

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado en Ing. Sist. de Telecom., Sonido e Imagen



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Diseño de un estudio de grabación en el Palacio de Formación y Congresos de Fuerteventura”

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor:
Manuel Fleitas Suárez

Tutores:
Juan Carlos Rodríguez Vercher
Jesús Alba Fernández

GANDIA, 2021

Resumen

Este proyecto se define como una propuesta para el diseño acústico de un estudio de grabación para la Escuela Insular de Música del Cabildo de Fuerteventura. Se parte de dos salas de ensayo situadas en el Palacio de Formación y Congresos de Fuerteventura, para las cuales se realiza un análisis de las propiedades acústicas actuales. Este análisis consiste en medidas in situ con el equipamiento necesario para la obtención del tiempo de reverberación de las salas. A continuación, se realiza el rediseño y adaptación a un estudio de grabación musical, compuesto por una sala de control y una sala de grabación, mediante el programa de simulación acústica Catt-Acoustic™. Se modifica la geometría de las salas y se añaden nuevos materiales teniendo en cuenta los criterios de diseño más importantes publicados por expertos en acústica de salas, con el objetivo de conseguir unos parámetros determinados válidos para un estudio de grabación.

Palabras clave

Acústica arquitectónica, estudio de grabación, sala de control, simulación acústica, acondicionamiento acústico.

Abstract

This project is defined as a proposal for the acoustic design of a recording studio for the Insular School of Music of the Cabildo de Fuerteventura. It starts from two rehearsal rooms located in the Fuerteventura Training and Congress Palace, for which an analysis of the current acoustic properties is carried out. This analysis consists of measurements in situ with the necessary equipment to obtain the reverberation time of the rooms. This is followed by the redesign and adaptation to a music recording studio, consisting of a control room and a recording room, using the Catt-Acoustic™ acoustic simulation program. The geometry of the rooms is modified and new materials are added taking into account the most important design criteria published by experts in acoustics, with the aim of achieving certain parameters valid for a recording studio.

Key words

Architectural acoustics, recording studio, control room, acoustic simulation, acoustic conditioning.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	5
1.1	DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	5
1.2	MOTIVACIÓN	5
1.3	OBJETIVOS	5
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	7
2.1	ACÚSTICA. ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA.....	7
2.1.1	Acondicionamiento acústico	8
2.1.2	Modos propios.....	10
2.1.3	Parámetros acústicos.....	11
2.1.4	Eco flotante.....	12
2.1.5	Absorbentes.....	12
2.1.6	Difusores.....	14
2.1.7	Criterios de diseño.....	16
3	ADAPTACIÓN A ESTUDIO DE GRABACIÓN	19
3.1	DESCRIPCIÓN DE LAS SALAS	19
3.1.1	Aula 11: sala de grabación.....	20
3.1.2	Aula 12: Sala de control.....	20
3.2	MEDIDAS IN-SITU.....	21
3.2.1	Equipamiento y software	21
3.2.2	Metodología y procedimiento.....	22
3.2.3	Resultados	24
3.3	SIMULACIÓN EN CATT-ACOUSTIC™	27
3.3.1	Catt-Acoustic™	27
3.3.2	Modelado de las salas en AutoCAD.....	28
3.3.3	Coeficientes de absorción	30
3.3.4	Simulaciones con herramienta TUCT.....	31
3.3.5	Resultados obtenidos	31

3.4	PROPUESTA DE ADAPTACIÓN A ESTUDIO DE GRABACIÓN	34
3.4.1	Sala de grabación.....	34
3.4.2	Sala de control	36
4	CONCLUSIONES	47
5	BIBLIOGRAFÍA	48

1 INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Este proyecto se define como una propuesta al Cabildo de Fuerteventura para la adaptación de dos salas de la Escuela Insular de Música, situadas en el Palacio de Formación y Congresos de Puerto del Rosario, a un estudio de grabación de música, compuesto por una sala de control y una sala de grabación.

Para ello, se realizarán mediciones *in situ* de determinados parámetros acústicos, caracterizando así las salas en su estado actual. Estas mediciones se realizarán teniendo en cuenta la normativa vigente UNE EN-ISO 3282-1: 2010: *Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos*. [1]

Una vez se hayan obtenido estos datos, se creará modelos 3D de las salas en el software AutoCAD y se simularán en el software Catt-Acoustic™, teniendo en cuenta los distintos materiales que forman las salas. Se compararán los resultados de dichas simulaciones con los datos obtenidos en las medidas *in situ* para poder validar los modelos realizados mediante el software de simulación.

A continuación, se realizará una adaptación del estudio, modificando ligeramente la geometría de las salas e incorporando nuevos elementos y materiales para mejorar la acústica y conseguir parámetros acordes a los requeridos en un estudio de grabación. Para ello, primeramente se estudiará cuáles son los parámetros más adecuados para este tipo de salas.

1.2 MOTIVACIÓN

La idea de este proyecto surge de la falta de estudios de grabación en la isla de Fuerteventura. Los usos que puede darle la Escuela Insular de Música a estas salas abarcan desde la grabación de grupos folklóricos de la isla y acuerdos de préstamo a grupos musicales locales, hasta la impartición de cursos de producción musical o similar que requieran de instalaciones con equipamiento de estudio, entre otros.

1.3 OBJETIVOS

El objetivo principal y la razón de ser de este trabajo es el acondicionamiento acústico de dos salas de la Escuela Insular de Música para su conversión a estudio de grabación. Para poder llevar a cabo este proceso se marcan los siguientes subobjetivos:

- Caracterizar las salas a tratar en su estado actual a través de medidas *in situ* con el equipamiento necesario, y realizar un análisis de sus características.

- Realizar modelos de simulación para el software Catt-Acoustic™, y validarlos con las medidas in situ.
- Realizar una adaptación de las salas a estudio de grabación. Para ello, en la sala de menores dimensiones, que se usará como sala de control, el objetivo será bajar el tiempo de reverberación al marcado por la European Broadcasting Union en su recomendación EBU Tech. 3276, entre 0.2 y 0.4 segundos, añadiendo nuevos materiales y elementos en la sala, y haciendo uso de distintas técnicas e ideas de diseño de salas de control. En la segunda sala o sala de grabación se buscará realizar una propuesta de mejora introduciendo elementos de acústica variable, con el objetivo de adaptar la sala a las necesidades de los diferentes músicos.

Se tratarán aspectos relacionados con el acondicionamiento de salas, y no sobre el aislamiento acústico. Esto es debido a que las salas en su estado actual cuentan con un diseño que ha sido pensado en este aspecto, tal y como se comentará más adelante.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 ACÚSTICA. ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA

La acústica se define como la rama de la física que trata el estudio de las ondas mecánicas como las vibraciones, el sonido, el infrasonido y el ultrasonido.

Aunque ya en la Antigua Grecia se comenzaba a hacer uso de conceptos relacionados con esta ciencia en el diseño de teatros, los primeros estudios de los que se tiene constancia datan de la Antigua Roma. Entorno al año 20 a. C., el arquitecto e ingeniero Marco Vitruvio publica su obra *De Architectura*, donde recoge diseños y descripciones para la mejora de la acústica de los teatros romanos.

La revolución científica producida en los siglos XVI y XVII, trae consigo multitud de descubrimientos en el campo de la física y la acústica:

- El sacerdote, filósofo y matemático francés Marin Mersenne realizó varios experimentos y mediciones con los que demuestra que la frecuencia del sonido producido por una cuerda depende de la longitud, tensión y densidad lineal de la misma. También realizó medidas de la velocidad del sonido, y demostró que es independiente de su frecuencia.
- Galileo Galilei, astrónomo y físico italiano, escribió “Las ondas son producidas por las vibraciones de un cuerpo sonoro, que se propagan por el aire, llegando al tímpano del oído como un estímulo que la mente interpreta como sonido”. Esta declaración es un punto importante de partida de la rama de la acústica conocida como psicoacústica, la cual se desarrollará desde los siglos XIX hasta la actualidad.

Pero no es hasta comienzos del XIX, cuando el físico estadounidense Wallace Clement Sabine realiza diversos estudios en acústica de salas, que la acústica arquitectónica comienza a desarrollarse como ciencia moderna. Tras el desarrollo de distintos proyectos, llegó a la conclusión de que existen vínculos entre la calidad acústica y el tamaño y superficie de absorción de un recinto. También definió el tiempo de reverberación como el tiempo que tarda en decaer el sonido 60 dB en un recinto. Este parámetro, que fue deducido por el físico de manera experimental, se expresa mediante una fórmula que, a día de hoy, sigue usándose como referencia debido a su sencillez. [2]

$$TR = \frac{V}{A} \cdot 0.161 \text{ [s]}$$

Ecuación 1. Fórmula de Sabine.

El área de absorción equivalente A que aparece en la fórmula de Sabine se define como la superficie equivalente de absorción total obtenida de diferentes superficies con diferentes coeficientes de absorción:

$$A = S_1 \cdot \alpha_1 + S_2 \cdot \alpha_2 + S_3 \cdot \alpha_3 + \dots S_n \cdot \alpha_n$$

Ecuación 2. Área de absorción equivalente.

En la actualidad, la acústica abarca numerosos campos, y es aplicada en multitud de escenarios. Podemos diferenciar varias líneas de investigación y estudio como son la acústica arquitectónica, ambiental, submarina, musical o la psicoacústica, entre otras. En este trabajo se desarrollan conceptos de la acústica arquitectónica. Esta rama estudia la acción de distintos elementos arquitectónicos sobre la propagación del sonido, y abarca tres temas: El aislamiento acústico, el acondicionamiento acústico y la acústica urbanística [3]:

- El aislamiento acústico se define como el conjunto de, tratamientos, sistemas y técnicas enfocados en reducir o eliminar la transmisión de sonido o vibraciones entre sistemas emisor y receptor.
- El acondicionamiento acústico estudia procedimientos y técnicas para mejorar la calidad acústica de un recinto en función de su uso.
- La acústica urbanística estudia mecanismos para la protección frente a ruidos externos en zonas urbanas en función de su uso.

Este trabajo se centra en el acondicionamiento acústico, por lo que a continuación se introducen conceptos de este campo.

2.1.1 ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO

El acondicionamiento acústico consiste en el diseño o mejora de la acústica de un recinto a través de técnicas y tratamientos que permiten un mayor control de la propagación del sonido en su interior. La geometría de la sala, los materiales que la componen, el mobiliario y los elementos como paneles difusores o absorbentes afectan directamente en cómo las ondas sonoras se repartirán por el espacio, y por tanto en cómo el receptor, sea un sistema de captación de sonido o una persona, percibirá el sonido del emisor.

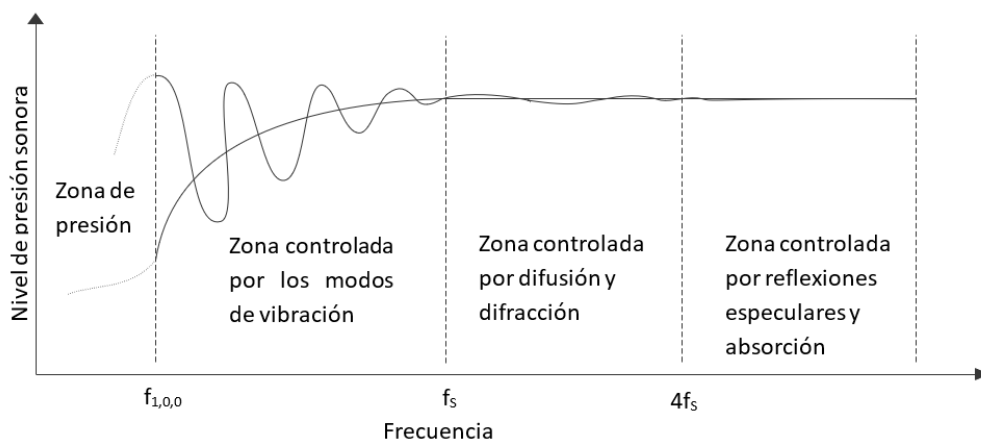
Existen multitud de conceptos fundamentales de acústica de salas que permiten trabajar en soluciones para la creación o mejora de las condiciones de un recinto. Para poder hacer uso de estas herramientas es necesario primero definir el problema y los objetivos que se buscan. Estos dependerán del tipo de sala y del tipo de actividad que se vaya a realizar en esta. Teatros, salas de conferencias, aulas o salas de grabación tienen distintas finalidades, y por tanto se buscará conseguir distintos parámetros acústicos que permitan alcanzar las condiciones de transmisión y escucha deseadas.

Hay que tener en cuenta varios factores que afectan al resultado final de la acústica de la sala, y que podemos manipular para acercarnos a los objetivos exigidos. Desde el tamaño de la sala, la relación entre sus dimensiones o los ángulos formados por el suelo, techo y paredes, hasta el punto de escucha juegan un papel fundamental en cómo las ondas sonoras se repartirán por el espacio.

El estudio de la acústica se puede realizar a través de tres métodos de cálculo: acústica ondulatoria, geométrica y estadística.

- La acústica ondulatoria se fundamenta en la resolución de la ecuación de onda, y es la representación más fiel del comportamiento de las ondas en un recinto. Su principal problema reside en su complejidad, por lo que habitualmente no es práctico excepto para casos concretos.
- La acústica geométrica supone que una fuente sonora emite rayos sonoros, de forma análoga a los rayos luminosos. Estos rayos equivalen a la dirección de propagación de la onda, y son perpendiculares al frente de onda. Permiten hacer estudios de la acústica de salas a través de softwares de simulación como Catt-Acoustic™.
- La acústica estadística parte de la premisa de que el sonido se propaga de forma homogénea e isotrópica por todo un recinto. Esta simplificación del comportamiento real del sonido permite obtener resultados evaluando estadísticamente la energía acústica del recinto en su conjunto.

Estos métodos, debido a sus características, habitualmente son aplicados en distintos rangos de frecuencias del espectro audible. Podemos diferenciar cuatro bandas de frecuencias en función de qué método preferible usar:



Gráfica 1. Espectro frecuencial dividido en zonas de control [4].

La zona de presión se encuentra en las frecuencias más graves, no es posible controlar las ondas sonoras en esta banda. Esto es debido a que las frecuencias con una longitud de onda mayor al doble del largo de una sala, es decir, por debajo del primer modo (1,0,0), producen un nivel de presión similar a lo largo de la sala, por lo que no se producen resonancias y los cambios de presión no son apreciables.

La zona controlada por los modos de vibración es dominada principalmente por los modos propios de la sala, de los cuales se hablará más adelante. Esta zona viene delimitada por la frecuencia de Schroeder (f_s) o Large Room frequency. A partir de esta frecuencia la densidad de modos es tal que podemos decir que no colorea la respuesta de la sala. Esta frecuencia viene dada por la Ecuación 3, donde TR es el tiempo de reverberación en segundos, y V es el volumen de la sala en metros cúbicos. Esta ecuación difiere de la ecuación original publicada por Schroeder tras años de experimentos y mediciones que han permitido mejorarla [5].

$$f_s = 900 \sqrt{\frac{TR}{V}} [Hz]$$

Ecuación 3. Frecuencia de Schroeder.

A partir de esta frecuencia el control se realiza mediante difusión y difracción, aplicando modelos estadísticos, debido a que la densidad de modos es tal que se considera campo difuso, permitiendo el uso de modelos estadísticos.

La zona controlada mediante absorción y reflexiones especulares aparece en frecuencias altas, donde la longitud de onda es muy pequeña comparada con las dimensiones de la sala. Esto permite hacer uso de modelos acústicos geométricos.

2.1.2 MODOS PROPIOS

La frecuencia de Schroeder (f_s) marca una de las zonas de comportamiento de un recinto. El comportamiento de la sala por debajo de esta frecuencia es modal. Esto significa que se producen ondas estacionarias debido a la suma o resta de ondas incidentes y reflejadas, produciendo interferencias constructivas o destructivas. Cuando la longitud de onda de la onda incidente es un múltiplo de la distancia entre dos superficies, la onda incidente y reflejada estarán en fase. Es en esta situación cuando se produce una onda estacionaria con máximos y mínimos de presión, lo cual produce irregularidades en la distribución del sonido por la sala.

Cada modo tiene asociada una frecuencia propia, la cual se puede calcular para un recinto paralelepípedo mediante la ecuación de Rayleigh:

$$f_{n_x n_y n_z} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} [Hz]$$

Ecuación 4. Ecuación de Rayleigh para el cálculo de la frecuencia de los modos propios.

donde c_0 es la velocidad del sonido, l_x , l_y y l_z son las dimensiones de la sala, y n_x , n_y y n_z son valores enteros que determinan el orden del modo a calcular.

