelanto temporal respecto a la primera superior a 50ms. Con un retraso inferior a 50ms el cerebro interpretará ambas fuentes como una única fuente de sonido [30].

Las zonas de la audiencia que mayor diferencia temporal sufrirán entre los line arrays LINA™, serán principalmente, las correspondientes a la zona alta de las gradas inferiores; aunque este efecto también existirá, aunque en menor medida, en las gradas superiores. La zona más baja de las gradas inferiores ya están cubiertas por el Front fill, de manera que no necesitan tratamiento alguno para generar un efecto de precedencia. Por tanto, es preciso que el modelo de altavoz que se vaya a insertar en el diseño ofrezca una cobertura sobre ambas gradas, pero principalmente, debe estar angulado en dirección a la zona superior de las gradas bajas.

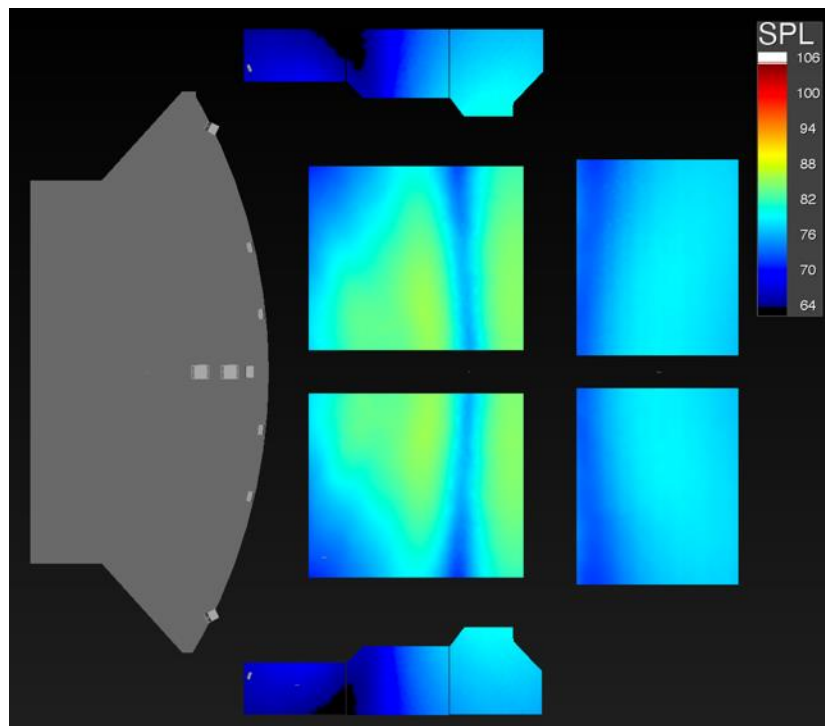


Figura 6.2 Predicción a 4kHz en MAPP 3D del cluster central compuesto por dos ULTRA-X40™.

El modelo ULTRA-X40™ de Meyer Sound® resulta ser un buen candidato para dicho arreglo, debido a que cuenta con una bocina de agudos de 110°x50° que permite ser rotada para alcanzar una mayor cobertura según su disposición. Dicho modelo, cuenta con dos altavoces de ocho pulgadas y un motor de compresión de 3 pulgadas, consiguiendo un máximo de 138 dB SPL gracias a su amplificador de triple canal de 1950W [28].

En la Figura 6.2 puede observarse la predicción realizada a 4kHz sobre los planos de la audiencia en MAPP 3D, tanto la cobertura ofrecida, como el nivel SPL obtenido en la predicción, se adecuan a las necesidades presentadas.

6.2 Ajuste temporal del cluster central

Siguiendo el procedimiento llevado a cabo por todos los sistemas instalados, el cluster central también debe ser optimizado. Ambas fuentes puntuales recibirán la señal procedente de una única salida del procesador de audio, por tanto, esta debe contar también con el mismo filtro High Pass (Linkwitz-Riley de 24dB/octava) que el resto de salidas que no sean para los subgraves; como fue descrito en el capítulo anterior. Pese a que se tiene un nivel de Headroom Δ dB de -5,4 dB, la ganancia de salida se va a mantener a 0 db; ya que no se prevee que sea necesario mayor nivel para el cluster.

Continuando con las indicaciones sobre el ajuste temporal del cluster descritas en el subapartado anterior, se procede a ajustar el tiempo de Delay para dicho arreglo. La mejor manera de hacerlo, es en primer lugar, partir del alineamiento temporal del cluster respecto al sistema principal y en segundo lugar, modificar el tiempo de Delay hasta que se perciba que la fuente de sonido queda ubicada en el centro, procedente del escenario.

La segunda parte del ajuste debe realizarse *in situ*, modificando el retraso según se quiera, al gusto de la persona encargada de hacerlo; debido a que en este proceso también intervienen las reflexiones de la sala y no puede predecirse de manera previa el Delay a insertar para que el efecto de precedencia sea notorio. Por tanto, en esta memoria quedará mencionada solo la primera parte del proceso, es decir, el alineamiento del cluster central respecto a los line arrays LINA™.

El micrófono que se va a utilizar para realizar el alineamiento será el que se encuentra dispuesto en la parte alta de la grada baja, el mismo que fue anteriormente utilizado para alinear los subgraves con los line arrays. Comprobando la respuesta al impulso, se obtiene que el Delay a aplicar al cluster central para alinearlos con los line arrays es de 17,4ms.

En la Figura 6.3 puede observarse el resultado obtenido tras el alineamiento del cluster central (trazo de color azul). Comparándolo con la interacción entre ambos sistemas sin alineamiento alguno (trazo de color rojo), se percibe como el resultado es bastante positivo, obteniendo interferencias constructivas para la totalidad de la respuesta en frecuencia. Además, se obtiene como la respuesta en frecuencia para el rango de frecuencias desde los 60Hz hasta los 500Hz es más estable tras el ajuste.

