

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR



**Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de
Telecomunicación.**

TRABAJO FIN DE GRADO

**Estudio acústico de un espacio para diferentes situaciones
sonoras.**

**Alberto Diaz Martin
Tutor: José Luis Carles Arribas
Ponente: Daniel Ramos Castro**

JUNIO 2021

**Estudio acústico de un espacio para diferentes situaciones
sonoras.**

AUTOR: Alberto Diaz Martin
TUTOR: José Luis Carles Arribas

Dpto. Música y Tecnología.
Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid
Junio de 2021

Resumen (castellano)

Este trabajo de fin de grado pretende realizar un estudio sobre los descriptores acústicos de una sala cerrada, con el objetivo de identificar las características arquitectónicas del recinto que condicionan la acústica de esta.

El espacio en cuestión donde se realizará el estudio es el Palacio de Cristal del Parque del Retiro, en Madrid. Para obtener la respuesta del espacio se han hecho múltiples mediciones en distintas posiciones en el mismo, usando grabadoras, micrófonos y una señal emisora generada explotando globos redondos intentando simular el impulso unidad. Seguido de una obtención de los descriptores acústicos de la sala. Se compara la respuesta al impulso del recinto con la que hay en una sala anecoica, donde se puede captar la señal original de la explosión que simula el impulso de Dirac.

También se estudiará en detalle las características de la sala usando software para diseñar una maqueta en 3D en la que posteriormente poder simular las reflexiones de la señal, así como el trazado de rayos (ray-tracing) en esta.

Tras el estudio de los descriptores y las simulaciones se pretenden dar diferentes soluciones que se pueden aplicar en la sala para mejorar la sensación sonora en ella en caso de que se use como recinto multiusos, en el cual a parte de usarse como galería de arte estudiar su uso para eventos como pequeñas exposiciones musicales.

Palabras clave (castellano)

Acústica, sensación sonora, descriptores acústicos, tiempo de reverberación, claridad, definición, respuesta al impulso, impulso unidad, trazado de rayos, reflectores acústicos, difusores, frecuencia, sala anecoica, impulso de dirac.

Abstract (English)

The following Bachelor Thesis paper seeks to make a study about the measurements and acoustical descriptors of a room and how the architectural characteristics of the space would affect the room acoustics.

The space where this study is conducted is the Cristal Palace located in the Retiro Park in Madrid.

To obtain the descriptors of the room acoustics, a wide variety of measurements were made, using recorders, microphones and balloons that when popped produce the unit pulse. Comparisons between the impulse response and the original signal recorded in an anechoic chamber will also appear in this paper.

A study of the room characteristics in detail will also take place by using software to design a 3D model in which we are able to simulate the reverberation of the signal as well as the raytracing to study the reflections.

After this the paper will finish proposing different solutions for the room and how to enhance its acoustics if needed for music and speech, using the room as a multipurpose space.

Keywords (inglés)

Acoustics, loudness, reverberation time, clarity, definition, impulse response, unit pulse, raytracing, acoustic reflectors, diffusers, frequency, anechoic chamber, diracs impulse.

Agradecimientos

Primero me gustaría agradecer a mi familia por los valores inculcados que me han llevado a ser la persona que soy hoy y el apoyo que me han dado.

También me gustaría mencionar a mis amigos ya que muchos han sido parte fundamental en que las horas de estudio en bibliotecas durante la carrera se hayan hecho menos duras.

A todos los profesores que han sido parte de mis estudios y por supuesto a mi tutor José Luis por interesarse en el TFG propuesto y darme la oportunidad de llevarlo a cabo con él.

Gracias por último a Guillermo y Eduardo por echarme una mano con las grabaciones.

INDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	1
1.3	Organización de la memoria.....	2
2	Estado del arte	3
2.1	Introducción.....	3
2.1.1	Transmisión del sonido.....	3
2.2	Tipos de salas y elementos en su diseño.....	4
2.2.1	Difusores.....	4
2.2.2	Reflectores.....	5
2.2.3	Absorbentes y resonadores.....	5
2.3	Fuente de sonido.....	7
2.4	Seguimiento de rayos.....	7
3	Diseño.....	9
3.1	Instrumentación	9
3.1.1	Fuente acústica.....	9
3.1.2	Grabadoras.....	9
3.1.3	Micrófonos.....	9
3.2	Descripción del recinto.....	10
3.2.1	Características de los materiales.....	10
3.3	Descriptores acústicos a estudiar.....	11
3.3.1	Tiempo de Reverberación. (RT).....	11
3.3.2	Tiempo de decaimiento temprano. (EDT).....	11
3.3.3	Definición. (D50).....	11
3.3.4	Claridad. (C80).....	12
3.4	Cámara anecoica.....	12
4	Desarrollo	13
4.1	Mediciones en el Palacio.....	13
4.1.1	Grabación 1.....	14
4.1.2	Grabación 2.....	14
4.1.3	Grabación 3.....	14
4.1.4	Grabación 4.....	14
4.1.5	Grabación 5.....	14
4.1.6	Grabación 6.....	14
4.1.7	Grabación 7.....	14
4.1.8	Grabación 8 y 9.....	14
4.1.9	Grabación 10.....	14
4.2	Medición en la Cámara anecoica.....	15
4.3	Tratamiento de señal previo y obtención de descriptores.....	15
4.4	Modelado 3D con Sketchup y ray-tracing con Wayverb.....	16
5	Integración, pruebas y resultados	19
5.1	Resultados de las mediciones.....	19
5.1.1	Resultados grabación nº1.....	19
5.1.2	Resultados grabación nº2.....	20
5.1.3	Resultados grabación nº3.....	21
5.1.4	Resultados grabación nº4.....	22

5.1.5 Resultados grabación nº5.....	23
5.1.6 Resultados grabación nº6.....	24
5.1.7 Resultados grabación nº7.....	25
5.1.8 Resultados grabación nº 8 y nº 9.	26
5.1.9 Resultados grabación nº10.....	27
5.1.10 Resultados grabación en cámara anecoica.....	28
5.2 Comparación e interpretación de las mediciones.	29
5.3 Análisis de tiempos de reverberación anormales.	31
6 Conclusiones y trabajo futuro.....	32
6.1 Conclusiones.....	32
6.2 Trabajo futuro.....	33
Bibliografía.....	35

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1: COMPARATIVA ENTRE LOS EFECTOS DE LA ABSORCIÓN, REFLEXIÓN ESPECULAR Y DIFUSIÓN DEL SONIDO. <i>EXTRAÍDO DE “DISEÑO ACÚSTICO DE ESPACIOS ARQUITECTÓNICOS.” POR A.CARRIÓN.</i>	6
FIGURA 2-2: SEGUIMIENTO DE RAYOS DE UNA SALA CON SOFTWARE ODEON. <i>EXTRAÍDO DE “ROOM ACOUSTICS MODELLING” POR D.MASOVIC.</i>	8
FIGURA 3-1: POSICIONES DE EMISOR Y RECEPTOR DURANTE LAS MEDICIONES EN EL RECINTO. <i>IMAGEN EXTRAÍDA DE HTTPS://ES.WIKIARQUITECTURA.COM/EDIFICIO/PALACIO-DE-CRISTAL-EN-MADRID/#PALACIO-CRISTAL-MADRID-13</i>	10
FIGURA 3-2: CÁMARA ANECOICA DEL ITEFI.....	12
FIGURA 4-1: GRABADORA EN EL PALACIO DE CRISTAL.....	13
FIGURA 4-2: SCRIPT DE MATLAB PARA EL TRATAMIENTO PREVIO DE LA SEÑAL.....	15
FIGURA 4-3: MODELO SIN COLUMNAS EN WAYVERB.....	16
FIGURA 4-4: MODELO SIMPLIFICADO EN WAYVERB.....	17
FIGURA 5-1: RESPUESTAS AL IMPULSO EN GRABACIÓN 1.....	19
FIGURA 5-2: RESPUESTAS AL IMPULSO EN GRABACIÓN 2.....	20
FIGURA 5-3: RESPUESTAS AL IMPULSO EN GRABACIÓN 3.....	21
FIGURA 5-4: RESPUESTAS AL IMPULSO EN GRABACIÓN 4.....	22
FIGURA 5-5: RESPUESTAS AL IMPULSO EN GRABACIÓN 5.....	23
FIGURA 5-6: RESPUESTAS AL IMPULSO EN GRABACIÓN 6.....	24

FIGURA 5-7: RESPUESTAS AL IMPULSO EN GRABACIÓN 7.....	25
FIGURA 5-8: RESPUESTAS AL IMPULSO EN GRABACIÓN 8 Y 9.....	26
FIGURA 5-9: RESPUESTAS AL IMPULSO EN GRABACIÓN 10.....	27
FIGURA 5-10: RESPUESTAS AL IMPULSO Y SU ESPECTROGRAMA EN CÁMARA ANECOICA.....	28
FIGURA 5-11: TIEMPOS DE REVERBERACIÓN MICRÓFONO X/Y.....	29
FIGURA 5-12: D50 Y C80 DE LAS MEDICIONES.....	30
FIGURA 5-13: ESPECTROGRAMAS DE SONIDO AMBIENTE DE GRABACIÓN 4 Y 9.....	31

INDICE DE TABLAS

TABLA 5-1: VALORES DE LOS DESCRIPTORES EN MICRÓFONOS X E Y, GRABACIÓN 1.....	19
TABLA 5-2: VALORES DE LOS DESCRIPTORES EN MICRÓFONOS X E Y, GRABACIÓN 2.....	20
TABLA 5-3: VALORES DE LOS DESCRIPTORES EN MICRÓFONOS X E Y, GRABACIÓN 3.....	21
TABLA 5-4: VALORES DE LOS DESCRIPTORES EN MICRÓFONOS X E Y, GRABACIÓN 4.....	22
TABLA 5-5: VALORES DE LOS DESCRIPTORES EN MICRÓFONOS X E Y, GRABACIÓN 5.....	23
TABLA 5-6: VALORES DE LOS DESCRIPTORES EN MICRÓFONOS X E Y, GRABACIÓN 6.....	24
TABLA 5-7: VALORES DE LOS DESCRIPTORES EN MICRÓFONOS X E Y, GRABACIÓN 7.....	25
TABLA 5-8: VALORES DE LOS DESCRIPTORES EN MICRÓFONOS X E Y, GRABACIÓN 8.....	26
TABLA 5-9: VALORES DE LOS DESCRIPTORES EN MICRÓFONOS X E Y, GRABACIÓN 9.....	26
TABLA 5-10: VALORES DE LOS DESCRIPTORES EN MICRÓFONOS X E Y, GRABACIÓN 10.....	27
TABLA 5-11: VALORES MEDIOS DE LOS DESCRIPTORES EN MICRÓFONOS X E Y, GRABACIÓN EN CÁMARA ANECOICA.....	28

1 Introducción

1.1 Motivación

Tanto la música en directo como los eventos o presentaciones multitudinarias eran partes esenciales de la vida social de las personas antes de la pandemia, en cualquiera de sus formatos: una presentación, un debate, una graduación, un concierto de música, etc. Su falta es una de las cosas que más daño han hecho al ocio en el último año.

