

**ESCUELA DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA**



TRABAJO FIN DE GRADO

Estudio acústico del Paraninfo de la ULPGC

**Titulación: Graduado en Ingeniería en Tecnologías
de la Telecomunicación**

Mención: Sonido e Imagen

Autor: Noemi Mederos Cabrera

Tutor/es: Fidel Cabrera Quintero

Fecha: 06 de junio de 2022

Resumen:

En este trabajo se han obtenido las medidas características más importantes de las condiciones acústicas del Paraninfo de la Universidad de Las Palmas de GC. Para ello, se ha utilizado la instrumentación específica de la que dispone el laboratorio de Sonido del Departamento de Señales, y se han realizado medidas in-situ del tiempo de reverberación y de difusión sonora en diferentes puntos de la sala.

También, se ha implementado en un software de simulación acústica las condiciones actuales del recinto, contrastadas con las medidas reales. Esto permite realizar estudios modificando las características de absorción de los materiales que cubren el recinto. Por ejemplo, estimar como varía el tiempo de reverberación con diferentes grados de ocupación de público, o el efecto de cubrir algunas zonas con material más absorbente como resultado del estudio para mejorar la acústica del Paraninfo. Esta simulación también ha permitido estudiar y determinar la ausencia de ecos indeseables en la sala.

Además, se realizó un estudio de cobertura sonora, excitando los altavoces de la sala con ruido rosa, registrando medidas de difusión sonora, para determinar la respuesta de todo el sistema de refuerzo sonoro y su ajuste.

Por último, se estudió y se presenta la configuración del sistema de refuerzo sonoro, con los diferentes canales de entrada y salida de la mesa de sonido que se encuentra en el control técnico de la sala.

Abstract:

In this work, the most important characteristic measurements of the acoustic conditions of the Auditorium of the University of Las Palmas de GC have been obtained. To do this, the specific instrumentation available in the Sound Laboratory of the Department of Signals has been used, and in-situ measurements of reverberation time and sound diffusion have been made at different points in the room.

Also, the current conditions of the enclosure have been implemented in an acoustic simulation software, contrasted with the real measurements. This allows studies to be carried out by modifying the absorption characteristics of the materials that cover the enclosure. For example, estimating how the reverberation time varies with different degrees of public occupancy or the effect of covering some areas with more absorbent material as a result of the study to improve the acoustics of the Auditorium. This simulation has also made it possible to study and determine the absence of undesirable echoes in the room.

In addition, a sound coverage study was carried out, exciting the speakers in the room with pink noise, and recording sound diffusion measurements, to determine the response of the entire sound reinforcement system and its adjustment.

Finally, the configuration of the sound reinforcement system was studied and presented, with the different input and output channels of the sound table located in the technical control of the room.



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 Antecedentes.....	13
1.2 Peticionario.....	15
1.3 Objetivos del proyecto.....	15
1.4 Emplazamiento	16
2. MEDIDA DE LOS PARÁMETROS ACÚSTICOS DEL PARANINFO	16
2.1 Instrumentación acústica	17
2.1.1 Descripción del DIRAC	17
2.1.2 Descripción del EASE.....	17
2.2 Medidas del tiempo de reverberación realizadas in-situ	18
3. SIMULACIÓN ACÚSTICA	25
3.1 Levantamiento con el simulador.....	25
3.2 Elección de los materiales acústicos necesarios	28
3.3 Resultados de la simulación	29
3.3.1 Nivel de presión sonora total (SPL Direct, SPLtotal)	33
3.3.2 Inteligibilidad de la palabra ALCONS	35
3.3.3 Criterio de inteligibilidad de la palabra RASTI.....	36
3.3.4 Parámetros de energía. C50 y C80	38

4. ESTUDIO Y PROPUESTA PARA LA MEJORA DE LA ACÚSTICA	40
4.1 Mejoras en el tiempo de reverberación.....	40
4.2 Simulación de ecos y medidas de difusión sonora	41
4.3 Estudio acústico del escenario	45
4.4 Propuesta de mejora acústica para el techo del escenario	47
5. SIMULACIÓN DE LA SALA CON REFUERZO SONORO	50
5.1 Ubicación de los equipos en el software de simulación	50
5.2 Estudio de cobertura sonora. Simulación y medidas in-situ.....	51
5.3 Parámetros acústicos mediante simulación	58
6. MANUAL DE USO DEL SISTEMA DE REFUERZO SONORO	60
6.1 Configuración del sistema de refuerzo sonoro	60
7. CONCLUSIONES	63
8. LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS.....	65
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
PLANOS.....	72
PLIEGO DE CONDICIONES	79
Condiciones particulares.....	79
	10

Características técnicas de los aparatos de medida	79
PRESUPUESTO	97
Condiciones Particulares	97
Trabajo tarifado por tiempo empleado:	97
i. Recursos hardware	98
ii. Recursos software	99
iii. Coste de amortización total	99
iv. Redacción del proyecto	100
10.2 Presupuesto ejecución material	100
10.3 Presupuesto total.....	101
ANEXO 1: resultados medidas in-situ.....	103
ANEXO 2: GLOSARIO DE TÉRMINOS	109
▪ Definiciones.....	109
▪ Parámetros acústicos	110



1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El edificio donde se encuentra situado el actual Paraninfo de la Universidad de las Palmas de Gran Canaria, en el momento de su creación, entre los años 1919 y 1925, se utilizó como el primer Instituto de Bachillerato de la provincia de Las Palmas y los Estudios de Comercio. Tras varios años de funcionamiento, en el año 1937, manteniendo su arquitectura original, este se transforma en Hospital Militar, utilizándose como tal hasta la construcción de un moderno hospital en la parte alta de la ciudad, quedando el antiguo edificio sin uso. Finalmente, fue el arquitecto Luis Alemany, quien recibió el encargo en 1993, de adaptar el edificio a la función de Rectorado. Esta reforma afectó, tanto a las antiguas dependencias como al espacio destinado al Paraninfo, situado en la parte posterior del edificio original.

Hasta ahora se han presentado varios PFC y TFG relacionados con estudios acústicos de locales de la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria, como el Auditorio Alfredo Kraus y otros teatros, pero no se dispone de un estudio del Paraninfo de nuestra Universidad, donde se detallan puntos importantes como tiempos de reverberación y respuesta de la sala. Diversos grupos y artistas que han actuado en este lugar han presentado quejas sobre la mala acústica en el escenario. Se tuvo la posibilidad de conocer las actividades realizadas en el Paraninfo, al haber desarrollado una beca del Vicerrectorado de Cultura, por lo que se tuvo oportunidad de hablar con los técnicos y usuarios de este espacio. De ahí surgió la idea de proponer este trabajo fin de grado.

Este recinto, cuenta con una sala para todo tipo de eventos con capacidad para aproximadamente 600 personas, equipada con pantalla, cañón, una mesa presidencial para hasta 12 ponentes y un sistema audiovisual moderno para conciertos y actuaciones, ya que además de los actos institucionales, acoge eventos como obras de teatro o conciertos musicales de todo tipo.



Figura 1.Sala del Paraninfo de la ULPGC

La **acústica** forma parte de las competencias específicas de la mención de Sonido e Imagen, las cuales se encuentran recogidas en RD que regula la verificación del título. En concreto, la CESI-4: Capacidad para realizar proyectos de ingeniería acústica sobre: Aislamiento y **acondicionamiento acústico de locales**; Instalaciones de megafonía; Especificación, análisis y selección de transductores electroacústicos; Sistemas de medida, análisis y control de ruido y vibraciones; Acústica medioambiental; Sistemas de acústica submarina. Se puede definir, siguiendo el contexto que le vamos a dar a este trabajo, como el conjunto de parámetros físicos que determinan las características sonoras de un local, relativas a la propagación y la difusión del sonido.

Por tanto, **la descripción detallada del problema** es que se dispone de este auditorio para eventos audiovisuales, pero, no se conocen sus parámetros ni la calidad de su acústica. Así pues, el problema que tenemos para resolver es la mejora de las condiciones acústicas del Paraninfo, para lo cual es imprescindible realizar medidas de los parámetros que caracterizan la buena o mala acústica de local, analizarlos, y proponer mejoras, que ayuden a tener un espacio adecuado, junto con el ajuste del sistema de refuerzo sonoro, para la celebración de cualquier tipo de acto.

Los procedimientos que se siguen en este trabajo se han estudiado en la asignatura de Acústica Arquitectónica y Ambiental, la cual está enmarcada en el cuarto curso del Título de Grado, dentro del módulo de tecnología específica en Sonido e Imagen. Dicha asignatura proporciona conocimientos en el manejo de los sistemas de medida y análisis para el control de ruido y las vibraciones, entendidas éstas como fuentes de emisión de energía al medio ambiente, siguiendo la bibliografía que permite ampliar conocimientos y profundizar en la materia, incluida la parte de refuerzo sonoro que se pretende estudiar.

1.2 Peticionario

El petionario ha sido la Escuela de Ingeniería de Telecomunicación y Electrónica de Las Palmas de Gran Canaria, con sede en el Campus Universitario de Tafira, para la obtención del título de Ingeniero Técnico de Telecomunicación en la especialidad de Sonido e Imagen.

1.3 Objetivos del proyecto

Los objetivos de este trabajo son:

- Obtener las medidas físicas que caracteriza la acústica del Paraninfo.
- Mediante el software, Electro-Acoustic Simulator for Engineers, en adelante, EASE, realizar el levantamiento del recinto que permita simular sus condiciones acústicas.
- Analizar los datos y mediante la simulación, proponer mejoras en la acústica.
- Estudio del uso correcto del sistema de refuerzo sonoro presente en el recinto.

1.4 Emplazamiento

El Paraninfo de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria se encuentra en la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria, concretamente en el casco antiguo del barrio de Vegueta.



Figura 2. Fotografía de la localización del Paraninfo ULPGC y su situación geográfica

2. MEDIDA DE LOS PARÁMETROS ACÚSTICOS DEL PARANINFO

Antes que nada, hay que saber primero que es un estudio acústico para poder tratar este trabajo de la mejor manera posible. Un estudio acústico es un informe en el que se analizan los datos objetivos que determinan una buena o mala acústica, como son el tiempo de reverberación, la difusión de la energía sonora en el recinto o el estudio de posibles ecos.

Todo trabajo de acondicionamiento acústico lleva un estudio previo de la volumetría del espacio y de los materiales de la envolvente. Con esta información y gracias al EASE, como software de simulación avanzado, se calcula y se diseñan los sistemas de acondicionamiento acústico. El procedimiento que seguir es:

- ➔ Caracterización del tiempo de reverberación del recinto.
- ➔ Modelización acústica y definición de los materiales fonoabsorbentes.
- ➔ Ejecución de los sistemas de acondicionamiento acústico.
- ➔ Medición final e informe con los resultados finales de TR del recinto.

2.1 Instrumentación acústica

2.1.1 Descripción del DIRAC

El software de medidas DIRAC, programa de la empresa Brüel & Kjaer, es un programa que permite medir las respuestas impulsivas de un recinto mediante el uso de un ordenador personal con un dispositivo de sonido y micrófonos. A partir de estas respuestas impulsivas, DIRAC calcula el espectro de frecuencia y la mayor parte de los parámetros acústicos de interés en la acústica arquitectónica, como el tiempo de reverberación, la claridad y la inteligibilidad, estando estos parámetros determinados por las normas ISO 3382 y IEC 60268-16.

2.1.2 Descripción del EASE

El software utilizado para realizar la simulación de nuestro recinto, como ya se ha indicado, ha sido el EASE 4.3 (EASE, s.f.), debido a que es un programa que proporciona a los diseñadores un sistema con un valioso conjunto de herramientas para todos los aspectos de la práctica profesional, desde el modelado detallado y realista, así como la posibilidad de predecir el comportamiento acústico del mismo mediante la simulación de la acústica del lugar y el rendimiento del sistema de sonido.

Este programa cuenta con gran cantidad de características como:

- ➔ Gran base de datos de altavoces y materiales.
- ➔ Avanzada herramienta de modelado 3D que cuenta con:
 - Prototipos de recintos.
 - Función de crear formas.
 - Posibilidad de crear objetos.
- ➔ Posibilidad de importar archivos desde el AutoCAD en formato DXF.
- ➔ Posibilidad de cálculo y creación de mapas de los parámetros:

- Total SPL / Direct SPL
- D / R Ratio
- %ALCons(Articulation Loss)
- Critical Distance
- RASTI
- Arrival Times
- Pressure Levels
- Clarity Ratios
- ITD (Initial Time Delay) Gap
- Loudspeaker Aiming/Overlap

➔ Capacidades de auralización de sonido directos.

➔ Posibilidad de crear animaciones.

De todos estos parámetros que podemos calcular y analizar con el EASE nos centraremos en los principales para nuestro trabajo como son:

➔ El tiempo de reverberación

➔ Niveles de presión, SPL

➔ Parámetros de inteligibilidad (%ALCONS y RASTI)

➔ Parámetros de claridad (C7, C50 y C80)

➔ Reflectograma

Aunque existe la posibilidad de importar archivos desde AutoCAD en formato DXF, en este trabajo se ha realizado de manera manual el levantamiento del recinto en el simulador.

2.2 Medidas del tiempo de reverberación realizadas in-situ

La normativa UNE-EN ISO 3382 (UNE-EN ISO 3382-1, 2009) establece que el procedimiento a seguir para la medida del tiempo de reverberación debe ser utilizar como mínimo 2 posiciones de la fuente omnidireccional y fijar 3 posiciones distribuidas uniformemente a lo largo de todo el espacio útil, en cada una de ellas hacer un mínimo de 3 medidas para cada posición de la fuente y cumpliendo estas medidas con las distancias detalladas en la norma ISO 3382. El micrófono no debe colocarse muy cerca

de la fuente para no estar en campo cercano de la misma y los niveles de presión sonora se miden en las bandas de octava con frecuencia central 125Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 KHz, 2 KHz, 4 KHz y 8 KHz. Otra cuestión que considerar es que la fuente acústica debe ser tan omnidireccional como sea posible. Además, debe producir un nivel de presión acústica suficiente para proporcionar curvas de caída para que no haya contaminación debida al ruido de fondo. Será necesario un nivel de ruido generado por la fuente sonora al menos de 45 dB superior al nivel de ruido de fondo en la banda de frecuencia correspondiente.

En cuanto al desarrollo de las medidas in-situ nuestra sala se encontraba vacía y en condiciones normales en las que se suele encontrar de mantenimiento, limpieza y temperatura. Teniendo todo esto comprobado y en orden, se procedió a la realización de las medidas.



Figura 3. Vista del recinto con la sala vacía en el momento de las mediciones.



Figura 4. Vista del recinto con la sala vacía en el momento de las mediciones.



Figura 5. Vista del recinto con la sala vacía en el momento de las mediciones.

Para dicha medición se ha seguido lo que se establece en la normativa anteriormente comentada: la fuente se ha colocado en 2 posiciones distintas de la sala (posición F1 y posición F2) y a su vez el sonómetro ha sido colocado en 22 posiciones distintas, tal como se indica en la figura 6. Con lo cual se han realizado un total de 135 medidas con 3 registros por posición. De las 135 medidas han quedado siendo útiles 132, ya que se repitieron las 3 últimas por problemas en el software y por tanto en los datos finales quedan 132 mediciones. La totalidad de las medidas realizadas en cada uno de los puntos, se pueden consultar en el anexo 1.

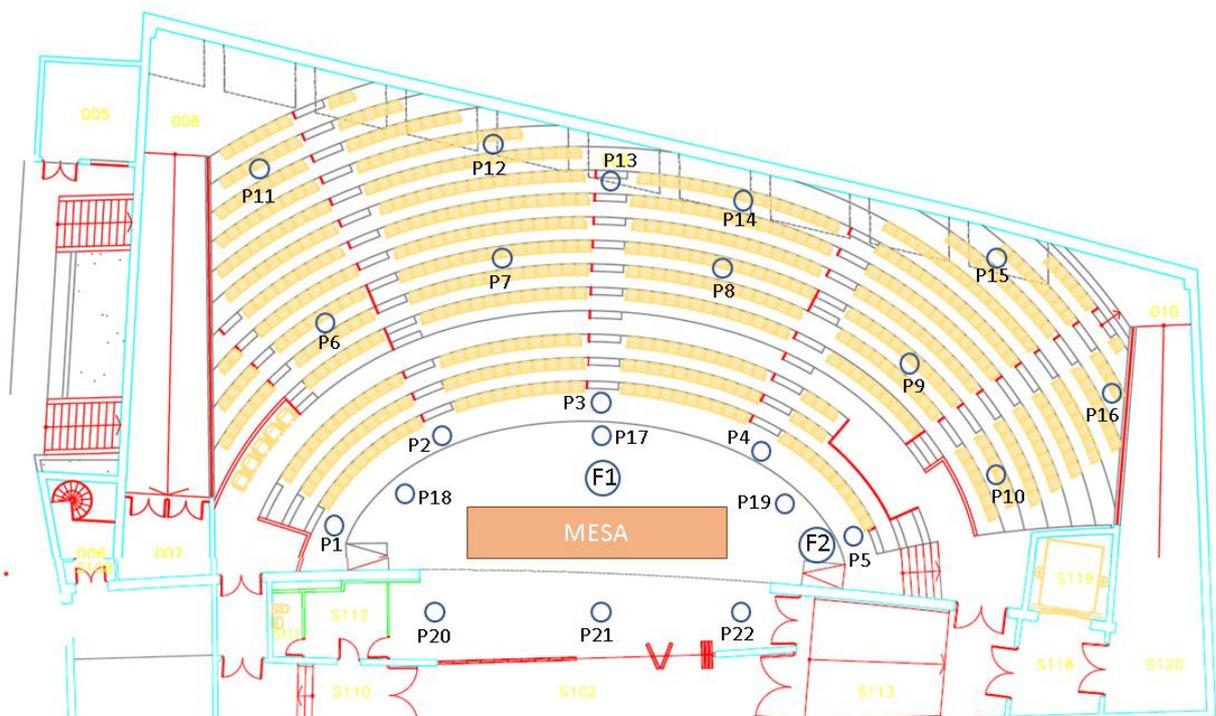


Figura 6. Plano AutoCAD con posiciones

Para la realización de estas medidas se ha utilizado en el recinto elementos principales como un sonómetro, un altavoz omnidireccional y un ordenador personal donde se ejecutaba el software de medidas DIRAC y, por lo tanto, donde obteníamos los datos recogidos por el sonómetro Rion NL-31.



Figura 6. Esquema del conexionado de la medición in-situ

Debido a la lejanía entre las posiciones de medida y el ordenador con el que procesamos cada registro, se ha utilizado un sistema inalámbrico “VHF Series” de SAMSON que trabaja en el rango de frecuencia de los 173,8 MHz - 213,2 Mhz. Por medio del transmisor VT3 conectado al transductor y del receptor VR3 conectado al ordenador, ambos sintonizados a la misma frecuencia, se ha creado un enlace que permite captar la información registrada por el sonómetro. El conexionado de todos los equipos para la correcta toma de medidas se especifica en la Figura 6.

Mediante el altavoz omnidireccional, se excitó la sala con ruido rosa y se cambiaba la posición del sonómetro a lo largo de toda la sala en 22 posiciones, obteniendo así los diferentes datos de caída de la señal, tanto para la F1 como para la F2, y así poder obtener una curva de caída de nivel a lo largo de todo el espectro.

Una vez recogido todos los datos, a través de todas las posiciones, con sus fuentes correspondientes y en todas las frecuencias, se procedió al cálculo del promedio de la curva tonal mediante el software Excel, donde se insertaron los datos guardados en

formato .txt del DIRAC, y con ello pudimos calcular la media aritmética correspondiente a cada octava de la banda de frecuencias, obteniendo el siguiente resultado:

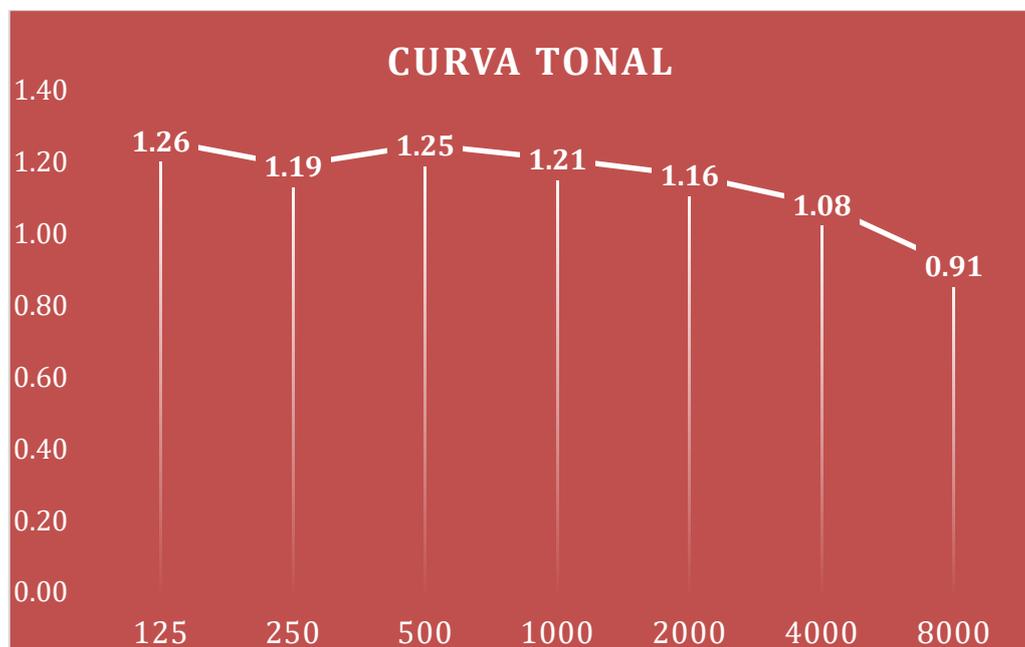


Figura 7. Curva tonal sin procesar errores

Al analizar los datos, se observó que era necesario un proceso de depuración ya que algunos de los valores obtenidos en la banda de 125 Hz estaban muy por encima del promedio del resto de las medidas. Con lo cual, se procedió a eliminar estas medidas, que se presentan en rojo en la siguiente tabla:

005.wav	1.324	1.033	1.294	1.221	1.126	1.099	0.897
006.wav	1.052	1.019	1.291	1.218	1.127	1.101	0.911
007.wav	2.626	1.143	1.209	1.151	1.118	1.033	0.903
008.wav	2.535	1.147	1.173	1.114	1.118	1.033	0.888
009.wav	2.67	1.139	1.151	1.156	1.122	1.032	0.883
010.wav	1.309	1.136	1.319	1.147	1.091	1.031	0.88
011.wav	1.216	1.2	1.272	1.172	1.111	1.034	0.88
012.wav	1.173	1.159	1.312	1.162	1.092	1.043	0.881
013.wav	0.378	0.978	1.077	1.101	1.054	0.995	0.279

014.wav	0.944	0.964	1.072	1.104	1.073	1	0.278
015.wav	0.347	1.031	1.07	1.108	1.069	1.015	0.278
016.wav	1.25	1.239	1.26	1.193	1.187	1.057	0.924
017.wav	1.281	1.191	1.263	1.21	1.184	1.053	0.928
018.wav	1.28	1.234	1.249	1.205	1.191	1.055	0.925

Tabla 1. Ejemplo l de datos recogidos con errores en sus valores

Una vez desechados estos datos, se ha obtenido una respuesta más fiable y exacta de la realidad del recinto, obteniendo por tanto la siguiente curva de valores:

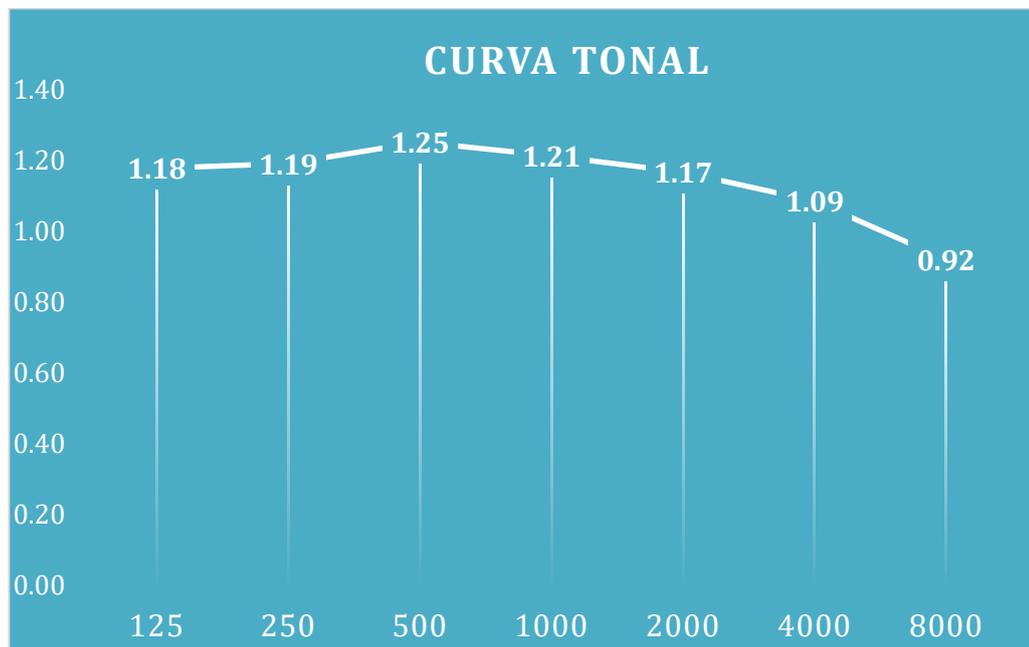


Figura 8. Curva tonal tras procesar errores

Habiendo determinado esta curva tonal del recinto, se procedió a obtener una curva tonal similar en el simulador acústico. A partir de ahí, se pueden estudiar y analizar las condiciones acústicas y calcular cualquier parámetro.

3. SIMULACIÓN ACÚSTICA

3.1 Levantamiento con el simulador

Para la realización del levantamiento del Paraninfo de la Universidad de las Palmas de Gran Canaria, se han utilizado los planos, en formato AutoCad, proporcionados por Ceferino Mederos Ossorio, Administrador de Servicios Centrales de la Sede Institucional. Estos planos se delinearon en perspectiva 2D de tal forma que solo nos permitía conocer las variables X e Y, para la construcción en EASE de la sala de audiencia. Las medidas de las alturas se realizaron in-situ, el día de las mediciones del tiempo de reverberación.

Partiendo de estos planos, se realizaron medidas mediante la ayuda de las herramientas de AutoCAD, para poder determinar los vértices de nuestro recinto. La metodología seguida en el levantamiento fue establecer los vértices con sus respectivas medidas de largo, ancho y altura. Posteriormente, se crearon las caras (paredes, suelo y techo), encontrando ciertas dificultades en el cierre del recinto, con respecto a las superficies correspondientes a las gradas. El EASE solo trabaja con superficies planas, por lo que fue necesario una tarea laboriosa a fin de lograr el cerramiento del recinto, y que desaparecieran huecos en el diseño del recinto. La solución adoptada fue triangular esas caras, de forma que el software, pudiera interpretar la continuidad de las superficies y así poder seguir con la ejecución del levantamiento. De esta forma, se obtuvo la siguiente estructura:

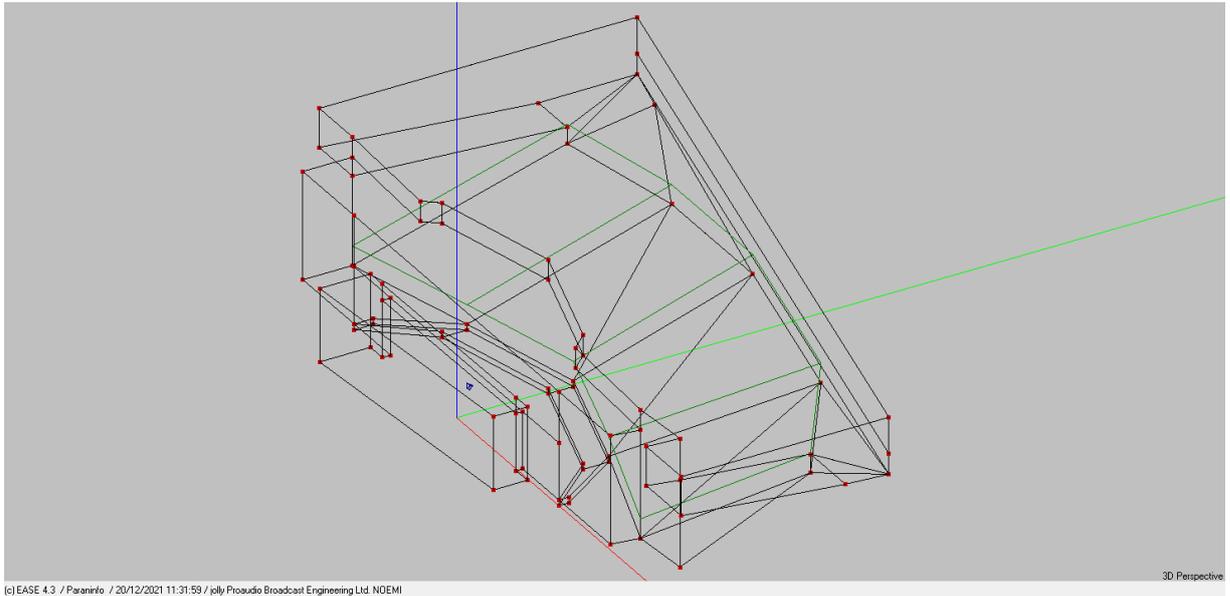


Figura 9. Vista de la sala en formato 3D

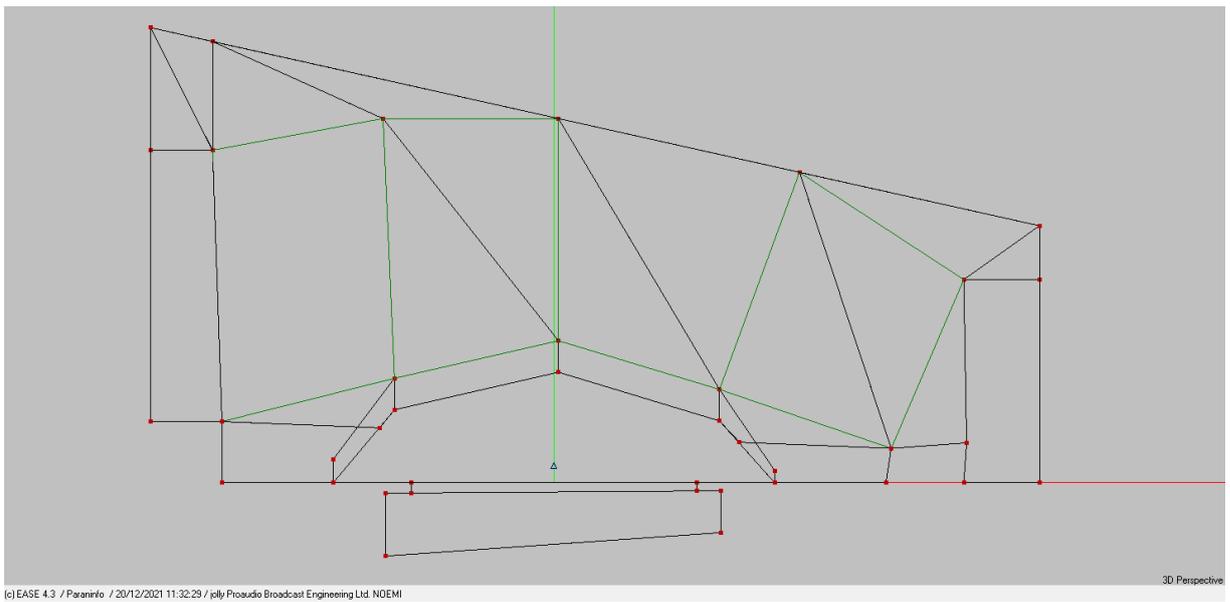


Figura 10. Vista de la sala desde el plano Z.