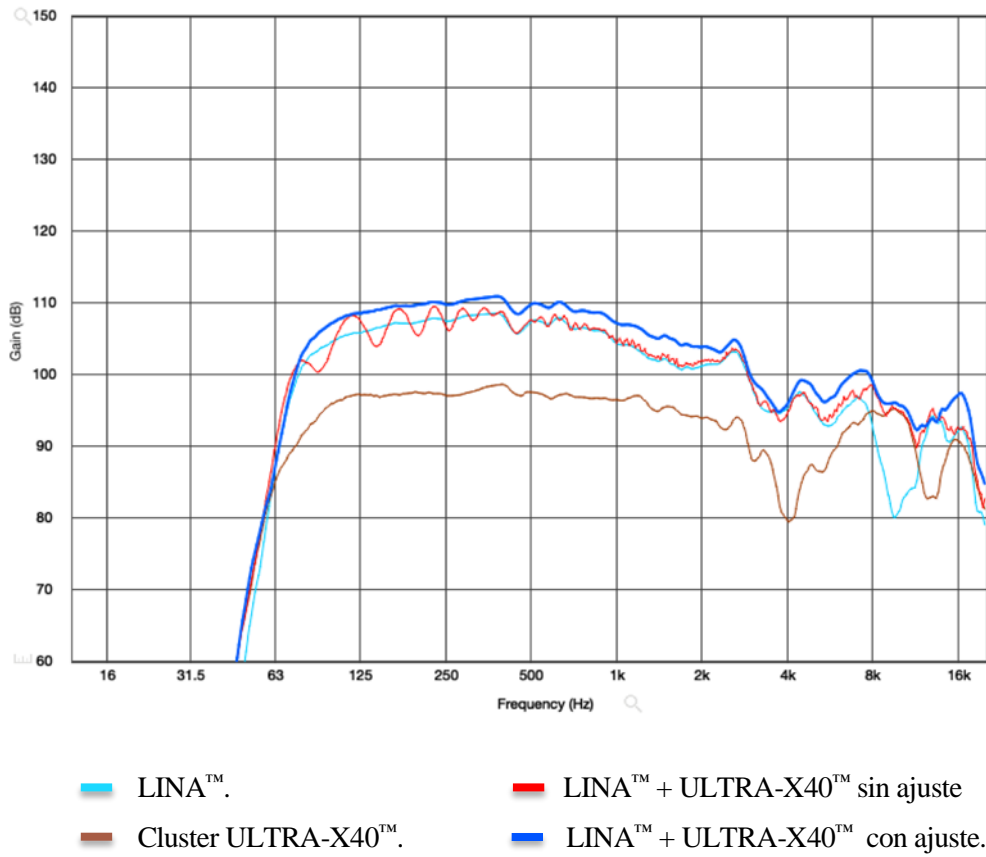


Figura 6.3 Respuesta en frecuencia de LINA™, cluster ULTRA-X40™ y comparativa del ajuste.

6.3 Predicción completa del sistema de audio diseñado

Finalmente, el diseño se concluye con la instalación de dicho arreglo de cluster central, introducido con el objetivo de mejorar la experiencia y la percepción auditiva de la audiencia. A continuación, en la Figura 6.4, se muestra cual sería la predicción obtenida en MAPP 3D a 4 kHz del sistema de sonido completo que ha sido diseñado para el auditorio.

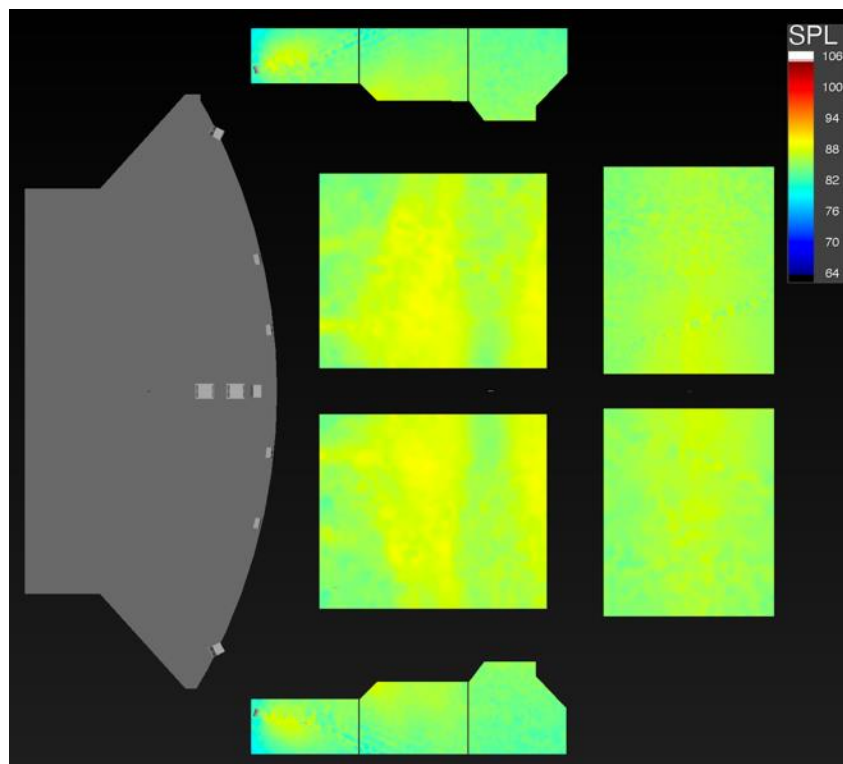


Figura 6.4 Predicción a 4kHz en MAPP 3D del sistema completo de sonido.

Para el micrófono de medición situado en la zona alta de la grada baja, los niveles promediados obtenidos son: 102,10 dB(A), 106,2 dB(C), 106,6 dB(Z); el nivel de pico lineal es de 119,1 dB SPL.