Esto unido a la importancia que tiene la ingeniería acústica en diversos campos hoy en día, ya sea desde el diseño de una sala de cine, el correcto aislamiento de un coche o producción musical entre otros ha provocado que esta rama de conocimiento de la carrera me genere un gran interés.

El atractivo que me parece que tienen las aplicaciones técnicas en este ámbito me ha motivado a hacer que este trabajo trate de analizar las características acústicas de una sala con el objetivo no solo de aprender un poco más de la parte práctica si no también para profundizar en que decisiones puede tomar un ingeniero para mejorar la sensación sonora de un espacio y como adaptarlo a diferentes tipos de eventos que pueden llevarse a cabo en el mismo.

1.2 Objetivos

El objetivo principal del trabajo es estudiar como reacciona una sala ante una señal acústica mediante una recogida de muestras que luego serán procesadas para obtener tanto los descriptores acústicos del espacio como seguimiento de rayos de la onda en este. Para posteriormente analizarlos y justificar que elementos de su arquitectura los condicionan con el objetivo de dar soluciones a las posibles desventajas que puede presentar a la hora de producir una respuesta sonora adecuada a diferentes situaciones a las que se le pretenda dar uso a la sala.

Para ello primero se recogerán las muestras en el Palacio de Cristal, teniendo en cuenta diferentes posiciones de medida, para ver como las posiciones de emisor receptor afectan a las muestras recogidas, algo que posteriormente se tendrá en cuenta para ver que disposiciones son las adecuadas para mejorar la audición de los receptores en casos de que haya un emisor o emisores dirigiéndose hacia un público, así como que disposiciones pueden reducir el ruido en caso de que haya eventos multitudinarios en los que gran cantidad de gente hablando a la vez pueda afectar al confort psicoacústico de los asistentes.

Otro objetivo será identificar los posibles elementos y su colocación para que puedan ayudar a mejorar la acústica del palacio en estos eventos, teniendo en cuenta diferentes materiales o la colocación de difusores, elementos absorbentes, resonadores o otros objetos que puedan mejorar la sensación acústica subjetiva del público que acuda a este espacio.

1.3 Organización de la memoria

La memoria consta de los siguientes capítulos:

- Capítulo 1: Introducción. motivación y objetivos.
- Capítulo 2: Estado del Arte. En este capítulo se introducirán nociones de ingeniería acústica, se tendrá un enfoque genérico, aunque los elementos que más importancia tienen en el TFG se trataran de manera más extensa.
- Capítulo 3: Diseño. Se describirá la instrumentación usada durante las mediciones. Y los descriptores acústicos. Se incluirán los diagramas arquitectónicos del palacio donde se realizaron las mediciones.
- Capítulo 4: Desarrollo. Se describirán los procedimientos para la toma de las medidas acústicas, la obtención de los descriptores, el análisis de las reverberaciones y del trazado de rayos en el entorno 3D.
- Capítulo 5: Pruebas y resultados. Se analizarán los resultados de las diferentes pruebas llevadas a cabo en el desarrollo.
- Capítulo 6: Conclusiones y trabajo futuro. Se discutirá de manera breve si se puede conseguir añadir elementos para adaptar la respuesta acústica del espacio a distintas situaciones. Se plantearán también diferentes puntos por los que continuar con el estudio planteado en este trabajo.

2 Estado del arte

2.1 Introducción.

El campo de la acústica es una rama de la física que se encarga de estudiar como ondas mecánicas de sonido se propagan por la materia. De esta rama de conocimiento surge la ingeniería acústica, que se encarga de estudiar de como darle una aplicación tecnológica a la producción, propagación y percepción de las ondas sonoras, desarrollando también elementos, para su almacenamiento y reproducción. Dentro de las múltiples áreas de conocimiento que engloban el estudio de la acústica, la acústica de salas es una disciplina que trata el sonido dentro de espacios cerrados o parcialmente abiertos con varios fines, como pueden ser el control del ruido para conseguir un espacio confortable acústicamente, la reproducción y producción de sonido.

2.1.1 Transmisión del sonido.

En esta sección se intentará dar una idea general de como se propaga el sonido en el interior de recintos y de que factores hay que tener en cuenta a la hora de entender como afectan las características arquitectónicas de una sala a la percepción del receptor.

Una sala se puede ver como un sistema lineal invariante en el tiempo (SLI) entre una fuente y un receptor. [1]

Cuando se genera un sonido en el interior de un recinto el receptor a parte de recibir de manera directa desde la fuente la onda, recibirá también una serie de reflexiones que normalmente se forman al chocar la señal con las superficies del espacio, las cuales también contribuyen a generar un campo sonoro. Hay que tener en cuenta que estas reflexiones dependen tanto de la disposición de las superficies del recinto como del material del que estén construidas.

Cuando una onda incide en una superficie se difracta, generando una onda reflejada, cambiando su dirección de propagación y afectando también a su presión sonora.

La onda sonora se transmite por el aire, donde hay disipación de energía, pero a no ser que la sala sea muy grande y este compuesta por materiales que sean poco absorbentes de cara al sonido la disipación en el aire se suele ignorar [1], ya que la mayoría de las pérdidas ocurren cuando se encuentra con algún obstáculo. Cuando la onda choca con la gente o con los límites de la sala, parte de la energía de la onda se absorbe ya que incide contra materiales en los cuales provocar una vibración de partículas requiere de una mayor energía que en el aire. La cantidad de energía que pierda dependerá de los materiales que este compuesto.

Habrà por tanto recintos cuya disposición y materiales faciliten una mejor respuesta acústica.

2.2 Tipos de salas y elementos en su diseño.

Entre los objetivos que pueden tener las salas o recintos desde el punto de vista de su acústica destacan 3: supresión del ruido, reproducción precisa del sonido o una mejora subjetiva del campo sonoro de cara a los receptores.[1]

Por tanto, no se pueden seguir las mismas pautas de diseño para un estudio de grabación que para un teatro o una casa, ya que las funciones que se desempeñan estas salas son diferentes. El Palacio de cristal es un recinto muy grande al que rodea un parque, por tanto, el principal objetivo que se perseguirá en esta sala será una mejora de la sensación acústica que puede tener una persona en su interior, buscando confort tanto cuando hay un emisor claro, o cuando la sala se encuentra abarrotada en una exposición artística, que es la función que desempeña actualmente.

Los elementos que hay que tener en cuenta a la hora de diseñar las salas son su geometría (volumen y forma), los techos, suelos y paredes (materiales, tamaño y posición), pequeños elementos adicionales (difusores, reflectores y elementos absorbentes) y por último el posicionamiento de las fuentes sonoras y sus receptores.

El recinto del Palacio ya tiene unas características arquitectónicas definidas, por tanto, pocos cambios se pueden hacer en ese ámbito, y habrá que centrarse en los pequeños elementos que se pueden añadir, así como el posicionamiento de receptor y emisor.

2.2.1 Difusores

Se entiende como difusión al fenómeno que ocurre cuando al incidir una onda sobre una superficie esta se dispersa en múltiples direcciones, esto se espera cuando la longitud de onda es comparablemente igual o menor que las irregularidades geométricas que presenta la superficie con la que impacta. Al difractar la onda pueden conseguir que el campo reverberante llegue a distintos puntos de la sala para mejorar la sensación espacial de los espectadores, aunque estén en posiciones diferentes.

Todos los materiales tienen cierto grado de difusión, pero los difusores suelen ser diseñados con irregularidades previamente estudiadas, y tendrán una máxima difusión a ciertas frecuencias.

Los difusores de Schroeder normalmente de madera suelen trabajar en una banda de frecuencia determinada y están compuestos por pozos que tienen una longitud concreta para aplicar cambios de fase a la onda incidente según una secuencia matemática.

- Difusores MLS(maximum length sequence): 2 niveles, uno con $d_1=0$ y otro pozo de longitud $d_2= \lambda/4$, la cual dependerá de la longitud de onda de las frecuencias de diseño para el difusor.

- Difusores QRS(quadratic root sequence) y PRS(primitive root sequence): la profundidad de los pozos depende de una secuencia normalmente periódica, cada uno con depende de una secuencia generadora diferente. Puede haberlos unidimensionales, formados por bandas separadas por una fina capa de madera o bidimensionales, con pozos normalmente cuadrados. Los PRS consiguen eliminar reflexiones especulares.

También destacan los difusores poli cilíndricos que suelen estar hechos de madera con forma convexa y un radio de menos de 5m para que no se comporten como reflectores. [2]

2.2.2 Reflectores

Una reflexión ocurre cuando una onda choca con una superficie y rebota cambiando la dirección de la onda, para que esto ocurra la superficie debe ser lisa y sus dimensiones mayores a la longitud de onda de las ondas que deseamos reflejar. Se suelen usar principalmente para música o salas destinadas al habla que no cuenten con altavoces, ya que son capaces de redirigir hacia el público reflexiones tempranas que, en conjunto con el sonido directo, contribuyen a mejorar la inteligibilidad y sonoridad, en el caso de la música conseguir que haya reflexiones laterales contribuyen a generar una mejor impresión espacial de la sala. [3]

Pueden ser planos o curvos, influyendo esto en el ángulo con el que incidirá la onda reflejada.[2]

2.2.3 Absorbentes y resonadores.

Habrán ciertos materiales de las superficies que favorecerán la absorción del sonido, sobre todo si se trata de materiales muy porosos, esto se debe a que la onda al penetrar el material por los distintos canales que ofrece disipará mucha más energía en forma de calor en las paredes de los poros. La señal incidente se refleja parcialmente mientras que la onda no reflejada va atravesando el material y atenuándose hasta que llega a la pared rígida donde rebotará de nuevo al material y seguirá con su atenuación.

Suelen ser utilizados para insonorización ya que ayudan eliminar o reducir mucho el tiempo de reverberación en una sala.

Entre estos materiales absorbentes destacan la lana de vidrio, lana mineral y las espumas de poliuretano y resina de melanina. [2]

Los materiales porosos presentan una mala absorción a frecuencias bajas es por ello por lo que si queremos mejorarla tendremos que usar resonadores. Los cuales disiparan la energía en forma de calor de la onda al conseguir esta que vibren, generando una pequeña radiación que se considera inaudible.