Es importante que la frecuencia de Schroeder sea lo más baja posible con el fin de evitar que la distribución de modos produzca una coloración del sonido original. Para ello, es posible disminuir el tiempo de reverberación. [6]

2.1.3 PARÁMETROS ACÚSTICOS

Existe multitud de literatura que describe varios parámetros acústicos usados para poder valorar objetivamente la calidad de un recinto. A continuación, se presentan algunos de los parámetros acústicos más relevantes para estudios de grabación:

- **Tiempo de reverberación (TR)**

Tal y como se ha descrito anteriormente, el tiempo de reverberación es el tiempo en segundos que tarda la presión sonora de un recinto en disminuir 60 dB. A la hora de realizar mediciones, es muy habitual recurrir a los valores T30 o T20, los cuales se definen como decaimiento de la señal en 30 dB multiplicado por 2, o 20 dB multiplicado por 3. Estos valores son equivalentes y nos dan resultados similares a los obtenidos midiendo una caída de 60 dB. Habitualmente se mide octavas o tercios de octava. Para obtener un valor de TR medio se realiza el promedio de los resultados obtenidos en las bandas de 500Hz y 1kHz.

$$TR_{mid} = \frac{TR_{500Hz} + TR_{1kHz}}{2} [s]$$

Ecuación 5. Valor del tiempo de reverberación medio.

- **Early Decay Time (EDT)**

El Early Decay Time es el tiempo que tarda la presión sonora de un recinto en caer 10 dB después de que la fuente sonora deje de emitir, multiplicado por 6.

A diferencia del tiempo de reverberación, que mide la percepción de reverberación de manera objetiva, el EDT se acerca más a cómo es percibida subjetivamente por el oído humano. Si estuviésemos analizando un recinto que permita una difusión homogénea del campo sonoro, con materiales cuyos coeficientes de absorción fuesen iguales para todas las superficies, estos dos valores serían equivalentes.

- **Claridad (C50 y C80)**

La claridad se describe como la relación en decibelios entre la energía precoz y la energía tardía, para un límite temporal precoz (t_e) de 50 ms en el caso de la claridad de la voz, y de 80ms para la claridad musical.

$$C_{t_e} = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{t_e} p^2(t) dt}{\int_{t_e}^{\infty} p^2(t) dt}$$

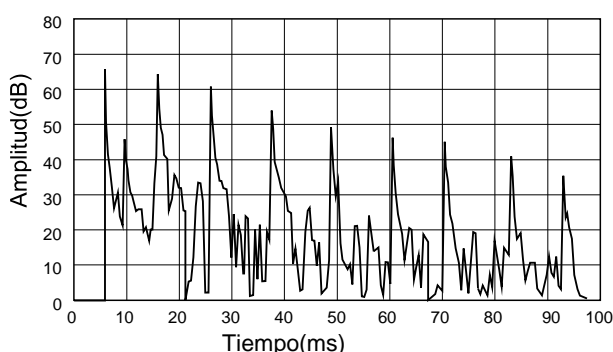
Ecuación 6. Relación entre la energía precoz y la energía tardía.

- **Tiempo de retardo inicial, Initial Time Delay Gap (ITDG)**

Este parámetro indica el tiempo existente entre la llegada del sonido directo y de la primera reflexión al receptor. Está relacionado con la intimidad acústica, que describe subjetivamente la sensación producida en un oyente de estar en un recinto de dimensiones equivalentes al sonido escuchado. Este valor debe situarse por debajo de los 20 ms idealmente, considerándose insatisfactorio a partir de los 35ms. [7]

2.1.4 ECO FLOTANTE

El eco flotante o flutter echo es un fenómeno acústico que se produce cuando una onda emitida por una fuente sonora queda atrapada entre dos superficies paralelas y muy reflectantes. Esta onda, al mantenerse rebotando entre las dos superficies y no ser absorbida, produce un sonido no deseado que afecta a las medias y altas frecuencias. Esta coloración en el timbre es debido a que la onda rebota a una frecuencia determinada, directamente proporcional a la distancia entre ambas superficies. Además, también disminuye la inteligibilidad de la palabra.



Gráfica 2. Curva energía-tiempo donde se aprecian los picos periódicos producidos por el flutter echo [7].

Para evitar este efecto a la hora de diseñar una sala deben evitarse las paredes paralelas, o añadir materiales absorbentes o difusores que reduzcan este vaivén del sonido.

2.1.5 ABSORBENTES

Todos los materiales absorben parcialmente las ondas incidentes. Los elementos absorbentes acústicos están formados por materiales que han sido estudiados y cuentan con una gran capacidad de absorción. Los fabricantes proporcionan habitualmente información sobre los coeficientes de absorción α por bandas de octavas, desde los 125Hz hasta los 4kHz.

Estos son usados en estudios de grabación con la finalidad de reducir el tiempo de reverberación, absorber la energía de reflexiones específicas, reducir la densidad de energía acústica (y por tanto el nivel de presión sonora), y controlar las reflexiones de la sala a partir de $4f_s$, tal y como se muestra en la Gráfica 1. Podemos diferenciar dos tipos de elementos absorbentes: Los materiales porosos, y los resonadores.

- **Absorbentes porosos**

Estos materiales están formados sustancias fibrosas con pequeños conductos de aire que producen un rozamiento de las partículas del aire, disipando energía en forma de calor. La efectividad de los absorbentes porosos depende del material del que está compuesto, así como de la relación entre el espesor de este y la longitud de onda. Se producen principalmente a partir de lana de vidrio, lana mineral, espuma a base de resina de melamina o espuma de poliuretano.

Estos materiales generalmente absorben mejor en media y alta frecuencia. Esto es debido a que la velocidad de las partículas del aire debe ser alta para que el material sea efectivo. Asumiendo que se instala en la pared un panel absorbente con espesor D , las partículas no tienen espacio para moverse cerca de la pared, por lo que la velocidad es menor conforme nos acercamos a la pared, llegando a ser nula. En esta situación, tenemos que para una determinada longitud de onda se requiere un material de un espesor 4 veces mayor para que la absorción sea máxima.

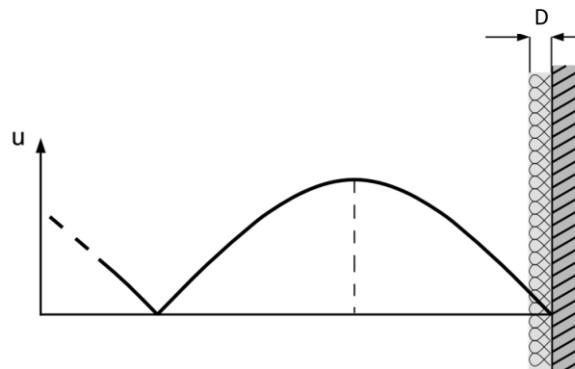


Figura 1. Velocidad de las partículas del aire cerca de una superficie reflectante [7].

Por tanto, podemos decir que, a mayor espesor, mayor será la capacidad del material de absorber a baja frecuencia. Otra manera de mejorar la absorción en estas frecuencias consiste en separar el panel de la pared, ya que de esta forma estaríamos acercando el material a la zona de mayor velocidad de las partículas de aire.

- **Absorbentes resonadores**

Existen ciertos elementos denominados resonadores caracterizados por su frecuencia de resonancia, en la cual se obtiene un alto grado de absorción. Debido a su zona de trabajo en el espectro de frecuencias, se usan como trampas de graves, atenuando a frecuencias bajo los 500 Hz en las que los absorbentes porosos no absorben mucha energía. Estos elementos los podemos dividir en resonadores de membrana y resonadores de Helmholtz.

- **Resonador de membrana**

Estos resonadores están formados por un panel de un material flexible separado de la pared una determinada distancia. Cuando una onda incide en esta placa, esta es excitada a una determinada frecuencia, vibrando y provocando una transformación de la energía sonora en energía mecánica y térmica, por lo que la onda reflejada será de menor amplitud.

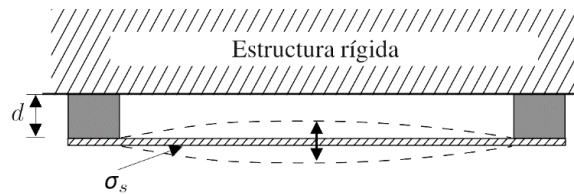


Figura 2. Resonador de membrana [8].

- **Resonador de cavidad simple**

Un resonador de cavidad simple o de Helmholtz consiste en una cavidad de aire que conecta con la sala únicamente a través de un orificio estrecho. De forma similar al resonador de membrana, actúa como un sistema resonante que absorbe las ondas sonoras a determinadas frecuencias. El aire que forma la cavidad del cuello actúa como una unidad (masa), mientras que el aire de la cavidad actúa como muelle.

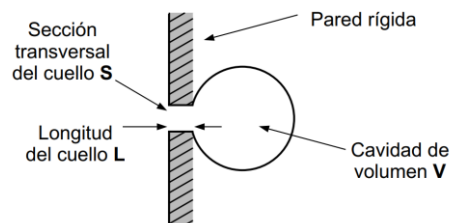


Figura 3. Resonador de Helmholtz o de cavidad simple. [7].

- **Resonador de cavidad múltiple**

Los resonadores de cavidad múltiple consisten en una placa de un material no rígido perforada con determinados orificios, y situada con cierta separación de la pared del recinto. Este tipo de resonador se puede interpretar de dos maneras: como un varios resonadores de cavidad simple que comparten cavidad; o como un resonador de membrana en el que se ha sustituido la masa del panel por la masa del aire del conjunto de orificios.

2.1.6 DIFUSORES

Los elementos difusores cuentan con la característica de reflejar el sonido en varias direcciones. El principal uso de estos materiales es producir un efecto de espacialidad, conseguido gracias a que la energía del campo reverberante puede ser dispersada uniformemente por el espacio.

A continuación, se describen los principales tipos de difusores y sus características.

- **Difusor policilíndrico**

Estos difusores consisten por un conjunto de superficies lisas y curvas de forma convexa, habitualmente hechos de planchas de madera. El radio de curvatura debe ser menor de 5 metros, en caso contrario el panel comienza a comportarse como un elemento reflector.

- **Difusor de Schroeder**

Los difusores de Schroeder o RPG (Reflection Phase Grating), están diseñados para trabajar en un rango específico del espectro. Podemos diferenciar dos tipos los difusores MLS y los QRD.

- **Difusores MLS**

Los difusores MLS (Maximum Length Sequence) se basan en secuencias pseudoaleatorias periódicas, denominadas de longitud máxima, y que tienen valores de -1 o $+1$. Se construyen a partir de una superficie lisa y reflectante, la cual cuenta con ranuras según el valor de la secuencia pseudoaleatoria. El ancho W de cada tramo tiene un tamaño $\lambda/2$, y la profundidad de este es de $\lambda/4$, siendo λ la longitud de onda de la frecuencia de diseño del difusor.

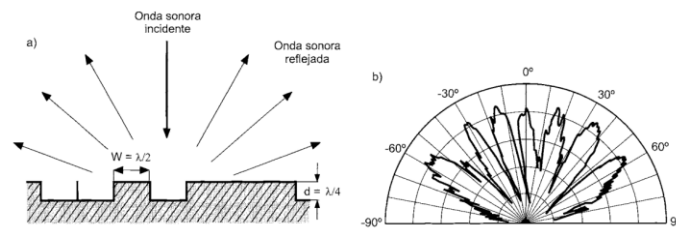


Figura 4. a) Difusor MLS. b) Diagrama de difusión en la frecuencia de diseño [7].

En la práctica este tipo de difusores no son usados habitualmente, siendo el principal motivo el estrecho ancho de banda de funcionamiento.

- **Difusores QRD**

Los difusores QRD (Quadratic-Residue Diffusor) parten, al igual que los MLS, de una secuencia pseudoaleatoria periódica. En este caso, de esta secuencia dependerá la profundidad de las ranuras. Podemos diferenciarlos en dos tipos:

Los difusores QRD unidimensionales en consisten en una serie de ranuras rectangulares paralelas, de igual anchura, y de distinta profundidad, divididas por separadores rígidos. La profundidad de las ranuras viene dada por una secuencia obtenida a partir de la expresión que se muestra en la Ecuación 7. Expresión para la obtención de la secuencia de un difusor QRD unidimensional., donde p es un número primo, n es un valor que va desde 0 a $p-1$, y mod es la operación matemática módulo, es decir el valor de s_n será el resto del cociente entre n^2 y p .

$$s_n = n^2 \text{ mod } p$$

Ecuación 7. Expresión para la obtención de la secuencia de un difusor QRD unidimensional.

La frecuencia mínima de trabajo de estos difusores dependerá de la profundidad máxima de la ranura, y la frecuencia máxima del ancho de la ranura. El separador que delimita dichas ranuras debe ser lo más fino posible para no intervenir en el funcionamiento del reflector.

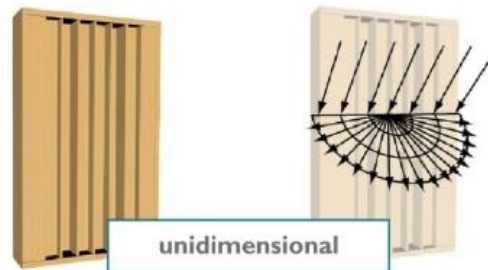


Figura 5. Difusor QRD unidimensional [9].

Los difusores QRD bidimensionales surgen de la necesidad de conseguir una difusión en todas las dimensiones. Esto se consigue formando una cuadrícula donde cada hueco tiene una profundidad diferente y viene dada por la Ecuación 8, donde p es un número primo y n y m son un valores que va desde 0 a $p-1$.

$$s_n = n^2 \text{ mod } p$$

Ecuación 8. Expresión para el cálculo de difusores QRD bidimensionales.



Figura 6. Difusor QRD bidimensional [9].

2.1.7 CRITERIOS DE DISEÑO

Muchos de los parámetros usados en acústica arquitectónica tienen una gran importancia a la hora de diseñar recintos como salas de conciertos, teatros o auditorio, pero no son tan prácticos a la hora de evaluar recintos de menores dimensiones, por debajo de los 100 m³ [10], como es el caso de la sala de control del estudio de grabación que se propone en este trabajo.

Esto es debido a que algunos parámetros comunes, como la claridad musical o el lateral energy fraction, no tienen en cuenta la información existente en los primeros 20 milisegundos tras la llegada del sonido directo. Es en esta parte el ecograma donde existe información importante sobre la acústica de las salas de control, ya que uno de los objetivos fundamentales de estas salas es evitar alterar el sonido original reproducido por los altavoces, de forma que la espacialidad obtenida en el proceso de grabación no sea modificada en el trabajo posterior. En el caso de las salas de control, las reflexiones tempranas dentro de los primeros 20ms, no deben superar los 20dB de diferencia respecto al sonido directo [11].

Aun así, desde la década de los 70, muchos expertos en acústica, sonido y arquitectura han propuesto formatos y sistemas para el diseño de estudios de grabación con el objetivo de crear los mejores entornos posibles para la creación musical, y los procesos de mezcla o masterización. Es así como surgen los denominados criterios de diseño para estudios de grabación. A continuación se describen algunos de los tipos de diseño más relevantes:

- **Rettinger**

Michael Rettinger publicó durante la década de 1970 varios artículos y libros en los que escribió como consideraba que debía ser diseñado un estudio de grabación. La forma de la sala de control no debe ser rectangular, sino trapezoidal, y las paredes deben estar construidas de materiales reflectantes, evitando paralelismos. La pared trasera es muy absorbente, mientras que las laterales y la parte trasera del techo también deben incluir materiales absorbentes, aunque en menor medida.

- **Non-Environment**

Ideada por Tom Hidley, la sala non-Environment se caracteriza por contar con un diseño muy absorbente en toda la sala excepto en la pared frontal y el suelo, donde se usan materiales muy reflectantes. Esto permite recrear condiciones similares a campo libre. Además, los monitores se sitúan incrustados en la pared con el objetivo de evitar problemas de cancelación de fase en baja frecuencia. Se busca predominancia en el sonido directo.

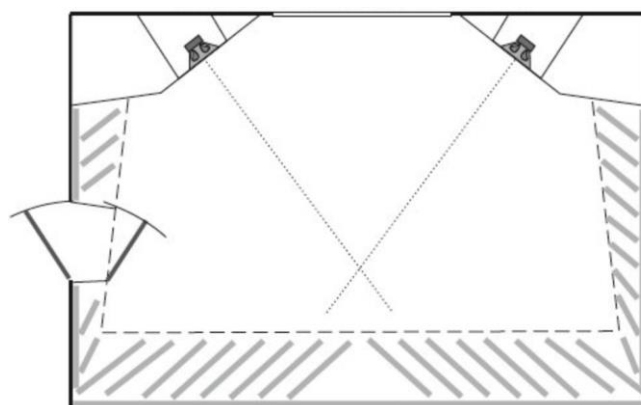


Figura 7. Diseño de una sala Non-Environment [4].