Además, se ha instalado un micrófono de medición adicional, este se encuentra situado sobre el eje de simetría del auditorio en medio de la grada superior, sus coordenadas serían $\{x=22,86m; y=0m; z=6,83m\}$ y los niveles promediados obtenidos son: 99,1 dB(A), 101,5 dB(C), 102,0 dB(Z); el nivel de pico lineal es de 114,5 dB SPL.

Por último, los niveles promediados obtenidos por el micrófono de medición situado en el palco son: 96,5 dB(A), 101,7 dB(C), 102,20 dB(Z); el nivel de pico lineal es de 114,7 dB SPL.

Para concluir, los niveles de presión sonora razonables para una audición clara y suave (sin resultar molesta) se encuentran en el rango de entre los 90 y los 95 dB(A), existiendo una tolerancia de ± 3 dB para toda la zona de la audiencia [1]. Por tanto, los resultados presentados ponen de relieve que el diseño cumple con los requisitos marcados en cuanto a nivel de presión sonora se refiere. En el Anexo A se muestran las predicciones realizadas en MAPP 3D para las ocho bandas de octava.

6.4 Parámetros finales del procesador Galileo GALAXY 816

Para finalizar, en la Figura 6.5 se muestra la configuración de los parámetros del procesador digital de audio Galileo GALAXY 816 que se han ido modificando a lo largo del proceso de esta memoria.

CH	Processing	Equalization	Delay Integration	Polarity	Delay	Gain (dB)	Mute	Label
1		Enabled	LINA pc125	Normal	0.00 ms	3	Mute	Array-L Top
2		Enabled	LINA pc125	Normal	0.00 ms	3	Mute	Array-L Bottom
3		Enabled	LINA pc125	Normal	0.00 ms	3	Mute	Array-R Top
4		Enabled	LINA pc125	Normal	0.00 ms	3	Mute	Array-R Bottom
5		Enabled	900-LFC pc125	Reversed	6.00 ms	9	Mute	Subs Front
6		Enabled	900-LFC pc125	Normal	8.45 ms	8	Mute	Subs Rear
7		Enabled	UPJunior-XP pc125	Normal	13.45 ms	-4	Mute	Front Fill
8		Enabled	UP4-XP pc125	Normal	10.20 ms	-0.4	Mute	Refuerzo Palco
9		Enabled	ULTRA-X40 pc125	Normal	17.40 ms	0	Mute	Cluster Central
10		Bypassed	OFF	Normal	0.00 ms	0	Muted	Output Channel 10
11		Bypassed	OFF	Normal	0.00 ms	0	Muted	Output Channel 11
12		Bypassed	OFF	Normal	0.00 ms	0	Muted	Output Channel 12
13		Bypassed	OFF	Normal	0.00 ms	0	Muted	Output Channel 13
14		Bypassed	OFF	Normal	0.00 ms	0	Muted	Output Channel 14
15		Bypassed	OFF	Normal	0.00 ms	0	Muted	Output Channel 15
16		Bypassed	OFF	Normal	0.00 ms	0	Muted	Output Channel 16

Figura 6.5 Parámetros finales del procesador Galileo GALAXY 816 en MAPP 3D para el sistema diseñado.

7 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este proyecto se ha realizado el diseño de un sistema de audio para el auditorio de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla, ubicada en la Isla de la Cartuja.

La memoria comienza introduciendo el concepto de sistema de audio y los elementos que lo caracterizan. Además, se ha realizado una revisión histórica de las herramientas fundamentales necesarias, así como la utilidad que presentan para el diseño de sistemas.

En relación al auditorio, se han analizado las condiciones de partida para el desarrollo del diseño, contemplando la distribución del mismo y siendo consciente de las limitaciones que presenta. Realizado este proceso, se procede a desarrollar los dos principales bloques que componen este trabajo: el diseño del sistema y la optimización del mismo.

El diseño del sistema se ha desarrollado sobre la herramienta de simulación MAPP 3D, y partiendo de las medidas reales del auditorio, se ha llevado a cabo el proceso de selección de las fuentes de audio más adecuadas para cada zona del auditorio. Durante dicho proceso, se han planteado numerosas cuestiones que han sido resueltas gracias a las distintas predicciones realizadas sobre el software. Estas cuestiones, han hecho tomar conciencia sobre temas tales como decidir qué elementos compondrían el sistema principal de sonido, la disposición de sus componentes, la selección de los ángulos de cobertura, la direccionabilidad de la energía emitida o el estudio del uso de fuentes de refuerzo. El diseño del sistema ha sido siempre enfocado a facilitar, en la medida de lo posible, la optimización del sistema.

La segunda parte de la memoria pone de relieve la importancia del proceso de optimización de un sistema de sonido. Se ha demostrado, que gracias al correcto alineamiento entre fuentes, es posible obtener interferencias constructivas en zonas donde predominaría el efecto *Comb Filtering* (o filtro de peine), como consecuencia del distanciamiento entre fuentes.

Por último, se ha constatado la relevancia del efecto de precedencia en el diseño de un sistema de audio. Con el objetivo de mejorar la experiencia del usuario, se ha propuesto introducir un elemento que mejore la percepción y la ubicación espacial de la fuente original de sonido.

Como conclusión final, cabe destacar la importancia que supone diseñar un sistema de sonido simulando su comportamiento antes de ser instalado. Además, el sistema diseñado se plantea como una propuesta de mejora que sustituya al actual, ofreciendo al auditorio la oportunidad de convertirse en un espacio polivalente que pueda albergar producciones de toda clase. Esto es posible gracias a que el sistema de sonido diseñado ofrece el nivel de presión sonora suficiente para ello, con una cobertura homogénea en toda la zona de audiencia y para todo el rango de frecuencias audible.