- Resonadores de Hemholtz: se denominan a los cuales están compuestos por una cavidad con cierto volumen, forma arbitraria y de paredes rígidas, la onda de sonido entra por un cuello de longitud mucho menor que la de onda a la cavidad. Puede tener múltiples cavidades, y en el caso de los compuestos por paneles perforados la cavidad será simplemente el espacio entre la pared y el panel siendo en este caso el aire donde se generará la vibración.
- Resonador de membrana: están compuestos por un panel fino el cual se coloca frente a una pared dejando entre ambos un espacio, el aire en la cavidad en conjunto con el panel constituirán el sistema resonante. Al incidir una onda sobre el panel este vibrará disipando la energía en forma de calor.[1][2]

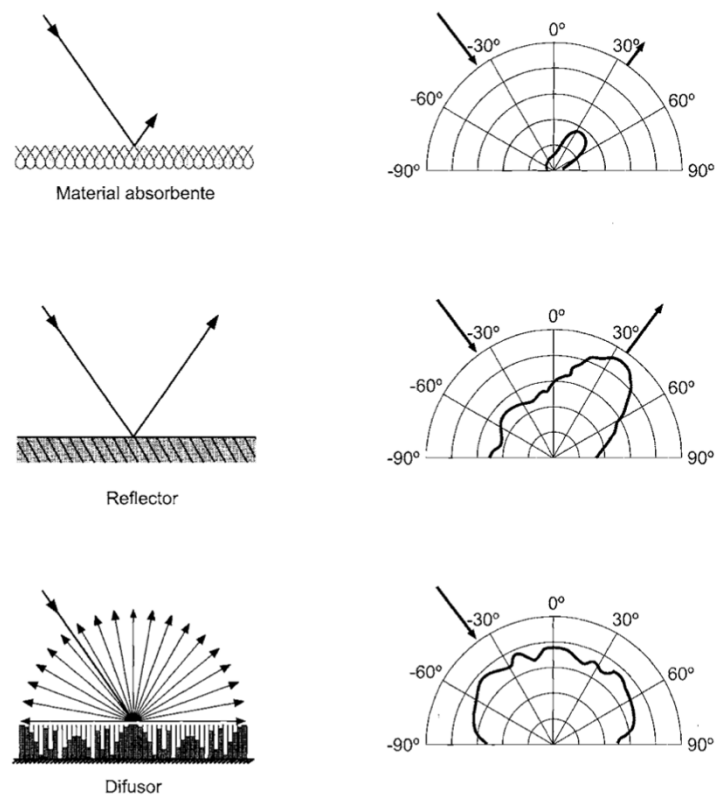


Figura 2-1: Comparativa entre los efectos de la absorción, reflexión especular y difusión del sonido.
 Extraído de "Diseño acústico de espacios arquitectónicos." Por A. Carrión.

2.3 Fuente de sonido.

En este trabajo, aunque se pueden usar diferentes métodos para obtener los descriptores acústicos de una sala, se ha estudiado como hacerlo usando explosiones de globos siguiendo el trabajo de la auralización de la Basílica de Hagia Sophia[4] en el cual se usan como fuente sonora obteniendo un resultado satisfactorio.

La fuente que genere el impulso unidad a de ser idealmente omnidireccional y proporcionar suficiente energía acústica en todas las frecuencias. Por ello los altavoces de dodecaedro y esféricos, son los más adecuados para emitir la señal, estos pueden generar diferentes tipos de señales más complejas cuyas características son apropiadas para obtener la respuesta al impulso de una sala, como son la ESS [5] o MLS [5], de manera omnidireccional. El problema que presentan es su precio y que necesitan una toma de corriente.

En recintos grandes y reverberantes se pueden usar las explosiones de los globos que se aproximan a un impulso unidad en el tiempo, sin que esto tenga mucha influencia en los resultados de los tiempos de reverberación [6].

Al explotarlos también generan una señal valida para aproximar el valor de la respuesta al impulso cuando no se tiene el presupuesto necesario para hacerlo con altavoces omnidireccionales.[7]

Como ya se mencionó una sala se puede ver como un SLI, por tanto, usando una señal que simule el impulso unidad podemos obtener los descriptores acústicos de la sala midiendo su respuesta al impulso.

La sala tendrá una respuesta al impulso que dependerá siempre de la posición del emisor y receptor.

2.4 Seguimiento de rayos.

El seguimiento de rayos es una técnica la cual consiste en calcular la excitación de las partículas que transportan la energía sonora en conjunto con el camino de la onda a la velocidad del sonido.

Para simular el recorrido se tendrán en cuenta características como los límites del entorno y el índice de absorción y refracción en de los materiales donde incide la onda.[7]

El proceso de simulación comienza generando un espacio cerrado 3D con polígonos planos en el cual simular, a las superficies del recinto se le añadirán coeficientes de absorción y difracción, para acabar ajustando la posición y dirección de fuentes y receptores.

Se seguirán las partículas hasta que se paren de mover, lleguen al límite que especifiquemos para la simulación o transcurra un tiempo límite, durante la simulación se obtendrán los tiempos, ángulos y energía de las partículas en los receptores del espacio 3D. [1]

En salas con poca absorción estimar el tiempo de reverberación puede resultar difícil y llevar a mediciones inexactas, en el caso del palacio, nos encontramos ante un recinto muy grande y que previsiblemente tendrá tiempos de reverberación largos.

En estos casos el seguimiento de rayos se convierte en una alternativa ya que se puede obtener el tiempo de reverberación aproximado numéricamente a partir de la respuesta de la energía obtenida en el modelo.

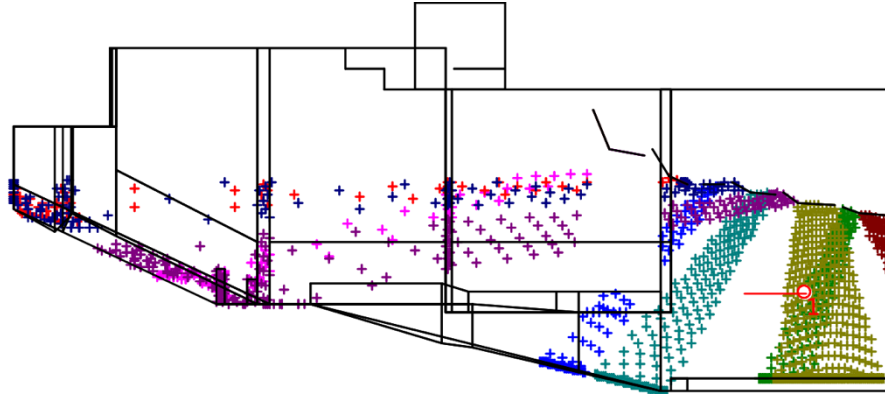


Figura 2-2: Seguimiento de rayos de una sala con software Odeon. *Extraído de “Room Acoustics modelling” por D.Masovic.*

3 Diseño

3.1 Instrumentación

En esta sección se describirán los elementos usados durante las mediciones en el Palacio de Cristal realizadas el 21/05/2021, las cuales se hicieron siguiendo las normas ISO 3382-2:2008.[8]

3.1.1 Fuente acústica.

Para recrear el impulso unidad se usaron globos hinchados con igual presión, teniendo en cuenta que han de ser capaces de producir suficiente nivel de presión acústica pico en su explosión, los globos elegidos tienen forma esférica en vez de ovalada para que su explosión genere una señal lo más omnidireccional posible.

3.1.2 Grabadoras.

Para hacer las mediciones se han usado 2 grabadoras, una grabadora zoom H6 y otra zoom H4N, ambas con dos entradas de nivel de línea por conectores o bien XLR o TRS, ambos nos permiten la entrada de un canal de audio no balanceado, y el TRS hace de entrada a dos canales estéreo no balanceados. [9]

3.1.3 Micrófonos.

En la grabadora Zoom H6 se han usado micrófonos XYH-6 X/Y, son unidireccionales, estos son altamente sensibles a las señales provenientes de la parte frontal pero menos a las laterales o posteriores.

En la grabadora Zoom H4N se han usado unos micrófonos Soundman OKM-II, estos son omnidireccionales por lo que captan la energía acústica de la misma forma en todas sus direcciones. [10]

3.2 Descripción del recinto.

El palacio de cristal es un recinto amplio de techos altos, su estructura de metal forjado está completamente cubierta por cristalerías, a excepción de la entrada en donde se pueden encontrar columnas en el pórtico, compuestas de piedra. La planta tiene forma de cruz, siendo la parte central la de mayor altitud al alcanzar ahí la bóveda de cristal los 22,6 m, el techo en el resto de las zonas está compuesto por bóvedas de medio cañón de 14,61m de altura. La planta tiene forma de cruz griega con un ancho de 28 metros por 54 de largo, cuenta con columnas metálicas soportando el techado.