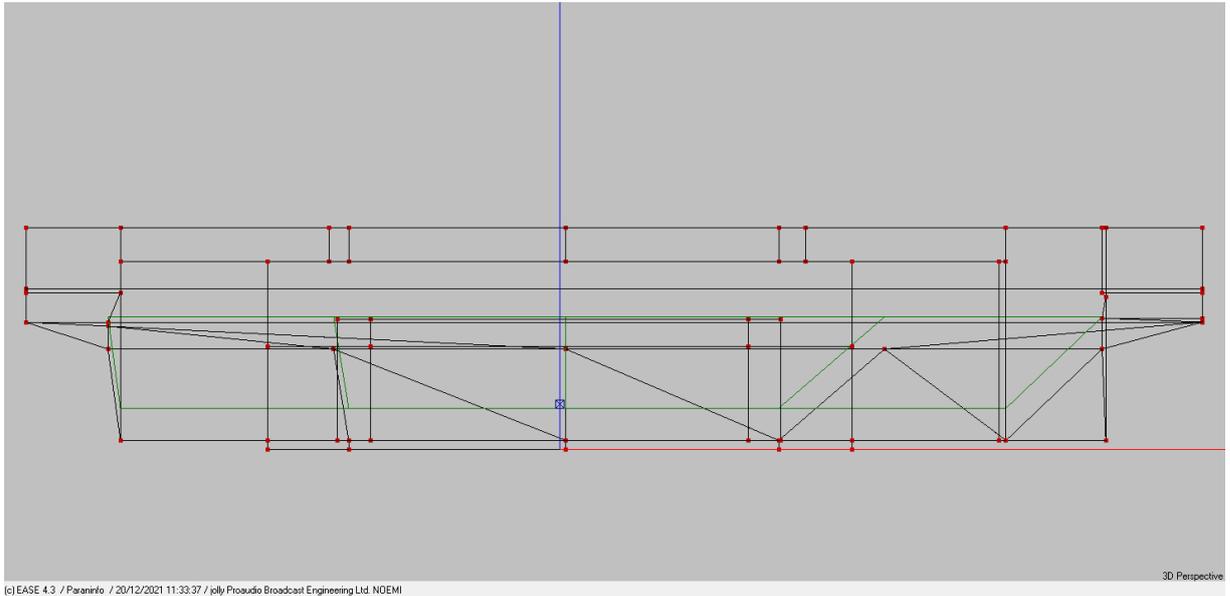


Figura 11. Vista de la sala desde el plano Y

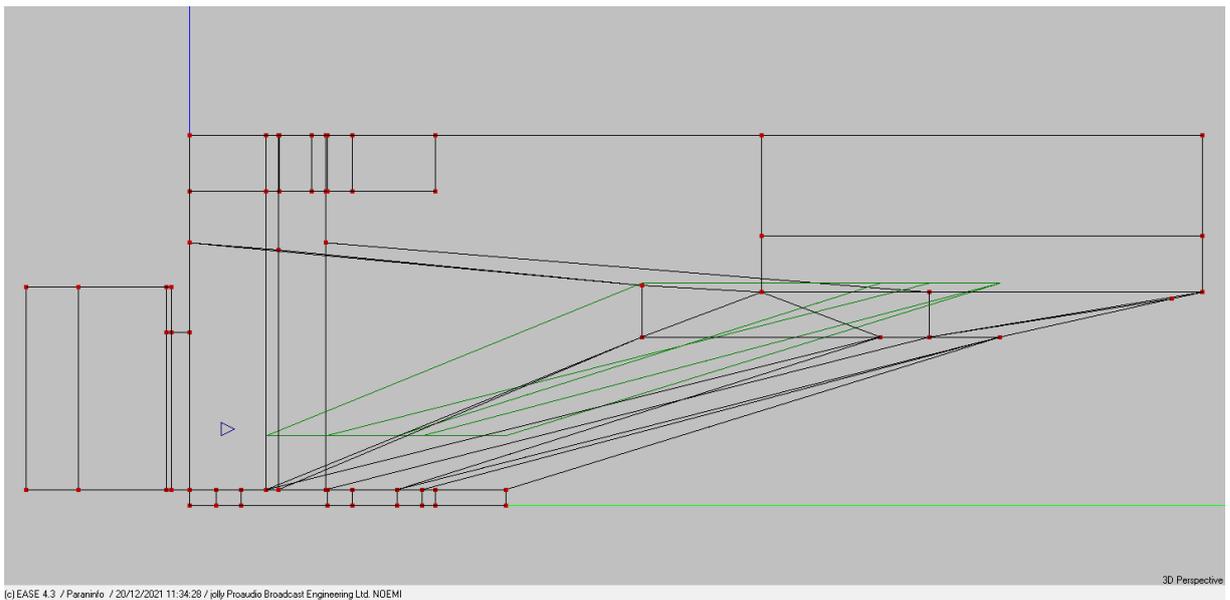


Figura 12. Vista de la sala desde el plano X.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de las características del recinto:

VOLUMEN	4533.73 m ³
SUPERFICIE	2403.78 m ²
Nº DE CARAS	71
Nº DE VERTICES	88

Tabla 2. Resumen características del recinto

En el simulador, para la caracterización del recinto, se tuvieron que ajustar los coeficientes de absorción de cada una de las 88 superficies, con el fin de lograr que la curva tonal simulada coincidiera con las mediciones in-situ del tiempo de reverberación, en adelante, TR, en cada octava de frecuencias.

3.2 Elección de los materiales acústicos necesarios

El siguiente paso realizado en la simulación ha sido elegir los materiales que se corresponden con los materiales reales del recinto, para poder así obtener el tiempo de reverberación real que existe, añadiendo los coeficientes de absorción a cada una de las superficies del Paraninfo. En primer lugar, se han asignado coeficientes de absorción, según Recuero López en Acústica Arquitectónica Aplicada, (Recuero López, 1999), a aquellas superficies claramente identificadas, según la siguiente tabla:

SUPERFICIE	MATERIAL	COEFICIENTES						
		125Hz	250Hz	500Hz	1KHz	2KHz	4KHz	8KHz
PAREDES	Madera 3cm	0.25	0.34	0.18	0.1	0.10	0.06	0.06
	Moqueta sobre pared	0.09	0.08	0.21	0.27	0.27	0.37	0.37
	Waffel 70/125	0.24	0.56	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
SUELO ESCENARIO	Entarimado de madera	0.09	0.09	0.08	0.09	0.1	0.07	0.07
ASIENTOS	Butaca madera con asiento tapizado	0.09	0.12	0.14	0.16	0.15	0.16	0.16
SUELO	Loseta vinílica	0.02	0.025	0.03	0.035	0.04	0.04	0.04

Tabla 3. Coeficiente de absorción de los materiales utilizados.

Nos quedaría por saber cuál sería el material exacto del techo, ya que el administrador del Paraninfo nos proporcionó información acerca de los materiales del recinto, sin embargo, no hubo una información certera acerca de cuál era el material exacto del techo, y por tanto, no podíamos conocer los valores de sus coeficientes de absorción. Es por esto por lo que se creó un material *Techo.mat* al cuál se le asignó en todas las octavas de

frecuencias un valor de 0.5, y con el cuál, sabiendo cómo debía ser la curva tonal del recinto, y teniendo los materiales de las otras superficies fijadas, se realizó un ajuste de los coeficientes de absorción de este material. Así se logró obtener los valores más próximos a la curva tonal medida in-situ. Los valores del ajuste final son los siguientes:

FREC.	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1KHz	2 KHz	4 KHz	8 KHz
TR medido	1.18	1.19	1.25	1.21	1.17	1.09	0.92
TR simulado inicial	1.17	1.01	1.07	1.11	1.09	1.02	0.79
Coef. abs. final α	0.5	0.36	0.38	0.43	0.45	0.45	0.3
TR simulado final	1.17	1.19	1.24	1.21	1.16	1.08	0.91

Tabla 4. Valores del ajuste de TR al añadir el techo

Una vez se ajustó el TR y todos los materiales asignados con sus correspondientes coeficientes de absorción, se procedió con las simulaciones de los distintos parámetros para estudiar la acústica de la sala.

3.3 Resultados de la simulación

Tras añadir los coeficientes de absorción a los materiales correspondientes, se ha obtenido el tiempo de reverberación de la sala mediante la fórmula de Sabine, sin añadir público. Por tanto, el resultado que se obtuvo para una sala vacía ha sido el siguiente:

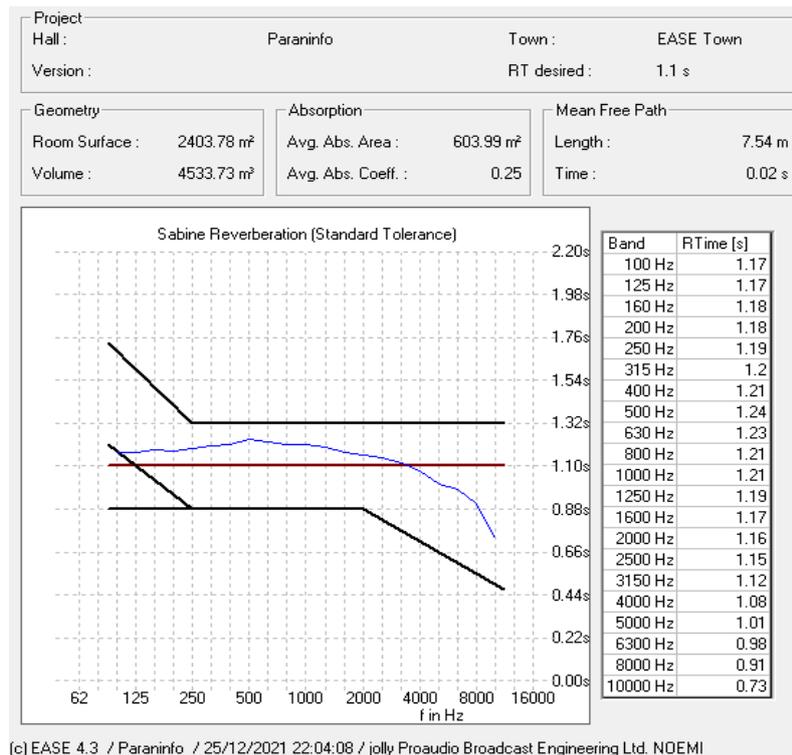


Figura 13. Tiempo de reverberación de la sala sin añadir público.

Se aprecia en los datos de la gráfica que, para la frecuencia de 1KHz, el tiempo de reverberación que se obtiene es de 1.21s similar al que se obtiene en la realidad en la sala.

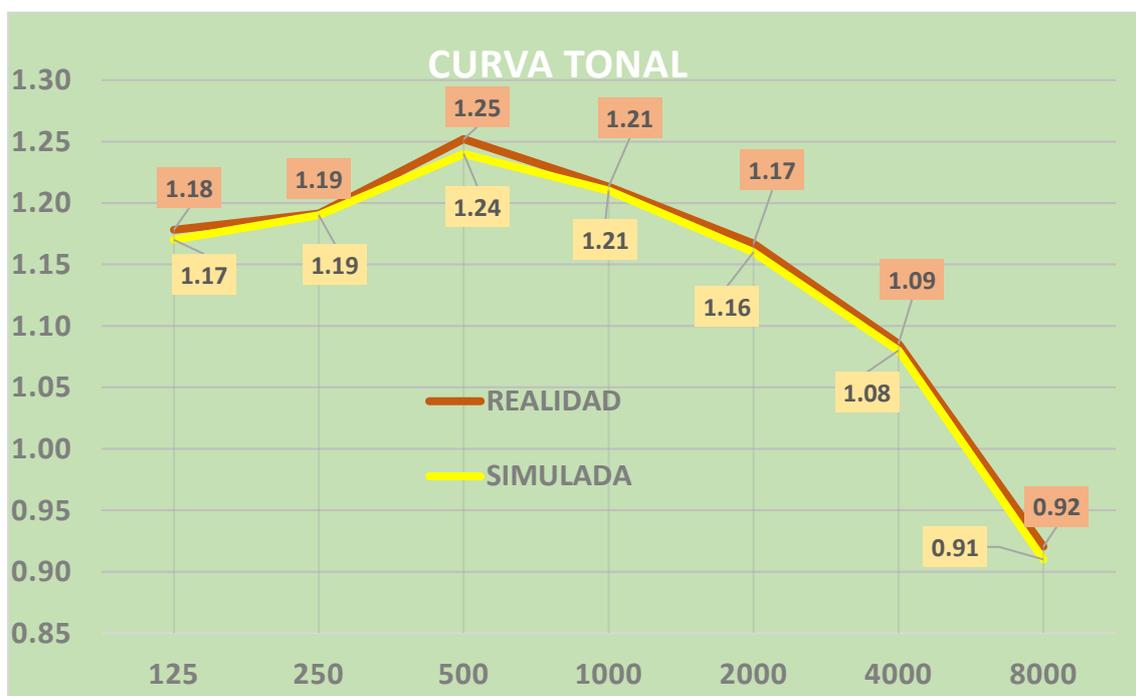


Figura 14. Representación gráfica de las curvas tonales calculadas superpuestas

La acústica de un recinto depende de la cantidad de personas que se encuentren en el mismo, el tiempo de reverberación puede cambiar significativamente e incluso variar los valores de los parámetros de inteligibilidad.

Se ha estudiado el tiempo de reverberación óptimo para los recintos como el nuestro, que se podría clasificar cómo teatro, ya que las actividades que se van a realizar en la sala están destinadas tanto a obras de teatro, conferencias como conciertos y obras musicales. Es por eso, que la elección del TR óptimo debe ser tal que la inteligibilidad de la palabra sea muy alta, así como que la música se perciba con buena calidad.

El volumen total de nuestro recinto es de 4321.08 m³, y para teatros con volúmenes comprendidos entre 100 y 10000 m³, siguiendo las recomendaciones de Antoni Carrión en su libro “Diseño acústico de espacios arquitectónicos” (Carrión, 1998.), se recomienda que el TR_{mid} para una sala ocupada esté comprendida entre $0.7s \leq TR_{mid} \leq 1.2s$, por tanto, para fijar el tiempo óptimo de reverberación podemos determinarla a partir de la siguiente gráfica:

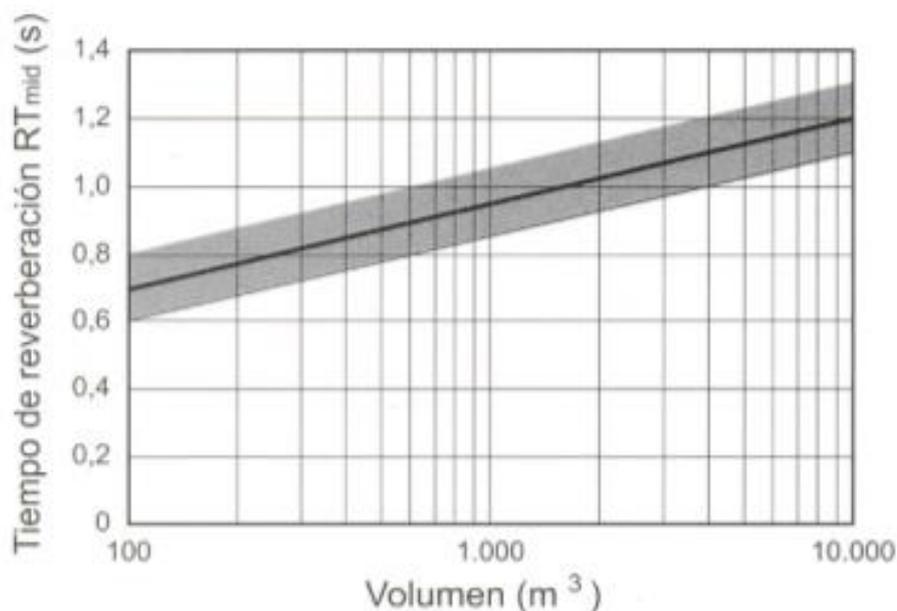


Figura 15. Margen de valores recomendados de TR_{mid} en función del volumen del recinto (sala ocupada)

Se procedió a establecer las áreas de audiencia en los lugares donde se sitúa el público. Estas áreas son unos planos imaginarios a nivel del oído que son utilizados por los módulos de cálculo para mostrar los resultados de diversos cálculos como SPL totales, SPL directos, inteligibilidad, claridad, etc.

Se procedió a simular la sala modificando el coeficiente de absorción de las superficies situadas debajo de las áreas de audiencia, con un 50% de aforo y un 100% de público, según la tabla de Recuero López, para comprobar que los datos que se obtienen del tiempo de reverberación están dentro de los límites en los dos casos:

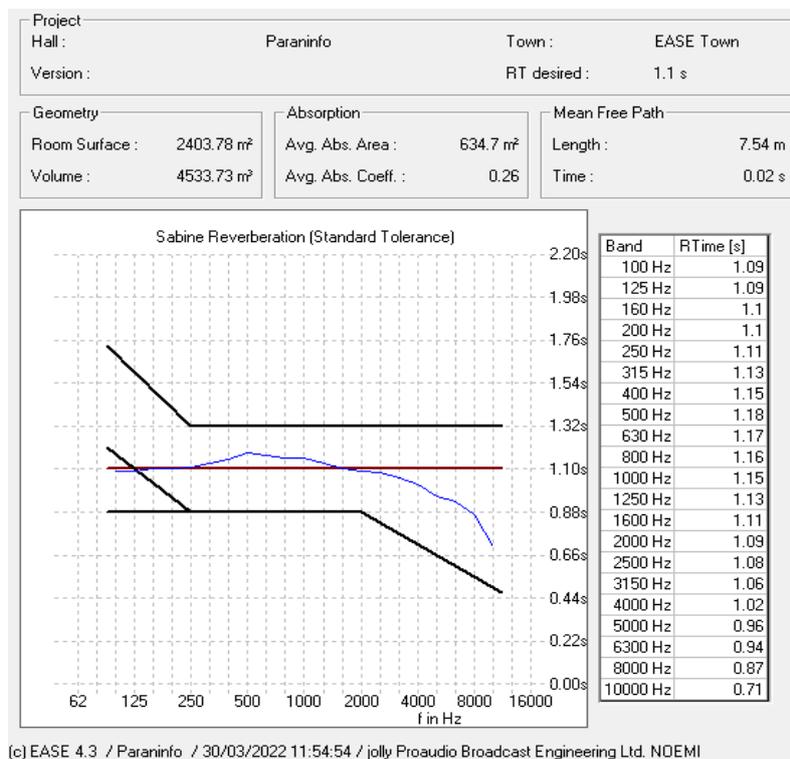


Figura 16. Tiempo de reverberación de la sala al 50%

Se aprecia en los datos de la gráfica que, para la frecuencia de 1KHz, el tiempo de reverberación ha bajado con un 50% de público, por lo que se obtiene es 1.15s, estando dentro de los límites óptimos de reverberación.

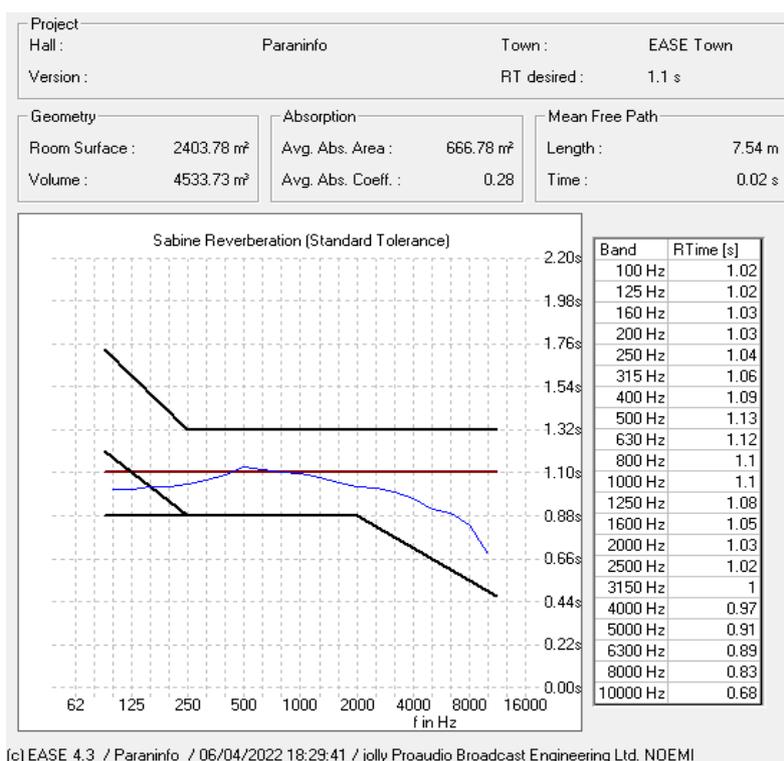


Figura 17. Tiempo de reverberación de la sala al 100%

Nuevamente se realiza la simulación añadiendo completamente público a todas las áreas de audiencia para comprobar que seguimos dentro de los límites. Podemos observar en los datos de la gráfica que, para la frecuencia de 1KHz, el tiempo de reverberación ha bajado de nuevo, encontrándose en 1.1s, y, por tanto, obteniéndose el valor de RT óptimo deseado.

3.3.1 Nivel de presión sonora total (SPL Direct, SPLtotal)

Se ha situado un orador, en este caso una voz femenina, en el centro del escenario, situado a una altura de 1.70m. Los estudios que siguen a continuación se han realizado con la **sala vacía**.

La gráfica de la voz femenina utilizada es la siguiente:

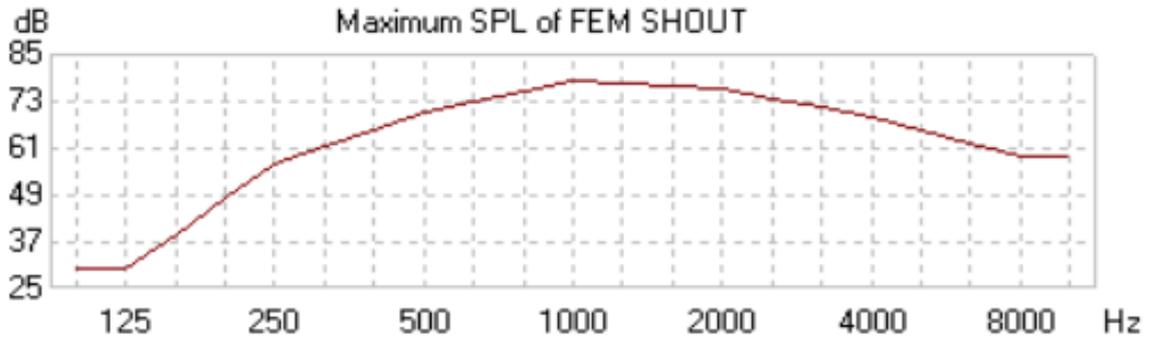


Figura 18. Nivel SPL de voz femenina

Los niveles de presión sonora obtenidos en las áreas de audiencia se muestran en las siguientes figuras:

▪ **DIRECT SPL**

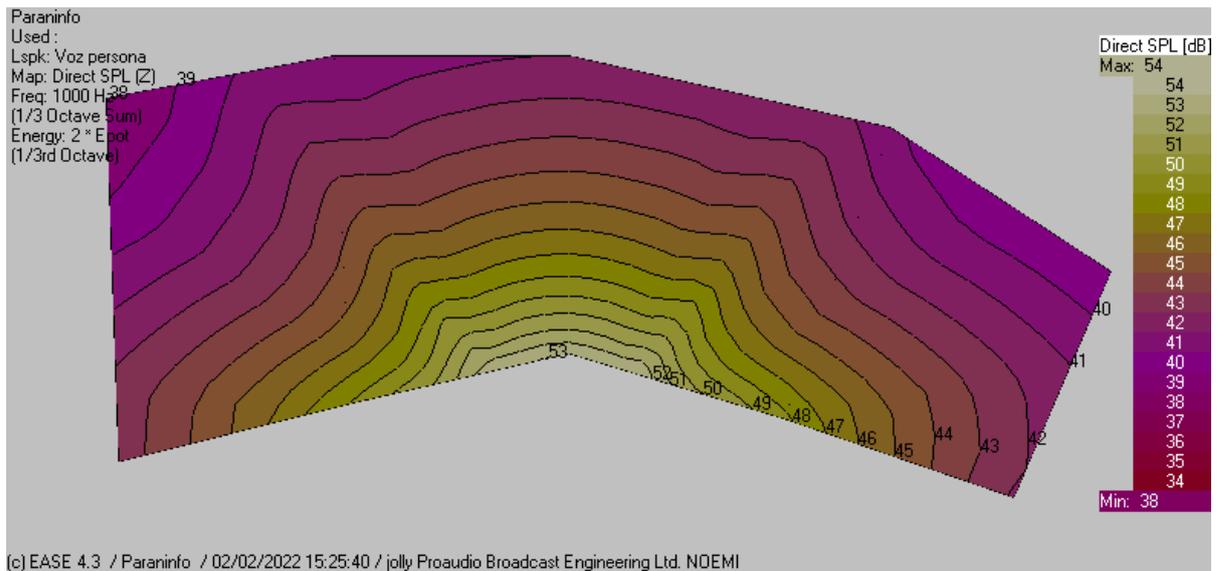


Figura 19. SPL directo en las áreas de audiencia.

Para el SPL directo se ha obtenido unos valores entre 38 dB y 54 dB, por lo que existe una diferencia teórica superior a 10 dB.

▪ **TOTAL SPL**

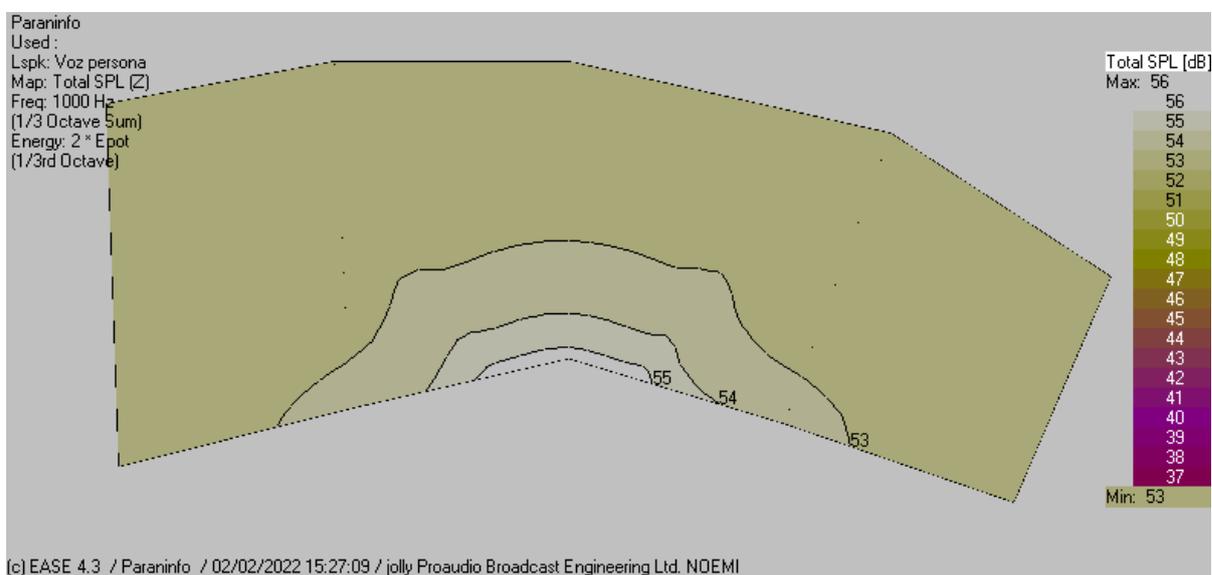


Figura 20. SPL Total en las áreas de audiencia.