7.1 Líneas futuras de trabajo

Como aspectos a tratar en un futuro, se podrían señalar:

- Partiendo de una simulación acústica del recinto, estudiar el comportamiento del sistema para distintas modificaciones que puedan ser acometidas con el objetivo de mejorar el auditorio en términos acústicos.
- Si el sistema fuese instalado, proceder a realizar mediciones *in situ* del mismo; donde ahora si se tendrá en cuenta la interacción real de la acústica del auditorio, las reflexiones creadas, absorción de los materiales, etc. Además, modificar los parámetros de procesamiento que fuesen necesarios.
- Elaborar un presupuesto económico del sistema que contemple todos los costes de instalación y evaluar si se trata de un diseño competitivo en relación a otras marcas del mercado.

8 REFERENCIAS

- [1] W. Ahnert y D. Noy, *Sound Reinforcement for Audio Engineers*, 1.^a ed. London: Focal Press, 2022. doi: [10.4324/9781003220268](https://doi.org/10.4324/9781003220268).
- [2] McCarthy, Bob, *Sistemas de Sonido: Diseño y Optimización*. Alvalena, 2009.
- [3] «Bose | Headphones, Speakers, Wearables». https://www.bose.com/en_us/index.html (accedido 7 de septiembre de 2022).
- [4] «AFMG® - Ahnert Feistel Media Group | Ahnert Feistel Media Group». <https://www.afmg.eu/en/afmgr-ahnert-feistel-media-group#history> (accedido 7 de septiembre de 2022).
- [5] «Ease Focus 3», *buildersfasr*. <https://buildersfasr195.weebly.com/ease-focus-3.html> (accedido 12 de septiembre de 2022).
- [6] «Meyer Sound». <https://meyersound.com/> (accedido 8 de julio de 2022).
- [7] «MAPP XT». <https://meyersound.com/product/mapp-xt/> (accedido 7 de septiembre de 2022).
- [8] «MAPP 3D». <https://meyersound.com/product/mapp-3d/> (accedido 8 de julio de 2022).
- [9] H. F. Olson y 1901-, «Elements of acoustical engineering», p. 368.
- [10] R. I. Musica, «Line Arrays: Cómo funcionan», *Revista ISP Música*. <https://www.ispmusica.com/audio-directo/didactica-directo-audio/1959-line-arrays-como-funcionan.html> (accedido 12 de septiembre de 2022).
- [11] GAPLASA, «Sistema de line array Bose Professional ShowMatch para el O2 Arena en Londres», *Instalia*, 11 de julio de 2018. <https://instalia.eu/sistema-de-line-array-bose-professional-showmatch-para-el-o2-arena-en-londres/> (accedido 12 de septiembre de 2022).
- [12] E. Universitat Politècnica de València, «Universitat Politècnica de València», *ing. agua*, vol. 18, n.º 1, p. ix, sep. 2014, doi: [10.4995/ia.2014.3293](https://doi.org/10.4995/ia.2014.3293).
- [13] C. Mendoza, «Segundo Foro Académico. Memoria», p. 272, 2009.
- [14] «How to Set Up a Subwoofer for Maximum Punch», *PreSonus*. <https://www.presonus.com/learn/technical-articles/How-To-Set-Up-a-Subwoofer-for-Maximum-Punch> (accedido 13 de septiembre de 2022).
- [15] «Galileo GALAXY». <https://meyersound.com/product/galileo-galaxy/> (accedido 8 de julio de 2022).
- [16] Meyer Sound Laboratories, Incorporated. «Galileo GALAXY 816 Network Platform», 04.230.007.02 B2, 2021.
- [17] «Design – MAPP 3D Help». <https://mapp-3d-help.meyersound.com/design/> (accedido 20 de julio de 2022).
- [18] D. Gunness, «The Design and Implementation of Line Arrays Using Digital Signal Processing», p. 27.
- [19] Meyer Sound Laboratories, Incorporated. «LINA™ Compact Linear Line Array Loudspeaker», 04.270.004.02 B2, 2021.
- [20] «Pressure Plots – MAPP 3D Help». <https://mapp-3dhelp.meyersound.com/pressure-plots/> (accedido 20 de julio de 2022).

- [21] Meyer Sound Laboratories, Incorporated. «750-LFC Compact Low-Frequency Control Element, Operating Instructions» 05.271.005.01 C2, 2018.
- [22] Meyer Sound Laboratories, Incorporated. «750-LFC Compact Low-Frequency Control Element» 04.271.004.02 A2, 2019.
- [23] Meyer Sound Laboratories, Incorporated. «900-LFC Compact Low-Frequency Control Element» 04.246.004.02 D3, 2019.
- [24] Meyer Sound Laboratories, Incorporated. «UP Junior-XP UltraCompact VariO™ Loudspeaker» 04.173.096.02 B2, 2019.
- [25] Meyer Sound Laboratories, Incorporated. «UP-4XP UltraCompact Loudspeaker» 04.201.004.02 B, 2019.
- [26] Meyer Sound Laboratories, Incorporated. «SIM® 3 Audio Analyzer System», 05.136.060.12 A, 2005.
- [27] «Measurement View – MAPP 3D Help». <https://mapp-3d-help.meysound.com/measurement-view/> (accedido 18 de agosto de 2022).
- [28] Meyer Sound Laboratories, Incorporated. «ULTRA-X40™ Wide Coverage Loudspeaker» 04.287.004.02 B4, 2021.
- [29] Meyer Sound Laboratories, Incorporated. «ULTRA-X40/42™ Operating Instructions» 05.287.005.01 B2, 2019, 2020.
- [30] C. Arias y O. A. Ramos, «Audición Espacial en Ambientes Reverberantes: Aspectos Teóricos Relevantes», p. 11.

ANEXO A. PREDICCIONES PARA CADA BANDA DE OCTAVA

En este anexo se muestran las distintas figuras fruto de las predicciones obtenidas sobre el diseño final del sistema de audio en MAPP 3D. Cada una de las imágenes representan la predicción realizada para una banda de frecuencia de octava.