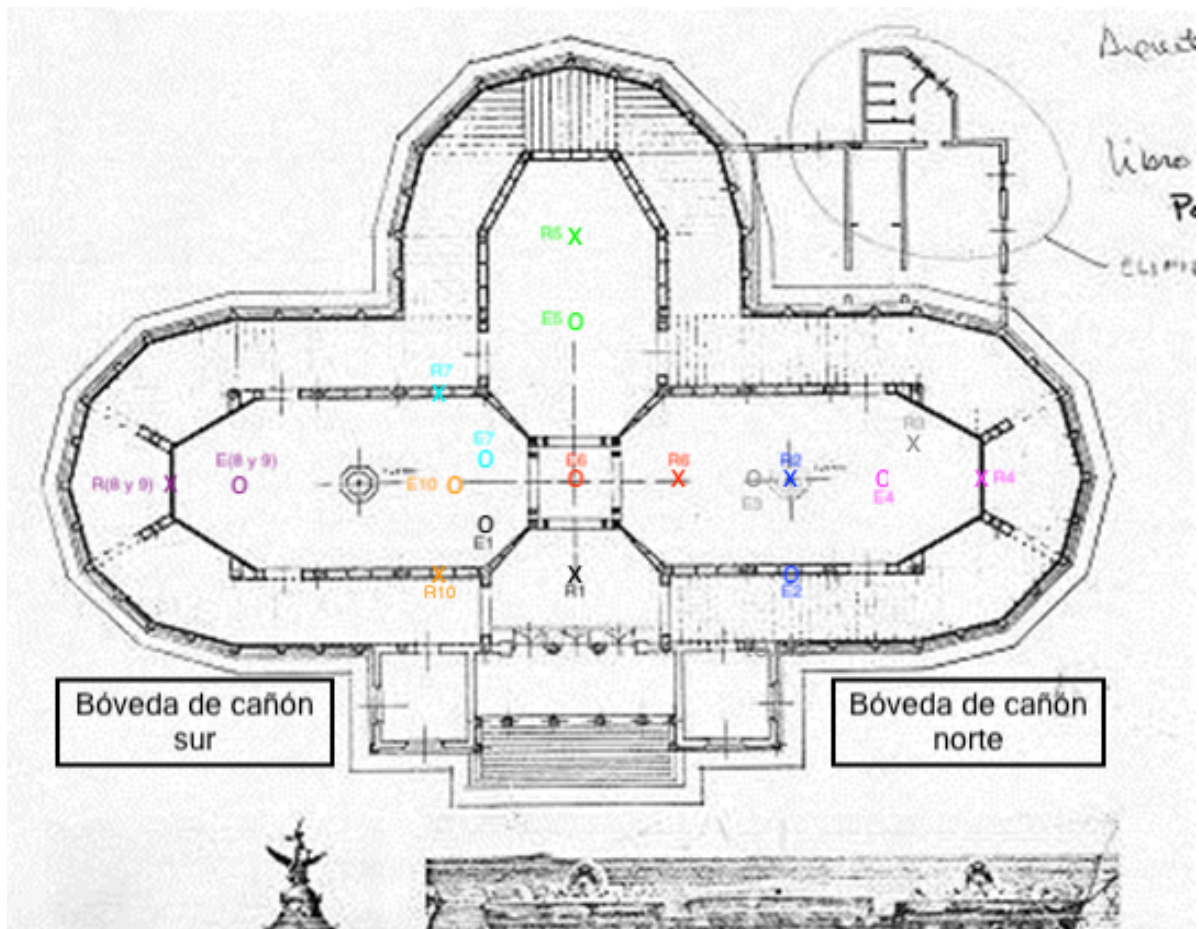


Figura 3-1: Posiciones de emisor y receptor durante las mediciones en el recinto. *Imagen extraída de <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/palacio-de-cristal-en-madrid/#palacio-cristal-madrid-13>*

3.2.1 Características de los materiales.

Como ya se ha mencionado, el recinto está delimitado en su mayoría por cristal un material que tiende a vibrar mucho cuando una onda sonora incide en su superficie, habrá cierta absorción de energía de la onda ya que se empleará en hacer vibrar el material, a efectos prácticos la energía disipada será muy pequeña, es por ello por lo que estas superficies no aíslan acústicamente bien la sala generando que la sensación sonora sea de un ambiente muy ruidoso.[2]

3.3 Descriptores acústicos a estudiar.

3.3.1 Tiempo de Reverberación. (RT)

Este descriptor se define como el intervalo de tiempo en el cual la energía del sonido cae 60dBs desde el momento en que termina de generarse ese sonido. Este sería el caso para T60, pero debido a que conseguir una ratio SNR de 60dBs es complicado se suelen usar T30 o T20, que miden el tiempo que tardan en caer 30dBs y 20dBs respectivamente. Este depende de la frecuencia, ya que habrá materiales que absorban mayor energía sonora a ciertas frecuencias.

Un tiempo de reverberación muy alto en una sala condiciona la inteligibilidad de la palabra, por ello en casos en los que la sala se vaya a usar para el habla hay que intentar mantener T30 entre 0,7-1,2s.

Para el caso de la música es recomendable que sea algo mayor, alrededor de 1,5-2,2s ya que le genera un mayor atractivo al oyente. En el caso de la música el RT óptimo dependerá del género musical. [1]

La energía acústica de la respuesta al impulso $g(t)$ define como:

$$SC(t) = 10 \log_{10} \left(1 - \frac{\int_0^t g^2(\tau) d\tau}{\int_0^\infty g^2(\tau) d\tau} \right)$$

$$T60 = t(SC=-60dB) \quad T30 = t(SC=-30dB) \quad T20 = t(SC=-20dB)$$

3.3.2 Tiempo de decaimiento temprano. (EDT)

El EDT cuantifica la caída de temprana del sonido, la cual esta relacionada con la percepción subjetiva de la reverberación, esto se debe a que rara vez se producen en las salas grandes decaimientos de la energía acústica. Es 6 veces la caída de 10 dBs.[1]

$$EDT = 6t(SC=-10dB)$$

3.3.3 Definición. (D50)

Está altamente relacionado con la inteligibilidad de la palabra, y se define como la fracción de la energía de la respuesta al impulso en los primeros 50 ms. Para que una sala sea considerada buena para el habla un mínimo del 50% de la energía acústica a de estar en estos primeros 50 ms D50. [1]

Se calcula dividiendo la energía en esos primeros 50 ms entre la energía total de la señal.

$$D50 = \frac{\int_0^{50ms} g^2(\tau) d\tau}{\int_0^\infty g^2(\tau) d\tau}$$

3.3.4 Claridad. (C80)

Para el caso de la música también tenemos este descriptor, el cual cumple una función parecida a la de D50, esta se relaciona con la separación en el tiempo que tienen los que componen una obra musical. Al igual que con D50 se define con una fracción de la energía sonora en decibelios, aunque para este caso en los primeros 80 ms.

Se calcula dividiendo la energía de esos 80 primeros ms entre el resto de la energía, el resultado de esta división se pasará a dBs, los valores recomendados para que la sala sea apropiada para actuaciones musicales están entre -2dBs y 3dBs.[1]

$$C_{80} = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_0^{80ms} g^2(\tau) d\tau}{\int_{80ms}^{\infty} g^2(\tau) d\tau} \right)$$

3.4 Cámara anecoica.

Una cámara anecoica es una sala que por una parte persigue un aislamiento de señales del exterior, en el caso de una que este orientada a mediciones acústicas, las señales de las cuales tiene que estar aislada serán las sonoras. En el interior del recinto el objetivo será que no se reflejen las señales producidas, para ello estará recubierta por cuñas de materiales porosos muy absorbentes con el objetivo de disipar la energía de toda onda sonora que incida con los límites de la sala, consiguiendo de esta manera que la señal percibida o medida se parezca lo máximo posible a la generada, simulando de esta manera las condiciones del campo libre. Las mediciones realizadas se hicieron en la cámara del ITEFI, parte del CSIC. [11]

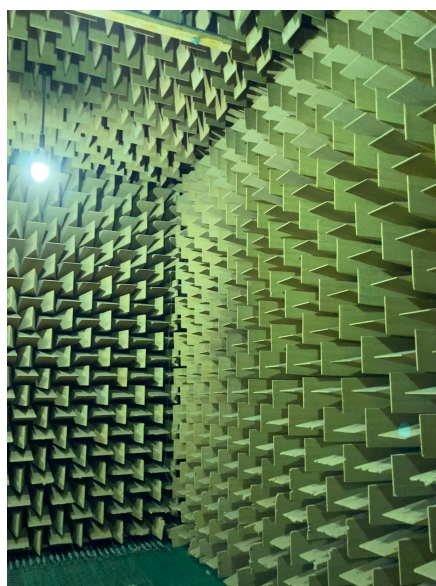


Figura 3-2: Cámara anecoica del ITEFI.

4 Desarrollo

4.1 Mediciones en el Palacio.

Como se apuntó en la descripción del recinto, se hicieron un total de 10 mediciones (Figura 3-1) siguiendo la norma ISO 354:2003, 3.5 [8], la cual indica que se puede medir la respuesta impulsiva en un punto del recinto observando la evolución temporal de la presión acústica a lo largo del tiempo de un impulso de Dirac generado en otro punto de la sala, el cual no era totalmente omnidireccional debido a que el sonido tenderá a dirigirse primero por el lado por el que se explota el globo. Los globos siempre se colocaron por encima de la cabeza con el objetivo de reducir la absorción de la persona que lo revienta. El recinto tiene un volumen superior a 300 metros cúbicos, por lo que habrá que tener en cuenta que la atenuación del sonido en el aire.

La sala no estaba vacía ya que éramos 5 personas, y como indica la norma ISO 3382-2:2008[8] las mediciones que se han tomado se consideran válidas como método de ingeniería, pero no se consideran mediciones de alta precisión ya que la toma de 10 muestras no es suficiente para la esto. Todas las mediciones se hicieron a una distancia mínima entre fuente y receptor de 2m y más de 1m de cualquier obstáculo del recinto, aunque siempre había una persona detrás de los micrófonos manejando las grabadoras, estas se colocaban en un pie de micro a más de un metro del suelo. Debido al entorno en el que nos encontrábamos se oía en todo momento el piar de los pájaros de los alrededores algo que hay que tener en cuenta ya que a la hora de obtener los descriptores acústicos esto tendrá un efecto en los resultados. En el suelo también había diferentes esculturas.



Figura 4-1: Grabadora en el Palacio de cristal.

4.1.1 Grabación 1

Realizada colocando al receptor (R1) delante de la entrada justo debajo de uno de los laterales de la bóveda principal, la explosión del globo se realizó en la posición E1 en la bóveda de medio cañón de la izquierda a la altura de la primera columna metálica del ala sur del edificio.

4.1.2 Grabación 2

Se explotó el globo entre las 2 columnas centrales del de la bóveda de cañón norte E2 y se colocó la grabadora en el centro de esta, en la posición R2.

4.1.3 Grabación 3

La explosión se hizo en la zona central de la bóveda de cañón norte E3, se posicionó al receptor con la grabadora en R3 en el interior de la bóveda cerca de las columnas.

4.1.4 Grabación 4

El receptor R4, se colocó entre las columnas situadas al final de la bóveda norte, y el globo se explotó dentro de esta a una distancia de 3,5 metros a la altura de las siguientes columnas que sostienen la bóveda en E4.

4.1.5 Grabación 5

Esta es la única que se hizo en la bóveda de cañón central, la más corta, y se realizó colocando la explosión del globo a la altura de las columnas más cercanas al centro, y la grabadora en la posición R5, donde se sitúan las columnas de en medio, a la misma distancia de ambas que E5.

4.1.6 Grabación 6

La explosión se realizó en el centro de la bóveda central y colocando la grabadora en R6 a la altura de las primeras columnas que sostienen la bóveda de cañón norte E6.

4.1.7 Grabación 7

Se colocó la grabadora entre las 2 primeras columnas que sostienen la bóveda de cañón sur, y se explotó el globo a la altura de la primera cerca del centro del recinto E7.

4.1.8 Grabación 8 y 9

Ambas se hicieron en la misma posición R8 y R9, colocando la grabadora entre las columnas más cercanas a la cristalera sur y el globo a la altura de las siguientes que sujetan la bóveda sur (E8 y E9).