- **LEDE**

El criterio LEDE (Live End-Dead End), diseñado por Don Davis, fue uno de los primeros que buscaba la estandarización. Divide la sala en dos partes, una zona frontal muy absorbente, y una zona trasera formada por difusores. De esta manera se consigue evitar que las reflexiones tempranas lleguen con un nivel elevado que pueda producir efecto de filtro peine, y se aumenta el intervalo de tiempo entre el sonido directo y las primeras reflexiones, el ITDG.

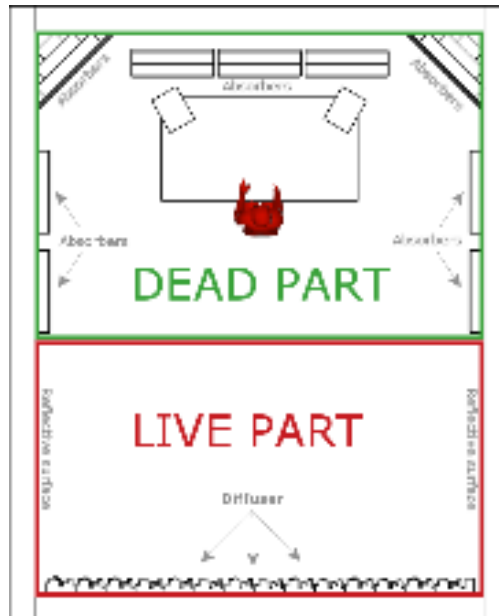


Figura 8. Diseño de una sala LEDE [12].

- **RFZ (Reflection Free Zone)**

Este diseño surge como una mejora del concepto LEDE, modificándose la geometría de la sala para desplazar las primeras reflexiones producidas por las paredes hacia la parte trasera de la sala, consiguiendo así una zona libre de reflexiones (Reflection Free Zone) en el punto de escucha.

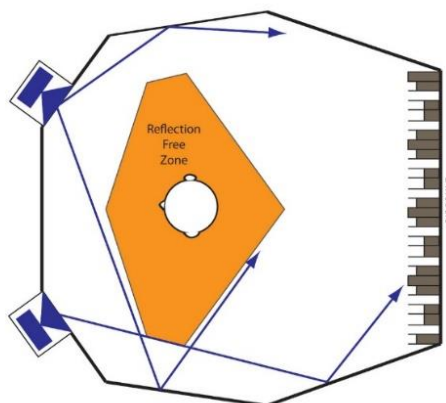


Figura 9. Diseño de una sala RFZ [13].

3 ADAPTACIÓN A ESTUDIO DE GRABACIÓN

3.1 DESCRIPCIÓN DE LAS SALAS

Las salas que se van a estudiar se encuentran situadas en el Palacio de Formación y Congresos de Fuerteventura. Este edificio, inaugurado en 2016, alberga en sus cinco plantas y más de 5.000 m² un auditorio y espacio para congresos, el Centro Bibliotecario Insular, una sede de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, y la Escuela Insular de Música del Cabildo de Fuerteventura, además de múltiples espacios para conferencias, exposiciones, certámenes, etc.



Figura 10. Fachada del Palacio de Formación y Congresos de Fuerteventura.

La planta 2 está reservada para la Escuela Insular de Música del Cabildo de Fuerteventura, lugar donde se imparten clases de música, además de contar con cabinas de ensayo para los alumnos. Entre estas salas, se encuentran las aulas 11 y 12, para las cuales se propone el proyecto descrito en esta memoria.

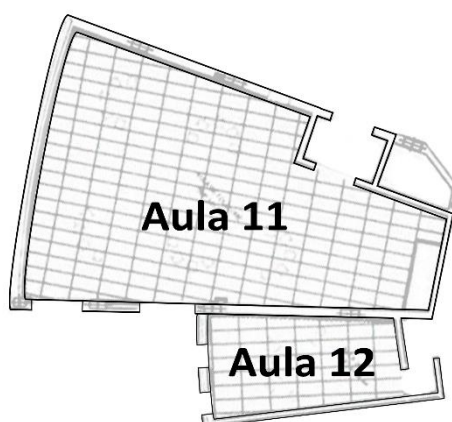


Figura 11. Plano de las salas.

3.1.1 AULA 11: SALA DE GRABACIÓN

Este aula de 141 metros cuadrados de superficie es usada para impartir clases de música. Cuenta con un total de 5 cortinas que permiten variar la acústica en función de los instrumentos que vayan a ser tocados. El suelo, de chapa de madera, cuenta con una pequeña cámara de aire. El techo, de contrachapado de madera, es inclinado y en forma de escalera, con un total de tres alturas. También cuenta con una cámara de aire, más amplia que la del suelo. Las paredes de la sala cuentan con la siguiente configuración de materiales: doble placa de pladur, lana de roca, placa de pladur, lana de roca y doble pladur. Esta configuración está pensada para aislar la sala en ambas direcciones. Con la misma finalidad, La sala se comunica con el pasillo principal de la planta mediante dos puertas. Cuenta con dos ventanas de doble cristal.



Figura 12. Sala de grabación.

3.1.2 AULA 12: SALA DE CONTROL

El aula 12 se usará como sala de control, y cuenta con unas medidas ideales para este uso: 31 metros cuadrados distribuidos en una sala casi rectangular, pero con las paredes más largas ligeramente inclinadas debido a la forma circular del edificio. De esta manera, las paredes laterales no son paralelas, lo que nos beneficiará a la hora de evitar determinados problemas de flutter echo, como se explica más adelante.

Los materiales del aula son los mismos que los de la sala de grabación, incluyendo el techo de tres alturas y la doble puerta para aislamiento acústico. También cuenta con dos ventanas, en este caso de menor tamaño.



Figura 13. Sala de control. Zona ancha.



Figura 14. Sala de control. Zona estrecha

3.2 MEDIDAS IN-SITU

Con la finalidad de caracterizar las salas en su estado actual, se realizaron medidas in situ de diferentes parámetros acústicos como el tiempo de reverberación. Estos datos nos permitirán más adelante contrastar los valores obtenidos en simulaciones con el software Catt-Acoustic™ y validar los modelos de las salas.

Estas mediciones, llevadas a cabo los días 14 y 15 de junio de 2021, fueron realizadas teniendo en cuenta la normativa UNE EN-ISO 3382-1: 2010. Se obtuvo la respuesta al impulso de cada sala haciendo uso del software ARTA, que genera un barrido sinusoidal emitido por una fuente y captado por un receptor. El software se encarga de recibir la información y procesarla para obtener los principales parámetros acústicos que se describen en la norma: Tiempo de reverberación, Early Decay Time, claridad de palabra y musical, definición, Ts y bass ratio.

3.2.1 EQUIPAMIENTO Y SOFTWARE

A continuación, se describe el material usado para las mediciones:

- Software de medición **ARTA**. Este software permite la medición de la respuesta al impulso, el análisis del espectro en tiempo real y las mediciones de la respuesta en frecuencia de un recinto.
- Micrófono **Behringer ECM8000**. Este receptor consiste en un micrófono de condensador electret para medición. Cuenta con una respuesta muy plana a lo largo de todo el espectro audible, lo que permite realizar mediciones más precisas.

- Altavoz **Yamaha MSR400**. Este altavoz usado como fuente cuenta con una potencia de 225W en el woofer y 75W en el tweeter, y un nivel máximo de presión sonora de 121 dB.
- Interfaz de audio **Behringer U-Phoria UMC202HD**. Esta tarjeta de audio cuenta con unos conversores A/D y D/A Midas y la alimentación phantom +48V que requiere el micrófono. Se conecta mediante USB al ordenador.

Este tipo de mediciones requieren una fuente omnidireccional. En este caso no se ha podido conseguir un altavoz de dichas características, por lo que se ha usado un monitor de PA que, aun no siendo omnidireccional, cuenta con alto SPL máximo, por lo que en gran medida permite rellenar el espacio de toda la sala con un nivel alto de SPL.

Además, el nivel emitido por la fuente debe ser según la normativa 45dB mayor que el ruido de fondo para poder hacer mediciones de TR30. Al no tener acceso a equipamiento calibrado, tampoco fue posible realizar medidas de ruido de fondo. En las dos salas, el nivel de aislamiento como hemos visto es muy alto, además de que no se estaba haciendo uso en el momento de las medidas de las salas colindantes. El aire acondicionado estaba apagado, por lo que las mediciones se consideraron aptas.

Aun así, se tiene en cuenta que no se está cumpliendo la normativa en su totalidad. Por tanto, las mediciones obtenidas no pretenden ser un estudio certificado de las características acústicas de las salas.

3.2.2 METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO

La realización de las medidas se llevó a cabo mediante el software ARTA, el cual nos permite obtener la respuesta al impulso de las salas. Este método, junto con el método de ruido interrumpido son los propuestos en la UNE EN-ISO 3382-1: 2010 para obtener los parámetros acústicos de una sala.

La respuesta impulsiva es la evolución temporal de la presión acústica medida en un punto del recinto resultado de la emisión de un impulso de Dirac en otro punto del recinto. Debido a que en la práctica no es posible emitir un impulso de Dirac, es posible hacer uso de señales cortas transitorias con características similares, u otras alternativas como un período de secuencia de máxima longitud MLS o un barrido sinusoidal (sweep).

Para realizar las mediciones en las dos salas se ha decidido hacer uso del barrido sinusoidal. Es necesario señalar la longitud de la secuencia y la frecuencia de muestreo de la señal. En nuestro caso, se ha configurado ARTA con una longitud FFT de 128k muestras, y una frecuencia de muestreo de 48kHz. El cociente de estos dos parámetros, el tiempo de excitación, debe resultar mayor que el tiempo de reverberación esperado. En nuestro caso, el tiempo de excitación es de aproximadamente 2.7 segundos, más que suficiente para realizar medidas en ambas salas.

La fuente se conectó al canal de salida L de la tarjeta de sonido a través de un cable jack TS. El receptor se conectó al canal de entrada 1 mediante un cable XLR que permite transportar audio balanceado. Se activó la alimentación phantom de +48V para poder alimentar el micrófono de condensador.

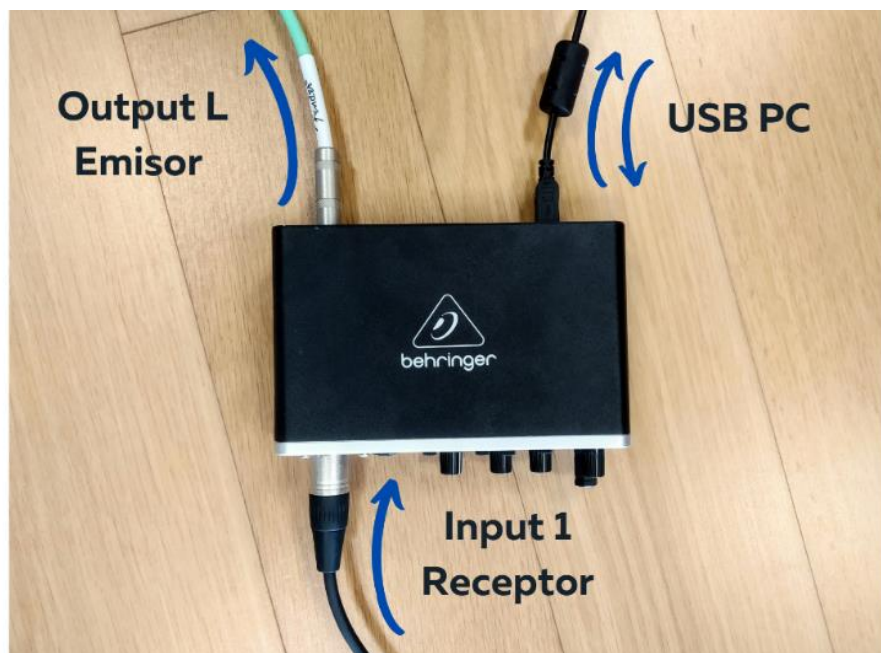


Figura 15. Conexión a la tarjeta de sonido.

Para la sala de grabación, se realizaron cuatro medidas con diferentes posiciones del receptor para cada una de las dos posiciones de la fuente. La fuente se situó a 1.5m del suelo y el receptor a 1.2m.



Figura 16. Altavoz Yamaha MSR400 como fuente.



Figura 17. Micrófono Behringer ECM8000 como receptor.

Se llevó a cabo el mismo procedimiento para hacer las mediciones de la sala de control. En este caso, al ser una sala de menores dimensiones, se realizaron 3 medidas para cada una de las dos posiciones de fuente.

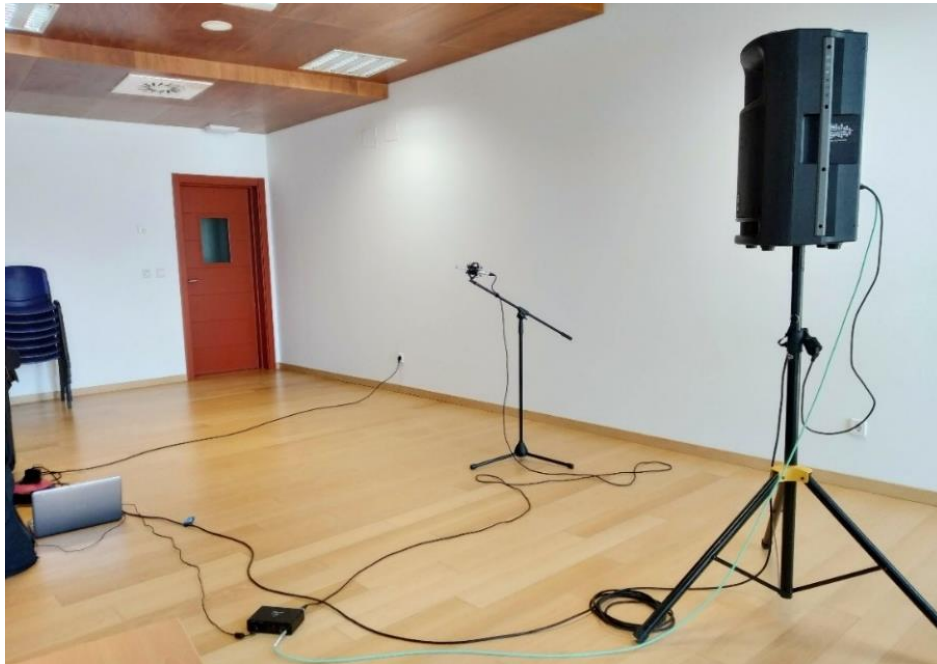


Figura 18. Sala de control durante las mediciones.

3.2.3 RESULTADOS

Una vez realizada cada una de las medidas, podemos acceder a los parámetros acústicos a través del menú *Analysis*. En la Tabla 1 se muestran los valores de cada parámetro de la sala de grabación por octavas.