Para el SPL Total, que ya contempla las reflexiones y la respuesta de la sala, en el peor de los casos el nivel es de 53 dB, con una ganancia de mas de 10 dB con respecto al sonido directo. Se observa una pequeña diferencia de 3 dB, en las zonas próximas al escenario.

3.3.2 Inteligibilidad de la palabra ALCONS

▪ **ALCONS**

La valoración de este índice de inteligibilidad, que representa el porcentaje de pérdidas en la correcta recepción de la voz, es la siguiente :

%ALCONS	VALORACIÓN
< 3%	EXCELENTE
3% - 7%	MUY BUENA
7% - 10%	BUENA

10% - 15%	POBRE
> 15 %	MALA

Tabla 5. Clasificación ALCons

Teniendo presente esta clasificación obtenemos que:

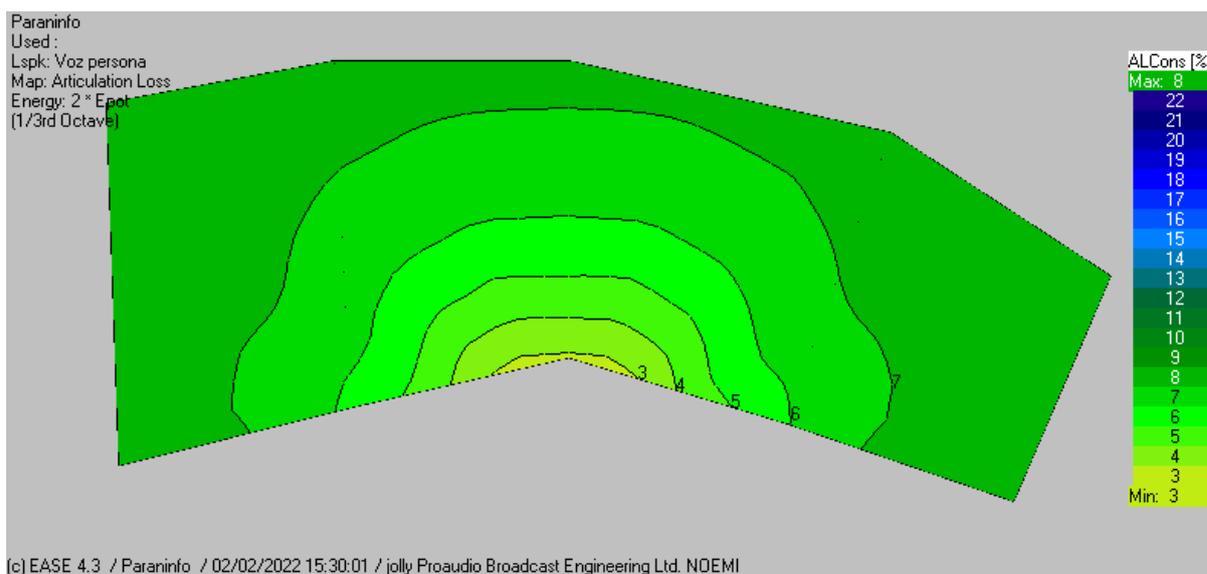


Figura 21. Articulation Loss of Consonants en las áreas de audiencia.

Como se aprecia en las gráficas anteriores, el nivel de ALCons varía desde un máximo del 8% hasta el mínimo del 3%, muy cerca del escenario, lo que supone una diferencia de 5%, por lo que se considera que el nivel de inteligibilidad del recinto es muy bueno.

3.3.3 Criterio de inteligibilidad de la palabra RASTI

- **RASTI**

Para evaluar la inteligibilidad de la palabra también se utiliza el parámetro RASTI, el cual tiene la siguiente valoración:

RASTI	VALORACIÓN
1 – 0.75	EXCELENTE
0.75 – 0.6	MUY BUENA
0.6 – 0.45	BUENA
0.45 – 0.3	POBRE
0.3 – 0	MALA

Tabla 6. Clasificación RASTI

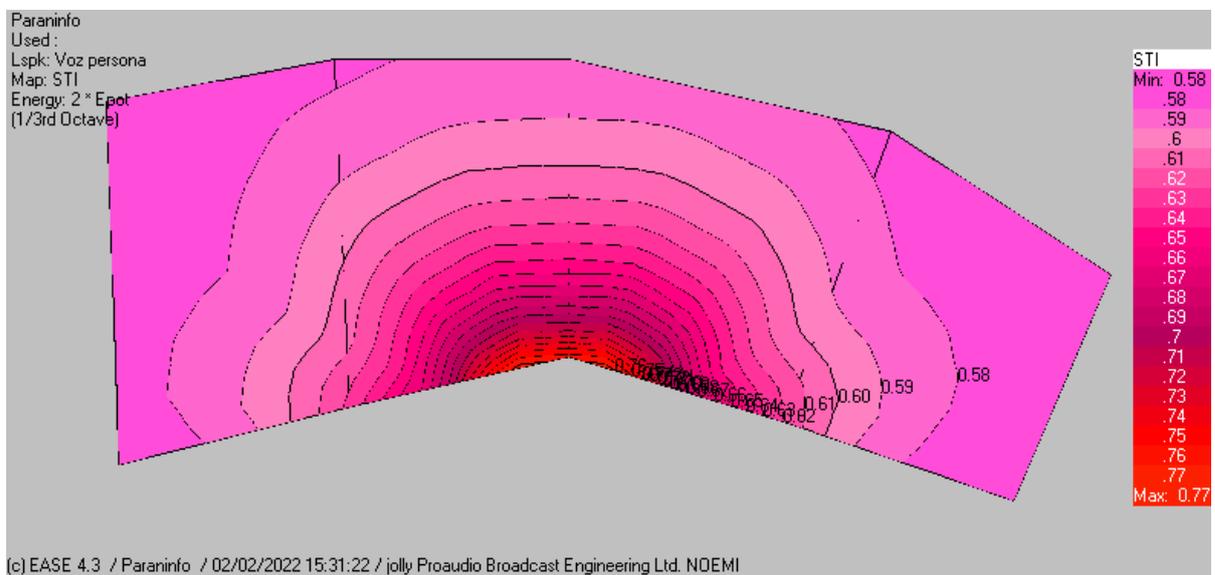


Figura 22. RASTI en las áreas de audiencia.

Tal y como se aprecia en las gráficas anteriores, y al igual que para ALCons, los niveles del RASTI en el recinto varían desde 0.77 a 0.58, por lo que la valoración de la inteligibilidad del recinto es muy buena hasta aproximadamente la mitad de las áreas de audiencia (0.60), y buena las zonas posteriores y las esquinas.

3.3.4 Parámetros de energía. C50 y C80

- **C50**

En las siguientes gráficas, podremos observar los valores del parámetro C50 para todas las áreas de audiencia del recinto.

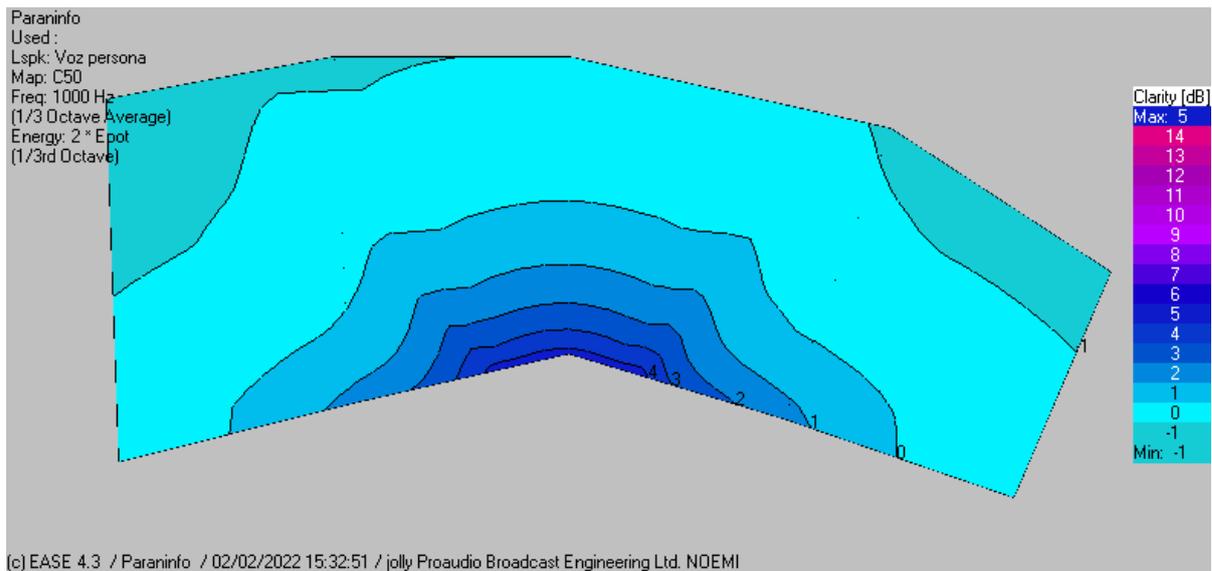


Figura 23. C50 en las áreas de audiencia.

Para hacer la valoración del parámetro C50, relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo y la que le llega posteriormente, primero hay que recordar que se debe cumplir que $C50 > 0$ dB en todos los puntos de la sala, siguiendo las indicaciones de los apuntes correspondientes de la asignatura Acústica Arquitectónica y Ambiental, (Caballero). Si nos fijamos en las gráficas anteriores, vemos que el valor mínimo es de -1 en las esquinas y el valor máximo de 5. Por tanto, la claridad vocal es muy buena salvo en las esquinas indicadas en la gráfica anterior.

- **C80**

En las siguientes gráficas, podremos observar los valores del parámetro C50 para todas las áreas de audiencia del recinto.

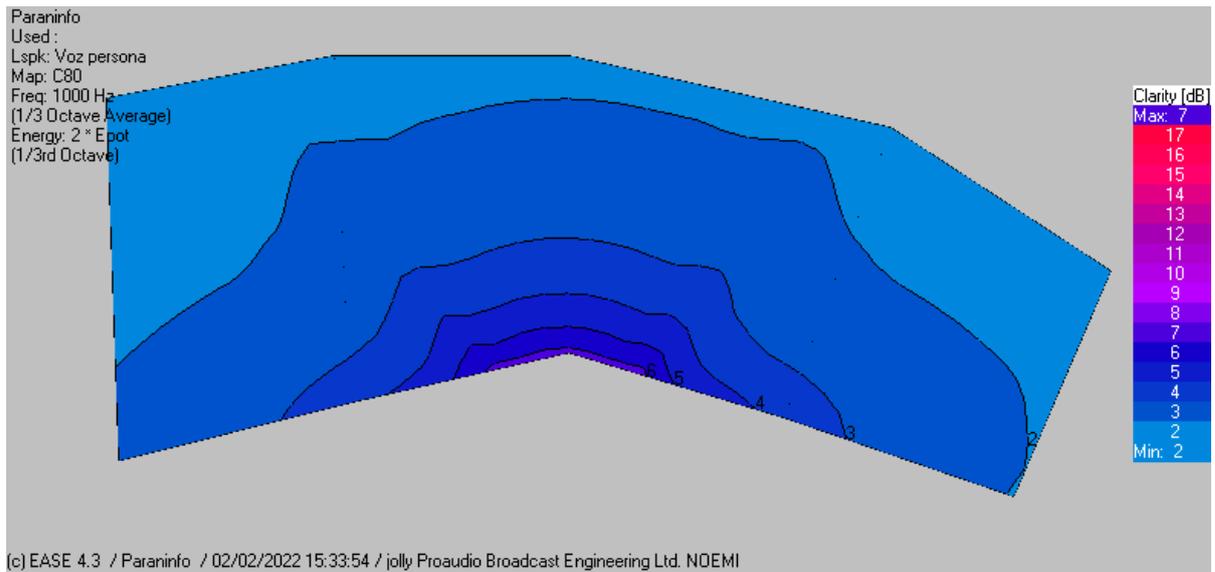


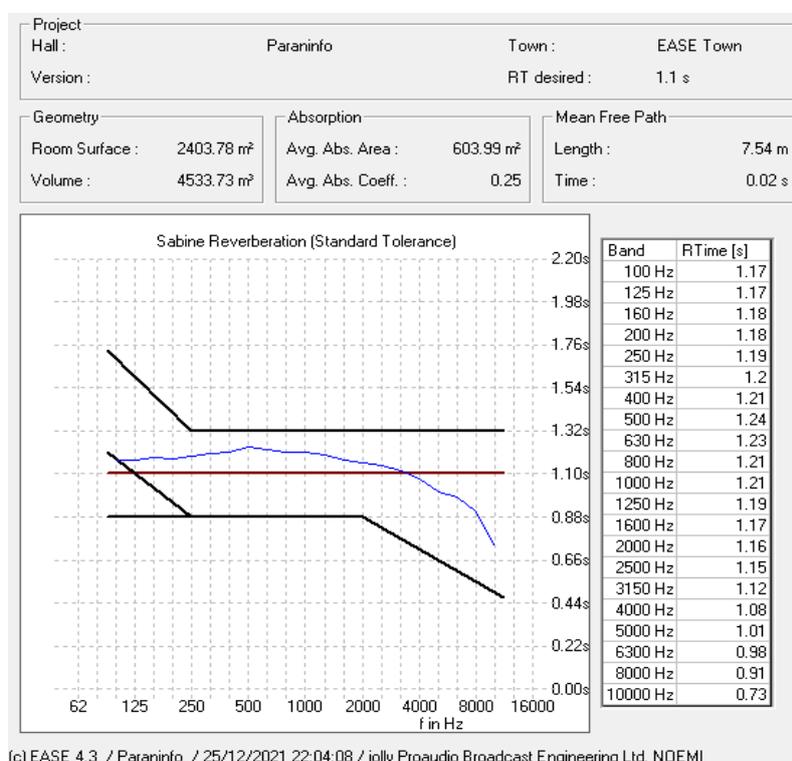
Figura 24. C80 en las áreas de audiencia.

El C80, es la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 80 ms desde la llegada del primer sonido directo y la que le llega posteriormente. Para este parámetro también se ha de cumplir que $C80 > 0$ dB, (Caballero), en todos los puntos de la sala. Por lo que observando los valores, vemos que el valor mínimo es de 2 dB y el valor máximo de 7 dB, con lo cual se cumple perfectamente el requisito de claridad musical.

4. ESTUDIO Y PROPUESTA PARA LA MEJORA DE LA ACÚSTICA

4.1 Mejoras en el tiempo de reverberación

Tras haber realizado los ajustes necesarios del coeficiente de absorción del techo, y haber simulado la sala, se consiguió la misma curva tonal que en el recinto real. Además, tras haber elegido, como demuestra la Figura 15, que nuestro TR_{mia} deseado es de 1.1s a la frecuencia de 1KHz, según debido a los criterios de utilización de la sala, tal y como mencionábamos anteriormente, según Antoni Carrión (Carrión, 1998.), tanto para conferencias como para obras de teatro y eventos musicales, se puede comprobar en la **Figura 13**, que en el Paraninfo, a la frecuencia de 1KHz, se tiene un TR de 1.2s, por lo que no es necesario realizar mejoras para el tiempo de reverberación, ya que está dentro de los criterios de la sala y cumple con la tolerancia del simulador como muestra la siguiente imagen, copia de la **Figura 13** :



“Figura 13. Tiempo de reverberación de la sala sin añadir público.”

4.2 Simulación de ecos y medidas de difusión sonora

Otro aspecto que considerar en la sala, son las reflexiones que puedan dar lugar a ecos indeseados. Para ello, haciendo uso del simulador, se ha colocado a un oyente en siete puntos diferentes de la sala, y se ha procedido a simular la respuesta en estos puntos, estos lugares se muestran en la **Figura 25**. Las gráficas obtenidas serán los reflectogramas en cada punto. Según el manual de EASE, se recomienda utilizar orden 10 en el estudio de las reflexiones, obteniendo los siguientes reflectogramas.