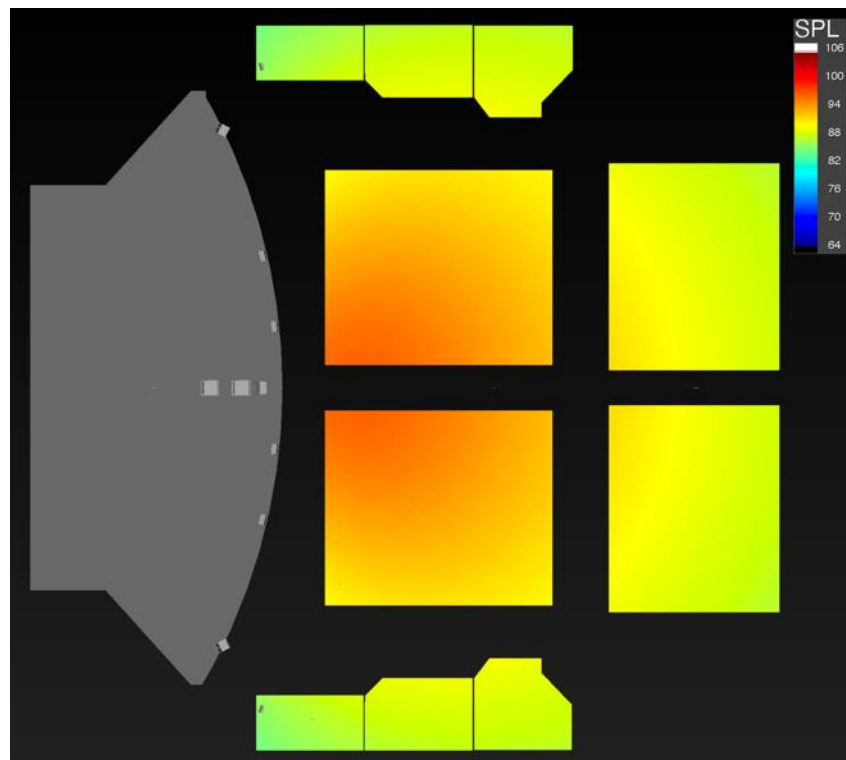


Figura A.0.1 Predicción de la octava de 31,5Hz en MAPP 3D.

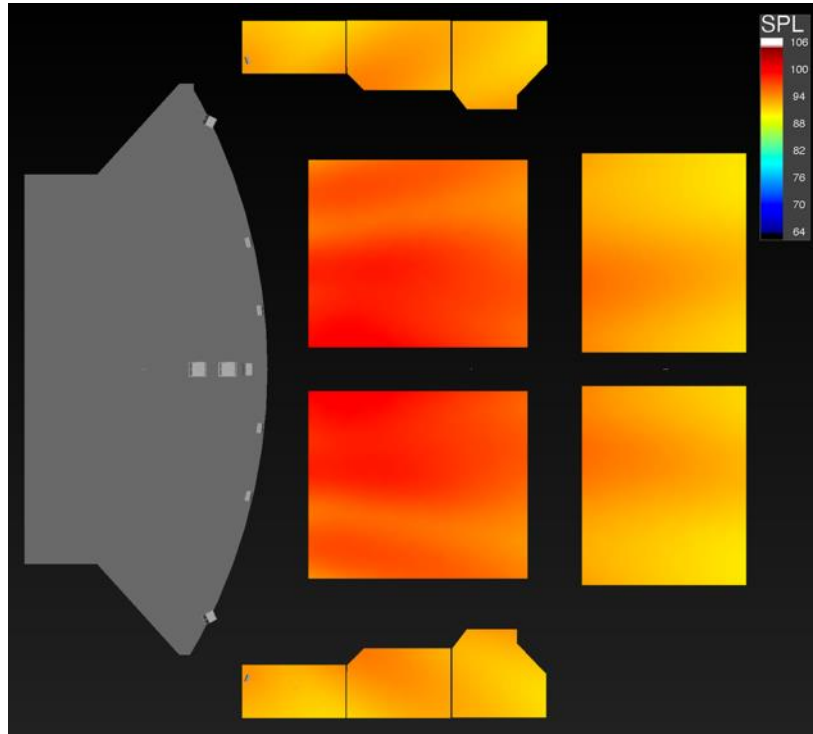


Figura A.2 Predicción de la octava de 63Hz en MAPP 3D.

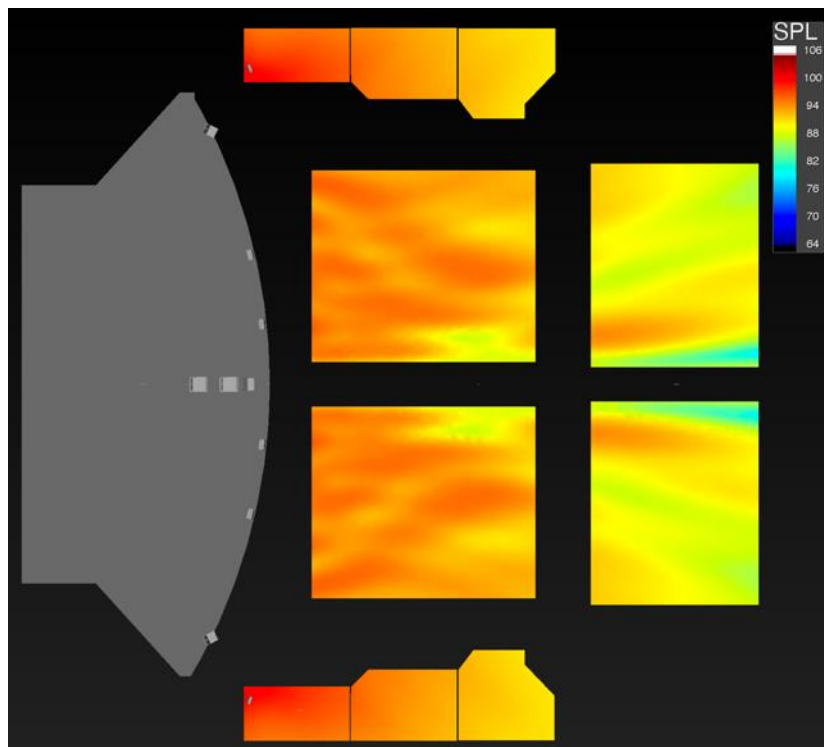


Figura A.3 Predicción de la octava de 125Hz en MAPP 3D.