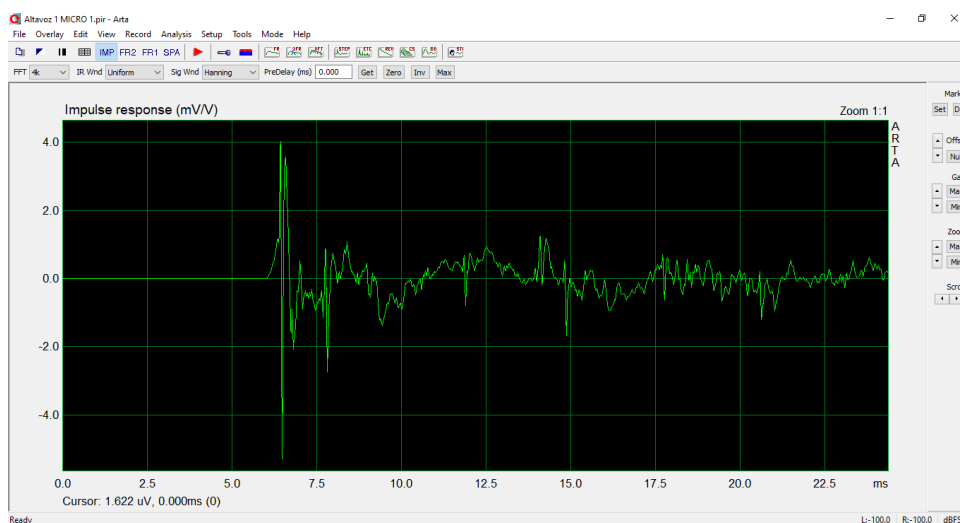
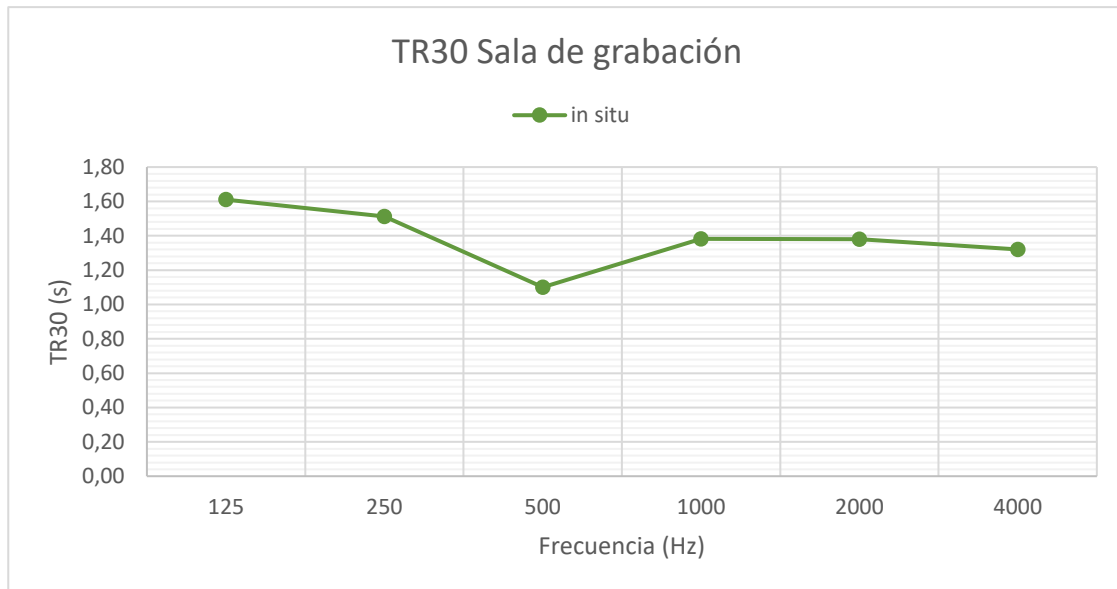


Figura 19. Respuesta al impulso del receptor 1, fuente 1.

F (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T30 (s)	1,6	1,5	1,1	1,4	1,4	1,3
C80 (dB)	-0,2	0,9	4,4	3,3	3	3,2
C50 (dB)	-2,7	-1,6	1,5	0,6	0,7	0,2

Tabla 1. Parámetros de la sala de grabación, obtenidos con ARTA.



Gráfica 3. Tiempo de reverberación de la sala de grabación obtenido con ARTA.

La claridad de palabra media en la sala de grabación vemos que es de 0.7 dB, es decir, no predomina notoriamente el sonido directo respecto a la reverberación. Se recomienda que este parámetro se sitúe por encima de los 2dB, por lo que la grabación de voces puede percibirse confusa y con poca nitidez.

$$C50_{med} = 0.15 \cdot C50(500Hz) + 0.25 \cdot C50(1kHz) + 0.35 \cdot C50(2kHz) + 0.25 \cdot C50(4kHz)$$

$$C50_{med} \approx 0.7 \text{ dB}$$

Ecuación 9. Cálculo de la claridad de palabra C50 para la sala de grabación.

La sala de grabación, debido no solo a la claridad de palabra obtenida, sino también al tiempo de reverberación, es difícil enfocarla a la grabación de voces, ya que estas habitualmente requieren de un tiempo de reverberación bajo que no es posible obtener dadas las dimensiones de la sala. Esta puede ser más apta para la grabación de instrumentos musicales.

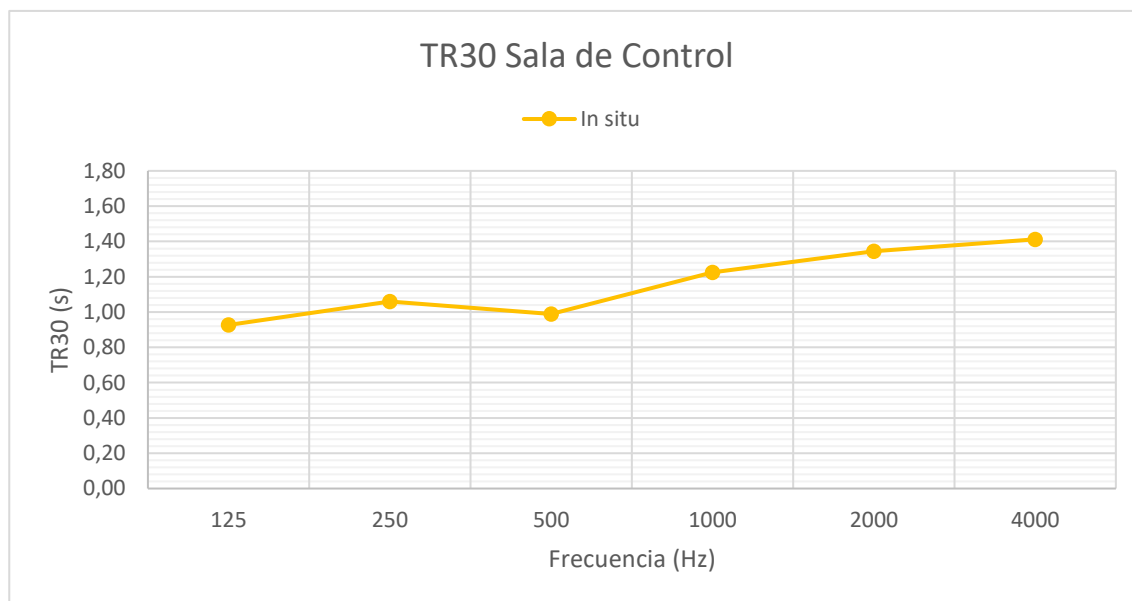
$$C80_{med} = \frac{C80(500Hz) + C80(1kHz) + C80(2kHz)}{3}$$

$$C80_{med} \approx 3.6 \text{ dB}$$

Ecuación 10. Cálculo de la claridad musical C80 para la sala de grabación.

Como vemos, la claridad musical es de 3.6 dB. Leo Beranek recomienda un valor comprendido entre -0.4 y 0dB para salas de conciertos, que cuentan normalmente con un tiempo de reverberación mayor que esta sala. Debido a que el C80 está correlacionado con el tiempo de reverberación, siendo menor cuando este último aumenta, es normal que la claridad musical sea algo mayor en esta sala.

Para mejorar la capacidad de la sala a la hora de ser usada para grabación de voces, se propondrán elementos de acústica variable como paneles móviles que permitan dividir la sala creando espacios reducidos, reduciendo el tiempo de reverberación y aumentando la claridad de palabra.



Gráfica 4. Tiempo de reverberación de la sala de control obtenido con ARTA.

El tiempo de reverberación medio de la sala de control es de 1.1 segundos. Este valor dista claramente de los valores recomendados en la EBU Tech. 3276, que van desde los 0.2 a los 0.4 segundos para este tipo de salas, tal y como se detallará más adelante. Los valores más elevados en alta frecuencia, de en torno a 1.4 segundos, podrán ser corregidos fácilmente gracias a la alta absorción en este rango de materiales porosos, como paneles absorbentes que se pretenden instalar.

También cabe destacar que el tiempo de reverberación de la sala de control es algo menor que el de la sala de grabación, debido principalmente a la diferencia de volumen entre las salas. Aun así, las diferencias no son tan pronunciadas como cabría esperar. Esto puede ser debido a que las cortinas con las que cuenta la sala de grabación no pudieron ser retiradas para realizar las mediciones. Además, el techo de esta cuenta con una gran cantidad de perforaciones para la iluminación y aire acondicionado, elementos que podrían actuar como resonadores, absorbiendo parte de la energía de la fuente.

Además, el tiempo de reverberación en ambas salas es bastante bajo en baja frecuencia comparado con la alta frecuencia, cuando es habitual encontrarse la situación opuesta. Las cámaras de aire situadas tanto en el suelo como en el techo, con una gran absorción en baja frecuencia, y los bajos coeficientes de absorción de las paredes y las ventanas en alta frecuencia son los principales motivos de esta situación.

El valle encontrado en 500Hz en la sala de grabación se debe presumiblemente a la alta absorción de las cortinas en esta frecuencia, tal y como se puede observar en la Tabla 2.

3.3 SIMULACIÓN EN CATT-ACOUSTIC™

3.3.1 CATT-ACOUSTIC™

Catt-Acoustic™ es un software de predicción acústica desarrollado por CATT (Computer Aided Theater Technique) usado para realizar simulaciones de espacios acústicos. Cuenta con el software CATT TUCT (The Universal Cone Tracer) integrado, el cual permite obtener ecogramas y respuestas al impulso de la sala a medir. Este paquete de software hace uso de la acústica geométrica y el trazado de rayos para obtener distintos parámetros usados en la acústica arquitectónica.

Las últimas versiones disponibles y con las que se trabajará son Catt-Acoustic™ v9.1 y TUCT v2.0.

A la hora de crear un nuevo proyecto, se crean 5 archivos:

- **master.geo:** es el archivo master del proyecto. Aquí se definen los materiales que van a ser usados, con sus respectivos coeficientes de absorción y, opcionalmente, de dispersión; y se define la geometría de la sala mediante planos.
- **rec.loc:** Almacena las coordenadas y propiedades de los receptores.
- **src.loc:** Almacena las coordenadas y propiedades de las fuentes.
- **geo.md9:** En este archivo se guarda la configuración general del proyecto.
- **project.txt:** Este archivo de texto es opcional y permite tomar notas del proyecto.

A pesar de que la geometría de las salas que se van a simular en este software no es excesivamente compleja, sí que incluye paredes con ángulos no rectos, y distintas alturas de techo. Por ello se ha decidido realizar los modelos en el software de diseño asistido por ordenador AutoCAD. De esta forma será mucho más sencillo modelar las salas y hacer ajustes en la geometría en el proceso de adaptación a estudio de grabación.

3.3.2 MODELADO DE LAS SALAS EN AUTOCAD

Los modelos 3D en AutoCAD se han realizado mediante líneas simples, trabajando con capas para diferenciar los distintos materiales. Una vez creada todas las líneas que forman cada sala, se hizo uso de la herramienta 3DCARA para definir los planos de las salas.

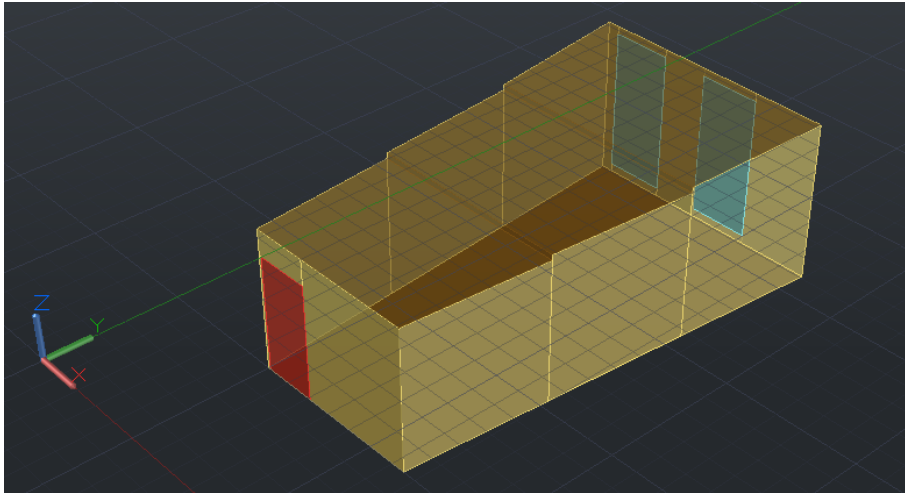


Figura 20. Modelo 3D en AutoCAD de la sala de control.

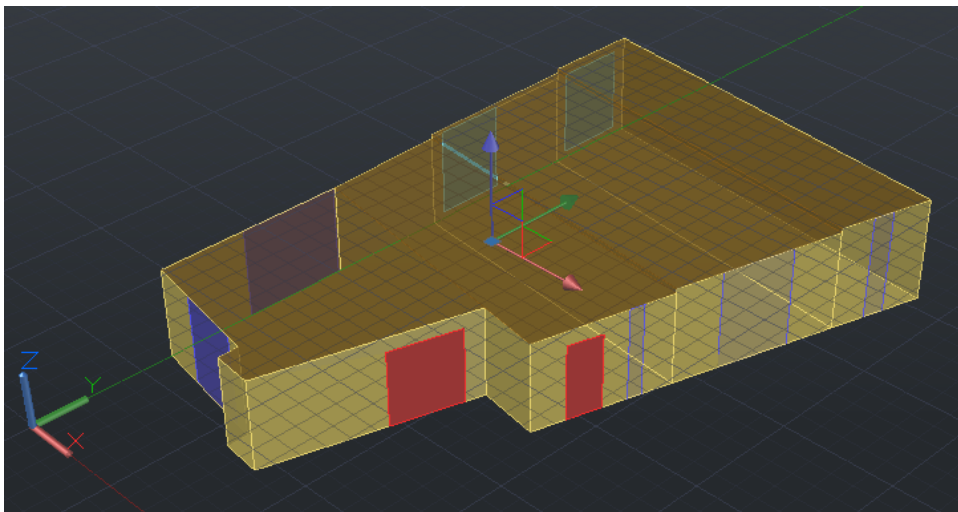


Figura 21. Modelo 3D en AutoCAD de la sala de grabación.

Tras finalizar los modelos, es necesario exportarlos en formato DXF, para que puedan ser importados con el software Catt-Acoustic™ a través de la herramienta *Dxf2Geo*, la cual transforma los planos creados en AutoCAD a un archivo *.geo*, con sus respectivas coordenadas. Después de haber obtenido estos archivos, uno para la sala de control y otro para la sala de grabación, se reestructuraron para agrupar los planos conformados por mismos materiales, corregir la orientación de algunos planos, y añadir los coeficientes de absorción de estos.

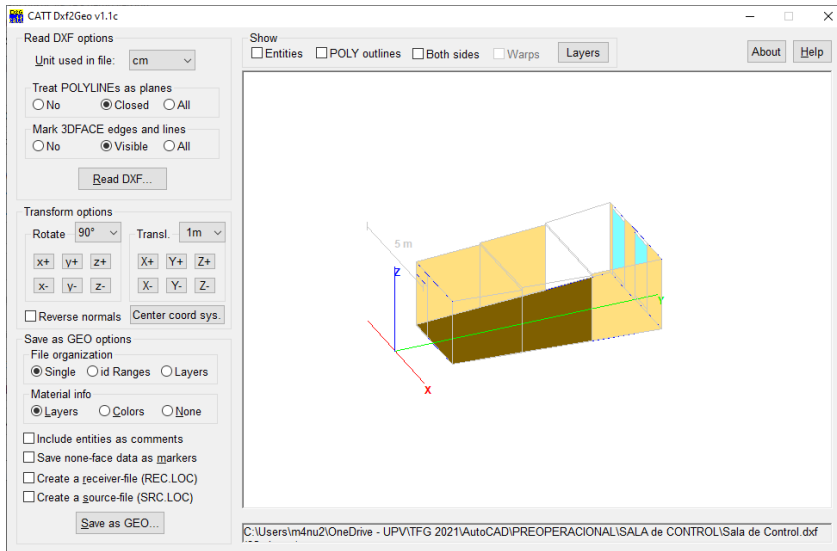


Figura 22. Menú DXF2GEO de Catt-Acoustic™.

Una vez tenemos los modelos en Catt, se han creado los archivos *rec.loc* y *src.loc* para cada una de las salas, donde se define la posición y características de las fuentes y receptores. En las Figuras Figura 23 y Figura 24 se muestra la posición de una de las fuentes y sus respectivos receptores para cada una de las salas. La posición de estos es la misma que se usó en las medidas in situ, con una altura de 1.5 metros para las fuentes y 1.2 para los receptores.