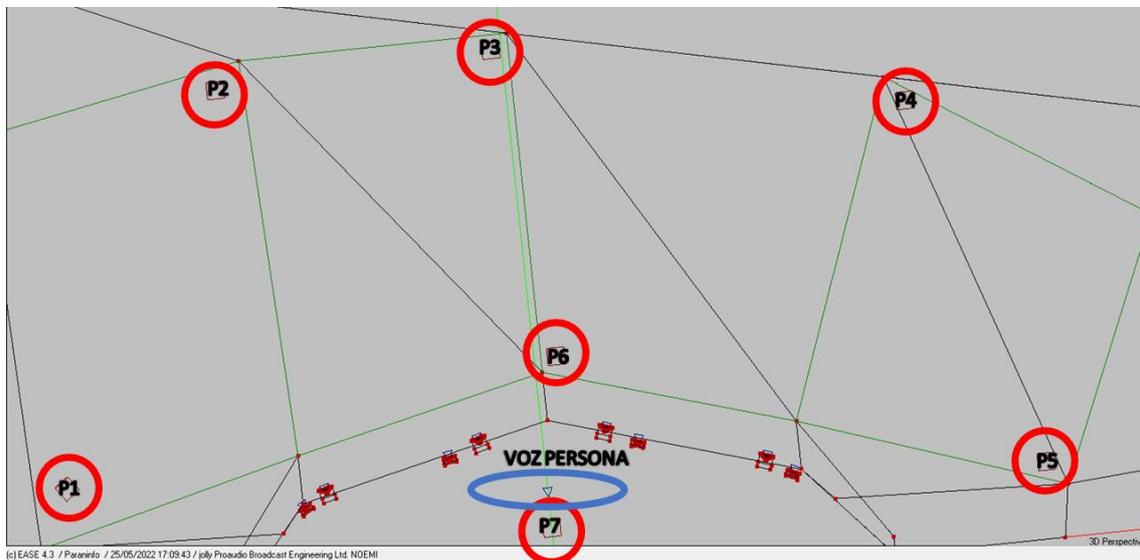


Figura 25. Posiciones oyentes de la sala

Reflectograma oyente 1

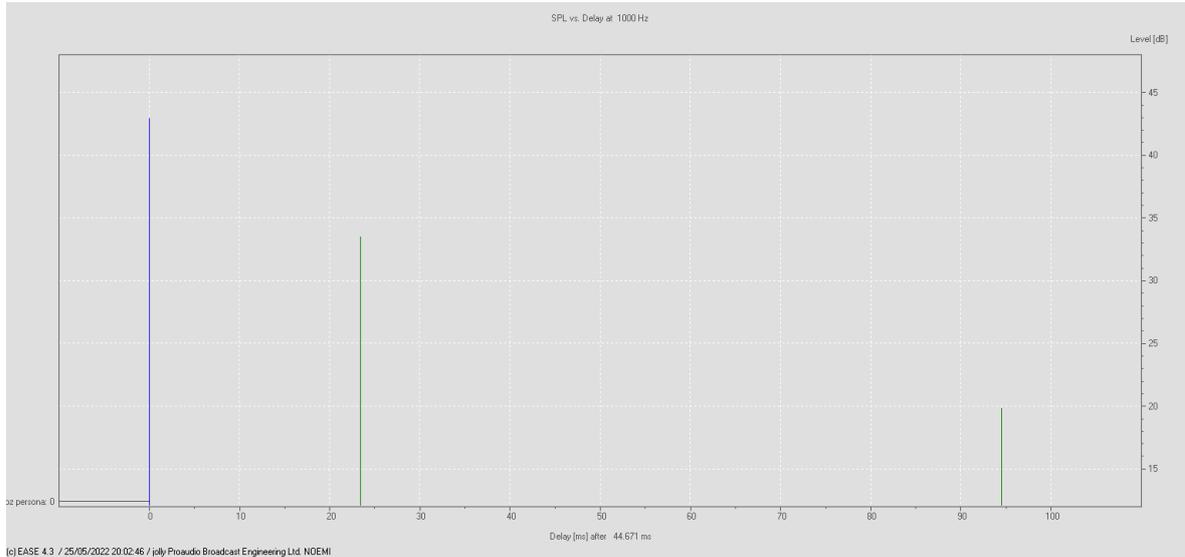


Figura 26. Reflectograma en el punto de escucha 1

Reflectograma oyente 2

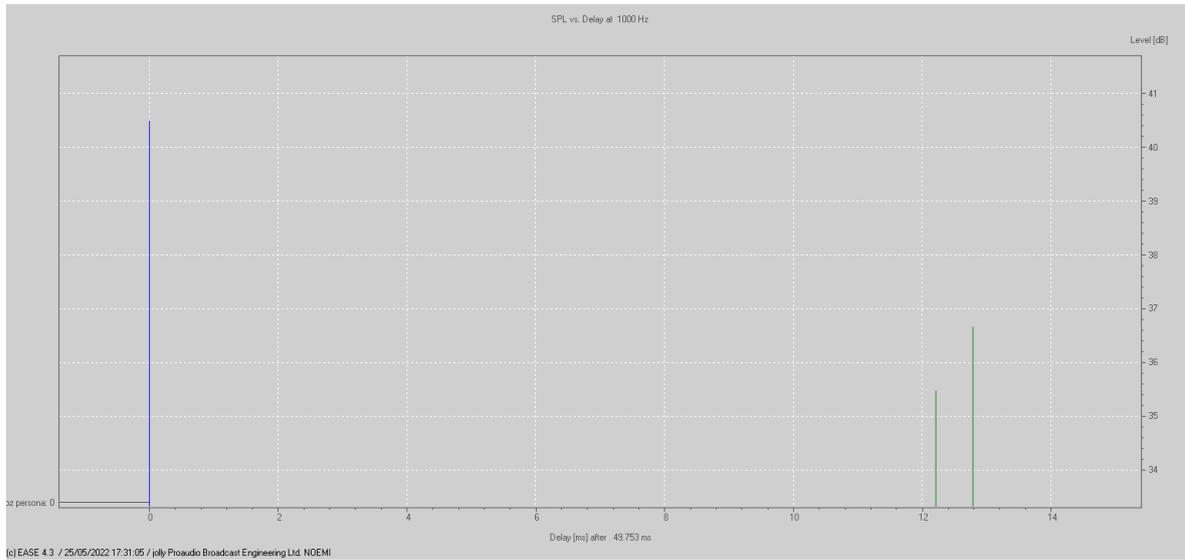


Figura 27. Reflectograma en el punto de escucha 2

Reflectograma oyente 3

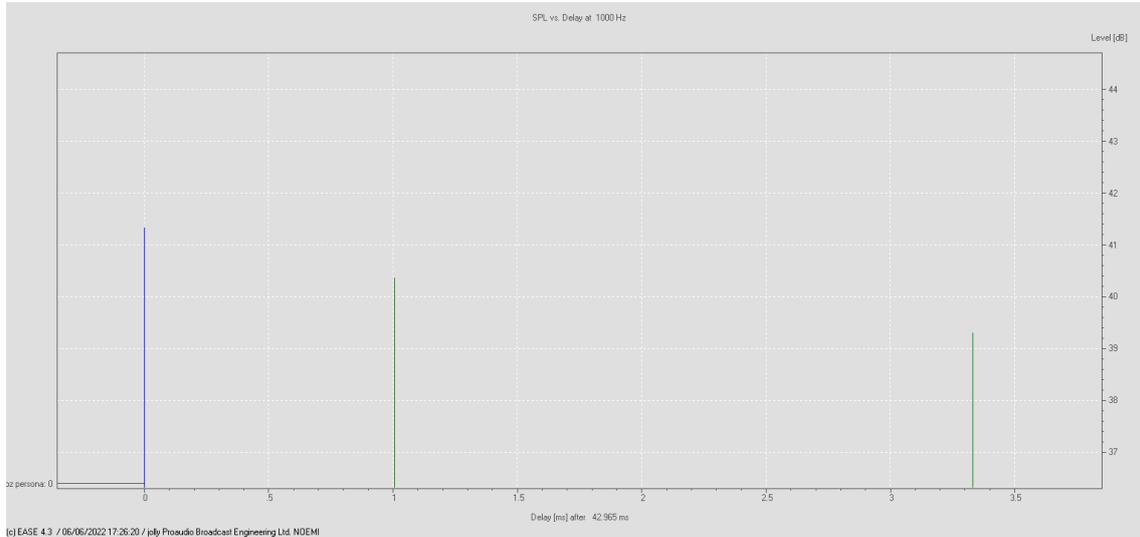


Figura 28. Reflectograma en el punto de escucha 3

Reflectograma oyente 4

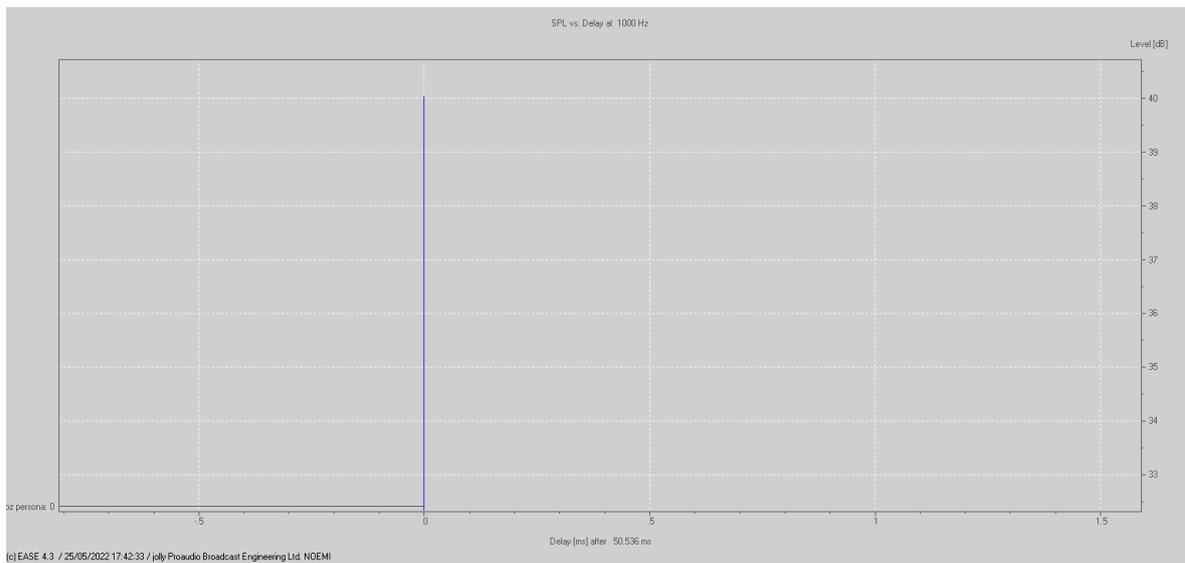


Figura 29. Reflectograma en el punto de escucha 4

Reflectograma oyente 5

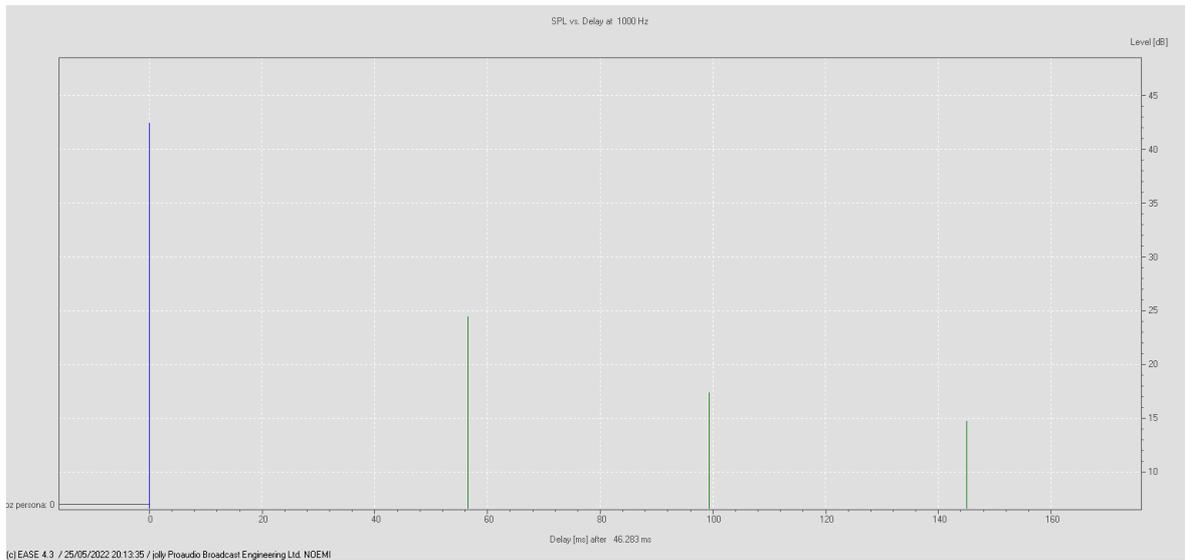


Figura 30. Reflectograma en el punto de escucha 5

Reflectograma oyente 6

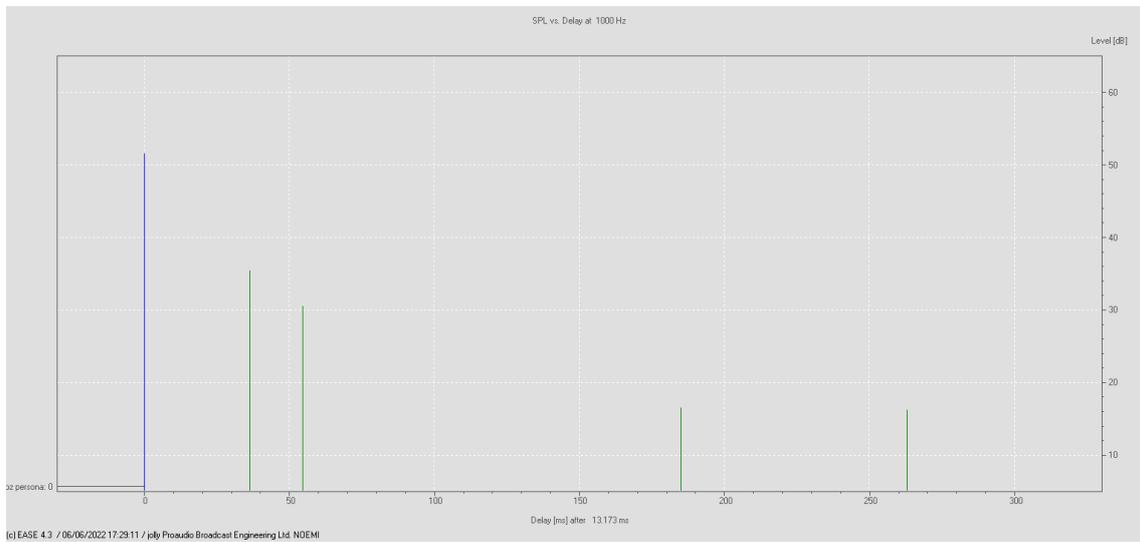


Figura 31. Reflectograma en el punto de escucha 6

Reflectograma oyente 7

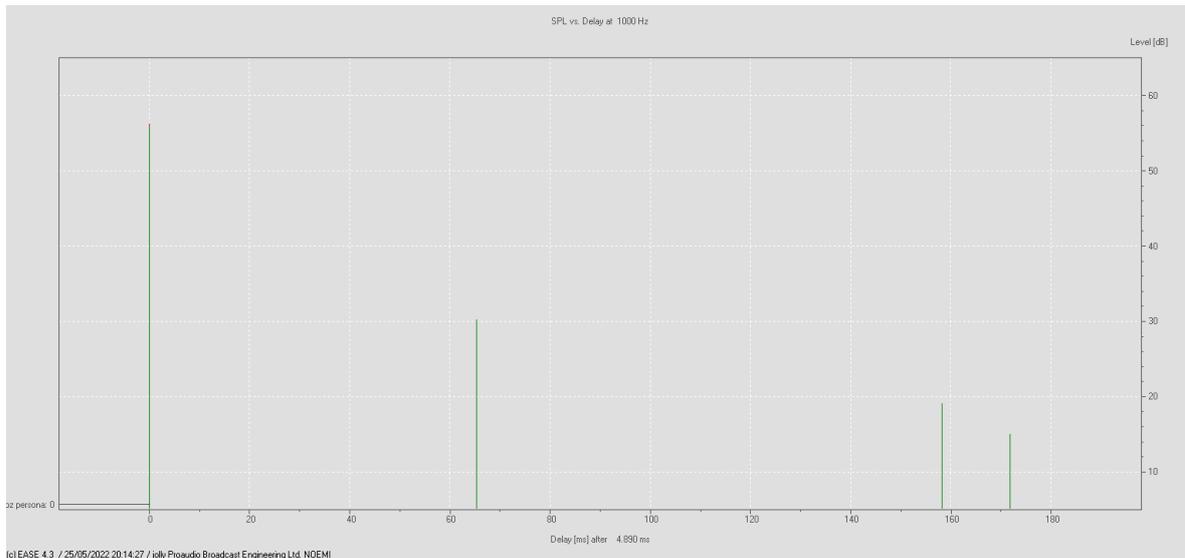


Figura 32. Reflectograma en el punto de escucha 7

4.3 Estudio acústico del escenario

Partiendo del reflectograma del punto de escucha 7, donde la primera reflexión llega con 4 ms de retraso pero con el mismo nivel que el sonido directo, se puede identificar una de las posibles deficiencias en la acústica del Paraninfo. Como se ha mostrado en los apartados anteriores, la acústica del recinto en cuanto a áreas de audiencia es buena. No obstante, el escenario tiene una superficie totalmente paralela a 7 metros de altura, con lo cual se genera un eco pulsatorio perceptible.

En este espacio, se ha realizado un barrido en frecuencia, intentando localizar frecuencias de resonancia tal y como se indica en la siguiente figura:

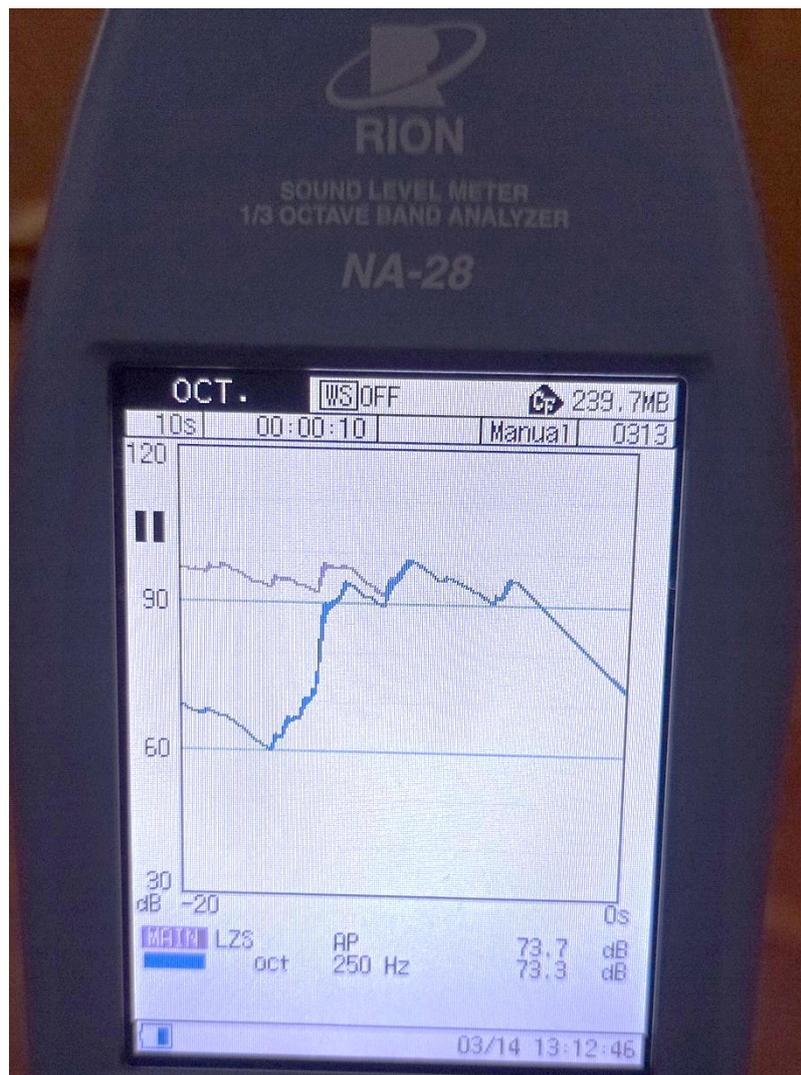


Figura 33. Foto tomada directamente del sonómetro con el barrido en frecuencia

Se observa que en la octava de 250 Hz hay una variación de 10 dB en picos de señal captados por el sonómetro, lo que indica la presencia de una resonancia. Como la distancia entre las superficies paralelas es de 7 metros, estas resonancias son múltiplos de 50 Hz, es decir, 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, 250 Hz ...

Este estudio de resonancias en las zonas del escenario, puede ser objeto de estudios futuros, al no poder abarcarse en este TFG. No obstante, en el siguiente apartado, se propone una posible solución para evitar estos ecos pulsatorios, producto de la resonancia entre estas superficies paralelas.

4.4 Propuesta de mejora acústica para el techo del escenario

Tras observar los problemas que se presentan en cuanto a las reflexiones en la zona del escenario, lo óptimo sería sustituir el falso techo por otro con cierta inclinación hacia las áreas de audiencia.

Como se ha observado, no es necesario aumentar la absorción acústica de la sala, pero sí es imprescindible eliminar estos ecos pulsatorios en el escenario. Por tanto, se recomienda utilizar al menos un revestimiento muy absorbente, como el piramidal de las zonas posteriores presentes en la sala, en el falso techo que cubra la mayor parte del escenario. Con esto se evitarían las molestias, que se indicaban en la introducción de este trabajo a raíz de los comentarios de los músicos que han utilizado las instalaciones del Paraninfo.



Figura 34. Waffel instalado en las paredes posteriores del Paraninfo

La instalación de este material sobre el techo del escenario da lugar a una disminución del tiempo de reverberación situándolo para la sala vacía en 1.12 s.

Para una ocupación del 100% en las áreas de audiencia, el tiempo de reverberación final es de 1.02 s, cumpliendo con los márgenes de tiempo óptimos indicados por (Carrión, 1998.), tal y como se aprecia en este resultado final de la simulación realizada:



Figura 35. Tiempo de reverberación con mejora en el techo del escenario

También se propone la instalación de paneles difusores acústicos en esta superficie paralela al suelo del escenario, lo que proporcionará la difusión de las ondas que llegan con reflexiones indeseadas. Aunque no tenga que ver con la acústica, estos paneles podrían proporcionar una estética diferente al recinto que resultaría más atractivo para artistas y clientes.

En las siguientes imágenes se presentan los materiales a instalar.

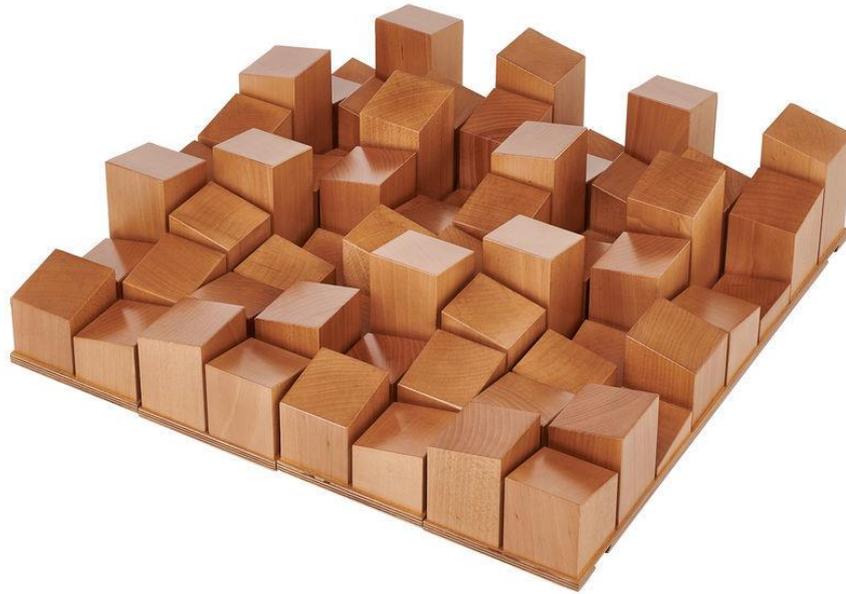


Figura 36. Panel difusor acústico Vicoustic

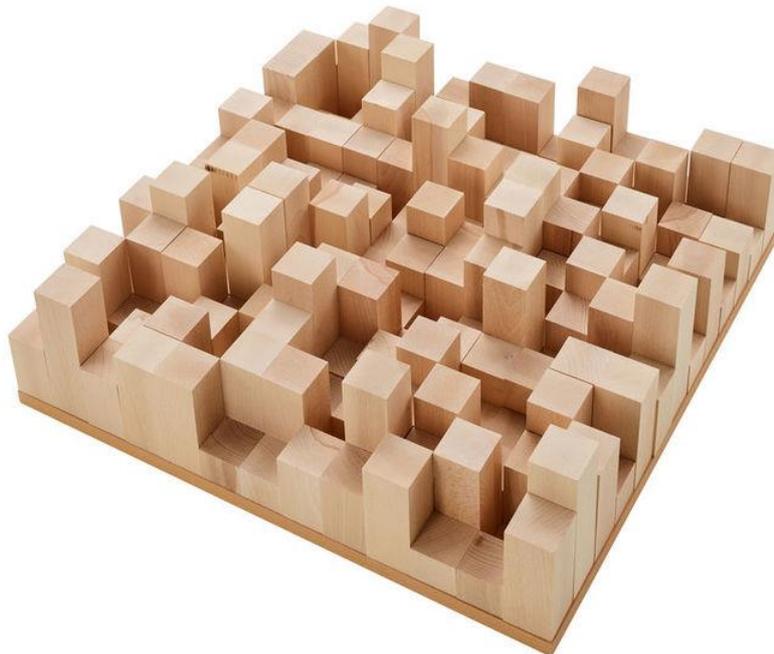


Figura 37. Panel difusor acústico t.akustik

5. SIMULACIÓN DE LA SALA CON REFUERZO SONORO

5.1 Ubicación de los equipos en el software de simulación

Para la simulación del sistema de refuerzo sonoro, se indica que en la primera visita al Paraninfo, solo se disponía de 4 altavoces en la parte superior del escenario, montadas en un andamio que cuelga del techo, de la marca **JBL**, modelo **EON 15 P-1**. En la base de datos de EASE no se encuentra este modelo de altavoz, por lo que la simulación se realiza con un altavoz de características similares al altavoz colocado en la realidad.

El modelo utilizado en esta simulación es el **EON 15 G2**. La distribución de altavoces es la mostrada en la **Figura 38**, siguiendo la distribución real de los mismos en la sala.

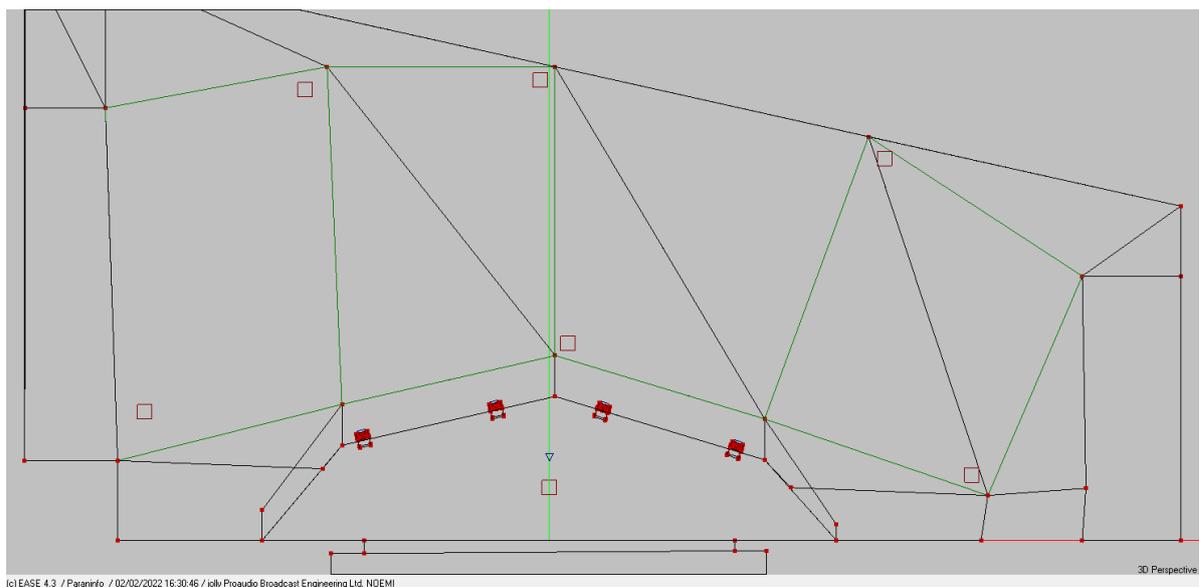


Figura 38. Distribución de los 4 altavoces en la sala (vista en planta)

Por otro lado, al refuerzo sonoro se incorporaron 4 altavoces adicionales en el borde del escenario, de la marca **d&b audiotechnik**, modelo **E8**. Se tomó la decisión de realizar medidas reales de difusión sonora a fin de contrastarlas con las medidas de la simulación, ajustando los niveles correspondientes. La disposición final de los altavoces tanto en el escenario como en el techo es la siguiente:

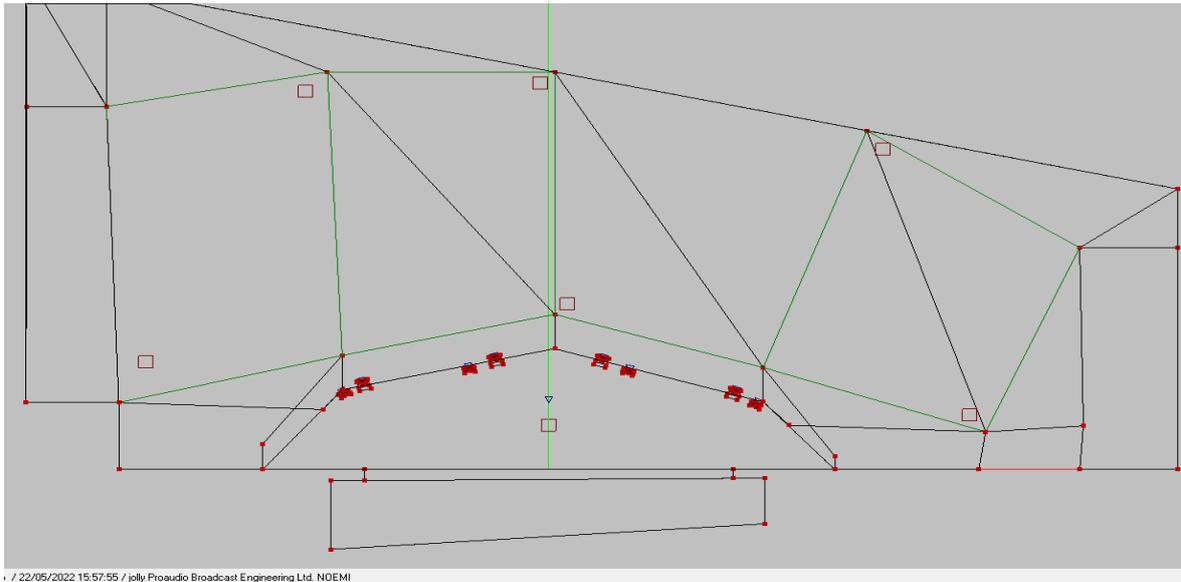


Figura 39. Distribución de los 8 altavoces en la sala (vista en planta)

5.2 Estudio de cobertura sonora. Simulación y medidas in-situ.

Configuramos los parámetros en la simulación de los altavoces del techo, de tal manera que coincidan con los valores medidos in-situ, de los niveles de difusión registrados. Para ello, ha sido necesario ajustar la potencia hasta 7.5W. Los altavoces reales, según características en el pliego de condiciones, tienen una potencia nominal de 130 W LF y 50 W HF con frecuencia de corte a 1.5 kHz.

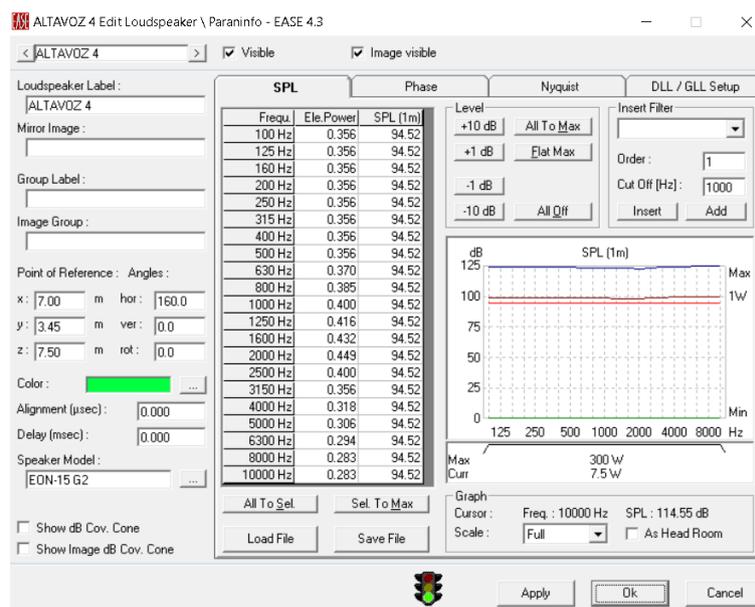


Figura 40. Configuración altavoces del techo en EASE

Aunque en la **Figura 40** se represente solo el altavoz número 4, todos los altavoces tienen la misma configuración.

También se configuraron los altavoces presentes en el escenario, de tal manera que encajen con el nivel de presión sonora total registrado. En el pliego de condiciones, están las características técnicas de estos altavoces, que tienen 150 w nominales. Para la simulación se ha ajustado la potencia a solo 1.6 W, según se indica en la siguiente figura:

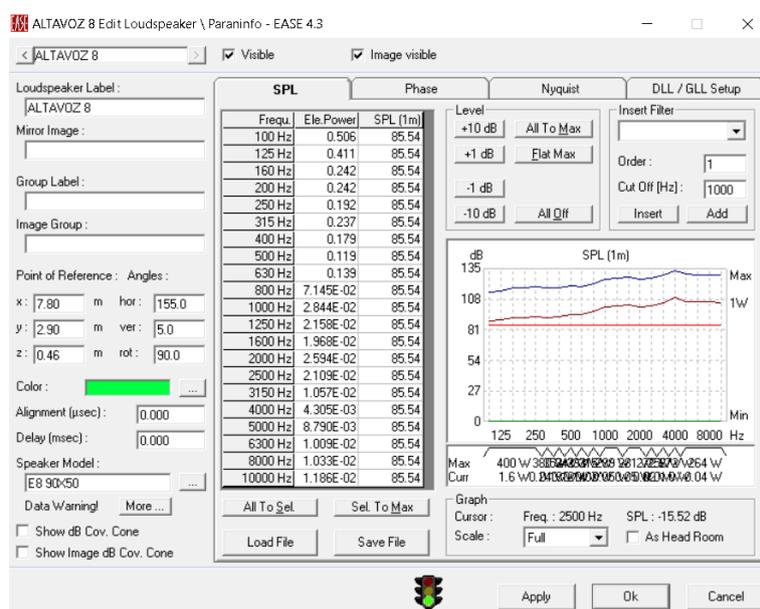


Figura 41. Configuración altavoces del escenario en EASE

Al igual que la anterior figura, en esta figura se muestra solo un altavoz, sin embargo, es la misma configuración para todos los altavoces presentes en el escenario.

A continuación, se presenta la comparación de los datos de difusión sonora medidos en el recinto con los valores simulados. Para ello, primero se muestran los resultados obtenidos de la simulación en el software, con los 4 altavoces colgados en el techo del escenario, una vez realizado el ajuste de potencia.

▪ **Nivel de presión sonora (SPLtotal)**

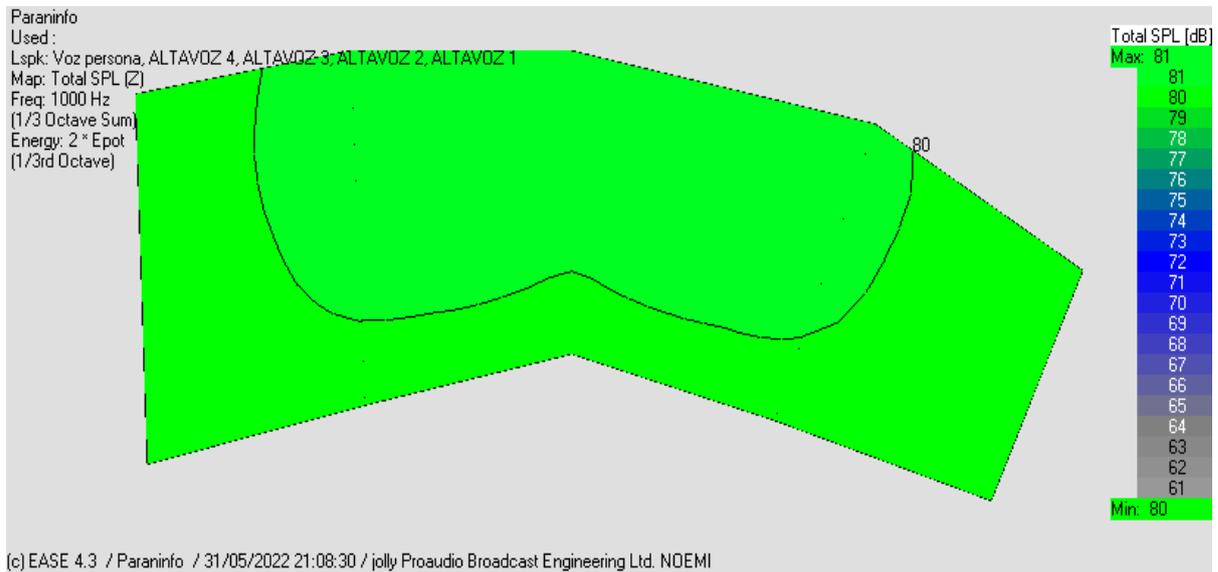


Figura 42. SPL Total en las áreas de audiencia con refuerzos sonoros (4 altavoces)

Como se puede observar en la figura anterior, el nivel de presión sonora total en toda la sala oscila entre 80 dB y 81 dB, por lo que la distribución de niveles es muy homogénea, sin grandes diferencias de intensidades acústicas en toda la sala, de forma teórica.

Se realizaron medidas de difusión sonora, de 10 segundos de promedio, con los altavoces emitiendo ruido rosa, al nivel normal de uso en la sala.

Es importante indicar, que esta prueba de difusión sonora ya incluye la ecualización de la PA (*Public Address*) que el personal técnico, que opera este sistema de refuerzo, ha ido ajustando de forma empírica para compensar los defectos en la acústica de la sala.

Se fijaron 12 puntos de medida distribuidos homogéneamente en toda el área de audiencia, partiendo desde la primera fila. En las siguientes figuras, se presentan los resultados obtenidos para la banda de octava de 1 kHz.

Para cada punto, se muestra el valor obtenido en la simulación y en la parte inferior, el valor registrado de difusión sonora in-situ.

En la **Figura 43**, con los 4 altavoces colgados del techo:

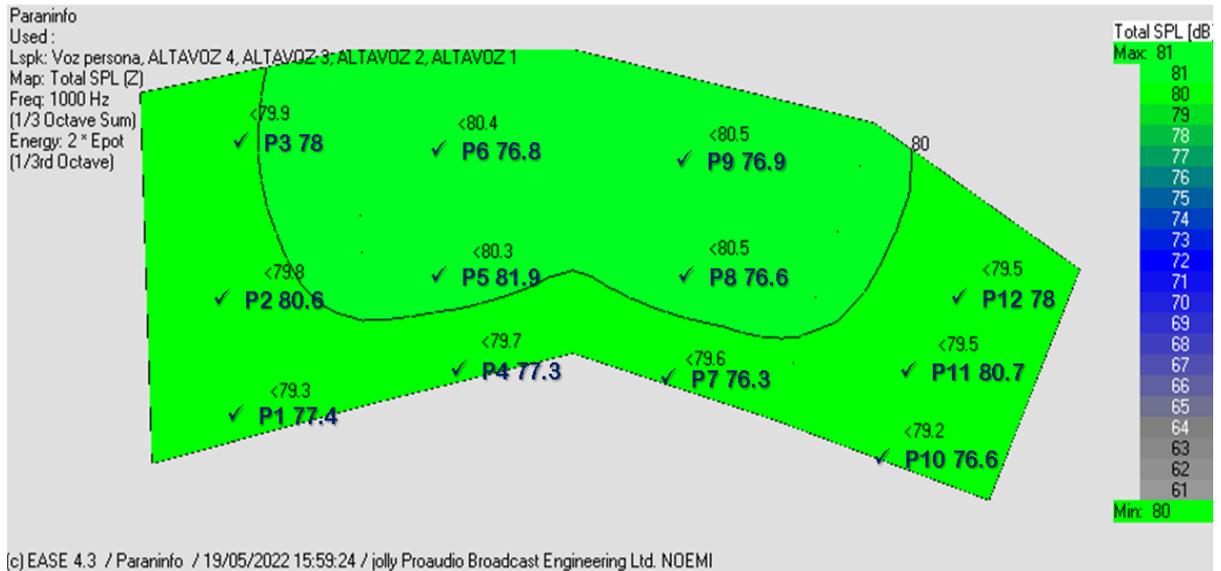


Figura 43. Difusión de altavoces del techo

En la **Figura 44**, con todos los altavoces del sistema:

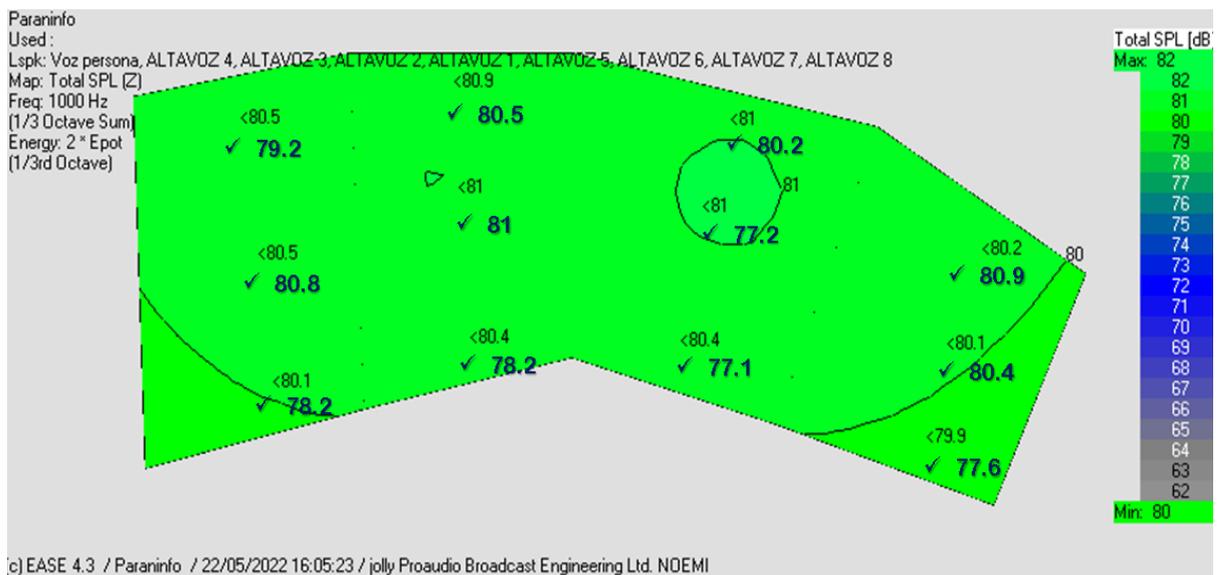


Figura 44. Difusión de todos los altavoces

De las medidas in-situ, se detecta un defecto en la cobertura del área de audiencia, ya que el altavoz número 3, da lugar a un nivel unos 3 dB inferior al resto de la sala (puntos de medida P7, P8 y P9). El servicio técnico del Paraninfo confirma esta incidencia, debido a un mal ajuste de la ganancia de este altavoz, pendiente de subsanar.