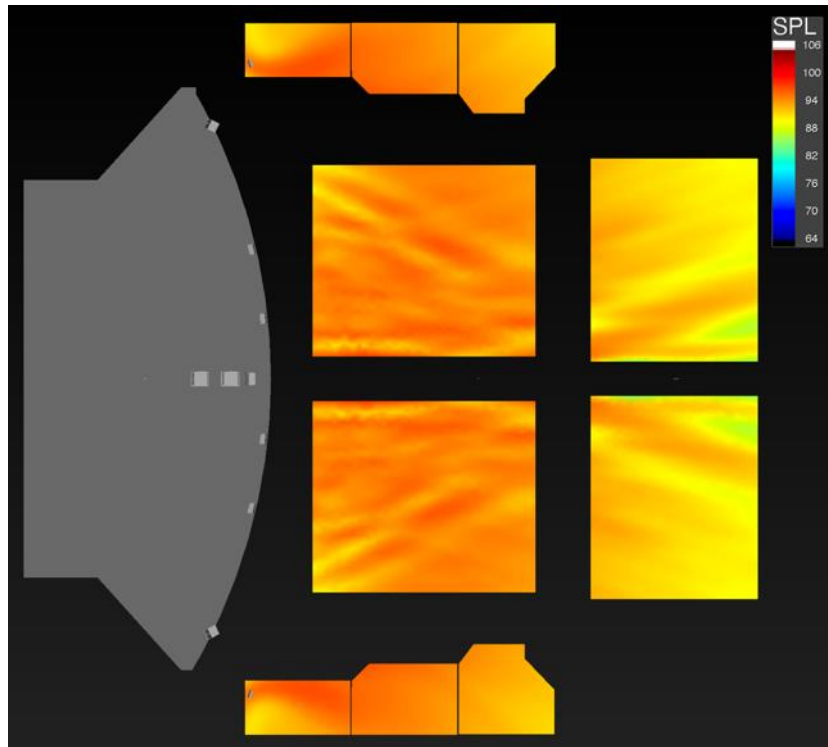


Figura A.4 Predicción de la octava de 250Hz en MAPP 3D.

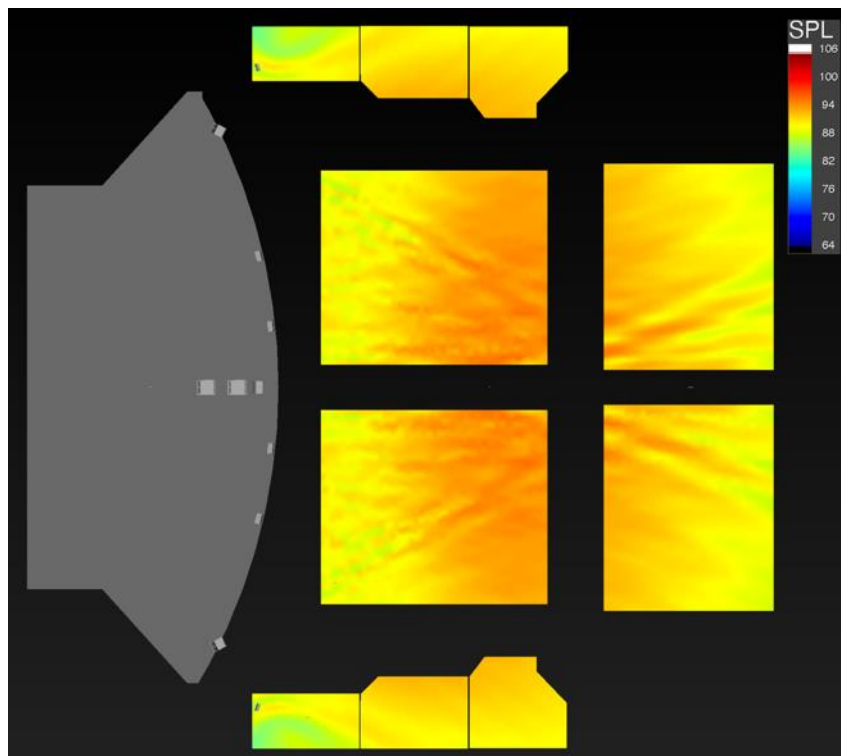


Figura A.5 Predicción de la octava de 500Hz en MAPP 3D.