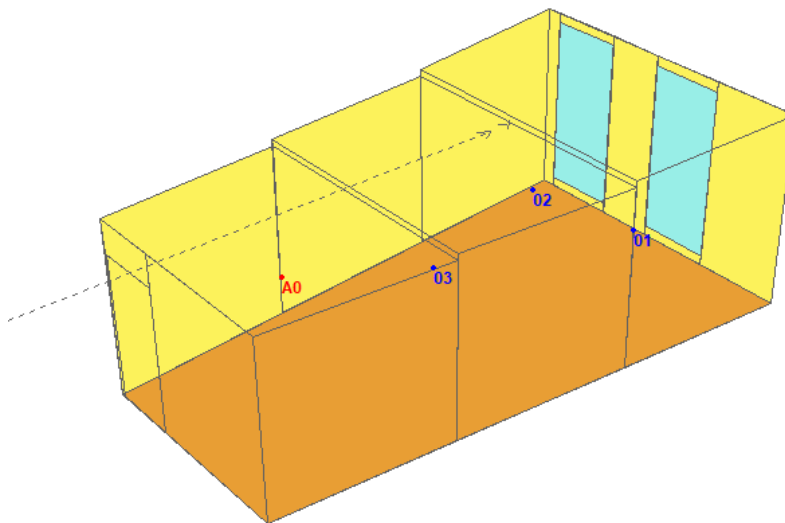


Figura 23. Sala de control en Catt-Acoustic™

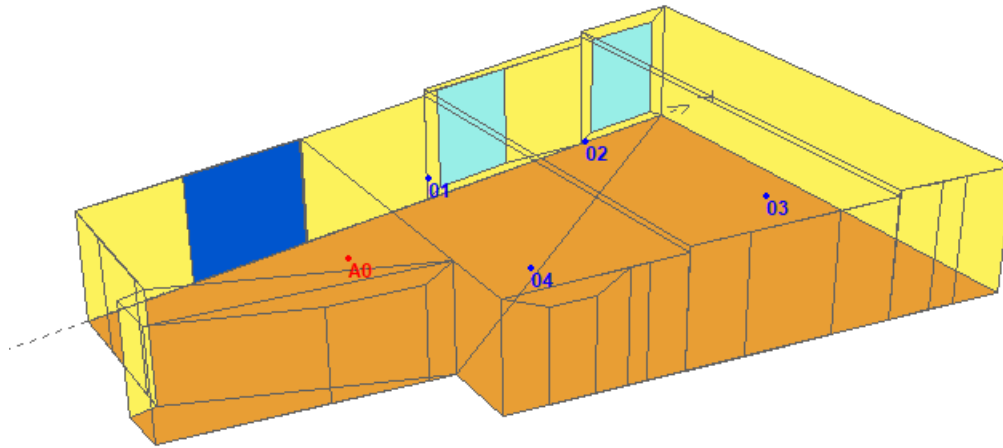


Figura 24. Sala de grabación en Catt-Acoustic™

3.3.3 COEFICIENTES DE ABSORCIÓN

Los coeficientes de absorción usados para modelar las salas se han obtenido partiendo de distintas tablas de referencia [14] [15]. Después de varias simulaciones e intentos por acercarnos a los resultados de los tiempos de reverberación de ambas salas obtenidos mediante medidas in situ, en la Tabla 2 se muestran los coeficientes de absorción definitivos por frecuencia. En todo momento se partió de las referencias citadas, y tan solo se hicieron pequeños ajustes en las cifras con el fin de tener un modelo válido ajustado a los valores obtenidos en las medidas in situ.

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Puerta	0.15	0.10	0.06	0.08	0.10	0.05
Ventana	0.25	0.10	0.07	0.06	0.04	0.02
Pared	0.25	0.13	0.16	0.13	0.10	0.07
Techo	0.42/0.35 ¹	0.30	0.20	0.17	0.15	0.08
Suelo	0.18	0.20	0.10	0.10	0.09	0.08
Cortina	0.22	0.35	0.65	0.45	0.50	0.55

Tabla 2. Coeficientes de absorción de los materiales de ambas salas para el estado preoperacional.

¹ Los coeficientes de absorción del techo varían entre las dos salas en la octava de 125Hz. Esto es debido a que, a pesar de estar hechos del mismo material, la cámara de aire existente en la sala de control es algo mayor, absorbiendo más energía sonora en bajas frecuencias que en el caso de la sala de grabación.

3.3.4 SIMULACIONES CON HERRAMIENTA TUCT

A través del módulo TUCT, es posible obtener la respuesta al impulso y el ecograma de las salas. Con esta información, el software nos permite conocer multitud de parámetros como el tiempo de reverberación, el EDT, o la claridad, entre otros.

Para obtener esta información, hay que ajustar previamente dos parámetros. El primero es el número de rayos, que indica la cantidad de rayos que se van a usar en la simulación. Este valor debe ser suficientemente alto como para que la densidad de rayos abarque toda la sala, y, en general, debe ser más grande cuanto mayor sea el volumen de esta. El segundo parámetro es la duración del ecograma/respuesta al impulso. Este valor debe ser como mínimo el tiempo de reverberación máximo esperado, en caso contrario es posible que el software no sea capaz de obtener resultados para algunas frecuencias.

En nuestro caso se ha optado por dejar los valores sugeridos por el programa: unos 8 millones de rayos y una duración del ecograma/respuesta al impulso de 1500ms para ambas salas, se ha comprobado tras hacer varias simulaciones que las diferencias entre resultados son mínimas.

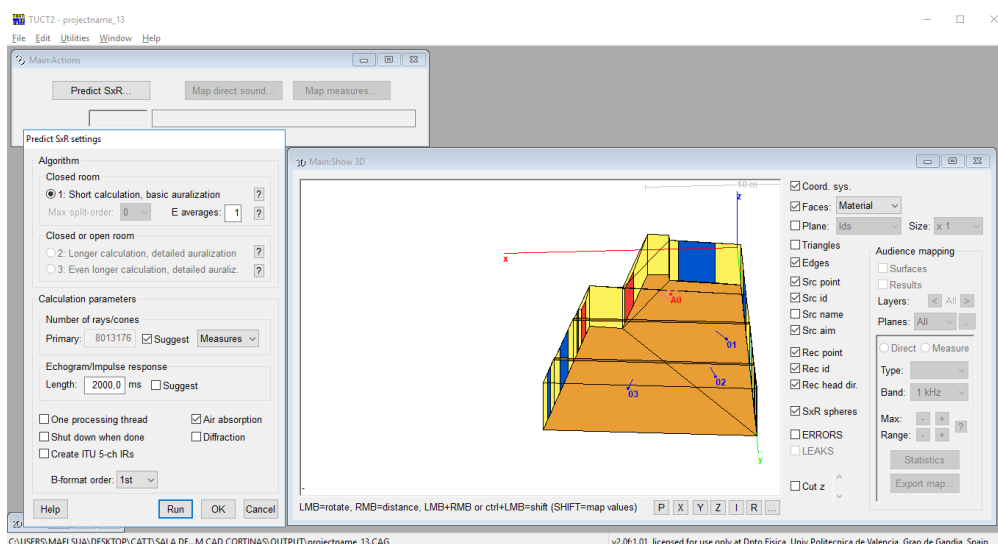
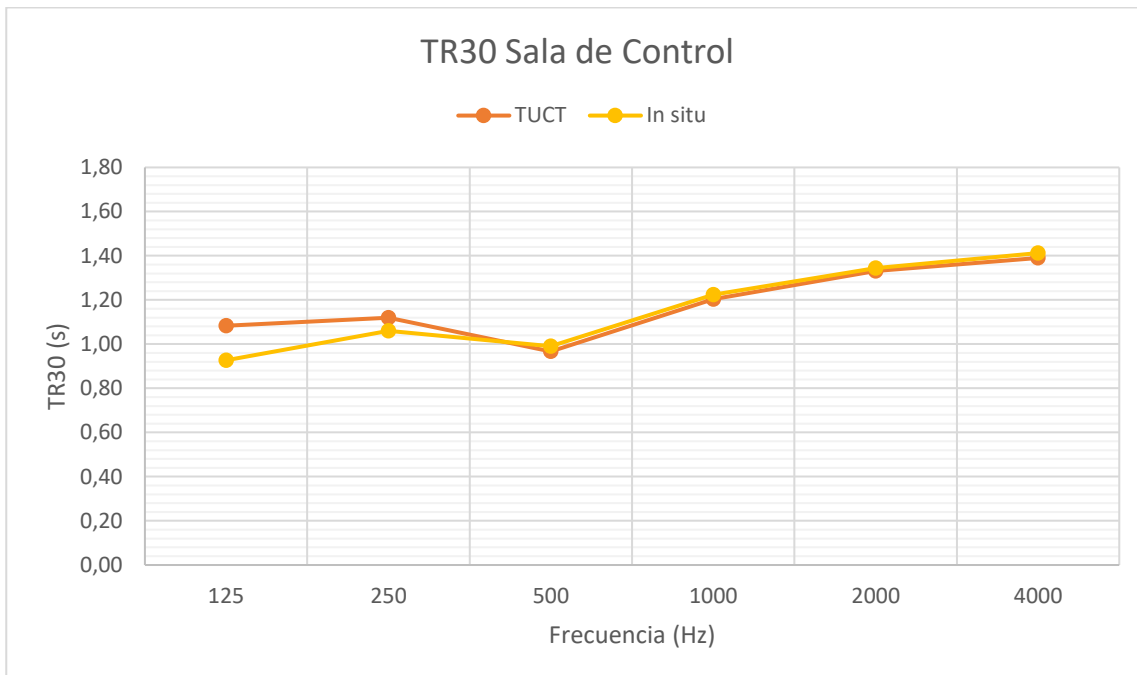


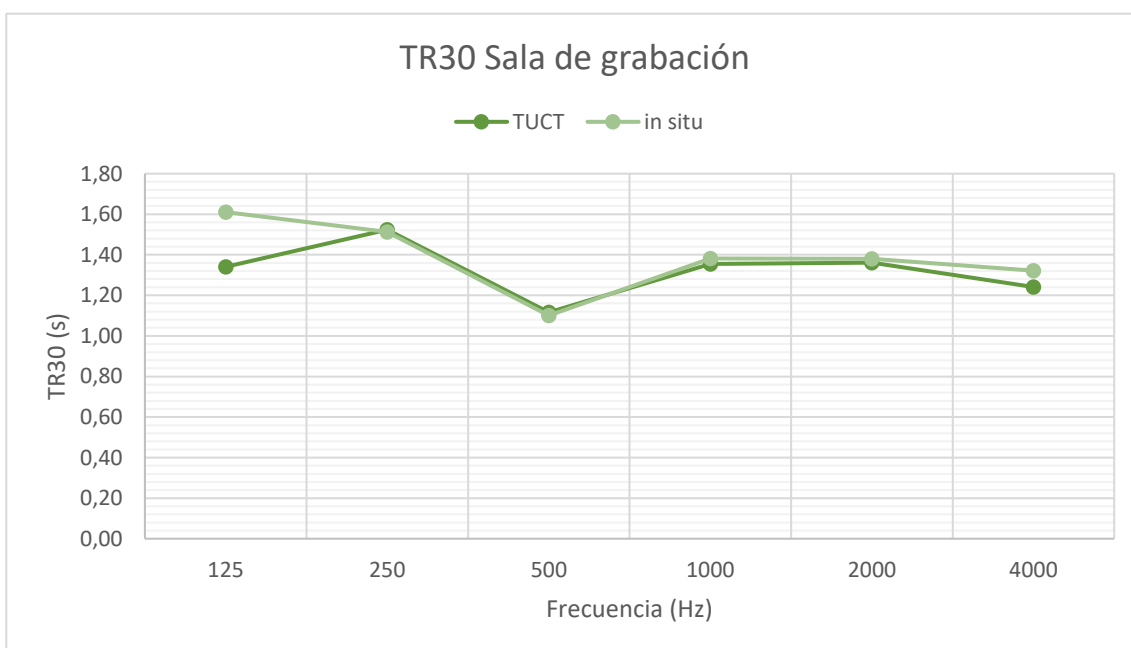
Figura 25. Captura del módulo TUCT, sala de grabación.

3.3.5 RESULTADOS OBTENIDOS

Tras realizar la simulación, se obtuvieron los tiempos de reverberación que se indican en las Gráfica 5 y Gráfica 6, donde se comparan con los resultados obtenidos en las medidas in situ en las dos salas.



Gráfica 5. Comparativa del tiempo de reverberación de la sala de control entre los resultados in situ y TUCT.



Gráfica 6. Comparativa del tiempo de reverberación de la sala de grabación entre los resultados in situ y TUCT.

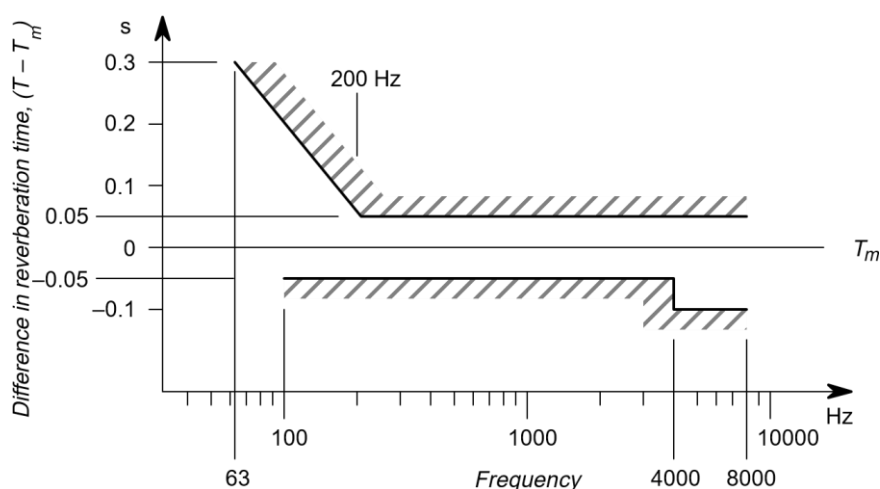
A pesar de que TUCT da valores de parámetros en las bandas de 125Hz hasta 16kHz, los valores de 8 y 16 kHz son extrapolaciones de los valores resultantes en las banda de 2 y 4kHz. En nuestro caso, solo trabajaremos con valores en el rango de 125Hz a 4 kHz, ya que en el archivo *master.geo* sólo hemos indicado los coeficientes de absorción en estas octavas.

En general los resultados obtenidos para las dos salas son muy similares a los resultados de las medidas in situ, difiriendo ligeramente en la banda de 125Hz, que depende en gran medida de las características de las cámaras de aire del techo de ambas salas, que son desconocidas. Por tanto se pueden dar por válidos los modelos realizados en Catt-Acoustic™.

Frecuencia (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
Sala de control	TUCT	1,1	1,1	1,0	1,2	1,3	1,4
	in situ	0,9	1,1	1,0	1,2	1,3	1,4
Sala de grabación	TUCT	1,3	1,5	1,1	1,4	1,4	1,2
	in situ	1,6	1,5	1,1	1,4	1,4	1,3

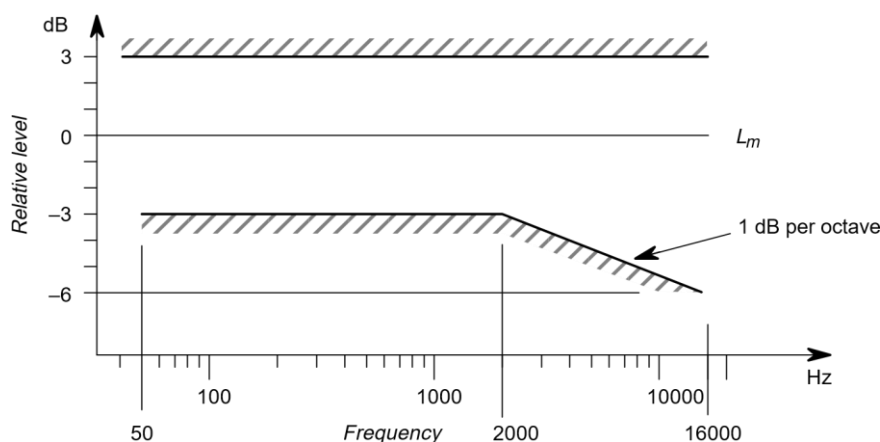
Tabla 3. Comparativa del tiempo de reverberación, en segundos, en medidas in situ y con TUCT para las dos salas.

Con todo esto, el primer objetivo propuesto es bajar el TR de la sala de control a valores entre 0.2 y 0.4 segundos, tal y como recomienda la EBU [16]. Además, la norma indica la tolerancia máxima por frecuencia, tal y como se muestra en la Gráfica 7.



Gráfica 7. Diferencia en el tiempo de reverberación recomendada por la EBU [16].

Por otra parte, la EBU también recomienda una tolerancia máxima de la respuesta en frecuencia del nivel de presión sonora, la cual se espera cumplir en la sala de control.