A continuación, se muestran los datos medidos en todas las bandas de octava:

Para las medidas de difusión con solo la emisión de los 4 altavoces colgados del techo, se obtienen los siguientes niveles:

Posiciones	dB total	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	16 kHz
P1	85.6	76.4	77.7	72.9	77.9	77.4	78.8	74.8	68	63.1
P2	87.7	77	75.9	73.8	78.9	80.6	81.1	80	75.2	69.7
P3	85.6	77.3	73.4	73.2	77.9	78	79	76	67.8	62
P4	85.9	77.5	77.2	73	78.8	77.3	79.1	74.4	69	65.1
P5	88.8	77.1	76.5	74.4	79.2	81.9	82.6	81.2	77.4	73.2
P6	85.5	77	71.6	70.8	79.3	76.8	78.3	76.7	70	65.3
P7	84.6	77	76.3	72.5	76.7	76.3	77.5	73.3	66.3	58.8
P8	84.5	76.9	73.6	71.7	77.1	76.6	77.3	75.2	68.3	62.4
P9	84.7	77.5	72.4	72.2	77.3	76.9	77.3	75	68.3	60.6
P10	85.6	77.8	78.4	74.2	78.3	76.6	77.5	73.5	66.8	60.7
P11	87.3	76.9	75.7	73.5	79.3	80.7	80	78	75.4	72.8
P12	85.5	76.1	73.5	73.5	77.8	78	78.1	76.6	67.7	64.7

Tabla 7. Datos de difusión sonora. 4 altavoces del techo

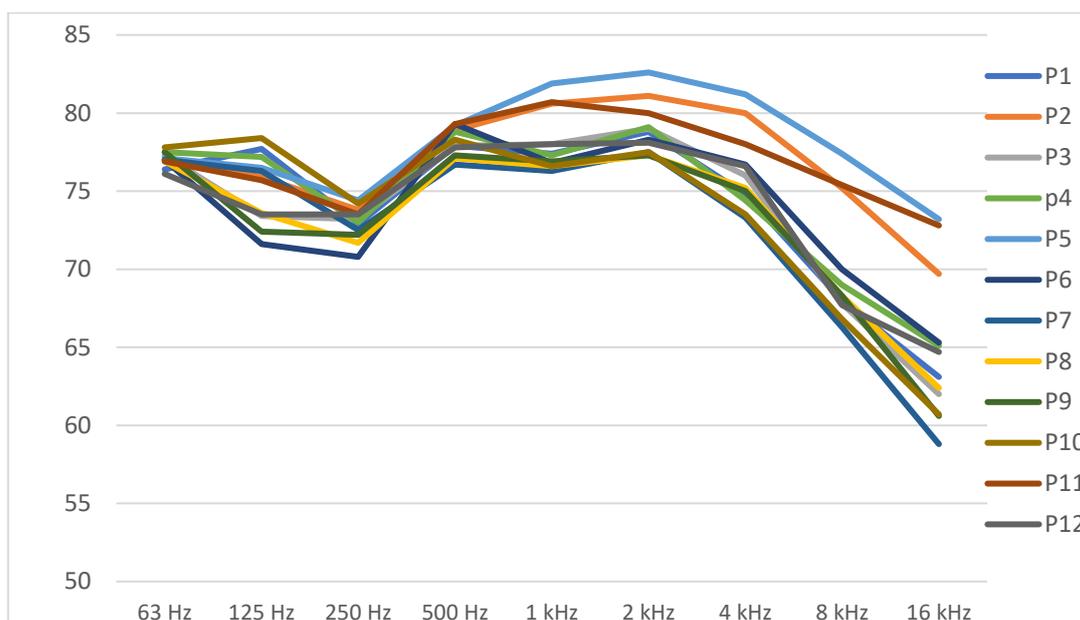


Figura 45. Gráfica de difusión sonora. 4 altavoces del techo

Al analizar la gráfica, se observa que existe una atenuación del orden de 10 dB en la banda de octava de 250 Hz con respecto al resto de frecuencias, lo que supone una ecualización de la señal percibida. Esto se debe al ajuste que el personal técnico del Paraninfo ha aplicado para minimizar efectos indeseables en esta frecuencia.

Para las medidas de difusión con la emisión de todo el sistema de refuerzo sonoro: 4 altavoces colgados del techo y 4 al borde del escenario, se obtienen los siguientes niveles:

Posiciones	dB total	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	16 kHz
P1	85.8	79	73.6	72.2	77.5	78.2	78.7	76.2	68.2	61.5
P2	87.7	77.4	75.2	74	78.7	80.8	81.5	79.7	74.7	68.9
P3	87.1	79.5	78.5	73.4	79.3	79.2	79.8	76.3	70.3	64.8
P4	85.9	77.5	72.1	71.5	78	78.7	78.9	77.1	70.6	65.9
P5	88.1	77	76.2	73.4	78.9	81	81.8	80.3	76.6	72.4
P6	87.6	79.9	77.6	74.7	79.9	80.5	79.9	77.6	71.8	67.3
P7	85.1	77.3	73	73	78.1	77.1	77.5	75.9	69.2	63.3
P8	84.9	76.1	74	71.7	78	77.2	78	75.7	68.8	62.7
P9	87.2	79.4	78.2	73.8	79.1	80.2	79.7	77.2	71	65.1

P10	85.5	77.5	76.3	72	77.6	77.6	78.5	75.7	69.4	63.2
P11	87.2	76.4	75.3	73.3	79.7	80.4	80.1	78	74.9	72.3
P12	87.4	78.2	77.1	74.2	79.8	80.9	79.5	78.3	72.3	66.3

Tabla 8. Datos de difusión sonora. Todo el sistema

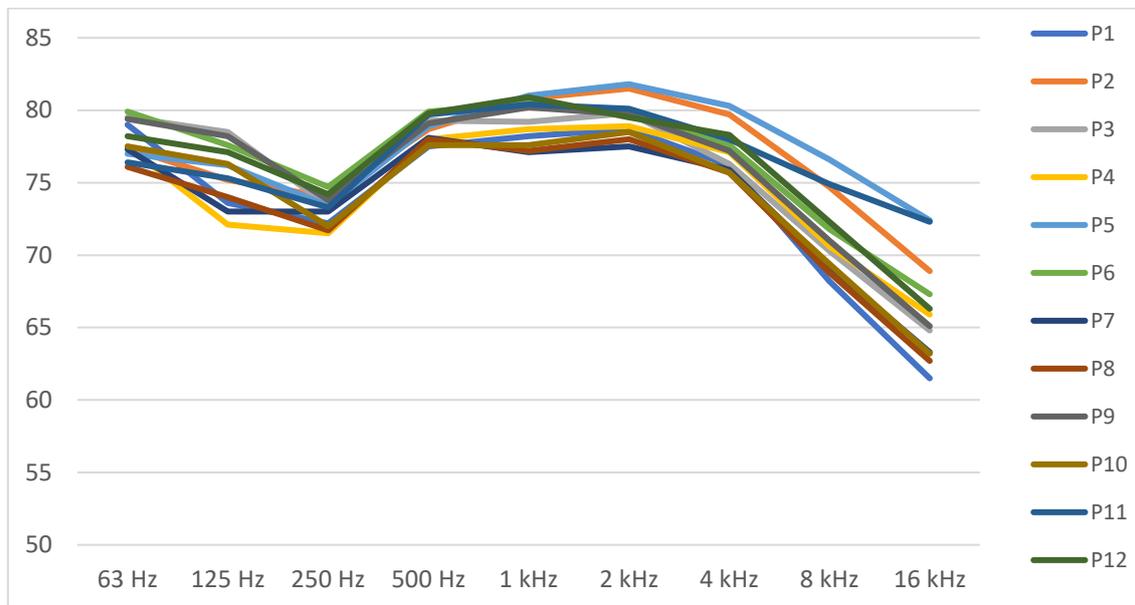


Figura 46. Gráfica de difusión sonora. Todo el sistema

Se observa que entre 500 Hz y 4kHz la respuesta del sistema es plana con menos de 3dB de diferencia, en el peor de los puntos, el P5 (81.8 - 78.9).

Se observa, que en los puntos 1, 4, 7 y 10, correspondientes a la primera fila de las gradas, hay un incremento de nivel del orden de 1 dB. En la siguiente tabla, podemos observarlo con detalle:

	P1	P4	P7	P10
4 altavoces	79.2	77.3	76.3	76.6
8 altavoces	78.2	78.7	77.1	77.6

Tabla 9. Comparación incremento primera fila

5.3 Parámetros acústicos mediante simulación

Mediante el software EASE, se procedió a obtener los diferentes parámetros de la acústica de la sala teniendo como fuente todo el sistema acústico descritos anteriormente: 4 altavoces en el techo y 4 altavoces en el borde del escenario.

- **ALCONS:** valor entre 7% y 5%. Valoración: muy buena.

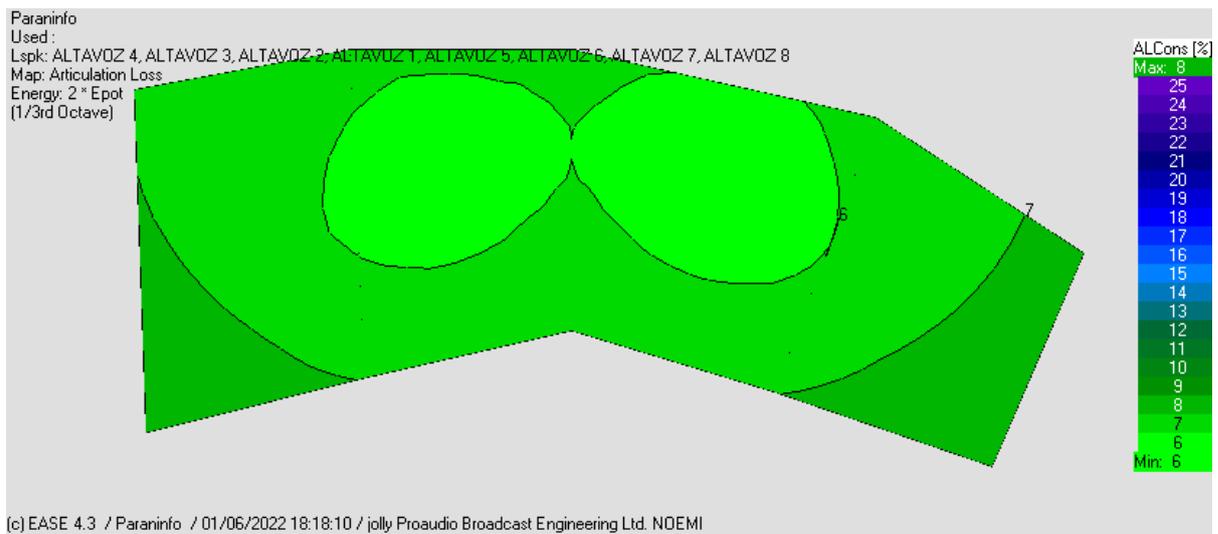


Figura 47. ALCons en las áreas de audiencia con refuerzo sonoro

- **RASTI:** valor entre 0.58 y 0.63. Valoración: muy buena y buena en los extremos.

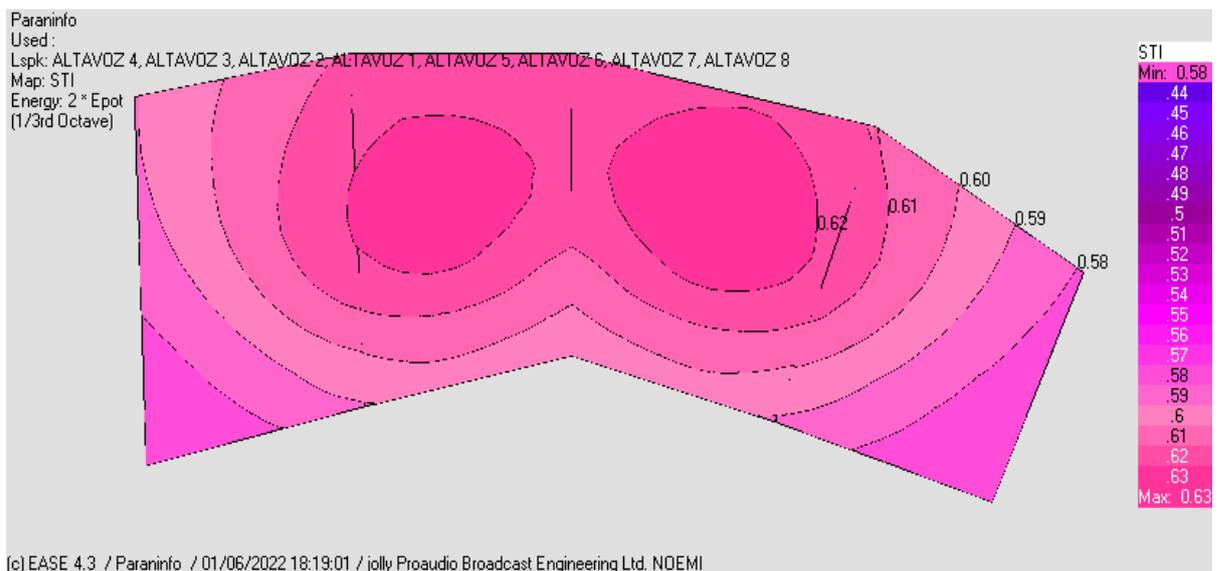


Figura 48. RASTI en las áreas de audiencia con refuerzo sonoro

- **C50:** valor entre 0 y -6. Valoración: mala.

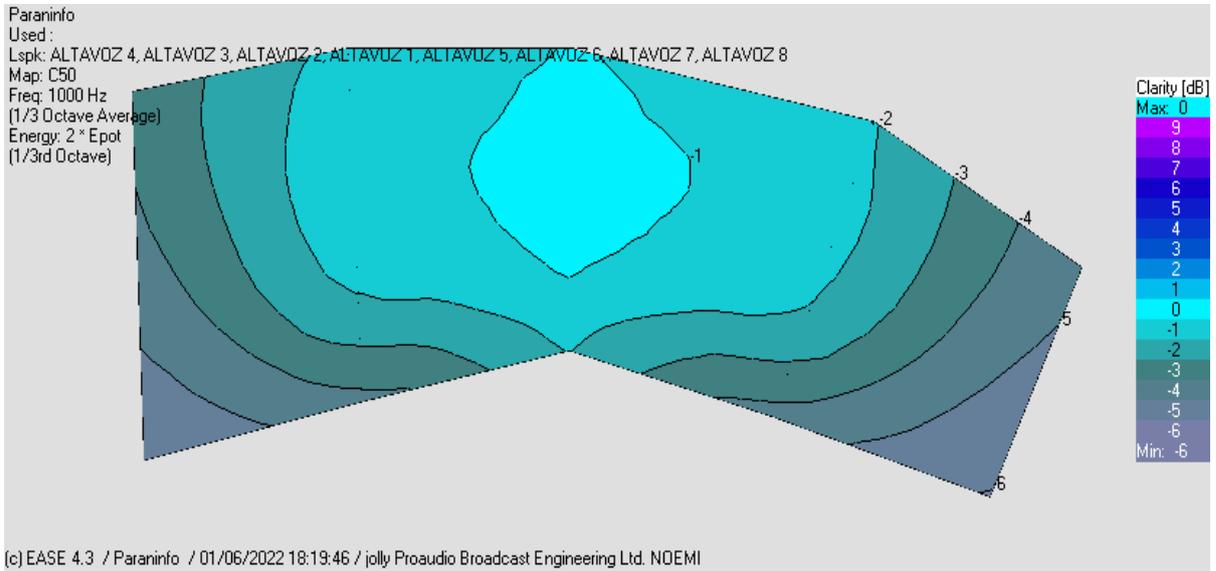


Figura 49. C50 en las áreas de audiencia

- **C80:** valor entre -1 y 3. Valoración: aceptable y mala en los extremos.

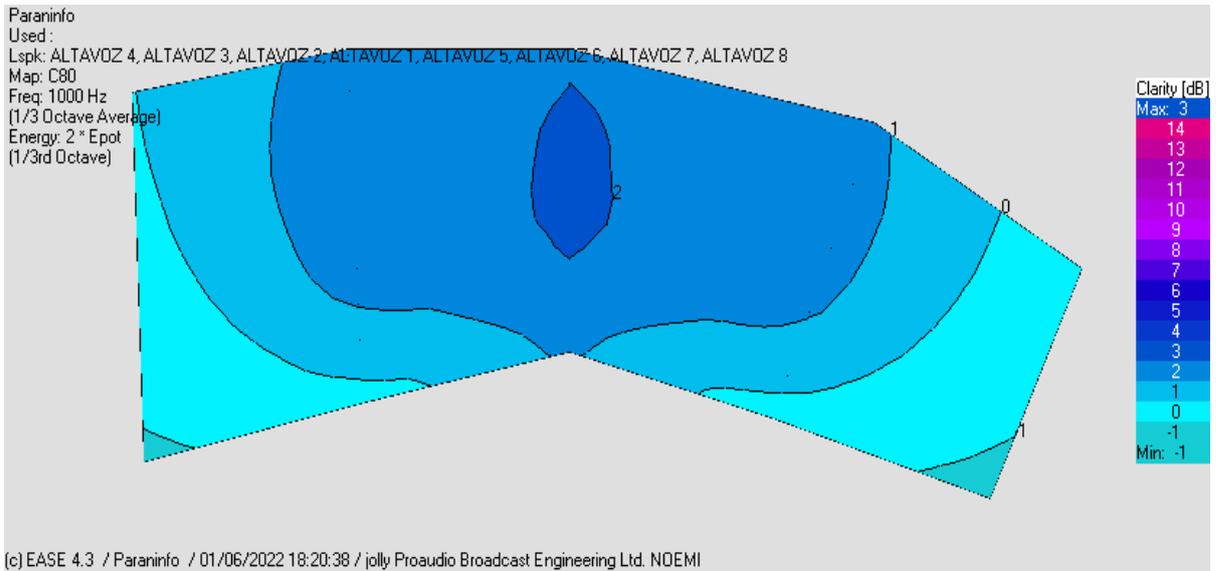


Figura 50. C80 en las áreas de audiencia

Los parámetros C50 y C80, están al límite de lo aceptable, con los cual, como línea futura de estudio, a partir de este trabajo fin de grado, se puede proponer un nuevo diseño con una cobertura más homogénea que permita mejorar estos parámetros.

6. MANUAL DE USO DEL SISTEMA DE REFUERZO SONORO

6.1 Configuración del sistema de refuerzo sonoro

La mesa que se encuentra en la sala del control técnico del Paraninfo es el modelo **Yamaha QL-1** y trabaja con el protocolo de audio digital Dante (Digital Audio Network Throws Ethernet).

Esta mesa consta de 8 salidas configuradas de la siguiente manera: las salidas de 1, 2, 3 y 4 están conectadas con los altavoces del escenario, la salida 5 hacia el rack de prensa de la sala y las salidas 6, 7 y 8 hacia el rack RIO (rack de conexiones). La PA (canal L y R) son las salidas 7 y 8.

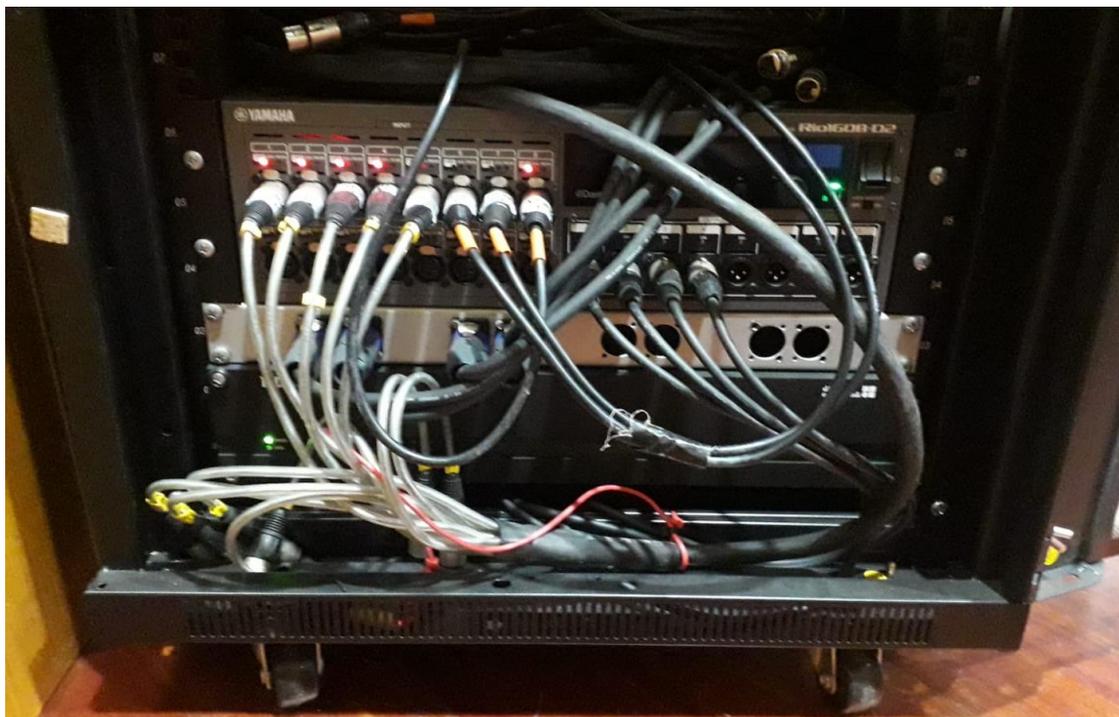


Figura 51. Conexiones realizadas en rack RIO

Las salidas 1, 2, 3 y 4 se pueden utilizar como refuerzo para las áreas de audiencia, tal y como se mostró en las medidas de difusión sonora, o bien, utilizarse como monitores de escenario según las necesidades del evento a gestionar.

En cuanto a canales de entrada, la configuración es la siguiente. Cuando existen congresos o eventos donde haya un número de personas que van a intervenir, se coloca la mesa central en el escenario, donde se habilitan unos micrófonos en cada puesto (en los canales 1-5), los cuales ya tienen la ecualización adecuada para una mejor percepción de la voz. También se eliminan determinadas frecuencias con cierta resonancia en el escenario al tener dos superficies paralelas con 7 metros de separación.



Figura 52. Ejemplo de ecualización de señal de entrada.

Por otro lado, cuando se habilita el atril sobre el escenario, también se coloca un micrófono (canal 8) para la persona que vaya a exponer su discurso. Este micrófono también se encuentra ecualizado como los micrófonos anteriores, con una curva de ecualización idónea para voz. Además, los canales 6 y 7 se encuentran libres, para poder conectar un pc desde la mesa, ya sea porque se desea visualizar algún video o documento.

Toda esta configuración se encuentra reflejada en la siguiente imagen:

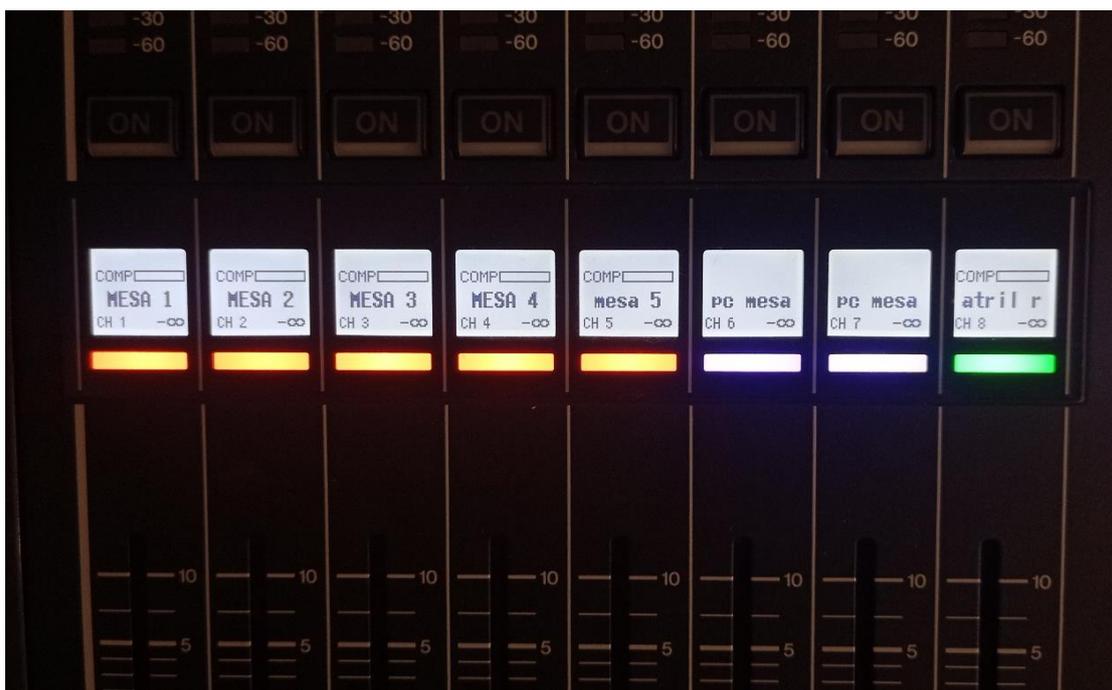


Figura 53. Foto tomada de la configuración Yamaha QL-1 del control técnico del Paraninfo.

Cuando se conecta un PC desde el escenario al rack que sale de la mesa del control, se produce un ruido. Este posible ruido o zumbido causado por la señal eléctrica que pasa por este dispositivo, también se minimiza con la correspondiente ecualización.

Las salidas para los altavoces principales colocados en el techo tienen una curva de ecualización que reduce los niveles en la frecuencia de 200 Hz, con 10 dB de atenuación. Esto se evidenció en las medidas de difusión in-situ realizadas donde la banda de 250 Hz mostró niveles de -10 dB respecto al resto de frecuencias.

Las resonancias que se producen en esta frecuencia, es el principal defecto de la acústica de la sala del Paraninfo. De forma empírica se intenta corregir y compensar mediante esta ecualización, con la eliminación de toda esta banda de frecuencias.



Figura 54. Ecuación de la sala

De forma empírica, también hay pequeños ajustes a las frecuencias de 630 Hz, 2.5kHz, 3.15 kHz y 6.3 kHz, con el fin de compensar la respuesta en frecuencia de los altavoces autoamplificados. En la figura 45 se muestra la respuesta con niveles homogéneos $\pm 3\text{dB}$ en la banda entre 500 Hz y 4kHz.

7. CONCLUSIONES

Este trabajo fin de grado cumple con los objetivos planteados.

Se han obtenido las medidas físicas que caracteriza la acústica del Paraninfo. El tiempo de reverberación se considera adecuado para el uso de este (1.2 s a 1kHz sin público), por lo que la primera conclusión es que la acústica del recinto es buena y no es necesario modificar las condiciones de absorción en la sala. En cambio, se detecta una resonancia que da lugar a ecos pulsantes en el escenario. La distancia entre estas dos superficies paralelas es de 7 metros y de forma empírica hay problemas a la frecuencia de 200 Hz.