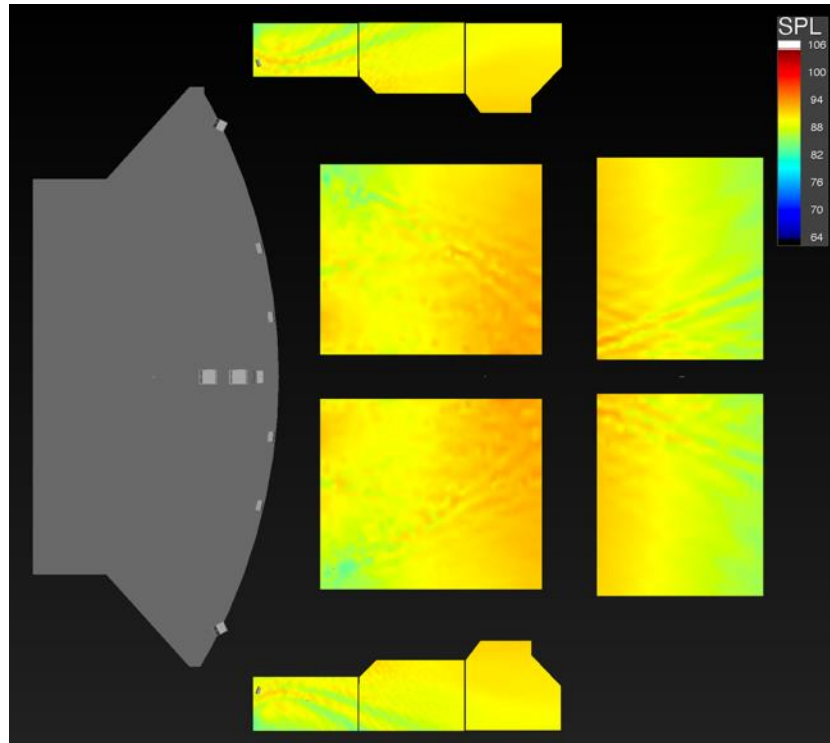


Figura A.6 Predicción de la octava de 1kHz en MAPP 3D.

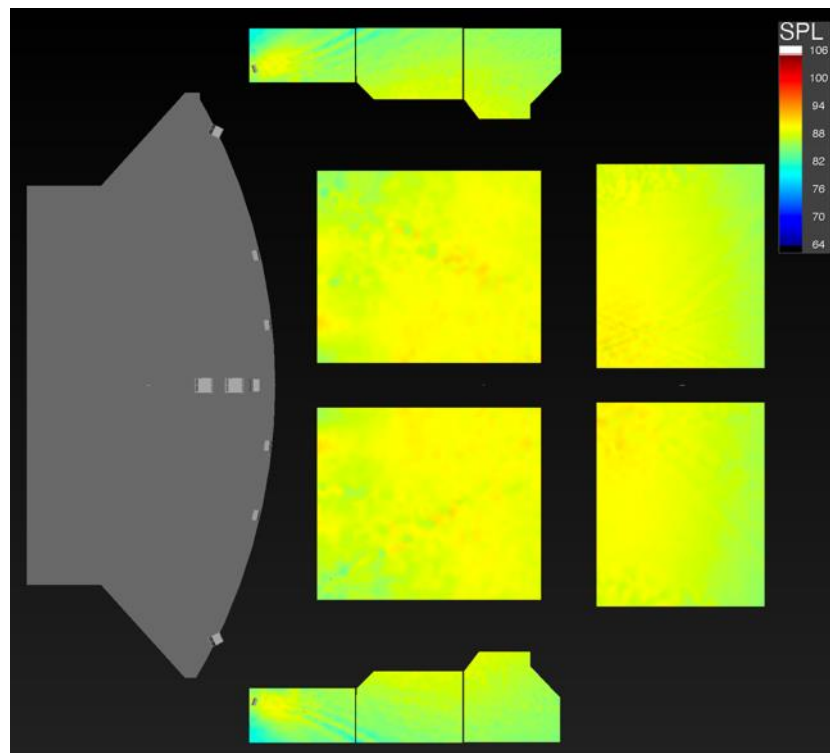


Figura A.7 Predicción de la octava de 2kHz en MAPP 3D.

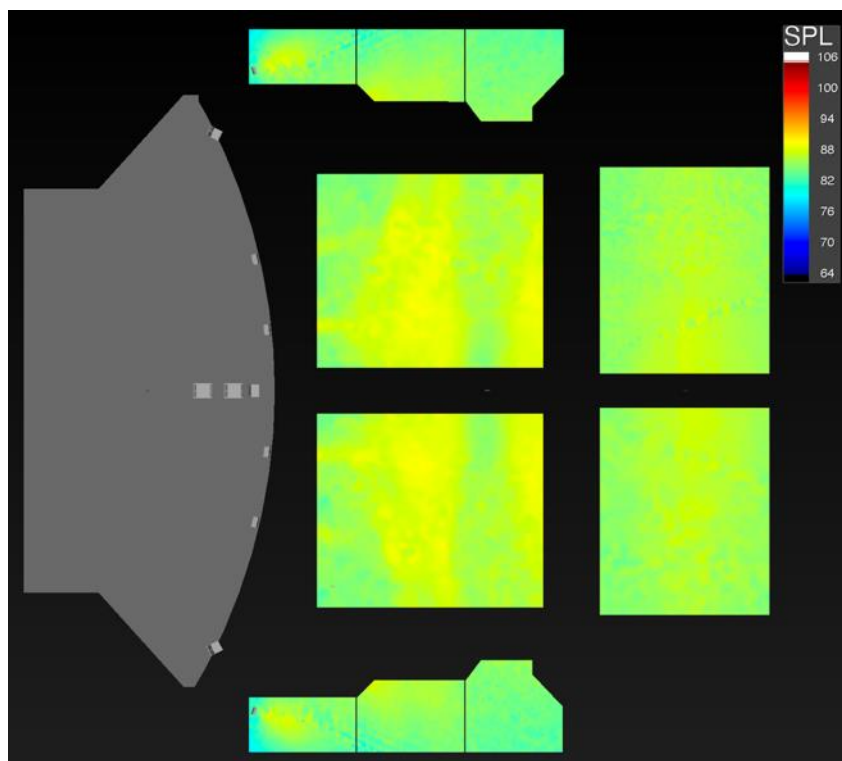


Figura A.8 Predicción de la octava de 4kHz en MAPP 3D.