4.1.9 Grabación 10

La grabadora en R10 se colocó a la misma altura que en R7, pero en este caso en las columnas más cercanas a la entrada, y se explotó en la zona central de la bóveda sur E10.

4.2 Medición en la Cámara anecoica.

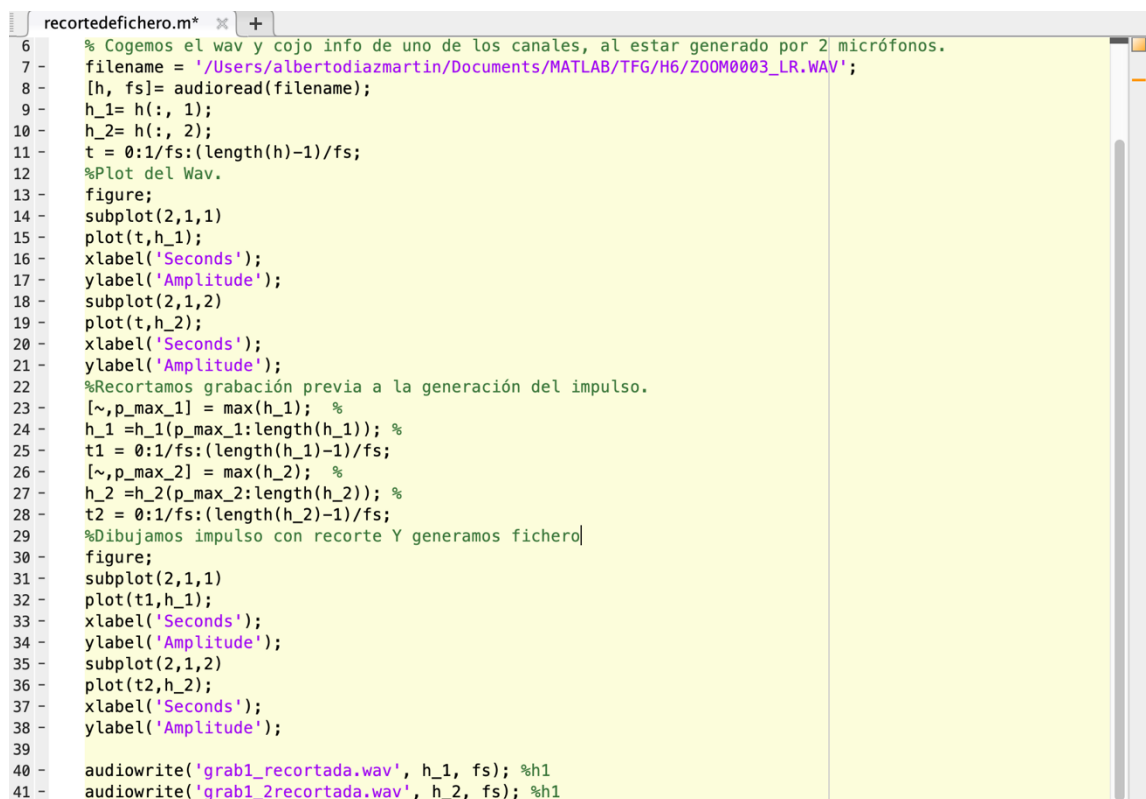
Para medir la señal producida al explotar el globo fuimos a la sala anecoica del ITEFI, compuesta por células de hormigón recubiertas por cuñas de lana mineral en su interior, el recinto está montado sobre flejes metálicos anti vibratorios, y esta contenido dentro de una estructura de 40 cm de espesor con una separación 80 cm por una cámara de aire, entre la construcción y la cámara. Esto consigue que haya una atenuación del ruido aéreo de 90dBa en comparación al exterior.

Para evitar posibles reflexiones con el suelo está compuesto por una malla flotante situada encima de las cuñas.

Las explosiones se hicieron en el centro de la sala a 2,5 metros de las grabadoras.

4.3 Tratamiento de señal previo y obtención de descriptores.

Tras obtener las mediciones grabadas en un fichero .wav se trataron con un sencillo script de Matlab que selecciona y separa la señal de cada canal y recorta hasta el momento en el que ocurre la explosión del globo. Esto se hace con el objetivo de realizar un análisis separado de ambos micrófonos con el software Room EQ wizard, el cual nos permite obtener los descriptores acústicos de una respuesta al impulso de un archivo .wav en diferentes bandas de frecuencia, así como su espectrograma.



```
6 % Cogemos el wav y cojo info de uno de los canales, al estar generado por 2 micrófonos.
7 filename = '/Users/albertodiazmartin/Documents/MATLAB/TFG/H6/ZOOM0003_LR.WAV';
8 [h, fs]= audioread(filename);
9 h_1= h(:, 1);
10 h_2= h(:, 2);
11 t = 0:1/fs:(length(h)-1)/fs;
12 %Plot del Wav.
13 figure;
14 subplot(2,1,1)
15 plot(t,h_1);
16 xlabel('Seconds');
17 ylabel('Amplitude');
18 subplot(2,1,2)
19 plot(t,h_2);
20 xlabel('Seconds');
21 ylabel('Amplitude');
22 %Recortamos grabación previa a la generación del impulso.
23 [~,p_max_1] = max(h_1); %
24 h_1 =h_1(p_max_1:length(h_1)); %
25 t1 = 0:1/fs:(length(h_1)-1)/fs;
26 [~,p_max_2] = max(h_2); %
27 h_2 =h_2(p_max_2:length(h_2)); %
28 t2 = 0:1/fs:(length(h_2)-1)/fs;
29 %Dibujamos impulso con recorte Y generamos fichero|
30 figure;
31 subplot(2,1,1)
32 plot(t1,h_1);
33 xlabel('Seconds');
34 ylabel('Amplitude');
35 subplot(2,1,2)
36 plot(t2,h_2);
37 xlabel('Seconds');
38 ylabel('Amplitude');
39
40 audiowrite('grab1_recortada.wav', h_1, fs); %h1
41 audiowrite('grab1_2recortada.wav', h_2, fs); %h1
```

Figura 4-2: Script de Matlab para el tratamiento previo de la señal.

4.4 Modelado 3D con Sketchup y ray-tracing con Wayverb.

Para realizar el seguimiento de rayos es necesario tener un modelo 3D del Palacio de Cristal, se ha partido de un modelo diseñado por el usuario Poloro[12] que estaba subido en la 3D Warehouse de Sketchup, una web donde los usuarios comparten sus diseños y que cualquiera que tenga el software puede descargar. Tras abrirlo se observaron demasiados elementos para un renderizado del seguimiento de rayos, pero decidí hacer una simulación de prueba. A diferencia de un modelo determinístico en el cual hay una certeza en los parámetros el trazado de rayos parte de un modelo estocástico, en el cual se genera desde la fuente un número de rayos con dirección aleatoria, estos rayos se irán siguiendo hasta que se alcance un número de reflexiones límite, algunos incidirán con el volumen del receptor colocado en el modelo. Solo los rayos que hayan pasado por la posición del receptor contribuirán a la salida final del seguimiento. El número de rayos se puede ajustar, y con ello se pueden conseguir simulaciones de mayor exactitud. [7]

A la hora de hacer las primeras simulaciones de prueba, el hardware gráfico de mi ordenador no fue capaz de renderizar de un modelo tan complejo compuesto de tantos polígonos como es el palacio, cayéndose ello el programa Wayverb en cada intento, independientemente del número de rayos especificado.

El seguimiento de rayos una técnica donde la geometría del recinto se puede simplificar usando polígonos que consigan asemejarse a la forma original del palacio, es por ello por lo que, para poder realizarlo, decidí modificar el modelo 3D.

Partí eliminando los objetos más complejos, pero el número de polígonos y la complejidad de la estructura, me siguió impidiendo simular el seguimiento de rayos.

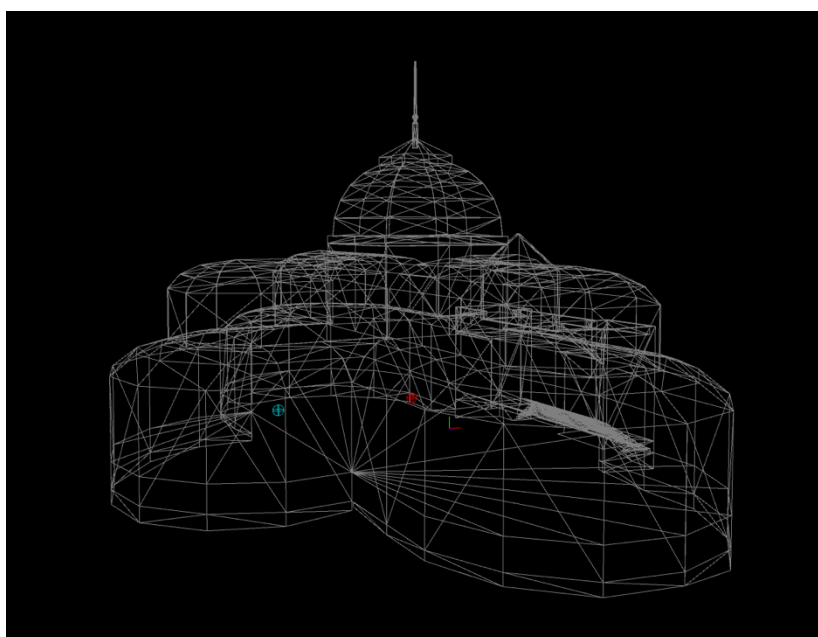


Figura 4-3: Modelo sin columnas en Wayverb.

Tras estas simplificaciones, el modelo se renderizaba, pero no se podía simular ya que el programa no era capaz de discernir cual era el objeto en cual seguir los rayos, y al colocar las posiciones del receptor y emisor entendía que no estaban en el interior del recinto.

Por ello decidí encerrar el 3D del palacio en una caja, en la siguiente simulación caractericé los materiales del modelo con Wayverb antes de simular, a la caja que encerraba el palacio se le dio un coeficiente de absorción del 100% para que simulase el campo abierto y no rebotase con ella ninguna onda.

De nuevo el programa entendió que tanto fuente como receptor estaban fuera del esquema. Decidí entonces simplificar al máximo el palacio de nuevo sin éxito a la hora de hacer el seguimiento de rayos.