Se ha realizado una simulación mediante el software EASE, y se dispone del levantamiento del recinto que permite simular sus condiciones acústicas. Estas se han contrastado con las medidas in-situ realizadas en la sala y permite modificar condiciones y calcular el resultado. Con 100% de aforo, el tiempo de reverberación queda situado en 1.1 segundos.

Una vez analizados los datos y la simulación, la mejora en la acústica que se propone es únicamente eliminar la resonancia en el escenario debido a las dos superficies paralelas. La solución más rápida y menos costosa es cubrir mediante material absorbente piramidal el falso techo que cubre el escenario. Esta medida se considera suficiente para solucionar estos problemas detectados. El tiempo de reverberación resultante sería de 1.12 s, frente a 1.2 s con el recinto vacío. 1.02 s para el recinto lleno.

También se propone, en caso de disponer de los recursos necesarios, paneles difusores en esta zona, o incluso modificar todo el falso techo para dar una inclinación hacia las áreas de audiencia y evitar las resonancias.



Figura 55. Fotografía tomada mostrando zona del techo donde instalar posibles mejoras

Por último, se ha estudiado el sistema de refuerzo sonoro presente en el recinto, realizando la simulación acústica del mismo. Se han contrastado los datos con medidas in-situ de difusión sonora. Se detecta una incidencia, ya que uno de los altavoces (número 3) trabaja actualmente con menor nivel de emisión que el resto. También se contrasta la mejora que en el transcurso de este trabajo fin de grado se ha habilitado al colocar 4 altavoces al borde del escenario.



Figura 56. Fotografía tomada in-situ donde se aprecia los altavoces del escenario

A este respecto, el sistema actual de refuerzo sonoro es mejorable aunque el diseño de este excede de los objetivos de este trabajo. Los valores C50 y C80 podrían mejorarse con una nueva distribución de altavoces que cubran las áreas de audiencia.

8. LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS

La idea de este trabajo surgió a partir de una beca de colaboración del Vicerrectorado de Cultura. El uso de la infraestructura audiovisual en nuestro Paraninfo puede servir de apoyo para asignaturas de la especialidad de Sonido e Imagen, especialmente, en las relacionadas con sonido. Para ello se pone a disposición el diseño del local en el EASE, así como todas las medidas realizadas in-situ en el recinto, de tiempos de reverberación y de difusión sonora.

Durante el desarrollo de las medidas in-situ, se intentó determinar posibles modos propios de resonancia entre las dos superficies paralelas, techo y suelo, del escenario. Esta prueba consistió en realizar un barrido en frecuencia entre 100 Hz y 400 Hz, emitido por los altavoces colgados del techo y el sonómetro como punto de recepción de los niveles de presión sonora.

Efectivamente, se obtuvo una gráfica donde los niveles de presión variaban del orden de 10 dB de diferencia durante el barrido.

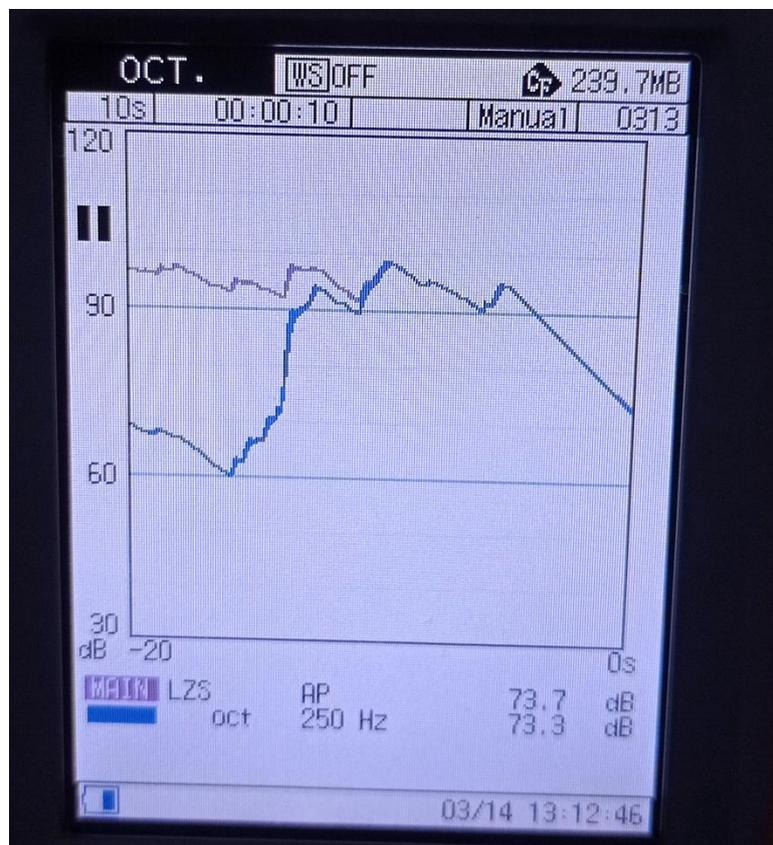


Figura 57. Barrido en frecuencia en el escenario

Otra medida realizada en el escenario fue la emisión de ruido rosa, por los altavoces del techo, y el registro de este mediante el sonómetro con filtro de tercios de octava, obteniendo la respuesta que se indica en la siguiente figura:

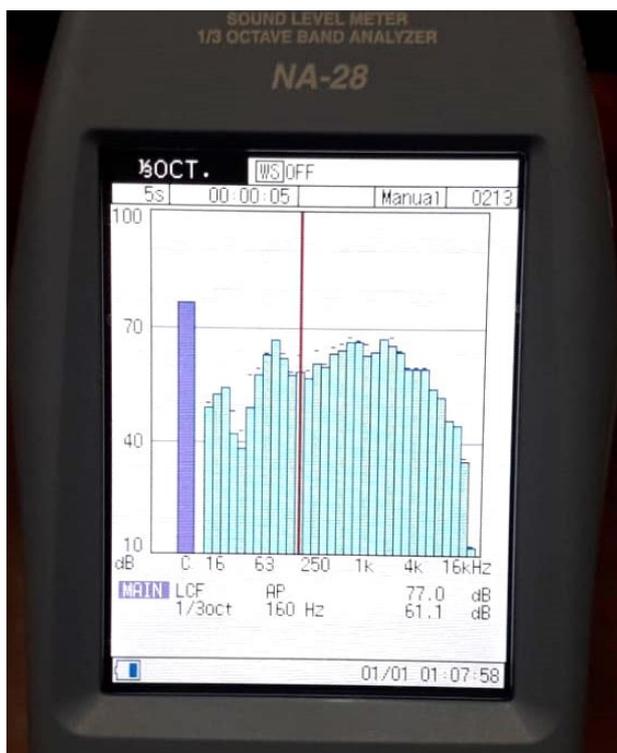


Figura 58. Medida de difusión sonora en el escenario.

En la figura 58, se observa la ecualización que actualmente aplica el servicio técnico del Paraninfo, justo en la banda de 200 Hz, para minimizar los efectos de la resonancia de estas superficies paralelas.

Lo improvisado de esta medida no permite determinar con exactitud estas frecuencias de resonancia. La distancia entre las superficies paralelas es exactamente de 7 metros, por lo que estas frecuencias ($f = c/\lambda$), deben estar en torno a múltiplos de 49 Hz. Como línea futura, se propone realizar un estudio más exhaustivo de este eco pulsatorio, y de las posibles resonancias. Todo esto, de forma previa, a la medida correctora que se propone en este trabajo fin de grado.

Como ampliación de este trabajo, se propone otros trabajos fin de grado, que aborden el seguimiento de las mejoras planteadas en cuanto a la acústica en el escenario, así como realizar propuestas de mejora en el diseño del refuerzo sonoro del Paraninfo.



9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ambientales, S. I. (s.f.). *Sonómetro RION NL-31*. Obtenido de Relación de principales equipos disponibles por Servicios Integrales Ambientales del Norte: <https://www.serviciosambientales.es/media/download/13484>
- Audiotec. (s.f.). *Que es un estudio acústico*. Obtenido de <https://www.audiotec.es/que-es-un-estudio-acustico/>
- BKSV. (s.f.). *DIRAC Room Acoustics Software Type 7841*. Obtenido de Product Data, Brüel & Kjær: <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp1974.ashx>
- Caballero, J. M. (s.f.). Apuntes de la asignatura Acustica Arquitectónica y Ambiental: Propagación del sonido en recintos cerrados y parámetros de inteligibilidad. En Carrión, Arau, & Ahnert.
- Carrión, A. (1998.). *Diseño acústico de espacios arquitectónico*. Ediciones UPC.
- Cesva Instruments, S. (2014). *Hoja de características BP012*.
- *d&b audiotechnik*. (s.f.). Obtenido de Altavoz E8: <https://www.dbaudio.com/global/es/productos/serie/serie-e/altavoz-e8/#tab-technicaldata>
- *EASE*. (s.f.). Obtenido de AFMG - Ahnert Feistel Media Group: <https://www.afmg.eu/en/ease-enhanced-acoustic-simulator-engineers>
- GmbH, T. (1996–2022). *t.akustik Diffusor Manhattan wood*. Obtenido de https://www.thomann.de/es/the_t.akustik_diffusor_manhattan_wood.htm?gclid=Cj0KCQiAIMCOBhCZARIsANLid6b_7RQa3xL7n2EzDiKQxmcIVwU8WRrwu4Ug9Bx3T9nSl2TkaTlhozYaApeBEALw_wcB
- GmbH, T. (1996–2022). *Vicoustic Multifuser Wood MKII 64 Wood*. Obtenido de https://www.thomann.de/es/vicoustic_multifuser_wood_mkii_64_wood.htm?gclid=Cj0KCQiAIMCOBhCZARIsANLid6b_7RQa3xL7n2EzDiKQxmcIVwU8WRrwu4Ug9Bx3T9nSl2TkaTlhozYaApeBEALw_wcB

id=Cj0KCQiAlMCOBhCZARIsANLid6aWeoA2kR6aXjyBHI3xXcRVWk3wdj
EYvkQfdwXwI82eGd66sQX2vVAaAqsBEALw_wcB

- Harris, C. M., Etxaniz, r. t., & León., p. J. (1995). *Manual de medidas acústicas y control del ruido*. (J. J. Aurora Suengas, Trad.) Madrid,: McGraw-Hill.
- Palazón Tudela, R. (2005). *Acondicionamiento y aislamiento acústico, refuerzo sonoro, protección contra incendio y sistema de vigilancia del Teatro Leal de La Laguna*. Las Palmas de Gran Canaria: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Paniagua Gutierrez, J. (2011). *Estudio Acústico Y Diseño Del Sistema De Refuerzo Sonoro De La Iglesia De San Roque En Valles De Ortega*. Las Palmas de Gran Canaria: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Recuero López, M. (1999). *Acústica arquitectónica aplicada*. Madrid: Paraninfo.
- Ruiz Suarez, A. (2011). *Estudio Acústico Del Auditorio Jameos Del Agua - Haría, Lanzarote*. Las Palmas de Gran Canaria: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Sams, D. D., & Carolyn Davis, H. W. (1989). *Sound system engineering* (2nd. ed. ed.). Indianapolis, IN.
- UNE-EN IEC 60268-16. (2021). *Equipos para sistemas electroacústicos. Parte 16: Evaluación objetiva de la inteligibilidad del habla mediante el índice de transmisión del habla*. Asociación Española de Normalización; .
- UNE-EN ISO 3382-1. (2009). *Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos*. Asociación Española de Normalización.
- Vicerrectorado de Cultura y Atención Integral. (s.f.). *Folleto Conoce Nuestra Sede Institucional*. Obtenido de https://www.ulpgc.es/sites/default/files/ArchivosULPGC/folleto_conoce_la_sede_institucional.pdf



PLANOS

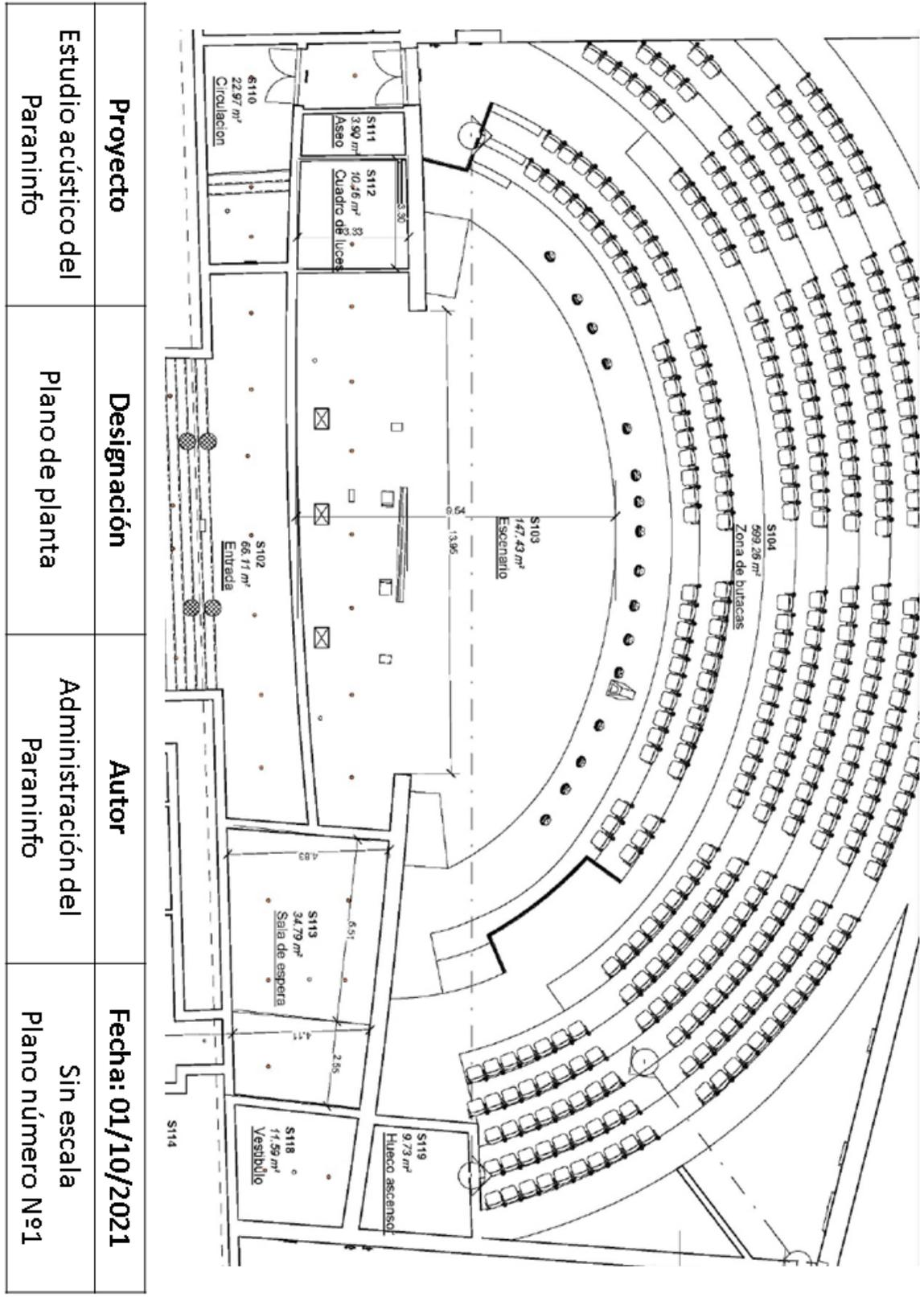


Figura 59. Vista en planta del Paraninfo

Proyecto	Designación	Autor	Fecha: 01/10/2021
Estudio acústico del Paraninfo	Plano de alzado	Administración del Paraninfo	Sin escala Plano número N°2

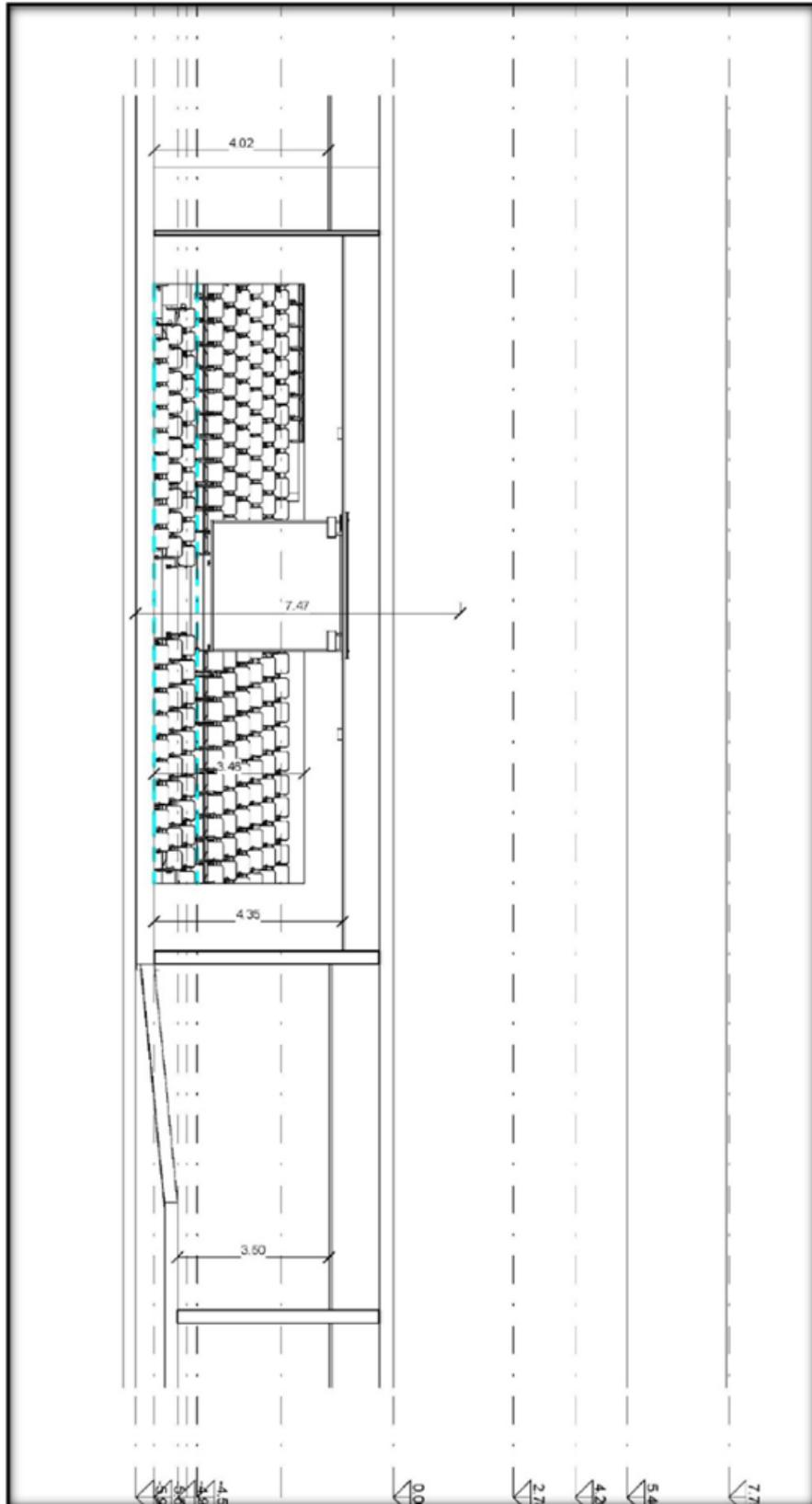


Figura 60. Vista en alzado del Paraninfo

Proyecto	Designación	Autor	Fecha: 06/06/2022
Estudio acústico del Paraninfo	Vista X del diseño en EASE.	Noemi Mederos Cabrera	Sin escala Plano número N°3

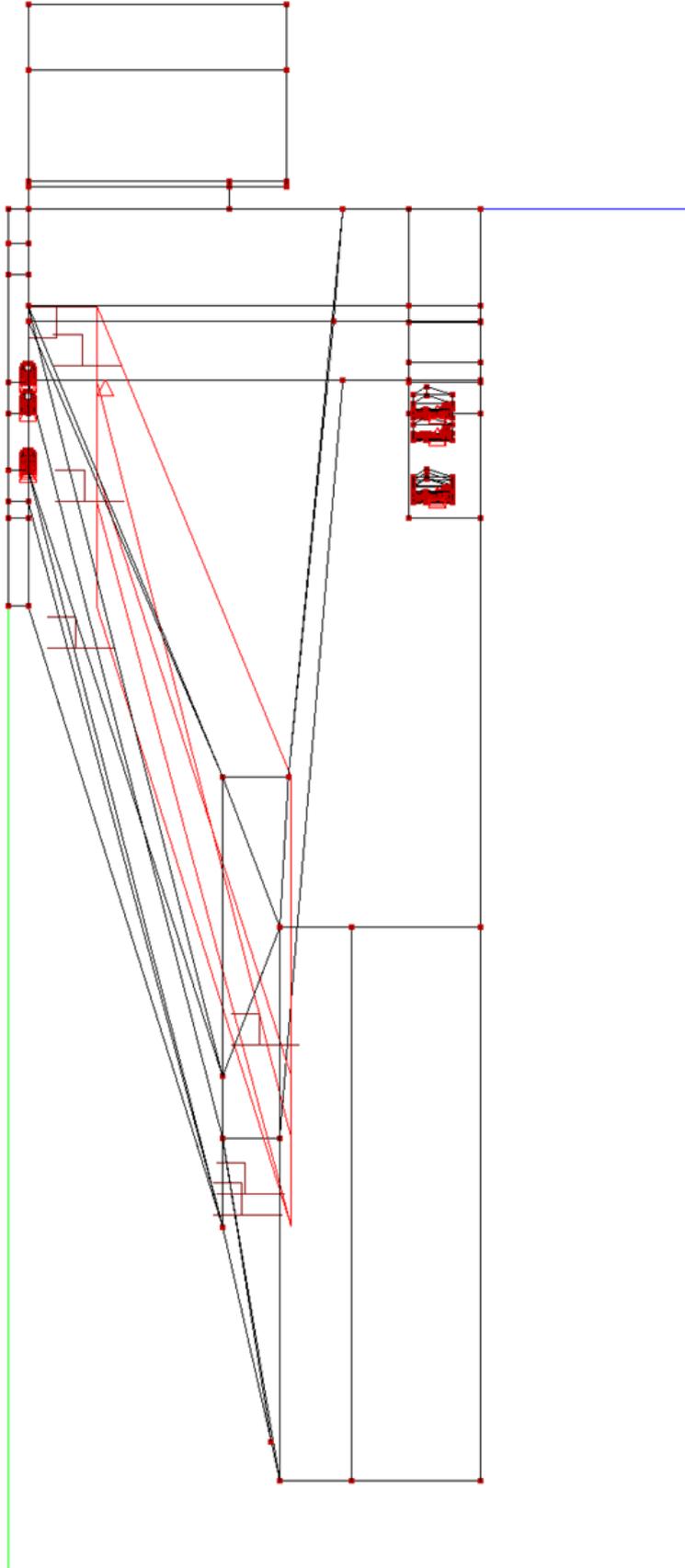


Figura 61. Vista X del Paraninfo

Proyecto	Designación	Autor	Fecha:
Estudio acústico del Paraninfo	Vista Y del diseño en EASE.	Noemi Mederos Cabrera	06/06/2022 Sin escala Plano número N°4

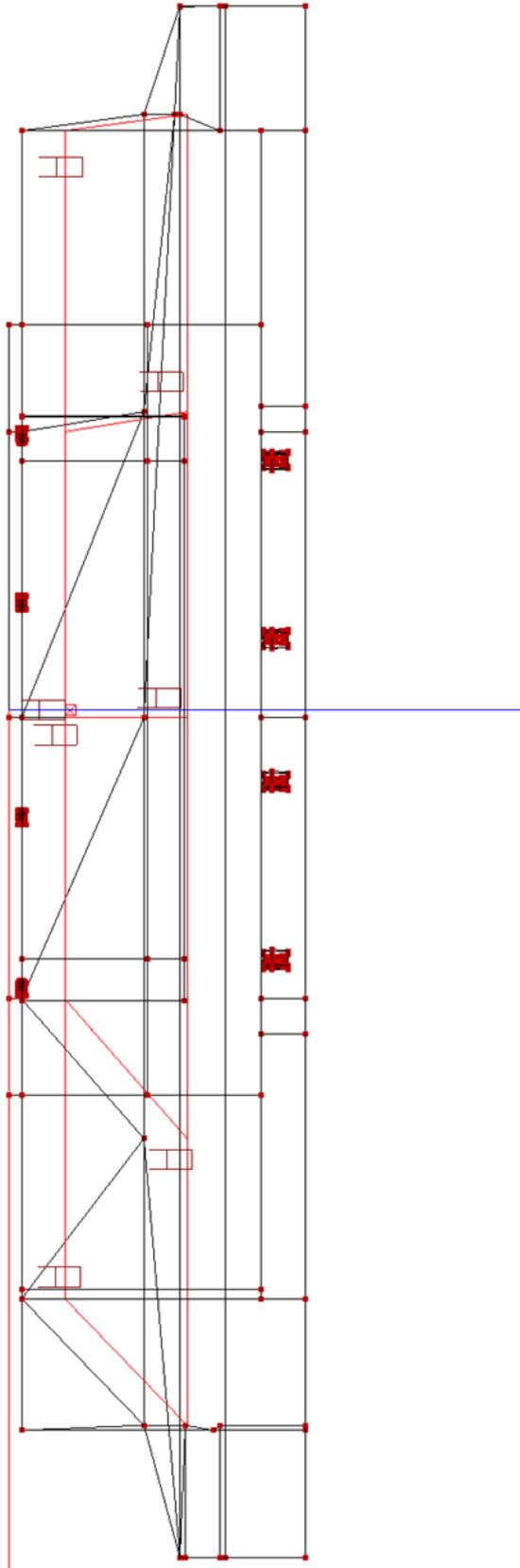


Figura 62. Vista Y del Paraninfo

Proyecto	Designación	Autor	Fecha:
Estudio acústico del Paraninfo	Vista Z del diseño en EASE, F45 – 110 m2.	Noemi Mederos Cabrera	06/06/2022 Sin escala Plano número N°5