Gráfica 8. Tolerancia máxima del nivel de presión sonora por frecuencias recomendada por la EBU [16].

En cuanto a la sala de grabación, el objetivo es plantear alternativas que permitan adaptar la sala en función de las necesidades de cada sesión de grabación, como son los elementos de acústica variable.

3.4 PROPUESTA DE ADAPTACIÓN A ESTUDIO DE GRABACIÓN

Una vez validados los modelos de ambas salas en Catt-Acoustic™, podemos realizar la adaptación de estas para mejorar las condiciones y convertirlas en salas funcionales.

3.4.1 SALA DE GRABACIÓN

En una sala de grabación, los requerimientos son por norma general más subjetivos, y dependen en gran medida del número de instrumentos o voces a grabar, el tipo de instrumento, la percepción de los músicos o el curso artístico que el productor musical decide llevar a cabo.

Con todo esto, no se buscan unos parámetros específicos, sino la posibilidad de adaptar la sala a las necesidades de los músicos o directores musicales. Por ello se ha decidido no modificar las condiciones generales de la sala, sino proponer una serie de sistemas que permitan modificar la acústica de la sala de forma sencilla entre distintas sesiones de grabación, adecuándola a las necesidades de la sesión. Se proponen elementos variables como cortinas y paredes móviles para dividir la sala y aislar algunas regiones.

3.4.1.1 ELEMENTOS DE ACÚSTICA VARIABLE

El primer sistema que se propone es un conjunto de cinco paneles móviles absorbentes. Estos paneles pueden ser usados para reducir el volumen aparente de la sala dividiéndola en dos partes, para crear pequeñas cabinas para la grabación de voces, o para ajustar el tiempo de reverberación en situaciones determinadas.

Los paneles propuestos están compuestos de lana de roca con un espesor de 10cm y unas medidas de 1x2 metros. Estos pueden ser instalados sobre un sistema de ruedas que permita desplazarlos con comodidad a lo largo de la sala. Con estos paneles es posible dividir la sala tal y como se ve en la Figura 26, creando un espacio de aproximadamente 32m² con un tiempo de reverberación previsiblemente menor al de la sala completa.

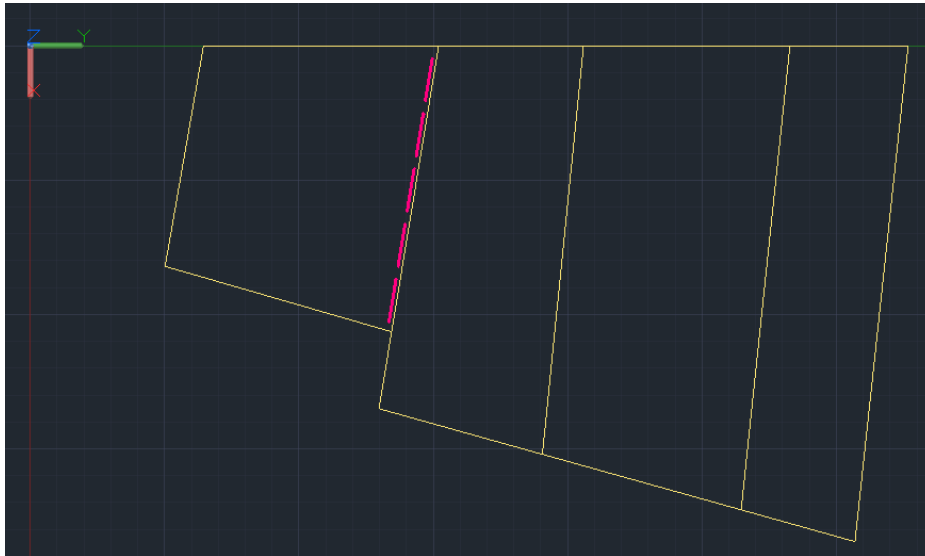


Figura 26. En rosa, una posible configuración de los cinco paneles móviles.



Figura 27. Ejemplo de uso de paneles móviles para modificar la acústica en los Galaxy Studios, Bélgica.

El segundo sistema propuesto ya se encuentra en la sala actualmente, se trata de cortinas de alta absorción. Estas cortinas son de terciopelo real y tiene una masa superficial de $540\text{gr}/\text{m}^2$. Están situadas de forma que siempre cubren una de las paredes que se encuentran cara a cara, reduciendo la aparición de posibles ecos flotantes y retardos que se perciban separados del sonido directo.

El coeficiente de absorción de estas cortinas destaca por ser bastante elevado en la banda de 500Hz . Esto, como se ve en la Gráfica 3, aparentemente causa un valle pronunciado en el tiempo de reverberación en esta banda. Con el fin de evitar esta coloración en la cola reverberante, se propone cambiar las cortinas por unas nuevas que tengan unos coeficientes de absorción más uniformes a lo largo del espectro de frecuencias. Estas deben de mantener una densidad de en torno a los $500\text{gr}/\text{m}^2$, para que el efecto que tengan en la acústica de la sala sea notorio [7]. En cuanto a la absorción en baja frecuencia, esta será mayor cuanto más puedan separarse de la pared reflectante.

3.4.2 SALA DE CONTROL

La sala de control, como ya hemos visto, requiere de más atención dado su uso. Dado que los criterios de diseño mencionados deben ser usados como punto de partida, y que objetivamente no es posible asegurar que uno sea mejor que otro, se ha optado por no seguir ningún criterio de forma rigurosa. Aprovecharemos conceptos de distintos criterios, como la absorción y geometría de las salas RFZ, y los altavoces empotrados de las salas Non-Enviroment.

Nos encontramos ante una sala con forma de abanico. Esta geometría, en caso de situar los altavoces en la zona más ancha de la sala, produce un aumento de las primeras reflexiones laterales, siendo esto precisamente uno de los puntos que queremos evitar. La inclinación de las paredes laterales es de 5° respecto a al eje perpendicular de las paredes frontal y trasera, es decir, 10° entre las paredes laterales.

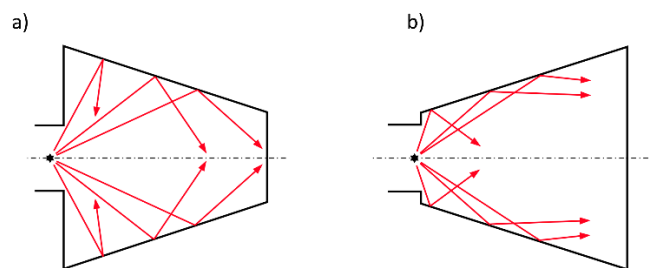


Figura 28. a) Las reflexiones se redirigen al eje central. b) Las reflexiones se dirigen a la pared trasera [7].

Dada esta situación, se ha decidido invertir la orientación original de la sala, quedando los altavoces y el punto de escucha en la zona más estrecha. Esta opción permite aprovechar la geometría de la sala, la cual pasa a dirigir las primeras reflexiones al fondo de la sala, pero implica tener la puerta de acceso detrás de los altavoces, los cuales se pretenden empotrar en la pared. Por ello se ha decidido cambiar la ubicación de la entrada a la sala, la cual pasará a estar en la sala de grabación.

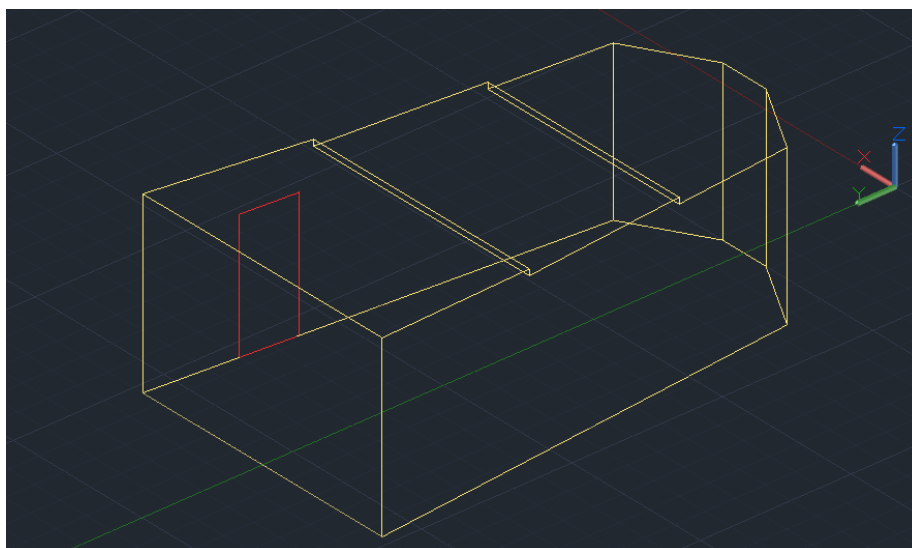


Figura 29. Nueva geometría de la sala de control.

Se ha decidido tapar las ventanas, debido a que están situadas justo en frente de donde se va a posicionar el punto de escucha, por lo que las reflexiones producidas por el cristal llegarían a esta zona rápidamente. Para ello se ha decidido situar una placa de pladur que cubre toda la pared donde se sitúan las ventanas. Esta nueva pared reducirá mínimamente el largo de la sala, y permitirá sustituir la superficie reflectiva de los cristales por otros materiales.

3.4.2.1 POSICIONAMIENTO DE LOS ALTAVOCES

La colocación del sistema de altavoces en la sala de control es un factor importante a tener en cuenta para una correcta propagación del sonido, ya sea en cuanto al balance de los dos canales o a la respuesta en frecuencia, y es necesario tener en cuenta varios aspectos que afectan directamente al funcionamiento de estos.

En primer lugar, debe existir simetría respecto al eje central de la sala que divide los dos altavoces, para evitar así diferencia de escucha entre los canales L y R. Esto se tendrá en cuenta a la hora de añadir nuevos elementos como paneles absorbentes o difusores. Además, el triángulo formado por los dos altavoces y el punto de escucha o sweet spot donde se situará el oyente debe de ser equilátero.

En segundo lugar, el montaje de los altavoces que se propone será de tipo flush-mounting, es decir, empotrados en pared. Se ha optado por este tipo de montaje debido a que la colocación de un altavoz separado de las paredes de una sala produce valles en baja frecuencia.

Este fenómeno se debe a que el altavoz radia sonido en todas las direcciones, especialmente en bajas frecuencias, donde las ondas son menos directivas. Estas ondas pueden reflejarse en las paredes, produciendo un nuevo frente de onda desfasado respecto al sonido directo, dando lugar a cancelaciones y a una onda resultante con una amplitud de entre +6dB y hasta -20dB respecto al caso ideal de espacio abierto. Por tanto, en función de la distancia del altavoz a la pared se cancelarán distintas frecuencias.

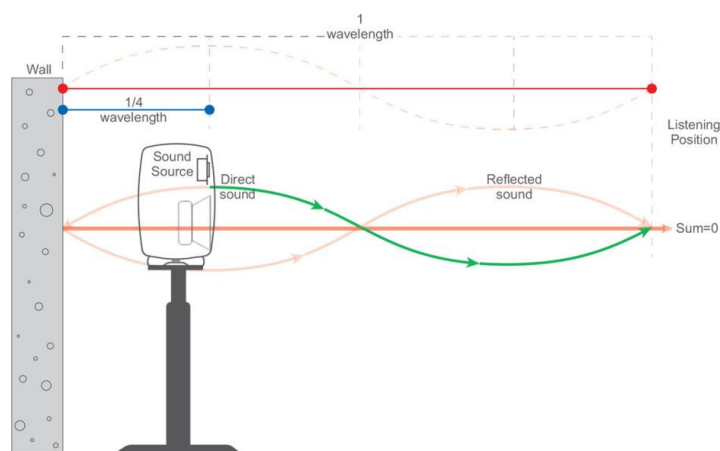


Figura 30. Las reflexiones en la pared trasera producen cancelaciones por fase no deseadas [17].

Para reducir cancelaciones en frecuencias audibles o moverlas a frecuencias más bajas, se recomienda alejar los altavoces lo máximo posible de la pared trasera. Aun así, habría que situarlos a 2.8 metros de la pared para que la mayor cancelación se produjese en los 30Hz.

Para poder llevar a cabo este montaje, se ha modificado la geometría añadiendo dos paredes de pladur en las esquinas, tal y como se muestra en la Figura 31. De esta forma los ángulos formados por los altavoces y el punto de escucha serán de 60° . La distancia entre los monitores y el punto de escucha según Don Davis debe de ser entre 2.5 y 3 metros. En nuestro caso esta distancia es de 2.9 metros.

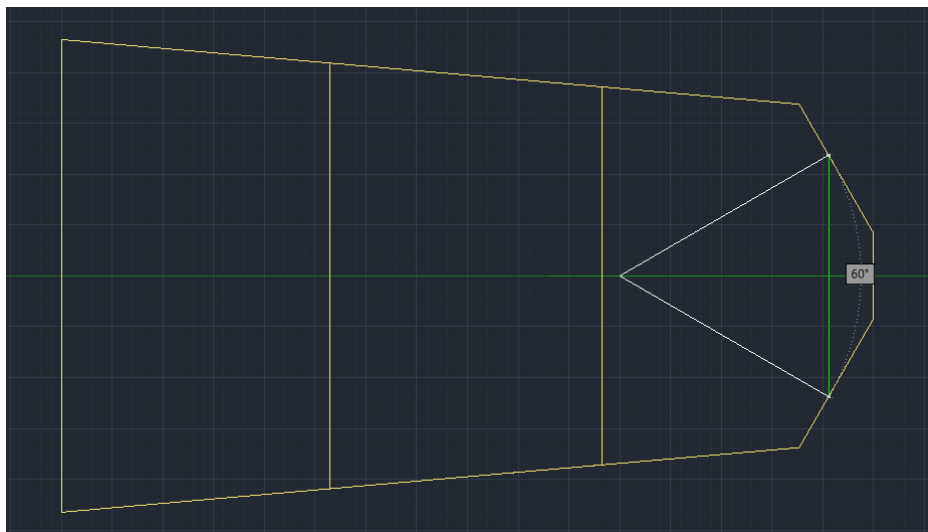


Figura 31. Planta de la sala de control. Posición del punto de escucha y los monitores.

Los altavoces a montar serán unos Genelec 1234A e irán situados a una altura de 1.2 metros medidos desde el centro acústico del altavoz, que según el fabricante se encuentra situado entre el centro del cono del tweeter y del cono de medios. A esta altura es a la que se entiende que se encontrarán los oídos del oyente.



Figura 32. Monitor de estudio Genelec 1234A.

A la hora de instalar los monitores, hay que tener en cuenta varias consideraciones. La superficie frontal debe de situarse al mismo nivel que la propia pared, ya que de otro modo tendríamos problemas de difracción en los bordes del monitor o problemas de fase, justo lo que queremos evitar.

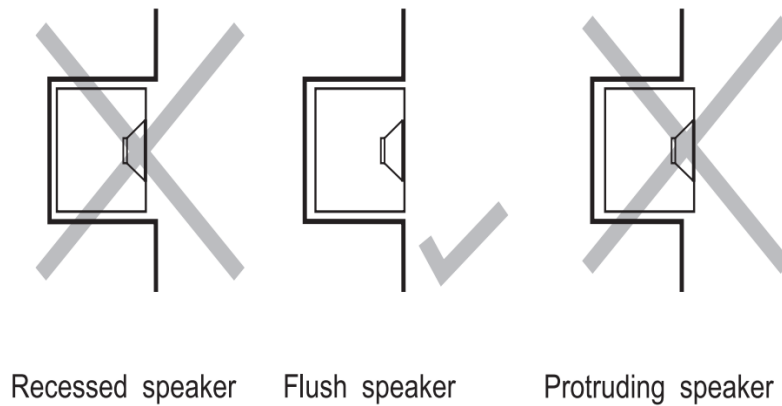


Figura 33. Montaje apropiado de monitores empotrados [18].

Con el objetivo de reducir todo lo posible filtraciones del sonido que los altavoces emiten por la parte trasera y laterales, se instalarán del siguiente modo: se realizará una cabina donde el monitor quedará encerrado excepto por la superficie frontal, situándose sobre almohadillas de goma para desacoplarlos mecánicamente de la única superficie de apoyo. Esta cabina necesitará del soporte estructural necesario para soportar el peso del monitor, y contará con el volumen suficiente para situar el monitor y material absorbente.