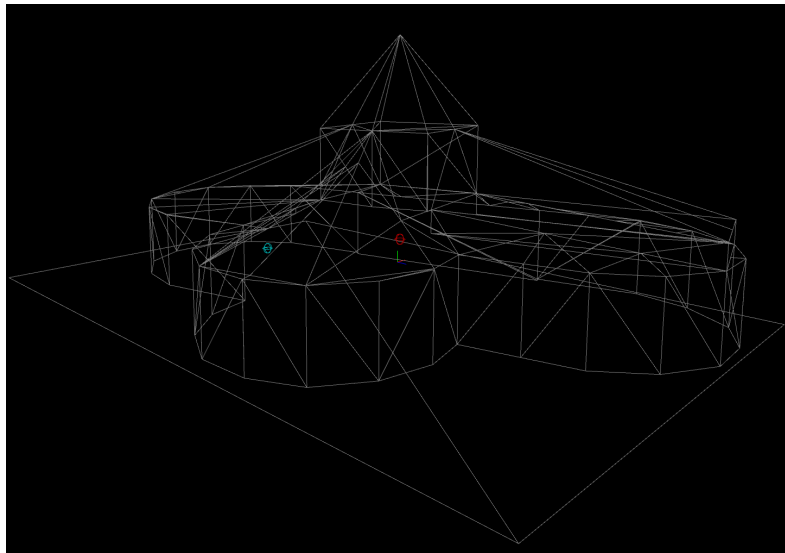


Figura 4-4: Modelo simplificado en wayverb.

El trazado de rayos con el software Wayverb no fue posible en el desarrollo del trabajo, algo que habría facilitado entender por que zonas del palacio había más reflexiones de la señal, y de esta manera entender mejor ciertos descriptores en ciertos puntos del recinto.

5 Integración, pruebas y resultados

En el siguiente capítulo se mostrarán los resultados obtenidos de las mediciones tomadas en el palacio, añadiendo tablas con los valores de los descriptores de cada grabación, una imagen de la respuesta al impulso captada en cada micrófono de la grabadora ZOOM 6 discutiendo brevemente cada resultado obtenido.

5.1 Resultados de las mediciones.

5.1.1 Resultados grabación nº1.

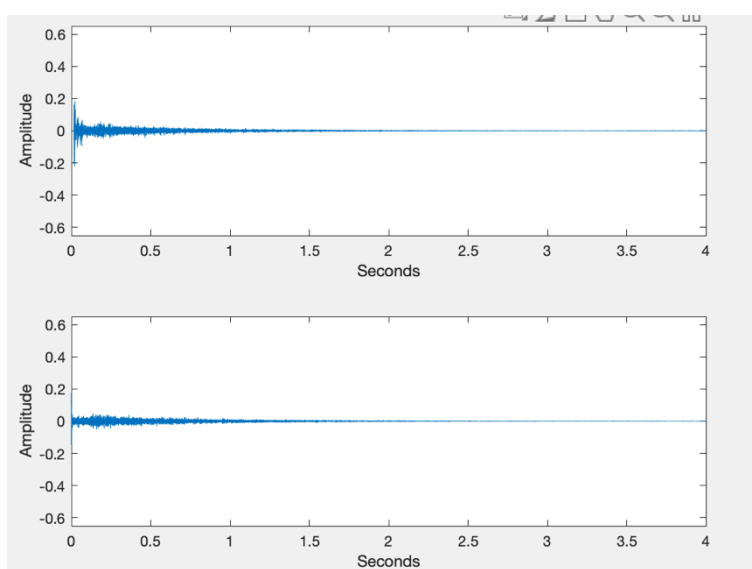


Figura 5-1: Respuestas al impulso en grabación 1.

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
X EDT (s)	13.895	5.1	6.062	6.558	4.967	3.111	1.196
X T30 (s)	28.013	13.262	6.134	7.01	5.499	2.829	2.177
X T20 (s)	30.101	5.386	6.726	7.035	5.576	3.072	1.46
X C80 (dB)	0.43	-2.98	-2.46	-3.31	0.66	3.37	0.43
X D50 (%)	47.8	25.6	34.2	29.9	50.4	63.8	47.8
Y EDT (s)	4.958	4.958	6.65	7.398	5.759	3.357	1.547
Y T30 (s)	11.255	11.255	N/A	6.908	5.658	2.477	3.863
Y T20 (s)	4.983	4.983	6.914	7.038	5.431	2.764	1.5
Y C80 (dB)	-8.7	-12.4	-11.59	-10.41	-7.52	-4.08	5.05
Y D50 (%)	5.5	3.1	5.5	5.9	12.1	20.9	70.5

Tabla 5-1: Valores de los descriptores en micrófonos X e Y, grabación 1.

Mientras que la EDT da valores parecidos en ambos micrófonos los de T30 y T20 difieren a frecuencias bajas, la claridad y definición también son diferentes, al ser los micrófonos unidireccionales dispuestos en ángulos que apuntan a distintas zonas de la sala, la captación

de la señal es distinta, en esta medición uno de ellos apuntaba a la bóveda norte mientras que el otro hacia la bóveda sur, directamente donde se realizó la explosión, se puede observar en la gráfica que el micrófono Y captó menos energía de la señal, hasta el punto de no haber decaimiento suficiente a 500Hz para medir T30. Hay que destacar, que no se captó mucha presión sonora, esto se puede deber a que la explosión se hizo en la bóveda sur mientras que el receptor se colocó debajo de la bóveda principal.

5.1.2 Resultados grabación nº2.

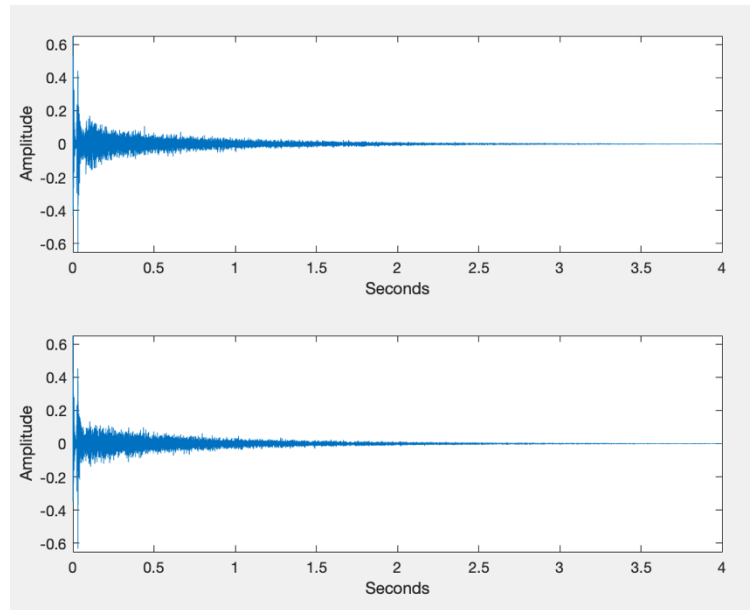


Figura 5-2: Respuestas al impulso en grabación 2.

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
X EDT (s)	3.107	4.221	6.358	6.021	4.734	2.647	0.838
X T30 (s)	5.157	4.616	5.703	6.933	5.568	3.359	1.453
X T20 (s)	4.96	4.67	6.416	6.866	5.541	3.261	1.320
X C80 (dB)	-2.88	-4.3	-1.57	-2.21	-3.04	2.01	6.760
X D50 (%)	26.4	25.6	38.1	36	29	55.2	79.2
Y EDT (s)	3.435	4.408	6.304	6.16	5.044	3.018	0.582
Y T30 (s)	3.948	5.283	7.024	N/A	5.425	3.4	1.592
Y T20 (s)	3.83	5.186	6.929	N/A	5.464	3.33	1.375
Y C80 (dB)	-1.87	-2.8	-1.61	-1.2	-2.61	2.08	8.7
Y D50 (%)	31.2	29.7	37.9	39.7	26.8	53.8	84.9

Tabla 5-2: Valores de los descriptores en micrófonos X e Y, grabación 2.

La captación de ambos micrófonos en esta medición es parecida, aunque se puede observar que el micrófono Y no captó suficiente decaimiento de la señal a 1000Hz. Los tiempos de reverberación alcanzan sus máximos para sonidos medios, y para sonidos muy agudos de altas frecuencias baja mucho, al ser una sala con un volumen tan grande, la disipación en el aire juega un papel fundamental en la atenuación de la señal, y su coeficiente de atenuación

es mucho mayor a frecuencias altas, es por ello por lo que tiene sentido que los tiempos de reverberación sean mucho menores a frecuencias altas [13]. En la D50 al haber tiempos de reverberaciones tan largos, la energía acústica se dilata en el tiempo, dando lugar a que haya menos de un 50% de esta energía en los primeros 50 ms. Ambos micrófonos captaron mucha presión acústica como se puede ver en la gráfica de la respuesta al impulso, esto se puede deber a que tanto receptor y emisor estaban debajo de la misma bóveda.

5.1.3 Resultados grabación n°3.

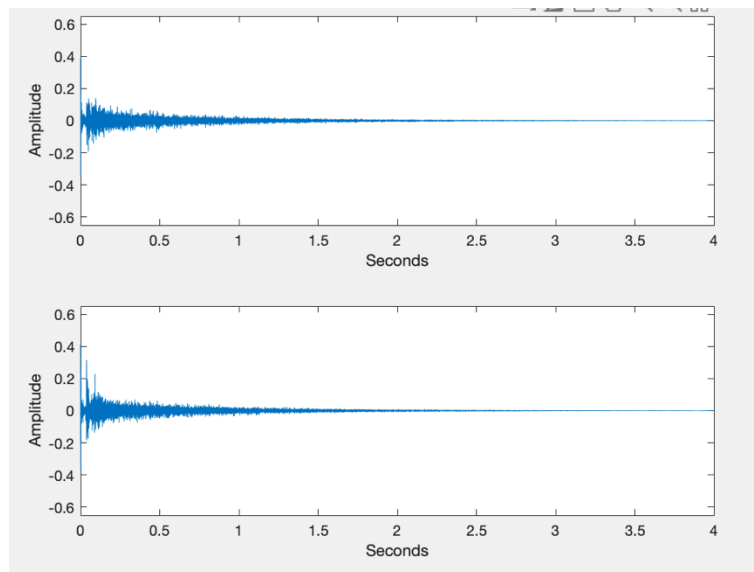


Figura 5-3: Respuestas al impulso en grabación 3.