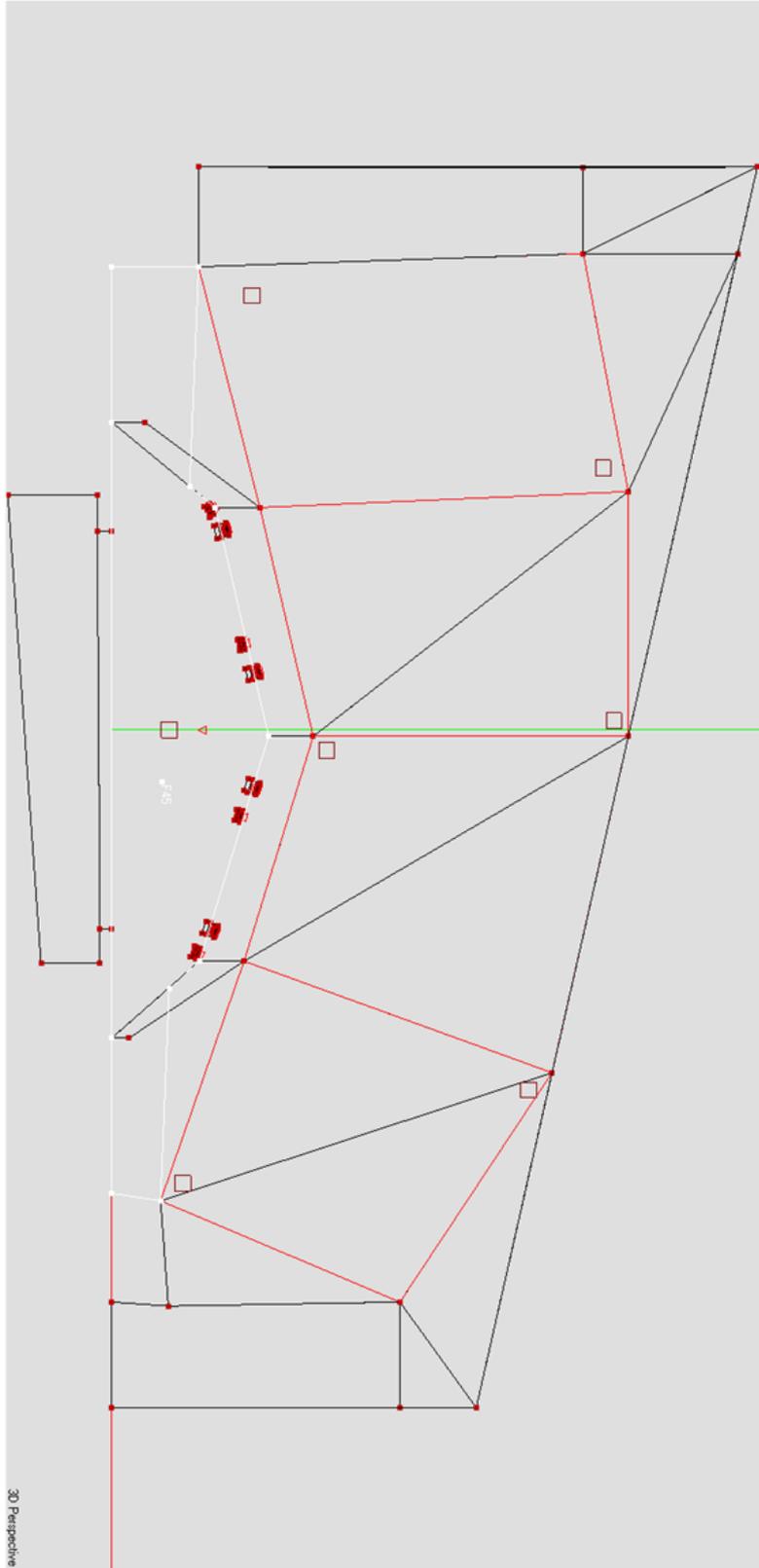


Figura 63. Vista Z del Paraninfo

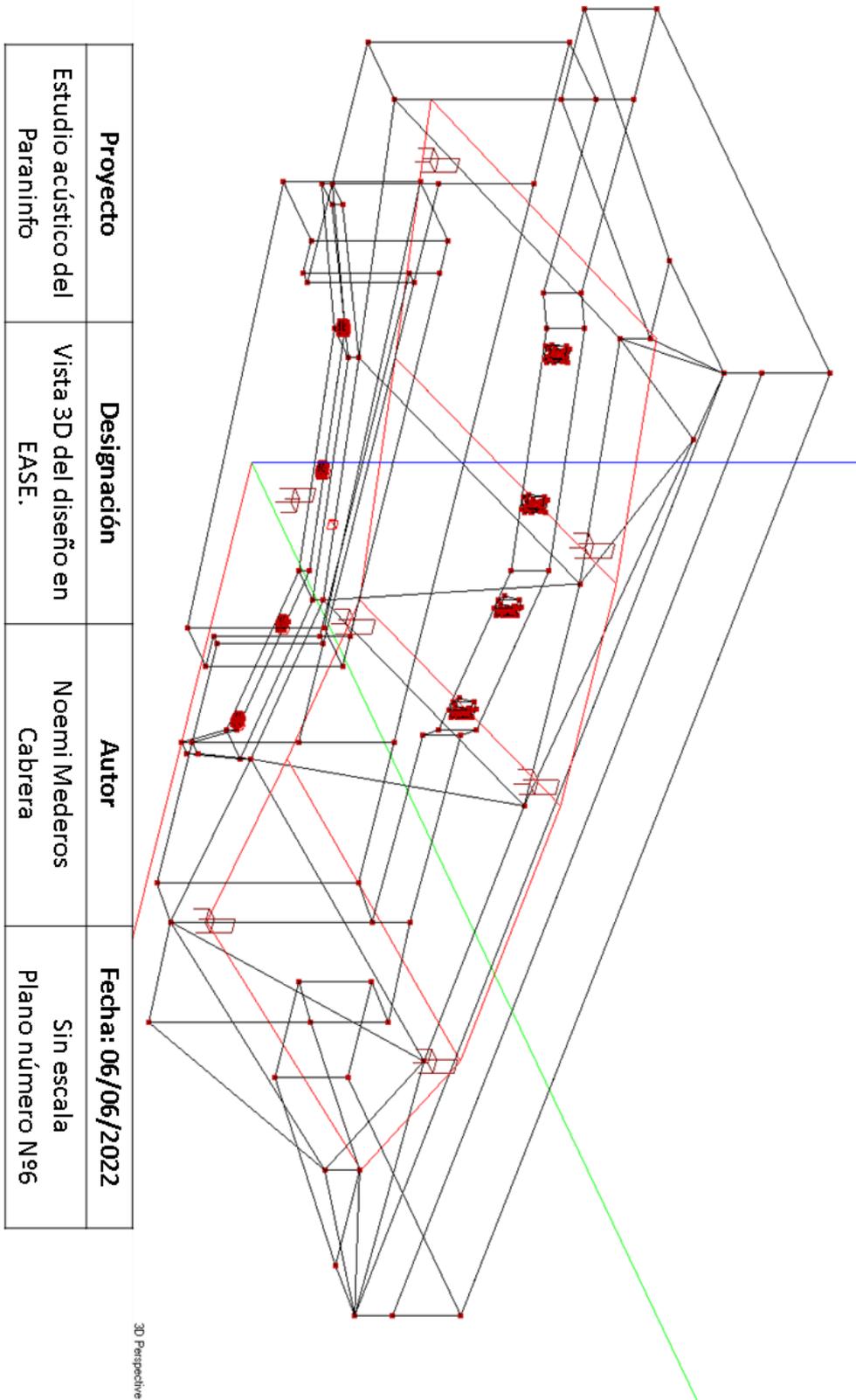


Figura 64. Vista 3D del Paraninfo

PLIEGO DE CONDICIONES

Condiciones particulares

Características técnicas de los aparatos de medida

1. Características de la fuente

- **Altavoz omnidireccional BP012**

El altavoz BP012 es un conjunto de 12 altavoces montados en un baffle dodecaedro que asegura una emisión omnidireccional del sonido a emitir.

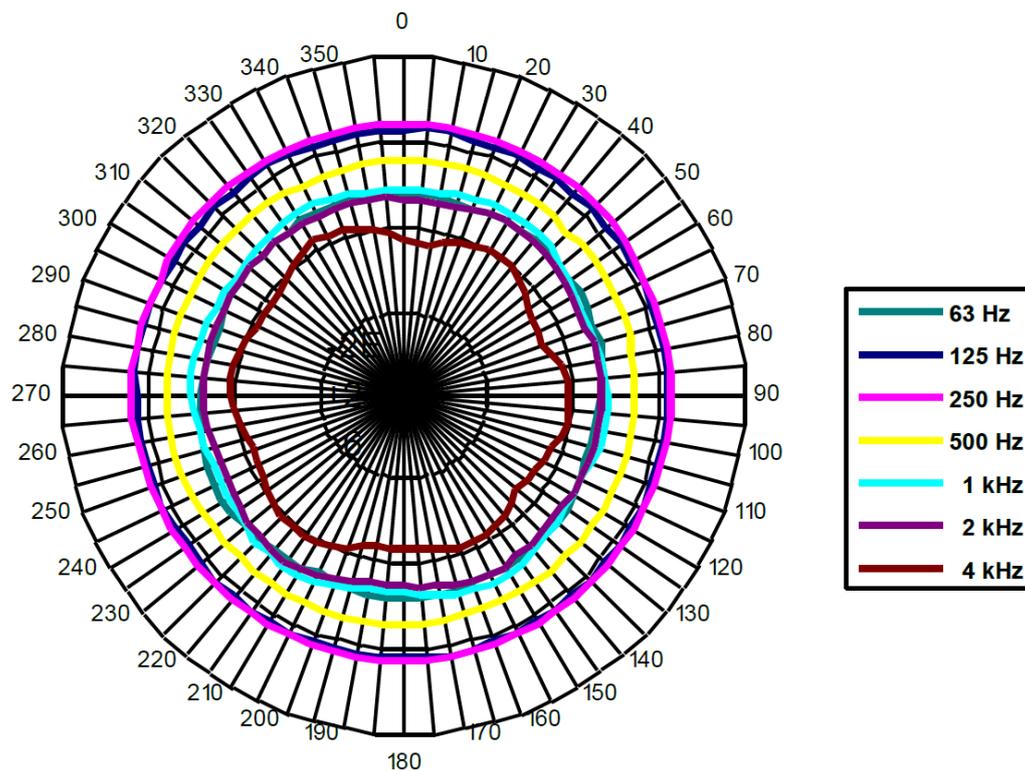


Figura 65. Diagrama de Directividad para las bandas de octava centradas a 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz



Figura 66. Altavoz BP012 omnidireccional

Las características de esta fuente son las siguientes:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Potencia acústica	123 dB PWL
Diagrama de directividad	Omnidireccional
Impedancia nominal	6 Ω
Potencia máxima de entrada	600 W RMS
Distribución de potencia por bandas	Bandas de 1/3 de octava de 50 a 5000 Hz
Conector	Speakon de 4 pines (± 1)
Peso	14.5 kg

Tabla 10. Características técnicas BP012

2. Características de los accesorios de la fuente

▪ Trípode TR014

Trípode con ruedas para el soporte de la BP012, permite situar la fuente a diferentes alturas: desde 1m hasta 2,5m.



Figura 67. Trípode TR014

- **Cable CN012:**

Cable de altavoz: Cable de 10 m con conector speakon de 4 pins. (para características diferentes consultar).



Figura 68. Altavoz BP012 con el cable CN012 conectado

3. Características del amplificador de potencia

- **Etapa de potencia profesional estéreo FONESTAR DSA-300**

El amplificador DSA-300 presenta las siguientes características técnicas:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Características	Etapa de potencia profesional estéreo. Circuito amplificador clase D de alta eficiencia. Fuente de alimentación conmutada.
Potencia	Modo estéreo y paralelo: 300 + 300 W RMS a 4 Ω 150 + 150 W RMS a 8 Ω
Protecciones	Encendido suave, temperatura, cortocircuito, sobrecarga, VHF, CC y CA
Entradas	2 líneas aux. balanceadas, combo (XLR y jack 6,3 mm) 2 K Ω 700 mV
Respuesta	20 – 20.000 Hz
Distorsión	Armónica: <0.1%
Factor de amortiguación	>200
Relación señal/ruido	>100 dBA
Velocidad de cambio	20 V/ μ s
Salidas	Altavoces: 4-8 Ω estéreo, terminales roscados y bananas o conector de altavoz. 8 Ω puente mono, terminales roscados y bananas
Alimentación	230/115 V CA, 110 W
Medidas	483 x 44 x 200 mm fondo. 1 U rack 19"

Tabla 11. Características técnicas DSA-300

4. Características del sonómetro

- **Sonómetro RION NL-31**



Figura 69. Sonómetro RION NL-31

Las características de este aparato son las siguientes:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Estándares aplicados	-IEC 60651:1979 – Tipo 1 -IEC 60804:1985 – Tipo 1 -IEC 61672-1 – Tipo 1
Rango de medida	28 dB a 138 dB
Nivel máx. de medida	138 dB rms 141 peak
Nivel min. de medida	≤ 18 dB (Pond. A) ≤ 25 dB (Pond. C) ≤ 30 dB
Rango lineal	100 dB
Nivel de presión sonora de referencia	94 dB
Rango dinámico de referencia	30 a 120 dB -20 a 20.000Hz (micrófono) -10 a 20.000Hz (salida AC) -10 a 20.000Hz (detector)

Tabla 12. Características técnicas RION NL-31

5. Características del EASE

El software EASE puede ejecutarse en los siguientes sistemas operativos con sistema de gráficos VGA: Windows XP, y Windows Vista. Windows 95, Windows ME, Windows 2000 y Windows NT no son compatibles.

También soporta 64 bits de resolución y procesadores multi-core. Además, el espacio mínimo que necesita este programa es de 256 MB o más de memoria RAM, 600 MB o superior de velocidad de reloj y al menos 2 gigabytes de espacio de disco duro. Microsoft .NET Framework v2.0 también es necesario para su rendimiento.

6. Características del DIRAC

El software DIRAC funciona en entornos Windows 8, Windows 7 y Windows Vista Microsoft .NET Framework 4.5. Necesita como mínimo 2GB de memoria RAM, 1 GHz de CPU y 500 MB de espacio de disco duro. Además cumple con las normas IEC 60268–16, ISO 3382 e ISO 18233. El hardware mínimo requerido comprende un PC con un dispositivo de sonido, una fuente de sonido impulsivo, y un micrófono conectado a la entrada de línea del dispositivo de sonido real.

Entrada de dos canales a través de tarjeta de audio en PC.



Figura 70. Imágenes ejemplo de la interfaz del DIRAC, (BKSv)

7. Características del refuerzo sonoro

El sistema instalado en la sala para el refuerzo sonoro es el siguiente:

- **JBL EON POWER 15**

Las especificaciones técnicas de este altavoz se presentan a continuación:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Rango de frecuencias	47 Hz - 18 KHz
Respuesta en frecuencia	65 Hz – 16 KHz
Frecuencia transversal	1.5 KHz
Bocina de directividad	90° * 60° nominal
SPL máximo nominal	127 dB @ 1m
Potencia del amplificador LF	130 W < 1% THD
Potencia del amplificador HF	50 W < 1% THD
Sensibilidad de entrada	-55 dBu a -2 dBu para salida nominal (posicion MIC) +9 dBu a +26 dBu para salida nominal (posicion LINE)
Conectores	XLR/F balanceado (entrada) XLR/M balanceado (salida)
Peso	21 kg

Tabla 13. Características técnicas EON POWER 15

Por otro lado, el sistema utilizado en el programa de simulación ha sido:

- **JBL EON 15 G2**

Las especificaciones técnicas de este altavoz se presentan a continuación:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Rango de frecuencias	39 Hz - 18 kHz
Respuesta en frecuencia	42 Hz - 17 kHz
Frecuencia transversal	1.5 KHz
Bocina de directividad	90° * 60° nominal
SPL máximo nominal	129 dB @ 1m
Potencia del amplificador LF	300 W < 1% THD
Potencia del amplificador HF	100 W < 1% THD
Sensibilidad de entrada	-44 dBu a -22 dBu para salida nominal (posicion MIC) -12 dBu a +20 dBu para salida nominal (posicion LINE)
Conectores	XLR/F balanceado (entrada) XLR/M balanceado (salida)
Peso	21 kg

Tabla 14. Características técnicas EON 15 G2

- **E8 D&B AUDIOTECHNIK**

Las especificaciones técnicas de este altavoz se presentan a continuación:

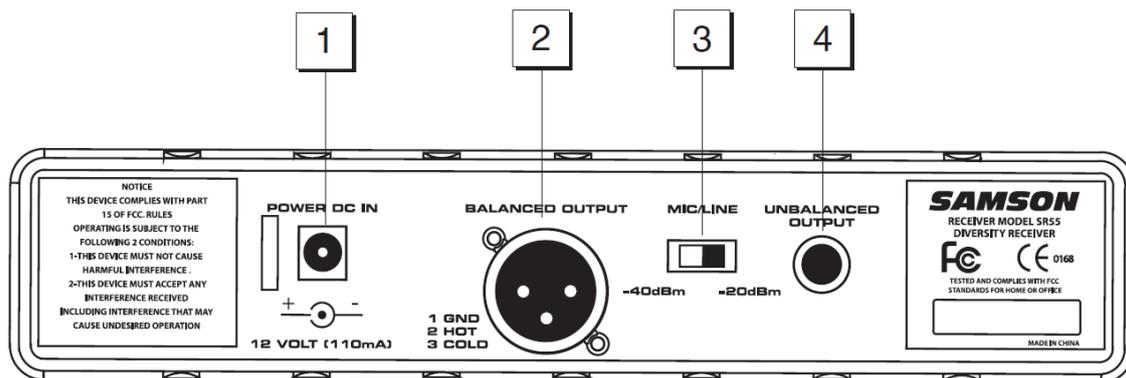
CARACTERÍSTICA	VALOR
Respuesta en frecuencia	62 Hz - 18 kHz
Impedancia	16 Ω
Bocina de directividad	90° * 50° nominal
SPL máximo nominal	129 dB @ 1m
Potencia del amplificador	150 W RMS
Peso	7.3 kg

Tabla 15. Características técnicas altavoz E8

8. Características del sistema de RF

El sistema “VHF Series” de SAMSON contiene un receptor VR3 y un transmisor de petaca VT3L. Este sistema funciona en el rango de frecuencia de 173,8-213,2 MHz. El transmisor y el receptor vienen ajustados de fábrica para utilizar el mismo canal.

El receptor VR3 incluido en el sistema inalámbrico VHF Series utiliza tecnología de no diversificación, incorporando una sola antena para facilitar su uso y reducir los costes. El dispositivo utilizado es el modelo SR5 de SAMSON, que presenta las siguientes características:



1. *Entrada DC*

En esta entrada se deber colocar el adaptador de corriente de 12 voltios y 250 mA que se incluye, junto con la pestaña anti-tirones. Es aconsejable no utilizar ningún otro adaptador distinto al que se incluye, ya que podría perjudicar seriamente al VR3, anulando así su garantía.

2. *Salida no balanceada**

Utilizar conector jack de 1/4" no balanceado de alta impedancia (5 K Ω) cuando conecte el VR3 a aparatos de sonido no profesionales (-10). Cableado: punta-activo, lateral-masa.

3. *Interruptor de nivel de salida de audio*

Ajusta la atenuación de nivel de salida audio de la salida balanceada a -20 dBm (nivel de línea) o -40 dBm (nivel de micro).

4. *Salida balanceada**

Utilizar conector XLR balanceado electrónicamente y de baja impedancia (600 Ω) cuando conecte el VR3 a unidades de audio profesional (+4). Cableado: punta 1 masa, punta 2 alto y punta 3 bajo (masa, activo y pasivo, respectivamente).

*Si es necesario, se pueden utilizar de forma simultánea tanto las salidas balanceadas como no balanceadas.

9. Ficha de material acústico propuesto.

- **Placas piramidales de poro abierto**

Material	Espuma blanda de poliuretano
Tipo	Espuma PUR-ETER autoextinguible norma UNE (53.127 color gris)
Presentación	Perfilada por una cara

Tabla 16. Características del material acústico

CÓDIGO	PIRAMIDE PCA	MEDIDAS (mm)
AI 06 002	Pirámide 65/50	1.000 x 1.000 x 65
AI 06 022	Pirámide 65/50 autoadhesiva	1.000 x 1.000 x 65
AI 06 005	Pirámide 90/70	1.000 x 1.000 x 90
AI 06 025	Pirámide 90/70 autoadhesiva	1.000 x 1.000 x 90
AI 06 007	Perfilado 20/10	2.000 x 1.000 x 20
AI 06 026	Perfilado 20/10 autoadhesiva	2.000 x 1.000 x 20
AI 06 009	Perfilado 40/15	2.000 x 1.000 x 40
AI 06 027	Perfilado 40/15 autoadhesiva	2.000 x 1.000 x 40
AI 06 010	Perfilado 50/20	2.000 x 1.000 x 50
AI 06 028	Perfilado 50/20 autoadhesiva	2.000 x 1.000 x 50

Tabla 17. Tipo y medidas material acústico

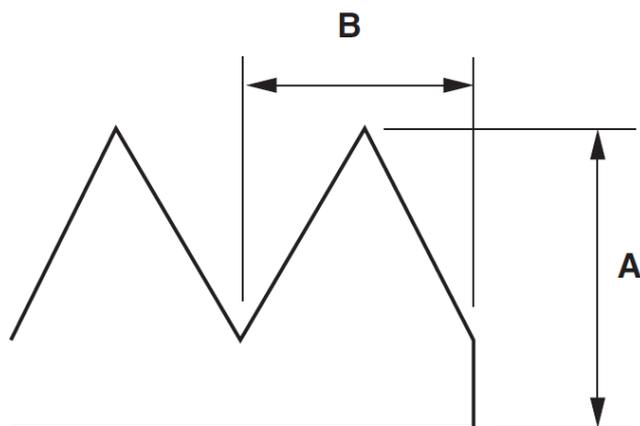


Figura 71. Dimensiones material acústico

DIMENSIONES (mm)	TIPO		
	20/10	40/15	50/20
A	20	40	50
B	10	15	20

Tabla 18. Dimensiones material acústico

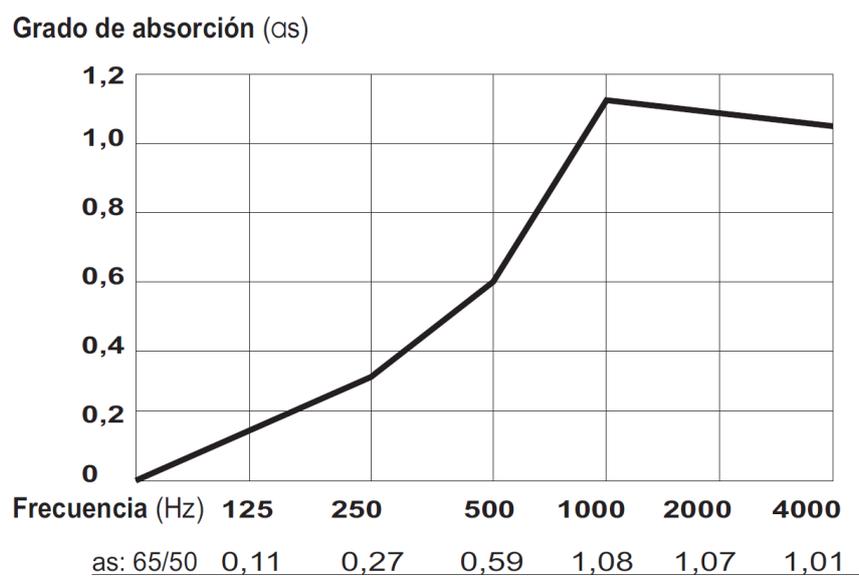


Figura 72. Grado de absorción material acústico 65/50

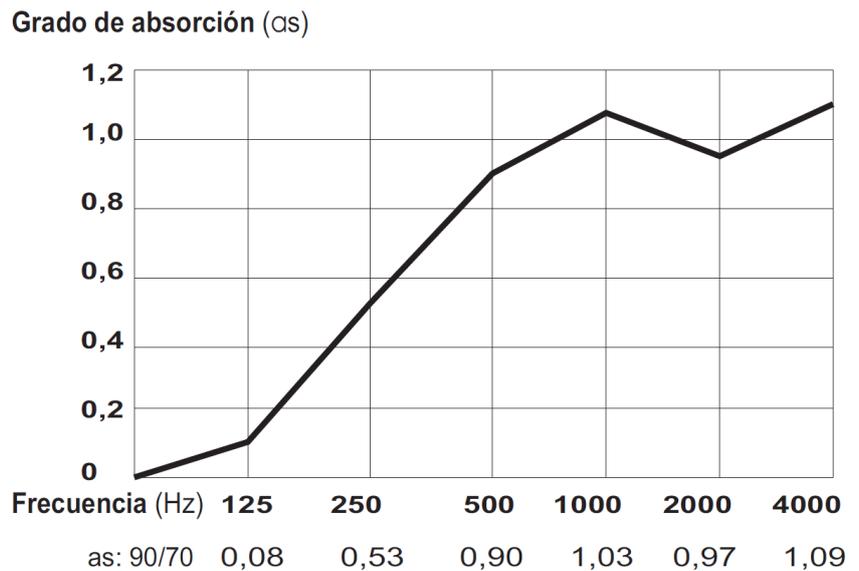


Figura 73. Grado de absorción material acústico 90/70

10. Materiales utilizados

- **Madera 3cm**

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Coef. Absorción α	0.25	0.34	0.18	0.1	0.1	0.06	0.06

Tabla 19. Coeficientes de absorción madera 3 cm

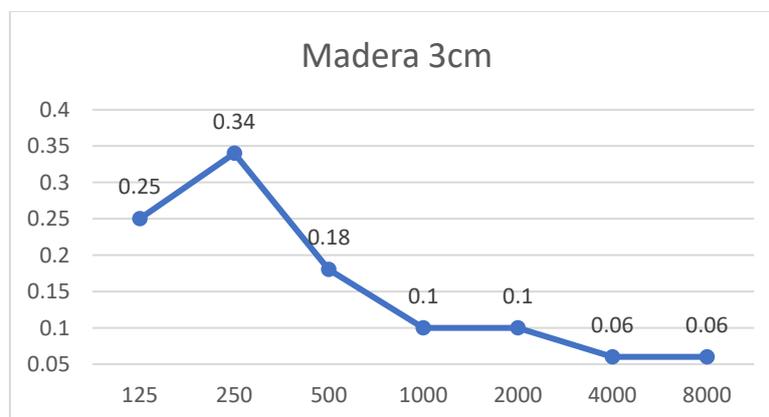


Figura 74. Gráfica de absorción madera 3 cm

- **Moqueta sobre pared**

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Coef. Absorción α	0.09	0.08	0.21	0.27	0.27	0.37	0.37

Tabla 20. Coeficientes de absorción moqueta sobre pared

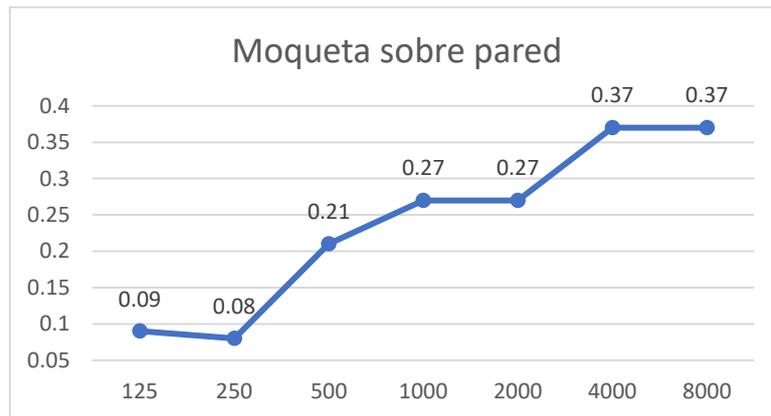


Figura 75. Gráfica de absorción moqueta sobre pared

- **Waffel 70/125**

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Coef. Absorción α	0.24	0.56	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9

Tabla 21. Coeficientes de absorción waffel 70/125

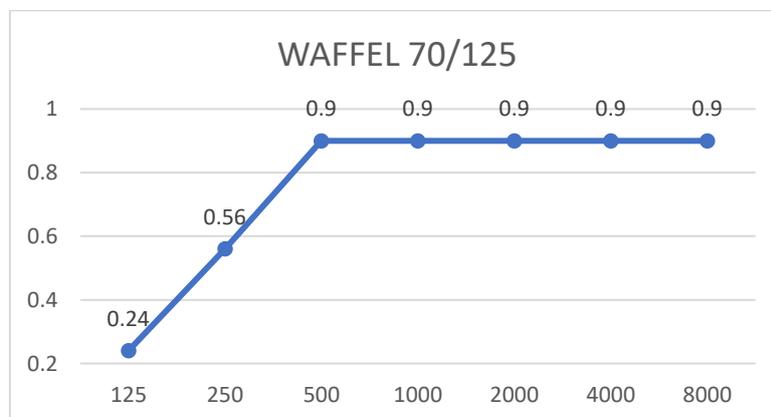


Figura 76. Gráfica de absorción waffel 70/125

- **Entarimado sobre madera**

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Coef. Absorción α	0.09	0.09	0.08	0.09	0.1	0.07	0.07

Tabla 22. Coeficientes de absorción entarimado sobre madera

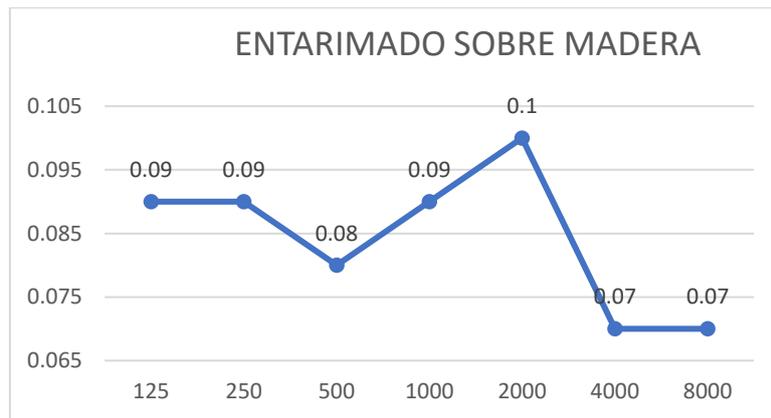


Figura 77. Gráfica de absorción entarimado sobre madera

- **Butaca madera asiento tapizado**

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Coef. Absorción α	0.09	0.12	0.14	0.16	0.15	0.16	0.16

Tabla 23. Coeficientes de absorción butaca madera asiento tapizado

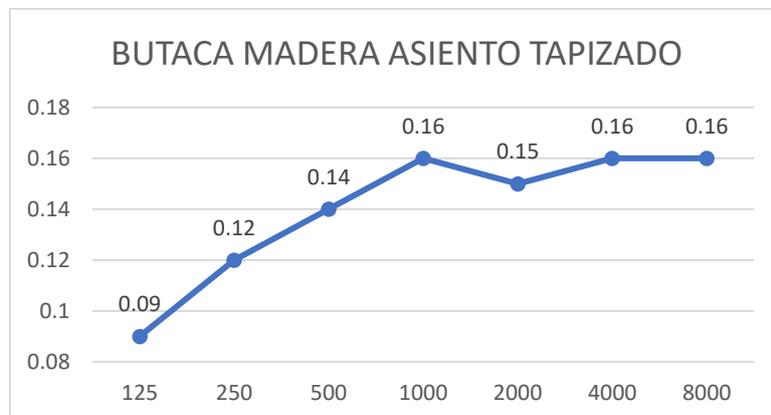


Figura 78. Gráfica de absorción butaca madera asiento tapizado

- **Loseta vinílica**

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Coef. Absorción α	0.02	0.025	0.03	0.035	0.04	0.04	0.04

Tabla 24. Coeficientes de absorción loseta vinílica

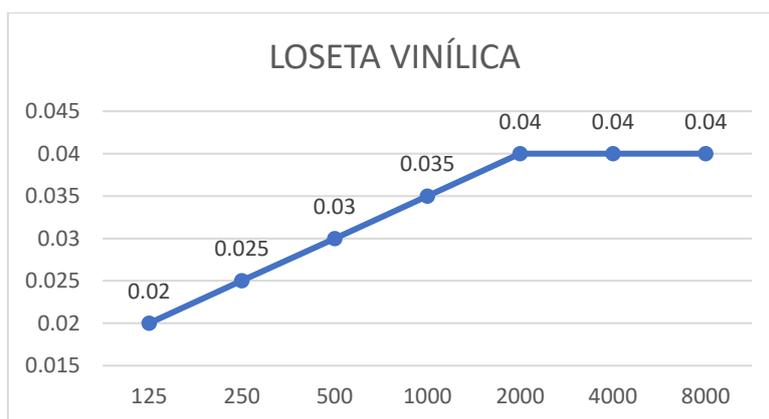


Figura 79. Gráfica de absorción loseta vinílica

- **Público asiento**

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Coef. Absorción α	0.3	0.32	0.27	0.3	0.33	0.33	0.33

Tabla 25. Coeficientes de absorción publico asiento

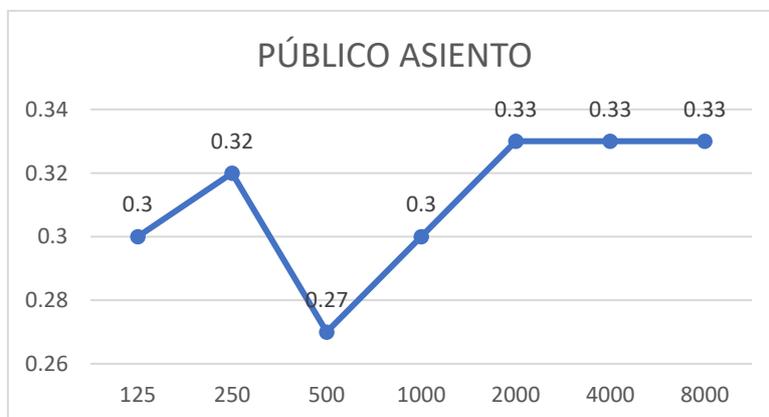


Figura 80. Gráfica de absorción publico asiento



PRESUPUESTO

En este apartado se incluye una estimación del coste de todos los recursos que se han empleado a lo largo de este proyecto y para la realización de este se ha calculado el coste por hora de trabajo mensual de un Ingeniero Técnico de Telecomunicaciones que desempeña tareas como técnico de proyecto.