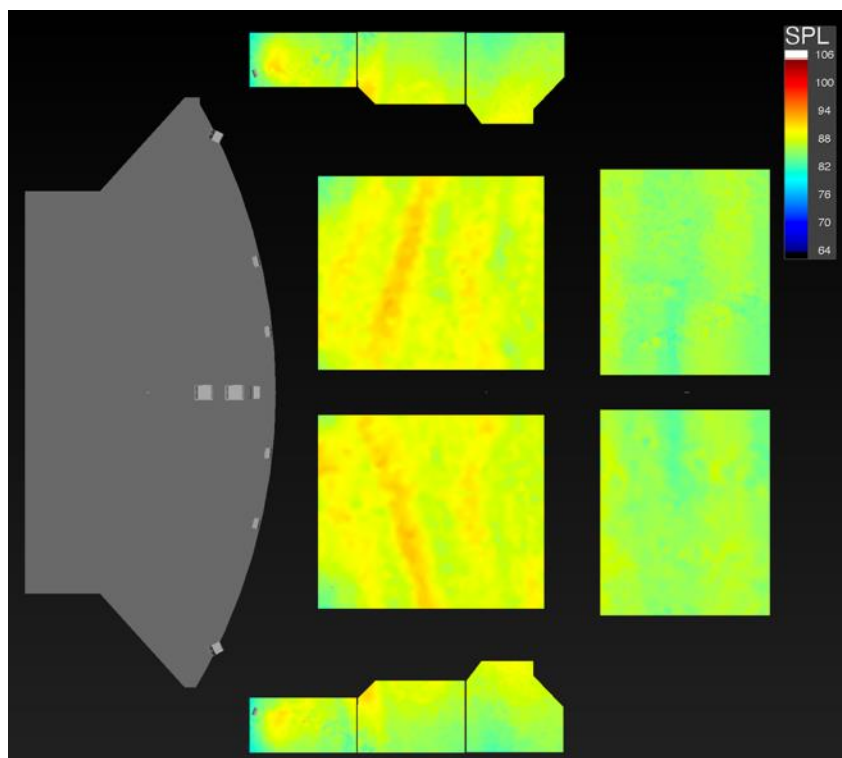


Figura A.9 Predicción de la octava de 8kHz en MAPP 3D.

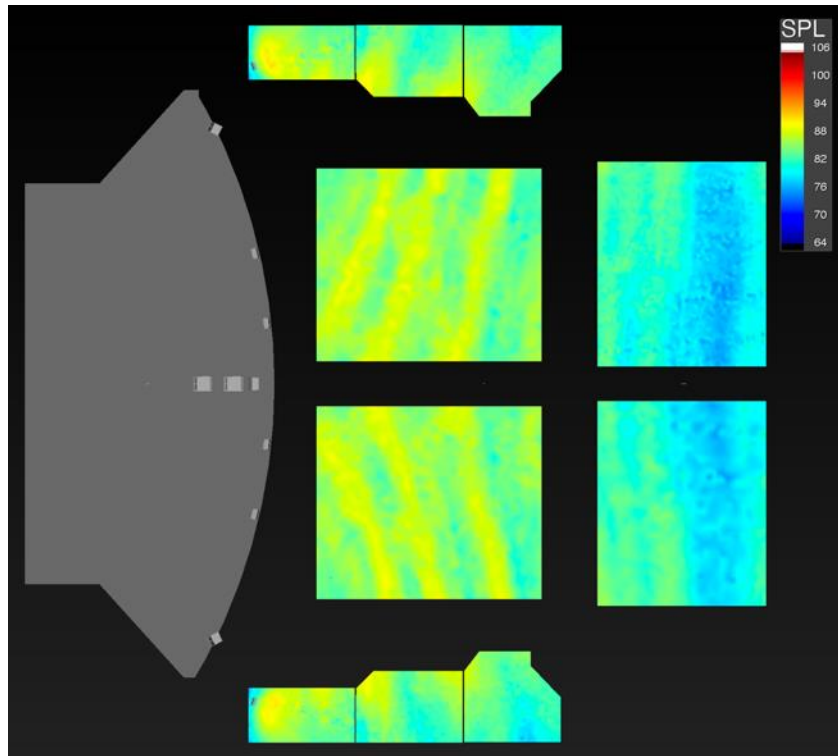


Figura A.10 Predicción de la octava de 16kHz en MAPP 3D.

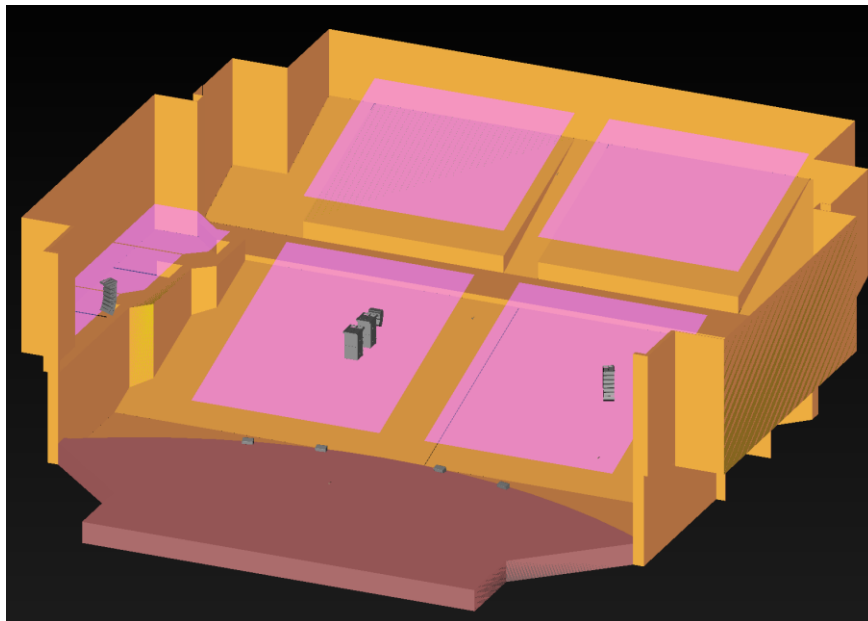


Figura A.11 Modelo con el sistema de sonido completo en MAPP 3D.