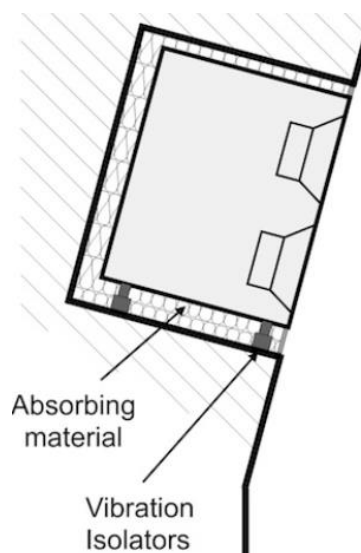


Figura 34. Uso de materiales absorbentes y gomas para reducir la transmisión de sonido [18].

La cavidad en la que se instalará el monitor estará forrada de lana de roca, para reducir la transmisión de sonido a la sala de control. Este material será de la máxima densidad y espesor posible para que tenga mayor efecto en bajas frecuencias. La unión entre el panel frontal del monitor y la pared deberá ser mínima, unos 2-3mm que eviten que entren en contacto.

Debido a la geometría de la sala, donde las paredes laterales no son paralelas, y habiéndose añadido estas dos nuevas paredes para los altavoces, el análisis de los modos propios de la sala no es posible mediante la fórmula de Rayleigh, ya que esta está pensada para el cálculo en salas paralelepípedas. Sería posible realizar un análisis modal a través de un software de simulación numérica, pero este aspecto se encuentra fuera de las líneas del trabajo de este proyecto.

3.4.2.2 MATERIALES Y NUEVOS ELEMENTOS

Con el objetivo de reducir el tiempo de reverberación hasta el objetivo marcado, es necesario introducir materiales absorbentes y difusores en la sala.

Se han dispuesto un total de 6 paneles absorbentes en las paredes para así controlar las primeras reflexiones no deseadas, provenientes de las paredes laterales, tal y como se observa en la Figura 36. Estos paneles de 1.2x1.5m y 60mm de espesor están centrados a la altura del oyente, 1.2 m, y están hechos de placas de lana de roca. La absorción de estos paneles es elevada a alta frecuencia. También se ha dispuesto un panel del mismo material en la pared que queda entre los dos altavoces.

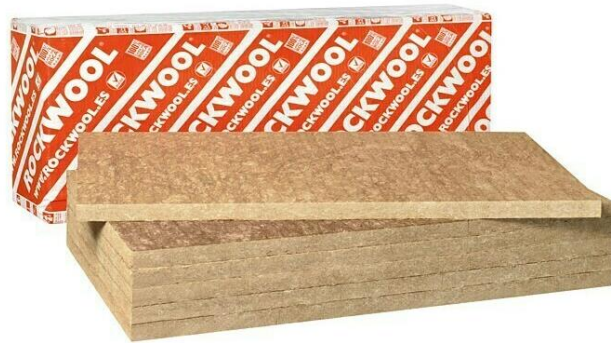


Figura 35. Placas de lana de roca que formarán los paneles absorbentes.

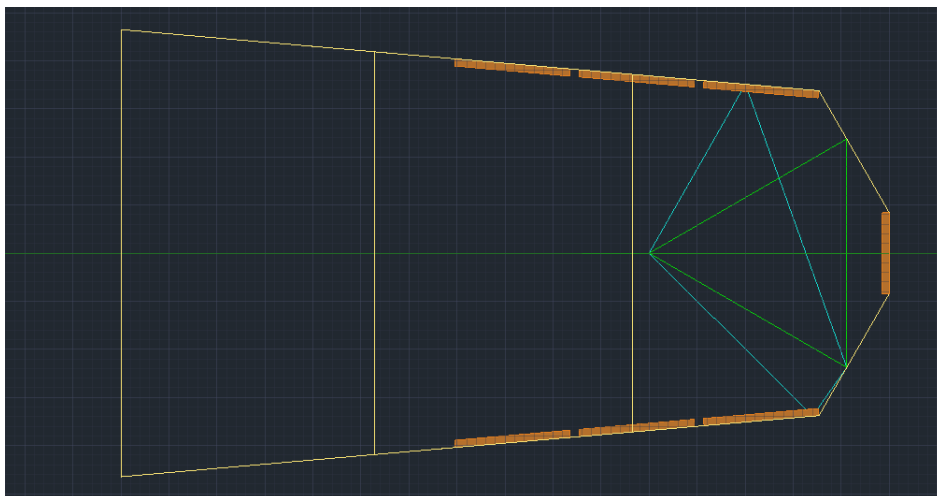


Figura 36. En azul, primera reflexión de las paredes laterales.

En esta simulación se van a posicionar dos fuentes en donde irán situados los altavoces, y un único receptor en el punto de escucha. Para las fuentes, se ha hecho uso del archivo CLF del modelo Genelec 1234A. Este formato de archivo, desarrollado por el CLF (Common Loudspeaker Format) Group, reúne información del altavoz, como su directividad, impedancia o sensibilidad, entre otros. En el caso de este modelo de monitor en particular, el fabricante no ha incluido el nivel de sensibilidad por frecuencia, y Catt-Acoustic™ no permite realizar simulaciones sin esta información en el archivo CLF.

Para poder hacer uso de este archivo con la información de directividad, hay que abrir el archivo CLF (*Genelec_1234A.CF2*) en el menú *Directivity*, y exportarlo como un array de un único elemento CTA. De esta forma Catt-Acoustic™ habrá incluido los datos de sensibilidad de forma estimada en el archivo *Genelec_1234A.CTA*, que puede ser usado como fuente.

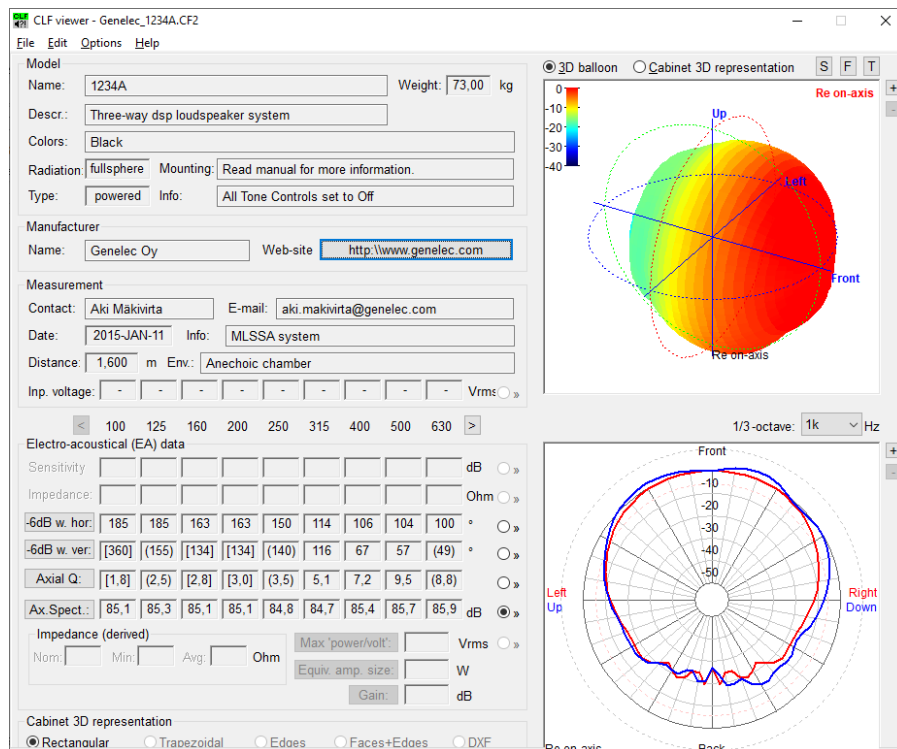
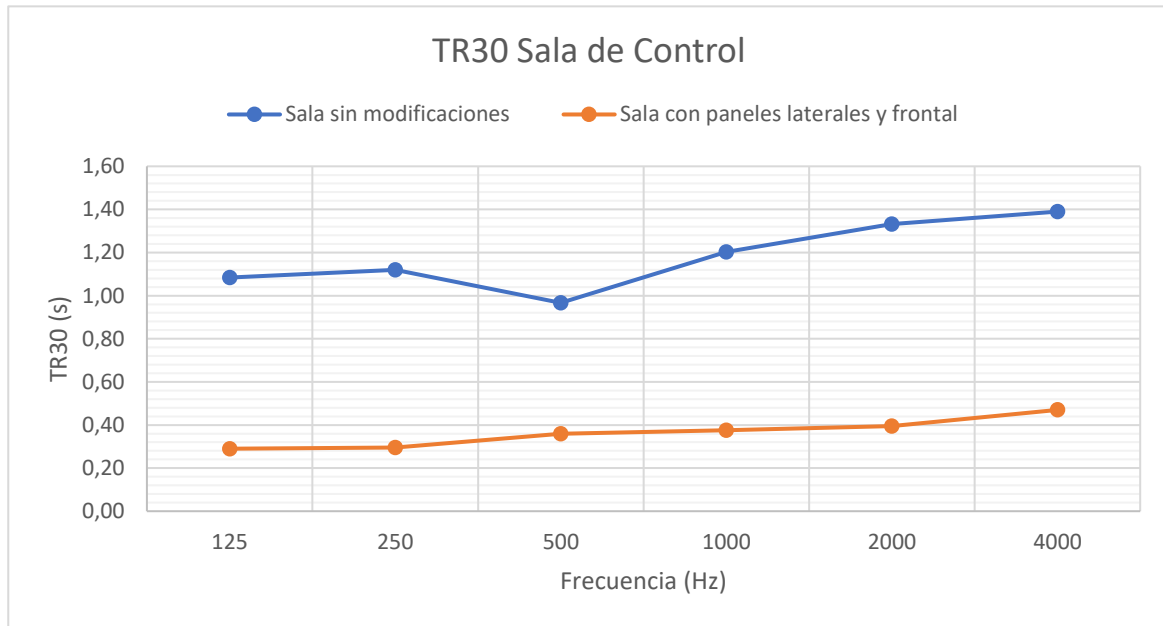


Figura 37. CLF Viewer, datos de Genelec 1234A.

Por último, hay que tener en cuenta que las fuentes no pueden estar situadas dentro de un plano, ya que pueden existir fugas y la simulación no sería válida. En estas situaciones, existen dos opciones [19]:

La primera opción consiste en modificar la directividad de la fuente y hacerla radiante sólo en la mitad frontal. Debido a que la información de la directividad se encuentra en el archivo CLF y este no es modificable, esta solución no es posible.

La segunda opción consiste en separar la fuente ligeramente del plano, y aplicar una superficie absorbente justo detrás. Esto mismo es lo que se ha hecho, separando la fuente un centímetro de la pared, y creando una superficie con absorción total en el área en el que se encontrará el monitor. De esta forma podremos simular con las fuentes en una posición prácticamente igual a la real, y la energía que radien los monitores hacia detrás (especialmente en baja frecuencia) será absorbida por estas nuevas superficies. De este modo se intenta imitar la situación dada al encastrar los monitores a la pared, donde la radiación no frontal es en gran medida absorbida por la cavidad donde estarán situados.



Gráfica 9. Tiempo de reverberación en la sala de control con paneles absorbentes.

En la Gráfica 9 se muestra el tiempo de reverberación de la sala tras haber añadido los paneles y la superficie de la mesa. Este ha disminuido considerablemente gracias a los absorbentes, pero sigue situándose por encima de los 0.4 segundos marcados en alta frecuencia, por lo que se ha decidido añadir nuevos elementos absorbentes en la sala.

En primer lugar, se ha decidido instalar en el techo y sobre el punto de escucha una nube absorbente. Esta nube consiste en un panel de 2x3m y 40mm de espesor de fibra de vidrio, la cual consigue una gran absorción tanto a alta como a baja frecuencia. Con este panel se busca evitar las primeras reflexiones provenientes del techo así como desplazar la energía no absorbida al fondo de la sala. Para ello se le ha dado una ligera inclinación de 10°. Además, la separación respecto al techo aporta un incremento en la absorción de baja frecuencia. Concretamente, al estar entre 20 y 40 cm de distancia del techo, se espera una mejora de la absorción a 200-400Hz.

También se ha decidido enmoquetar el suelo en la zona de escucha con dos capas de textil: una primera de alta densidad, 3kg/m², y una segunda alfombra de 1.4kg/m², nuevamente buscando reducir primeras reflexiones y bajar el TR en altas frecuencias. Los coeficientes de absorción se muestran en la Tabla 4.

Finalmente, se ha añadido difusor PRD (Primitive-Root Difussor) de tamaño de 1.2x1.5m, formado por paneles Vicoustic Multifuser DC2 de poliestireno expandido. Estos difusores son análogos a los QRD, salvo por que la secuencia generadora es diferente, dependiendo de la raíz primitiva del número primo p . Debido a esto, su formación no es simétrica.

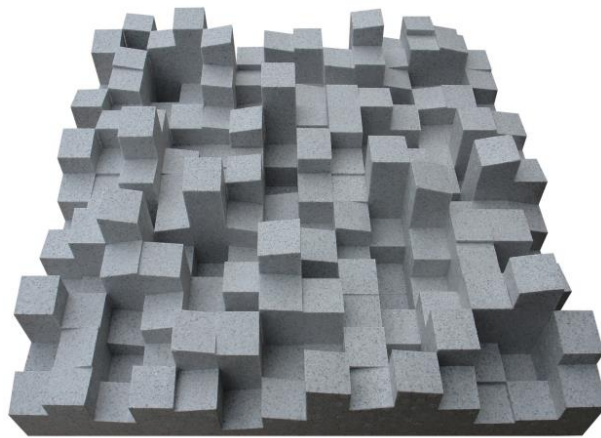
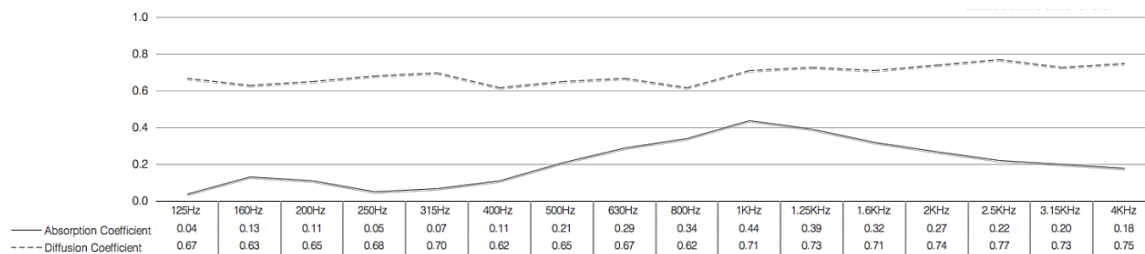


Figura 38. Muestra de un panel Vicoustic Multifuser DC2.

Este panel se situará en la pared trasera de la sala, donde es dirigida toda la energía que no ha sido absorbida por los paneles dispuestos en la zona frontal. Con esto se busca dispersar las ondas incidentes, y que la pequeña cola reverberante de la sala llegue al punto de escucha desde más direcciones, contribuyendo a aumentar el grado de impresión espacial existente y por tanto a evitar que la sala suene muy seca.

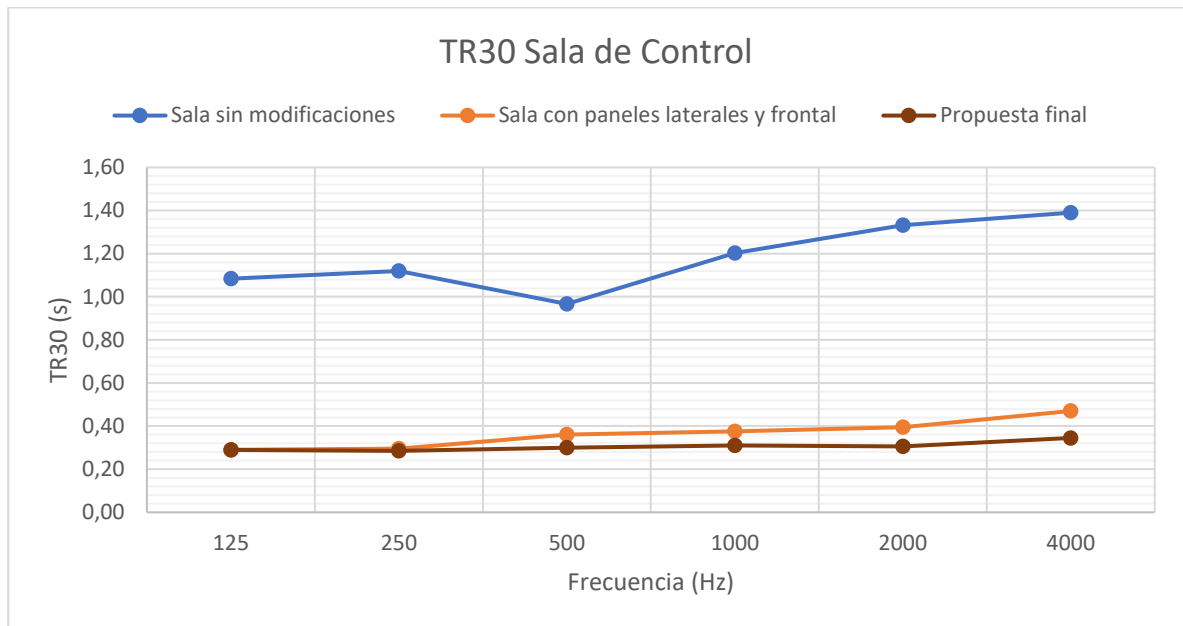


Gráfica 10. Coeficientes de absorción y difusión del panel Vicoustic Multifuser DC2.