Condiciones Particulares

Trabajo tarifado por tiempo empleado:

CONCEPTO	PRECIO UNITARIO (€/HORA)	NÚMERO DE HORAS	COSTE (€)
Realización de medidas y procesado de las mismas	19	50	950
Diseño en el EASE	19	150	2850
Estudio y análisis de datos	19	100	1900
TOTAL:			5.700

Los honorarios por el tiempo empleado para la realización de este proyecto corresponden a la cantidad de *cinco mil setecientos euros*.

Este presupuesto incluye el tiempo que se le ha dedicado al procesado de los datos de medida (realización in-situ, posterior análisis de los datos útiles y desechables), la modelación y el levantamiento del recinto dentro del programa de simulación, obteniendo así los distintos planos de la sala y finalmente, la simulación y obtención de parámetros necesarios para el cálculo del estudio acústico.

i. Recursos hardware

A continuación, se procede a calcular los recursos hardware utilizados, donde se estima que los años transcurridos de compra de estos elementos han sido hace 5 años, por lo que obtenemos que:

RECURSO	VALOR COMPRA (€)	VIDA ÚTIL ESTIMADA	VALOR RESIDUAL	CUOTA ANUAL	TIEMPO DE USO	COSTE AMORTIZACIÓN (€)
Samson VHF	380	10	190	19	0.5/12	0.8
Altavoz BP012	2900	10	1450	145	0.5/12	6.04
Sonómetro NI-31	2900	10	1450	145	2/12	24.17
Pc Acer	350	10	175	17.5	0.5/12	0.73
Trípode Fuente	42	10	21	2.1	0.5/12	0.09
Trípode Sonómetro	67	10	33.5	3.35	0.5/12	0.14
Ordenador personal Lenovo	900	10	450	45	4/12	15
Equipamiento de Sonido del Paraninfo	800	10	400	40	1/12	3.33
TOTAL:						50.3

La amortización de la utilización del hardware es de un total de *cincuenta euros y treinta céntimos*.

ii. Recursos software

A continuación, se procede a calcular los recursos software utilizados, donde se estima que los años transcurridos de compra de estos elementos han sido hace 5 años, por lo que obtenemos que:

RECURSO	VALOR COMPRA (€)	VIDA ÚTIL ESTIMADA	VALOR RESIDUAL	CUOTA ANUAL	TIEMPO DE USO	COSTE AMORTIZACIÓN (€)
EASE 4.3	2.210	10	1.105	110.5	4/12	36.84
DIRAC Bruel & Kjaer	3.092	10	1.546	154.6	2/12	25.77
Microsoft Office 2016	80	10	40	4	4/12	1.33
TOTAL:						63.94

La amortización de la utilización del software es de un total de *sesenta y tres euros con noventa y cuatro céntimos*.

iii. Coste de amortización total

CONCEPTO	TIEMPO TOTAL TRABAJO	AMORTIZACIÓN (€)	COSTE (€)
Recursos hardware	4 meses	50.3	-
Recursos software	4 meses	63.94	-
TOTAL:			38.08

La amortización total del trabajo es de un total de *treinta y ocho euros con ocho céntimos*.

iv. Redacción del proyecto

CONCEPTO	COSTE (€)
Papel de impresión	12
Tinta de color	45
Tinta negra	40
Encuadernación	30
TOTAL	127

Se calcula que el coste de creación y edición de la memoria, gastos de folios, impresión y encuadernación ha sido de *ciento veintisiete euros*.

10.2 Presupuesto ejecución material

Presupuesto de los paneles difusores acústicos (mejora acústica):

DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO (€)	CANTIDAD	COSTE (€)
Unidad de panel Vicoustic Multifuser Wood MKII 64 Wood	375	10	3.750
Unidad de panel t.akustik Difusor Manhattan wood	222	10	2.220
Metro cuadrado de material piramidal	50	110	5.500

Cabe decir que no existe un panel difusor elegido y por tanto, este precio es solamente orientativo, en el caso de que se procediera a la instalación de este material.

10.3 Presupuesto total

DESCRIPCIÓN	TOTAL (€)
Tiempo empleado	5.700
Amortización	38.08
Redacción del documento	127
Material propuesto (peor caso)	5.500
TOTAL	11.365,08

Yo, Noemi Mederos Cabrera, declaro que el presupuesto total de este proyecto asciende a :

**ONCE MIL TRESCIENTOS SESENTA Y CINCO EUROS CON OCHO
CÉNTIMOS (11.365,08 €)**

Las Palmas de Gran Canaria, a 06 de junio de 2022.

Firma:



ANEXO 1: resultados medidas in-situ

Medidas del tiempo de reverberación de la sala:

Nombre de archivo	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
001.wav	0.836	1.123	1.161	1.383	1.414	1.424	0.92
002.wav	0.813	1.103	1.183	1.371	1.409	1.439	0.922
003.wav	0.85	1.14	1.164	1.368	1.41	1.436	0.942
004.wav	1.081	1.05	1.295	1.201	1.137	1.096	0.895
005.wav	1.324	1.033	1.294	1.221	1.126	1.099	0.897
006.wav	1.052	1.019	1.291	1.218	1.127	1.101	0.911
007.wav	2.626	1.143	1.209	1.151	1.118	1.033	0.903
008.wav	2.535	1.147	1.173	1.114	1.118	1.033	0.888
009.wav	2.67	1.139	1.151	1.156	1.122	1.032	0.883
010.wav	1.309	1.136	1.319	1.147	1.091	1.031	0.88
011.wav	1.216	1.2	1.272	1.172	1.111	1.034	0.88
012.wav	1.173	1.159	1.312	1.162	1.092	1.043	0.881
013.wav	0.378	0.978	1.077	1.101	1.054	0.995	0.279
014.wav	0.944	0.964	1.072	1.104	1.073	1	0.278
015.wav	0.347	1.031	1.07	1.108	1.069	1.015	0.278
016.wav	1.25	1.239	1.26	1.193	1.187	1.057	0.924
017.wav	1.281	1.191	1.263	1.21	1.184	1.053	0.928
018.wav	1.28	1.234	1.249	1.205	1.191	1.055	0.925
019.wav	1.198	1.212	1.268	1.194	1.163	1.059	0.909
020.wav	1.218	1.175	1.286	1.187	1.158	1.063	0.944
021.wav	1.218	1.172	1.261	1.189	1.16	1.064	0.928
022.wav	1.206	1.222	1.279	1.162	1.129	1.103	0.935
023.wav	2.429	1.207	1.286	1.184	1.122	1.103	0.954
024.wav	2.689	1.223	1.261	1.149	1.134	1.101	0.968
025.wav	1.229	1.147	1.238	1.221	1.197	1.091	0.918
026.wav	1.304	1.138	1.226	1.256	1.194	1.093	0.923
027.wav	1.325	1.149	1.203	1.256	1.178	1.101	0.924
028.wav	1.126	1.267	1.277	1.166	1.094	1.013	0.939
029.wav	1.304	1.27	1.261	1.14	1.1	1.012	0.874
030.wav	1.313	1.287	1.279	1.182	1.111	1.026	0.897
031.wav	2.627	1.287	1.279	1.163	1.164	1.068	0.904
032.wav	2.676	1.279	1.269	1.203	1.12	1.031	1.058
033.wav	2.45	1.268	1.258	1.202	1.147	1.025	0.925
034.wav	1.349	1.208	1.212	1.261	1.182	1.081	0.926

035.wav	1.282	1.207	1.275	1.237	1.159	1.079	0.901
036.wav	1.279	1.21	1.231	1.24	1.16	1.1	1.067
037.wav	1.121	1.224	1.207	1.269	1.132	1.036	0.847
038.wav	0.989	1.196	1.203	1.266	1.115	1.037	1.007
039.wav	1.072	1.259	1.153	1.21	1.12	1.082	0.881
040.wav	1.271	1.08	1.209	1.152	1.147	1.042	0.902
041.wav	1.212	1.111	1.235	1.17	1.178	1.076	0.918
042.wav	1.225	1.099	1.229	1.158	1.146	1.065	0.905
043.wav	1.134	1.369	1.21	1.234	1.119	1.064	1
044.wav	1.205	1.214	1.286	1.238	1.114	1.059	0.978
045.wav	1.119	1.225	1.183	1.173	1.12	1.038	0.945
046.wav	1.244	1.2	1.342	1.204	1.118	1.043	0.966
047.wav	1.369	1.208	1.403	1.232	1.139	1.044	0.961
048.wav	1.436	1.223	1.371	1.224	1.13	1.049	0.973
049.wav	1.024	1.115	1.215	1.249	1.638	1.279	0.98
050.wav	1.052	1.094	1.221	1.256	1.621	1.292	1.008
051.wav	1.036	1.129	1.228	1.231	1.765	1.299	0.982
052.wav	1.123	1.024	1.196	1.393	1.838	1.687	1.072
053.wav	1.028	1.024	1.154	1.417	1.783	1.639	0.974
054.wav	1.096	1.009	1.165	1.363	1.697	1.489	0.978
055.wav	0.992	1.148	1.318	1.147	1.16	1.166	0.865
056.wav	1.147	1.235	1.251	1.156	1.176	1.115	0.915
057.wav	1.133	1.096	1.28	1.16	1.152	1.129	0.947
058.wav	1.133	1.189	1.245	1.248	1.142	1.09	0.941
059.wav	1.256	1.151	1.239	1.244	1.156	1.12	0.937
060.wav	1.233	1.165	1.211	1.239	1.149	1.062	0.981
061.wav	1.304	1.285	1.311	1.285	1.135	1.07	0.907
062.wav	1.273	1.221	1.327	1.346	1.116	1.009	0.915
063.wav	1.309	1.254	1.262	1.308	1.128	1.069	0.875
064.wav	1.253	1.32	1.252	1.244	1.069	1.073	1.022
065.wav	1.269	1.236	1.253	1.278	1.184	1.121	0.952
066.wav	1.301	1.298	1.256	1.238	1.172	1.105	0.962
067.wav	1.287	1.09	1.315	1.195	1.119	1.075	1.029
068.wav	1.232	1.052	1.326	1.184	1.132	1.093	0.918
069.wav	1.18	1.094	1.355	1.211	1.118	1.09	0.899
070.wav	1.211	1.225	1.124	1.191	1.025	0.932	0.854
071.wav	1.15	1.167	1.214	1.204	1.064	1.035	0.887
072.wav	1.165	1.17	1.215	1.213	1.128	1.043	1.025
073.wav	1.282	1.136	1.144	1.113	1.095	0.975	0.868
074.wav	1.286	1.13	1.132	1.139	1.072	0.993	0.884
075.wav	1.236	1.128	1.038	1.109	1.082	0.974	0.888
076.wav	1.249	1.113	1.264	1.262	1.088	1.008	1.032
077.wav	1.273	1.106	1.238	1.265	1.107	1.047	0.952

078.wav	1.269	1.098	1.237	1.275	1.108	1.045	0.94
079.wav	1.155	1.264	1.256	1.183	1.118	1.152	0.875
080.wav	1.283	1.224	1.225	1.197	1.101	1.15	0.896
081.wav	1.175	1.283	1.222	1.213	1.132	1.15	0.906
082.wav	1.184	1.377	1.299	1.204	1.115	1.057	0.916
083.wav	1.139	1.398	1.272	1.167	1.1	1.065	0.918
084.wav	1.13	1.409	1.215	1.199	1.105	1.074	0.944
085.wav	1.261	1.327	1.379	1.177	1.122	1.035	0.988
086.wav	1.215	1.294	1.277	1.195	1.127	1.006	0.919
087.wav	1.249	1.288	1.351	1.176	1.117	1.039	0.941
088.wav	1.224	1.215	1.288	1.104	1.116	1.075	1.017
089.wav	1.22	1.212	1.283	1.206	1.084	1.066	0.931
090.wav	1.226	1.182	1.241	1.158	1.101	1.067	0.9
091.wav	1.206	1.23	1.192	1.246	1.194	1.021	0.972
092.wav	1.267	1.201	1.226	1.221	1.164	1.065	0.944
093.wav	1.18	1.216	1.222	1.215	1.159	1.043	1.023
094.wav	1.197	1.301	1.322	1.195	1.159	1.05	0.891
095.wav	1.172	1.289	1.339	1.163	1.147	1.047	0.912
096.wav	1.134	1.295	1.323	1.163	1.11	1.058	0.882
097.wav	1.059	1.135	1.331	1.203	1.084	1.024	0.94
098.wav	1.058	1.179	1.279	1.233	1.094	1.051	0.881
099.wav	1.287	1.227	1.329	1.25	1.031	0.981	0.92
100.wav	0.992	1.287	1.325	1.211	1.098	1.074	0.944
101.wav	1.022	1.289	1.284	1.192	1.076	1.079	0.908
102.wav	1.089	1.282	1.178	1.225	1.102	1.06	1.039
103.wav	1.189	1.323	1.202	1.223	1.096	1.034	0.86
104.wav	1.394	1.324	1.206	1.221	1.099	1.017	0.871
105.wav	1.316	1.311	1.237	1.17	1.08	1.012	0.953
106.wav	1.187	1.13	1.208	1.164	1.17	1.029	0.94
107.wav	1.246	1.132	1.247	1.23	1.118	0.994	1.017
108.wav	1.175	1.142	1.222	1.139	1.16	1.055	0.975
109.wav	1.112	1.272	1.251	1.206	1.173	1.015	0.902
110.wav	1.092	1.356	1.22	1.204	1.1	1.052	0.999
111.wav	1.158	1.308	1.234	1.178	1.149	1.028	0.942
112.wav	1.251	1.283	1.386	1.285	1.145	1.082	1.04
113.wav	1.352	1.246	1.354	1.264	1.149	1.07	0.851
114.wav	1.313	1.29	1.406	1.192	1.148	1.033	0.843
115.wav	0.972	1.073	1.145	1.093	1.104	0.985	0.579
116.wav	1.035	1.102	1.249	1.162	1.14	1.046	0.963
117.wav	0.952	1.084	1.273	1.16	1.105	1.061	0.961
118.wav	1.031	1.24	1.389	1.283	1.094	1.07	0.874
119.wav	1.024	1.147	1.322	1.356	1.124	1.055	0.885
120.wav	1.051	1.223	1.361	1.328	1.209	1.087	0.868

121.wav	0.879	1.022	1.155	1.156	1.225	1.115	0.879
122.wav	0.863	1.066	1.173	1.145	1.226	1.113	0.868
123.wav	0.854	1.046	1.198	1.124	1.215	1.114	0.863
124.wav	1.163	1.231	1.346	1.189	1.112	1.012	0.884
125.wav	1.086	1.154	1.22	1.154	1.013	1.001	0.831
126.wav	1.252	1.194	1.359	1.222	1.06	0.991	0.87
127.wav	1.008	1.131	1.203	1.172	1.101	1.024	0.868
128.wav	1.292	1.126	1.236	1.21	1.154	0.991	0.871
129.wav	1.117	1.156	1.173	1.102	1.365	1.091	0.882
133.wav	1.801	1.182	1.243	1.236	1.134	1.078	0.886
134.wav	1.344	1.294	1.171	1.214	1.158	1.082	1.004
135.wav	2.288	1.162	1.165	1.219	1.148	1.094	0.925
PROMEDIO	1.26	1.19	1.25	1.21	1.16	1.08	0.91

❖ *Fotos tomadas en las mediciones in-situ:*



Figura 81. Foto 1



Figura 82. Foto 2



Figura 83. Foto 3



ANEXO 2: GLOSARIO DE TÉRMINOS

Para poder entender bien este trabajo es necesario tener claro algunos conceptos teóricos. Aquí se presentan algunas definiciones en caso de necesitar su consulta:

▪ Definiciones

- ➔ **Sonido:** el sonido se define como la vibración mecánica que se propaga a través de un medio material elástico y denso (generalmente el aire), y que es capaz de producir una sensación auditiva. Por lo tanto, siguiendo esta definición, en el vacío no se produce sonido.

- ➔ **Nivel de presión sonora (SPL):** La presión sonora es la manera más habitual de expresar la magnitud de un campo sonoro y su unidad de medida es el N/m^2 o *Pa*. El oído humano presenta un alto rango de presiones audibles y, por tanto, presenta un inconveniente al trabajar con este tipo de medida ya que estaríamos obligados al uso de números inmanejables debido a que estamos aplicando una escala lineal. Es por ello por lo que utilizamos la escala logarítmica para poder representar la presión sonora, y hablamos del SPL (Sound Pressure Level) que hace referencia a la intensidad de sonido que puede generar una presión sonora percibida por una persona en un momento concreto. Este valor se mide en *dB* y dichos valores varían entre 0 *dB* y 120 *dB*, los cuales corresponden al valor del umbral de audición y al valor del umbral de dolor.

- ➔ **Bandas de frecuencias:** En la audición humana, la banda de frecuencias audibles se extiende desde los 20 Hz aprox. hasta los 20KHz, es decir, desde sonidos muy graves a sonidos muy agudos. Por tanto, el conjunto de todas estas frecuencias se denomina banda de frecuencias.

→ **Sonómetro:** El sonómetro es un instrumento electrónico de medida que recoge información del comportamiento acústico desde un punto de medida, es decir, mide los niveles de presión sonora. Permite realizar medidas globales, o por bandas de frecuencias con diferentes respuestas temporales (“Fast”, “Slow”, “Impulse”, “Peak”). Además, los fabricantes de estos instrumentos deben seguir unas normas internacionales establecidas a las que deben ceñirse para poder reducir al máximo las posibles diferencias entre mediciones.

▪ **Parámetros acústicos**

→ **Tiempo de reverberación:** se define tiempo de reverberación al tiempo (definido en segundos) que se tarda en descender 60 dB SPL la intensidad de un sonido con respecto a su valor inicial. Este valor facilita la evaluación de las propiedades acústicas de un recinto.

El TR varía con la frecuencia, tendiendo a disminuir a medida que ésta aumenta, es decir, a frecuencias más altas, menor tiempo de reverberación. Cuando se establece un único valor recomendado de TR para un recinto concreto, se suele hacer referencia al obtenido como media aritmética de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1KHz (RT_{mid}).

TIPO DE SALA	RT _{mid} , SALA OCUPADA (EN S)
Sala de conferencias	0,7 – 1,0
Cine	1,0 – 1,2
Sala polivalente	1,2 – 1,5
Teatro de ópera	1,2 – 1,5
Sala de conciertos (música de cámara)	1,3 – 1,7
Sala de conciertos (música sinfónica)	1,8 – 2,0
Iglesia/catedral (órgano y canto coral)	2,0 – 3,0
Locutorio de radio	0,2 – 0,4

Tabla 26. Márgenes de valores recomendados de RT_{mid} en función del tipo de sala (recintos ocupados)

➔ **Claridad de la voz, C50:** La claridad de la voz se define como la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (sonido directo y primeras reflexiones) y la que le llega después de los primeros 50 ms.

Este valor se calcula en cada banda de frecuencia entre 125 Hz y 4KHz, expresándose en escala logarítmica de la siguiente manera:

$$C50 = \frac{\text{Energía hasta 50 ms}}{\text{Energía a partir de 50 ms}} \text{ (dB)}$$

El valor medio recomendado de C50 correspondiente a cada punto de una sala ocupada debe verificar que $C50 > 2$ dB. Es decir, cuanto más elevado sea dicho parámetro, mejor será la inteligibilidad de la palabra y la sonoridad en el punto considerado.

→ **Claridad musical, C80:** La claridad musical se define como la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 80 ms desde la llegada del primer sonido directo (sonido directo y primeras reflexiones) y la que le llega después de los primeros 80 ms. Este término indica el grado de separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical.

Este valor se calcula en cada banda de frecuencia entre 125 Hz y 4KHz, expresándose en escala logarítmica de la siguiente manera:

$$C80 = \frac{\text{Energía hasta 80 ms}}{\text{Energía a partir de 80 ms}} (dB)$$

Cuando se trata de música, las reflexiones que llegan al oyente dentro del intervalo de 80 ms son integradas por el oído junto con el sonido directo y contribuyen a aumentar la claridad musical.

El valor medio recomendado de C80 para una sala vacía debe situarse entre $-4 \leq C80 \leq 0$ dB, evitándose en todos los casos valores superiores a +1 dB. Para salas ocupadas, el valor medio será entre $-2 \leq C80 \leq 2$ dB. Cabe destacar, que la claridad musical no solo depende de los valores energéticos que se dan en su definición, sino también de factores puramente musicales.

→ **%Alcons y RASTI:** La adecuada percepción de las consonantes y vocales de una palabra hacen que tengamos una correcta comprensión del mensaje oral que se nos quiere transmitir.

Cuando se llevaron a cabo los primeros experimentos para determinar la fórmula para el cálculo de la inteligibilidad, se realizó un exhaustivo trabajo que consistió en dos partes. En la primera parte, tras unos cuantos procesos, se determinaba cuál era el porcentaje de la pérdida de información obtenida. Dicha pérdida se asociaba a una percepción incorrecta de las consonantes, el cual se denominó % de Pérdida de

Articulación de Consonantes, o lo que es lo mismo, %ALCons (“Articulation Loss of Consonants”). Por tanto, como es de esperar, si tenemos un porcentaje elevado de este parámetro, peor será la calidad de la inteligibilidad del sonido existente.

La segunda parte de este trabajo consistió en hallar una ley matemática que permitiera la posibilidad de predecir la inteligibilidad de la palabra en cualquier punto de un recinto todavía por construir. Por tanto, haciendo uso de la teoría acústica estadística se pudo deducir que el valor de %ALCons se podía determinar a partir del conocimiento del tiempo de reverberación TR y de la diferencia de los niveles de presión sonora de campo directo y campo reverberante (LD y LR respectivamente).

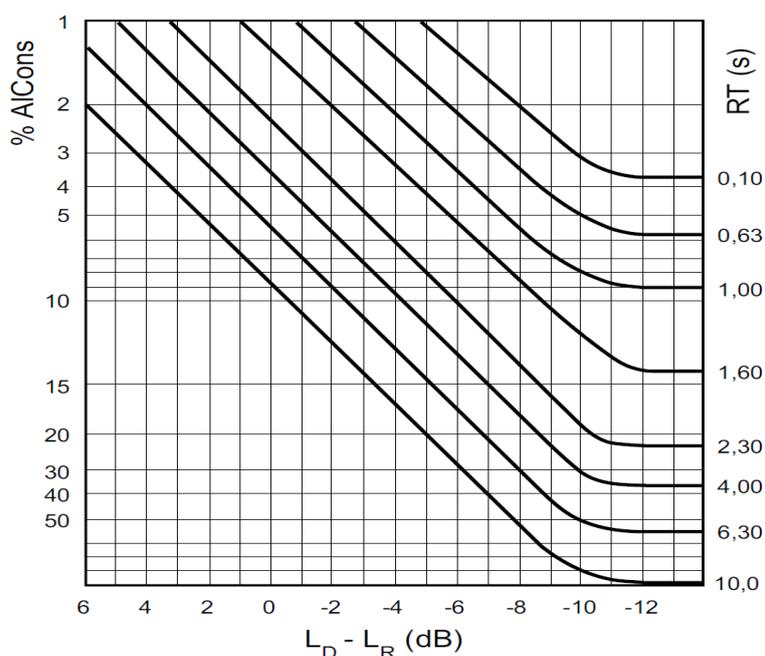


Figura 84. Obtención de %ALCons (eje izquierdo) a partir de TR (eje derecho) y LD-LR (eje de abscisas)

Por otro lado, es preciso indicar que existe otro parámetro que permite cuantificar el grado de inteligibilidad de la palabra. Este se denomina STI (“Speech Transmission Index”) y su valor oscila entre 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad total). Asimismo, existe una versión simplificada del STI denominada RASTI (“Rapid Speech Transmission Index”).

Habitualmente, el RASTI es el parámetro medido en recintos, debido a su rapidez de cálculo en relación con el STI.

Se ha podido demostrar que existe una muy buena correlación entre los valores de %ALCons y de STI / RASTI. Dicha correspondencia se muestra en la Figura 85 y en la Tabla 27. En esta última aparece también la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad.

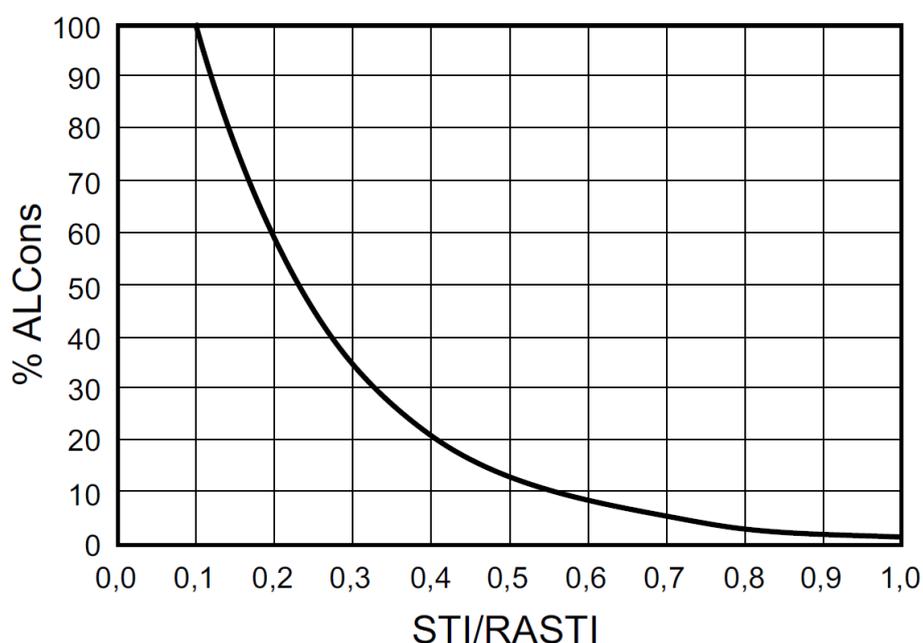


Figura 85. Relación entre %ALCons y STI/RASTI.

%ALCONS	STI / RASTI	VALORACIÓN SUBJETIVA
1,4% - 0%	0,88 - 1	Excelente
4,8% - 1,6%	0,66 – 0,86	Buena
11,4% - 5,3%	0,50 – 0,64	Aceptable
24,2% - 12%	0,36 – 0,49	Pobre
46,5% - 27%	0,24 – 0,34	Mala

Tabla 27. Relación entre %ALCONS y STI/RASTI y valoración subjetiva

➔ **Absorción acústica:** La absorción acústica es determinante en la calidad acústica final de un recinto cualquiera, debido a la reducción de la energía asociada a las ondas sonoras, tanto en su propagación a través del aire como cuando inciden sobre sus superficies límite.

Esta absorción es producida por diversos factores como el aire, el público y los asientos, los materiales de las superficies de la sala susceptibles de entrar en vibración (puertas, tabiques, ventanas, etc.), los materiales utilizados en la construcción del propio recinto como por ejemplo las paredes o el techo, así como los propios materiales absorbentes que se utilicen de manera selectiva en la sala colocados sobre determinadas zonas a modo de revestimientos del recinto.

Las características de absorción de los materiales absorbentes y de los resonadores dependen no sólo de sus propiedades físicas, sino también de un sinfín de detalles constructivos, como son los coeficientes de absorción α obtenidos mediante ensayos de laboratorio, según un procedimiento homologado (norma UNE-EN ISO 354:2004).