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
X EDT (s)	3.899	5.063	6.503	6.562	4.554	2.676	1.012
X T30 (s)	4.141	7.298	6.4	6.836	5.467	3.697	1.461
X T20 (s)	4	5.21	7.0748	6.809	5.586	3.358	1.398
X C80 (dB)	0.9	-6.05	-4.86	-6.21	-1.9	0.23	3.10
X D50 (%)	54.1	19.2	24	10.5	32.5	38.8	53.4
Y EDT (s)	4.529	4.602	6.724	6.42	4.64	2.36	1.039
Y T30 (s)	29.939	5.481	6.083	6.881	5.361	3.535	1.467
Y T20 (s)	29.437	5.291	6.665	6.831	5.291	3.379	1.338
Y C80 (dB)	-9.02	-7.04	-6.65	-4.87	0.15	2.6	4.3dB
Y D50 (%)	11	13.9	15.2	18.7	46.8	55.3	58.1

Tabla 5-3: Valores de los descriptores en micrófonos X e Y, grabación 3.

Los valores de ambos micrófonos dan valores parecidos a los tiempos de reverberación en todas las frecuencias menos en la primera octava, en la cual el micrófono Y captó graves que perduraron mucho más en el tiempo. De nuevo la presión sonora disminuye más rápido a mayor frecuencia, y por tanto mayores serán también los valores de D50 y C80. Observando las gráficas de la respuesta al impulso, se puede ver que ambos micrófonos captaron

prácticamente la señal de manera muy parecida, a diferencia de la grabación 1 donde se apreciaba mucha diferencia entre ambos canales.

5.1.4 Resultados grabación nº4.

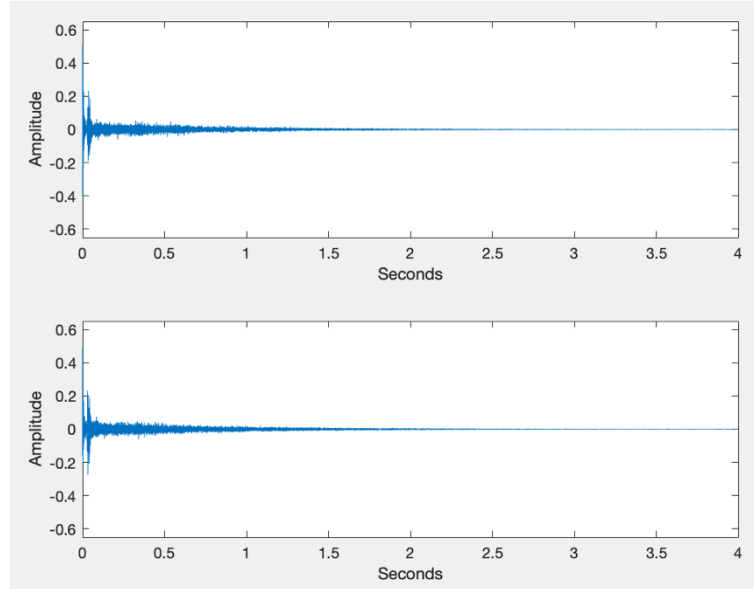


Figura 5-4: Respuestas al impulso en grabación 4.

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
X EDT (s)	4.927	4.67	6.72	6.683	5.555	2.957	0.482
X T30 (s)	26.772	12.806	6.033	6.898	5.33	2.918	1.45
X T20 (s)	29.632	5.069	6.554	6.756	5.352	3.2	1.341
X C80 (dB)	0.24	3.76	0.52	-0.43	0.28	2.24	9.98
X D50 (%)	48.5	68.7	53	42.9	47.8	58.2	87.6
Y EDT (s)	4.853	4.851	5.525	6.713	5.02	2.706	0.5
Y T30 (s)	31.838	12.24	5.789	6.959	5.338	2.997	1.488
Y T20 (s)	34.627	5.009	6.244	6.826	5.413	3.216	1.437
Y C80 (dB)	-1.98	0.96	1.34	-1.45	1.15	2.47	9.64
Y D50 (%)	37.3	54.4	53.6	33.8	53.1	56.9	86.4

Tabla 5-4: Valores de los descriptores en micrófonos X e Y, grabación 4.

En este caso ambos canales captaron la respuesta al impulso prácticamente igual, esto se debe a que el receptor se colocó en un punto donde hay simetría, ya que un micrófono apuntaba a la pared este y el otro a la oeste de la bóveda norte, ambas de estructura similar, y con el mismo número de columnas. De nuevo los tiempos de reverberación son muy altos a frecuencias bajas, ya que el coeficiente atenuación del aire es muy baja para sonidos graves. Observando las 4 grabaciones se puede ver que los materiales de la sala tienen poco efecto en la absorción del sonido, ya que son altamente reflectantes, el cristal que es un material susceptible a entrar en vibración y como se vio con los resonadores estos materiales absorben

acústicamente a frecuencias bajas. Su coeficiente de absorción a 125Hz es de 0.08-0.30 [14] es muy pequeño en comparación con el coeficiente de atenuación del aire a frecuencias altas.

5.1.5 Resultados grabación nº5.

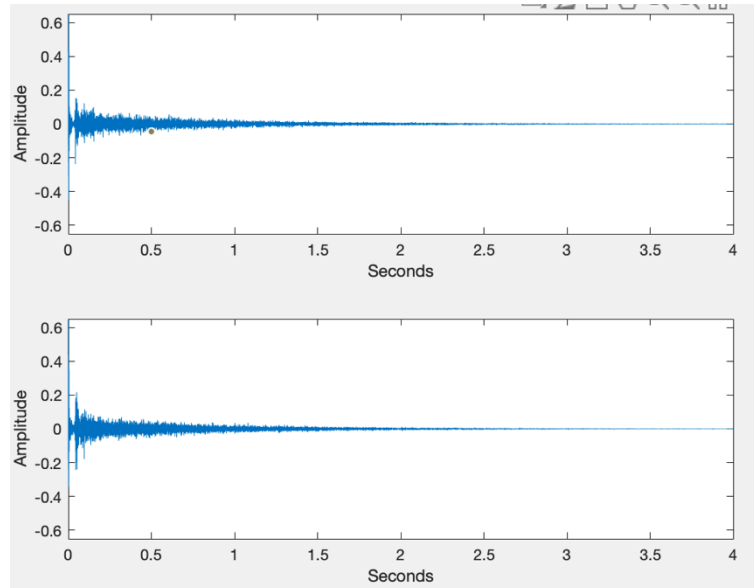


Figura 5-5: Respuestas al impulso en grabación 5.

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
X EDT (s)	4.002	2.792	6.614	6.371	4.738	2.854	1.056
X T30 (s)	N/A	5.265	6.871	6.842	5.099	3.052	1.414
X T20 (s)	4.373	5.146	6.987	6.802	5.232	3.217	1.319
X C80 (dB)	1.55	6.51	-0.8	-7.11	-0.72	-0.17	5.33
X D50 (%)	53.7	72.8	43.3	11.6	41.8	36.3	66.6
Y EDT (s)	3.756	3.08	6.155	6.548	4.594	2.497	1.051
Y T30 (s)	N/A	5.326	6.543	6.868	5.18	3.104	1.384
Y T20 (s)	3.129	5.212	6.78	6.806	5.332	3.294	1.28
Y C80 (dB)	-4.4	4.73	-2.87	-1.05	0.55	0.67	7.12
Y D50 (%)	27	59.1	27.6	21.6	46.7	37.7	76

Tabla 5-5: Valores de los descriptores en micrófonos X e Y, grabación 5.

En estas mediciones los canales no captaron un decaimiento de -5dBs a -35dBs a frecuencias bajas, por ello no hay datos. De nuevo nos encontramos con resultados de tiempos de reverberación parecidos en ambos canales en todas las octavas. La D50 y C80 son muy similares a frecuencias altas, mientras que a bajas los resultados difieren de nuevo.

5.1.6 Resultados grabación n°6.

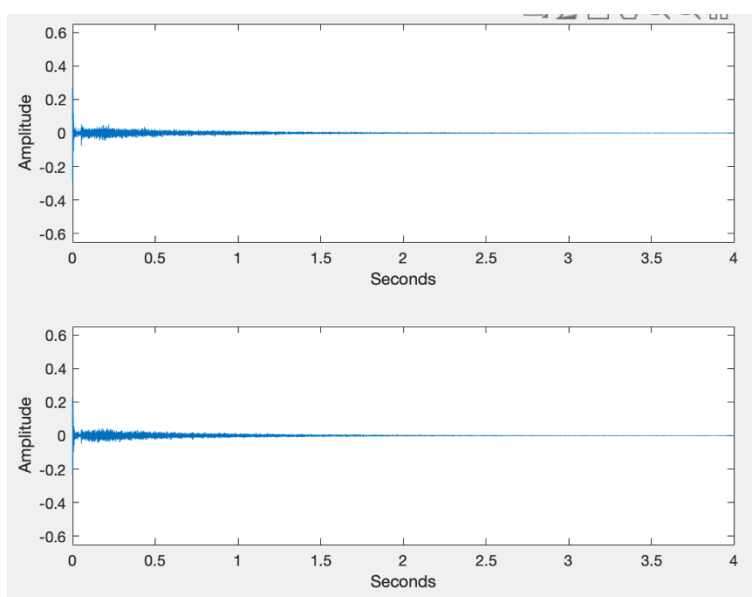


Figura 5-6: Respuestas al impulso en grabación 6.

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
X EDT (s)	3.433	5.323	7.553	7.21	5.911	3.551	1.514
X T30 (s)	N/A	21.868	5.341	6.973	5.393	7.144	5.804
X T20 (s)	4.947	6.386	5.871	6.789	5.526	4.045	1.532
X C80 (dB)	-5.09	-4.61	-5	-0.35	-0.93	2.68	7.2
X D50 (%)	22.4	14.7	21	44.9	38.4	60.1	77.9
Y EDT (s)	4.625	5.252	6.675	6.891	5.697	3.398	1.61
Y T30 (s)	39.561	19.323	4.662	6.951	5.286	7.423	8.611
Y T20 (s)	40.187	6.31	5.212	6.861	5.413	4.306	1.603
Y C80 (dB)	-12.29	-8.32	-7.72	-2.34	-2.78	0.7	6.23
Y D50 (%)	4.2	5.9	12.5	34	27.6	50.1	72.4

Tabla 5-6: Valores de los descriptores en micrófonos X e Y, grabación 6.

La grabación número 6 se realizó colocando el emisor en la cúpula central, y como se puede observar comparando la gráfica de la respuesta al impulso en el tiempo, la presión sonora es en este caso menor que en las mediciones anteriores, ya que mucha se atenúa al transmitirse por la cúpula. Los graves tienen unos tiempos de reverberación extremadamente largos en la grabación captada por el canal Y. Algo que afecta a como se reparte la energía de la señal en el tiempo y por ende a los descriptores D50 y C80, que en el micrófono Y la D50 es alrededor de un 10% más baja que en el canal X, en todas las octavas menos en la de 125Hz y 8000Hz, en esta última es de nuevo donde mayor % de la energía está contenida en los primeros 50 ms, un comportamiento que tiene la sala en todos los puntos donde se han realizado las grabaciones, lo que parece indicar que es efectivamente el aire y no los materiales de la sala, el que mayor contribución tiene en la disipación de energía de la señal.