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Paneles absorbentes	0.46	0.93	0.99	0.99	0.97	0.99
Nube absorbente	0.07	0.07	0.20	0.41	0.75	0.98
Moqueta	0.25	0.13	0.16	0.13	0.10	0.07
Difusor	0.10	0.10	0.15	0.40	0.30	0.22

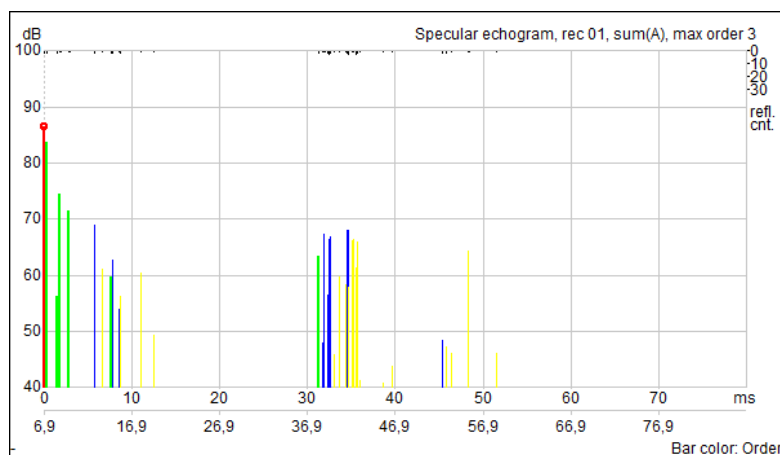
Tabla 4. Coeficientes de absorción de los nuevos elementos.

Con estos nuevos materiales añadidos, se ha obtenido el tiempo de reverberación que se muestra en la Gráfica 11 como propuesta final.



Gráfica 11. Tiempo de reverberación de la sala de control con todas las modificaciones.

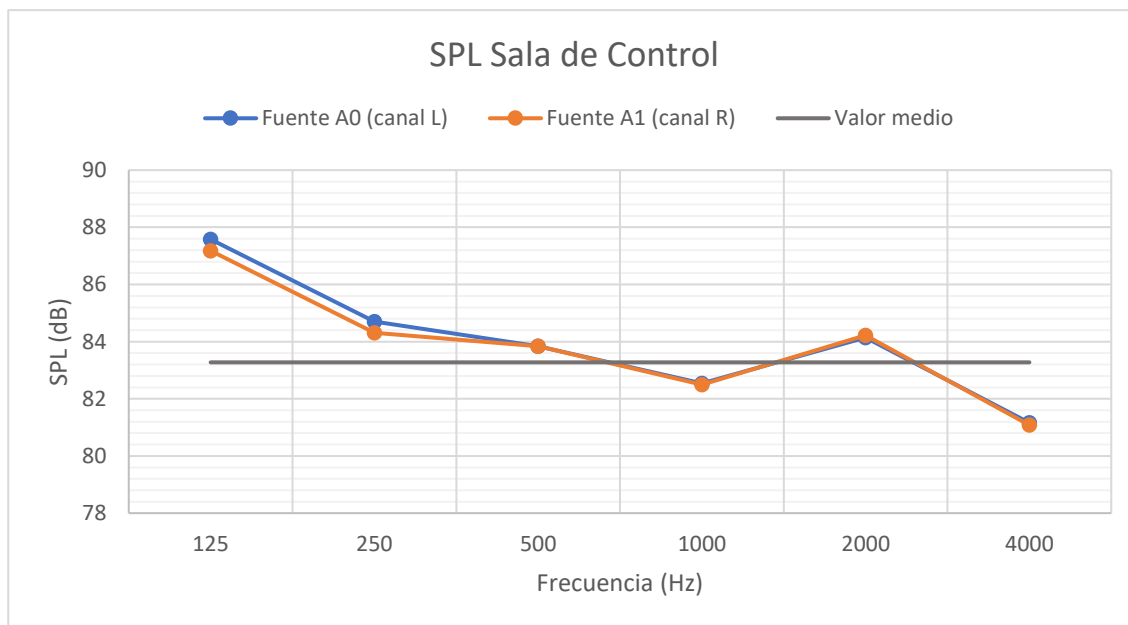
Como vemos, tras todos los cambios implementados se ha conseguido un tiempo de reverberación uniforme de en torno a 0.3 segundos para todas las frecuencias.



Gráfica 12. Ecograma de la sala de control.

En la Gráfica 12. Ecograma de la sala de control. se muestra el ecograma de la sala de control. Debido a las dimensiones de la sala, el ITDG es mínimo, y las primeras reflexiones se concentran en los primeros 10ms, con una diferencia de entre 20 y 30 dB respecto al nivel del sonido directo. Destaca una gran concentración de reflexiones de segundo y tercer orden entre los 30 y 35ms tras la llegada del sonido directo. Estas reflexiones, por su retardo respecto a la señal directa, provienen principalmente de la zona trasera de la sala. Debido a su bajo nivel, 20dB menor al rayo directo, no se espera que tengan un impacto notable en la escucha desde el sweet spot.

En cuanto al nivel de presión sonora, En la Gráfica 13 se muestran los valores obtenidos para ambos canales. El valor medio es la media del nivel de presión sonora en las octavas de 250Hz hasta 4kHz. Se cumple la recomendación de la EBU en todas las octavas excepto en 125Hz, donde la diferencia respecto al valor medio es de 4dB, no muy pronunciada. Esto es posible solucionarlo mediante un ecualizador paramétrico, ajustando su frecuencia central, factor Q y ganancia. También sería deseable atenuar con un ecualizador la banda de 2kHz, y subir la banda de 4kHz para obtener una respuesta más plana.



Gráfica 13. Nivel de presión sonora en la sala de control.

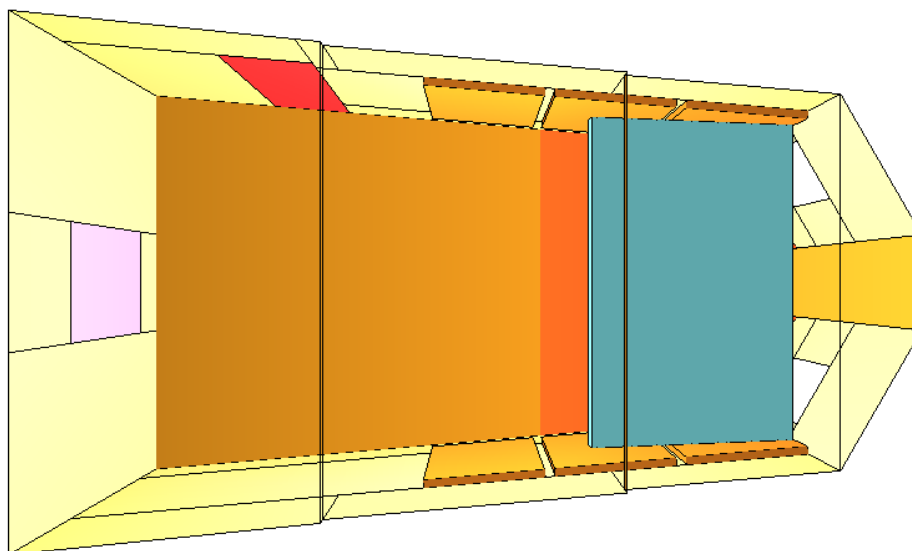


Figura 39. Sala de control, propuesta final. Planta.

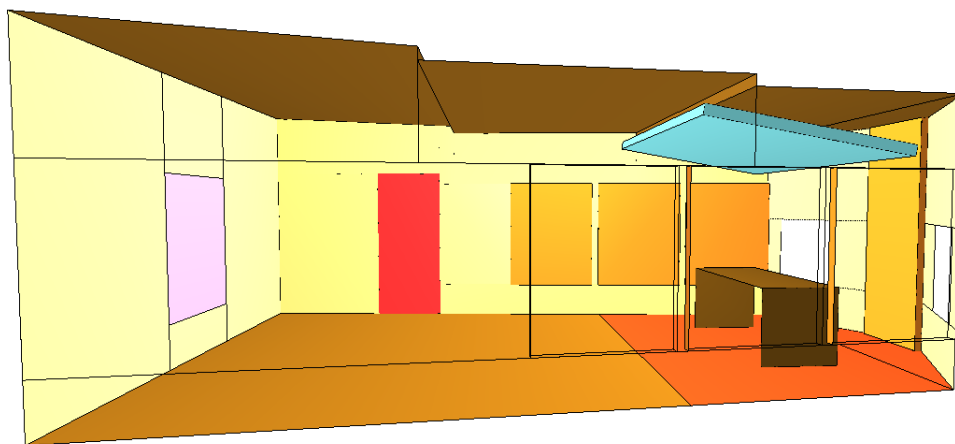


Figura 40. Sala de control, propuesta final. Perfil.

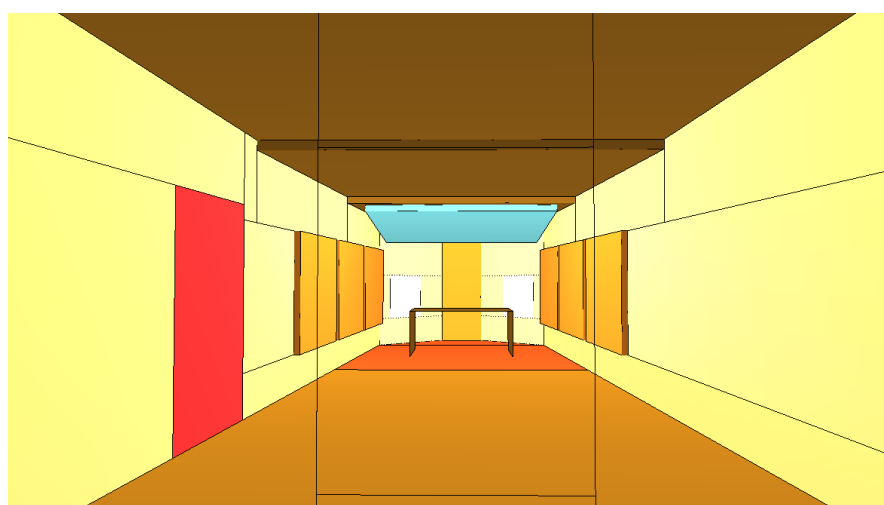


Figura 41. Sala de control, propuesta final. Interior.

4 CONCLUSIONES

Con la finalidad de realizar el diseño de un estudio de grabación a partir de dos salas ya existentes en el Palacio de Formación y Congresos de Fuerteventura, en este proyecto se han abarcado numerosos conceptos teóricos sobre el campo de la acústica arquitectónica.

Estos conceptos han sido aplicados para poder alcanzar dicho objetivo. En concreto, se han realizado medidas in situ aplicando la normativa UNE EN-ISO 3282-1: 2010. A continuación, se ha diseñado una sala de control cumpliendo lo descrito en la recomendación EBU Tech. 3276, y se ha bajado el tiempo de reverberación hasta los 0.3 segundos, alcanzando el objetivo marcado. También se ha propuesto una solución de elementos de acústica variable para la sala de grabación, que permita adaptarla a distintas circunstancias y necesidades.

Este proyecto también ha servido como aprendizaje, ya no sólo en cuanto al conocimiento teórico adquirido e implementado, si no respecto al uso de los programas de diseño y simulación, AutoCAD y Catt-Acoustic™, a los cuales se les ha dedicado muchas horas de trabajo que han permitido mejorar su uso de forma más eficiente.

Cabe destacar las limitaciones que hubo a la hora de realizar las mediciones in situ de las salas, debido a la falta de material apropiado. Se hizo todo lo posible por conseguir el material necesario, pero desgraciadamente solo se pudo conseguir el que se describe en esta memoria. Aun así, este hándicap no afectó al desarrollo realizado posteriormente.

Finalmente, se mencionan a continuación algunas líneas de trabajo que se podrían realizar en un futuro sobre este proyecto:

- Realizar un estudio más exhaustivo de la sala de grabación. En este trabajo se ha focalizado la atención y el desarrollo a la sala de control, principalmente porque existe más bibliografía al respecto, y debido a que es, técnicamente hablando, un reto más exigente.
- Una vez implementada la sala de control tal y como se propone, realizar medidas in situ para analizar el resultado real de todos los cambios y nuevos elementos añadidos. Concretamente, sería interesante realizar un estudio de la baja frecuencia para ver el comportamiento del sistema de colocación de los monitores, tipo flush mounting; además de la respuesta modal de la sala, que no fue posible analizarla mediante la fórmula de Rayleigh debido a su geometría. También sería posible comprobar si las reflexiones de la pared trasera, vistas en el ecograma de la sala, pueden ser percibidas, y en caso afirmativo idear una solución para reducirlas.

5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] *UNE EN-ISO 3282-1: 2010: Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos.*
- [2] H. Arau-Puchades, *La arquitectura del sonido y la envoltura de los espacios*, Barcelona: Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona, 2015.
- [3] J. Sancho Vendrell, J. Llinares Galiana y A. Llopis Reyna, *Acústica Arquitectónica y Urbanística*, Valencia: Universitat Politècnica de València, 2011.
- [4] P. Newell, *Recording Studio Design*, 2 ed., Elsevier/Focal Press, 2008.
- [5] M. Skålevik, «Schroeder Frequency Revisited,» Forum Acusticum, Aalborg, 2011.
- [6] R. Moscoso, *Acústica de Estudios de Grabación*, Lima, 2013.
- [7] A. Carrión Isbert, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, Barcelona: Edicions UPC, 1998.
- [8] A. Martín Domingo, *Apuntes de Acústica*, Madrid, 2014.
- [9] «Thomann,» [En línea]. Available: https://www.thomann.de/es/onlineexpert_page_acustica_de_estudio_medios_tecnicos_de_ayuda_para_la_mejora_de_la_acustica_de_sala_03_difusores.html.
- [10] A. T. Fürjes, É. Arató-Borsi y F. Augusztinovicz, *Evaluation and Design of Small Rooms*, Building Acoustics, 1999.
- [11] R. A. Moscoso, *Cuartos de control de estudios de grabación: desarrollo histórico de su diseño*, Lima: XVII Simposio Peruano de Física, 2008.

- [12] D. Webb, «First reflection, flutter echo , comb filtering,» WebBLAB, 2018. [En línea]. Available: <https://webblab.net/home-studio/8-first-reflection-flutter-echo-comb-filtering>.
- [13] B. Fazenda, J. Angus y T. Cox, «The SOS Guide To Control Room Design,» Sound on sound, febrero 2015. [En línea]. Available: <https://www.soundonsound.com/techniques/sos-guide-control-room-design>.
- [14] M. Vorländer, *Auralization*, Dordrecht: Springer, 2007.
- [15] T. J. Cox y P. D'Antonio, *Acoustics absorbers and diffusers*, Londres: Spon Press, 2004.
- [16] *Listening conditions for the assessment of sound programme material: monophonic and two-channel stereophonic*, EBU Tech. 3276, 1998.
- [17] Genelec, «How To Place Your Monitors,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.genelec.com/monitor-placement>.
- [18] «How to flush-mount large studio monitors and how should the wall be constructed?,» Genelec, 2019. [En línea]. Available: <https://support.genelec.com/hc/en-us/articles/360013369860-How-to-flush-mount-large-studio-monitors-and-how-should-the-wall-be-constructed->.
- [19] CATT-Acoustic™, CATT-A v9.1e:2 User's Manual, Gothenburg, 2019.
- [20] M. Balangué García, *Estudi Acústic del Teatre Orfeó Montsià d'Ulldecona (Tarragona)*, Gandía: UPV, 2020.
- [21] M. Vázquez Rosado, *Metodología de diseño de estudios de grabación y aplicación a caso práctico*, Madrid: UPM, 2013.
- [22] M. Rettinger, «On the Acoustics of Control Rooms,» *Journal of the Audio Engineering Society*, nº 1261 (J-1), 1977.