5.1.7 Resultados grabación nº7.

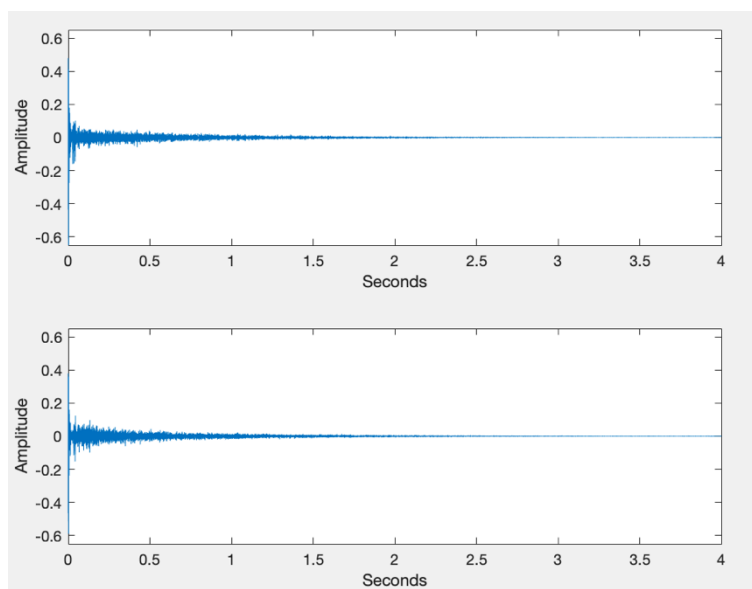


Figura 5-7: Respuestas al impulso en grabación 7.

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
X EDT (s)	3.433	5.323	7.553	7.21	5.911	3.551	0.736
X T30 (s)	N/A	21.868	5.341	6.973	5.393	7.144	1.394
X T20 (s)	4.947	6.386	5.871	6.789	5.526	4.045	1.197
X C80 (dB)	-5.09	-4.61	-5	-0.35	-0.93	2.68	9.84
X D50 (%)	22.4	14.7	21	44.9	38.7	60.1	85.9
Y EDT (s)	4.472	3.947	6.27	5.737	4.256	2.048	0.739
Y T30 (s)	N/A	5.332	5.793	6.947	5.281	8.619	1.387
Y T20 (s)	3.889	5.111	6.476	7.088	5.274	3.353	1.16
Y C80 (dB)	-1.76	-2.65	1.14	-3.64	0.58	1.85	10.24
Y D50 (%)	34.5	33	55.2	25.9	41.9	53.8	86.7

Tabla 5-7: Valores de los descriptores en micrófonos X e Y, grabación 7.

De nuevo en la medición no se encuentra caída de -5dB a -35dB a 125Hz. Los tiempos de reverberación captados por ambos micrófonos son similares, excepto para T30 a 250 Hz donde de nuevo se capta un tiempo de decaimiento excesivamente largo, el resto siguen un comportamiento muy parecido al observado en mediciones pasadas. Observando la gráfica, podemos observar que hay una mayor presión de nuevo al volver generar el impulso en las bóvedas de cañón y no en la cúpula.

De nuevo hay diferencias apreciables entre la energía acústica medida por ambos canales en los primeros ms, resultando en C80 y D50 diferentes en ambas mediciones, excepto a frecuencias altas donde de nuevos ambos resultados son parecidos.

5.1.8 Resultados grabación nº 8 y nº 9.

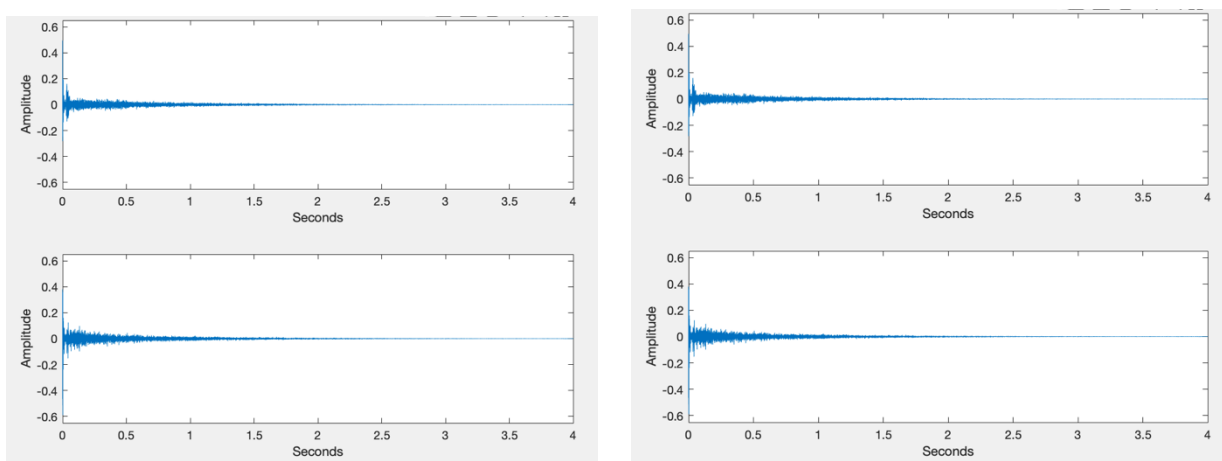


Figura 5-8: Respuestas al impulso en grabación 8 y 9.

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
X EDT (s)	4.196	5.768	6.454	6.915	5.08	2.962	0.861
X T30 (s)	22.248	15.028	6.868	6.925	5.283	2.94	1.425
X T20 (s)	23.534	5.472	7.006	6.89	5.395	3.136	1.363
X C80 (dB)	-5.28	-0.82	-2.7	-1.05	3.52	3	7.54
X D50 (%)	22.2	41.6	33.8	39.9	67	62.6	79.4
Y EDT (s)	4.505	5.982	6.155	6.679	4.668	2.805	0.762
Y T30 (s)	N/A	14.637	6.786	6.831	5.318	3.085	1.437
Y T20 (s)	4.8	5.45	7.081	6.624	5.357	3.174	1.429
Y C80 (dB)	-4.07	-1.07	-2.38	0.53	4.41	1.98	7.25
Y D50 (%)	28.8	37.1	34.1	48.7	71.5	56	77.9

Tabla 5-8: Valores de los descriptores en micrófonos X e Y, grabación 8.

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
X EDT (s)	4.813	4.616	7.340	7.129	5.43	3.254	0.848
X T30 (s)	30.025	14.425	5.708	6.823	5.277	25.614	1.863
X T20 (s)	34.436	5.319	6.114	6.74	5.345	39.78	1.428
X C80 (dB)	-0.9	-0.52	-1.24	-4.09	-2.84	2.65	6.14
X D50 (%)	51.2	44.9	40.9	26.2	30.6	60.8	72.3
Y EDT (s)	5.298	6.102	6.705	6.797	5.151	2.966	0.663
Y T30 (s)	34.886	15.624	5.364	6.816	5.249	25.787	1.916
Y T20 (s)	37.254	5.265	5.944	6.907	5.44	40.019	1.432
Y C80 (dB)	-2.28	-1.44	0.03	-0.9	-1.99	2.09	7.52
Y D50 (%)	42.3	37.6	48.5	43.1	33.9	54.2	78.7

Tabla 5-9: Valores de los descriptores en micrófonos X e Y, grabación 9.

En la grabación 8 el micrófono Y no consigue medir suficiente decaimiento a 125Hz para T30, y los resultados de T20 difieren bastante de los medidos por el X en esta octava, aunque en el resto los valores de los descriptores son parecidos.

En el mismo punto se realizó una segunda medición la cual vuelve a dar resultados parecidos entre ambos canales, pero que en comparación a la grabación anterior se encuentra un T20 y T30 muy largo a 4000Hz, observando las gráficas de la respuesta al impulso no observo diferencia apreciable entre ambas, por lo que decidí escuchar de nuevo ambas grabaciones, para compararlas y en los finales en los que la reverberación de la explosión se está acabando se escuchan de manera diferente y con distinta intensidad el piar de los pájaros, esto puede ser una explicación a muchos de los tiempos de reverberación tan largos que hay ya que enmascaran cualquier posible reflexión a partir de cierto momento en el que la señal decae a ciertos dB.

5.1.9 Resultados grabación nº10.

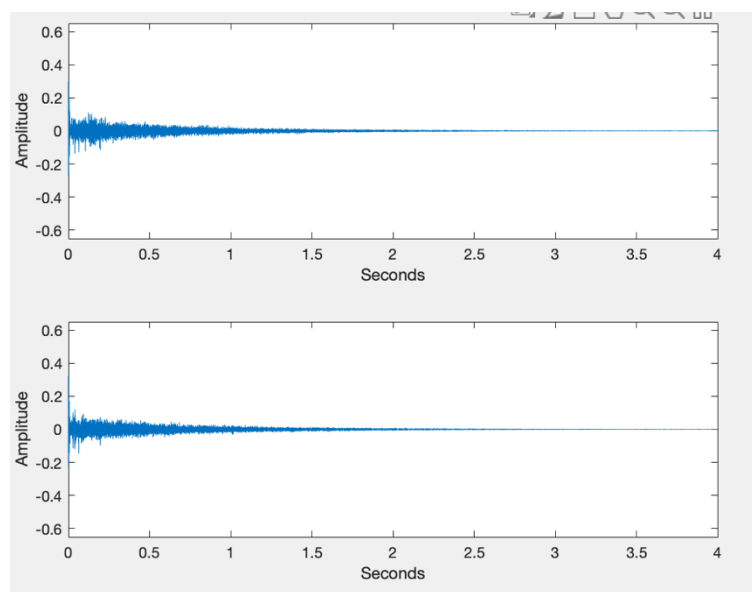


Figura 5-9: Respuestas al impulso en grabación 10.

	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
X EDT (s)	3.425	6.6	6.532	6.142	4.97	3.149	1.220
X T30 (s)	N/A	5.162	6.15	6.866	5.197	3.016	1.171
X T20 (s)	3.878	4.867	6.625	6.666	5.298	3.199	1.276
X C80 (dB)	-5.19	-4.14	-3.73	-7.52	-5.32	-2.25	5.7
X D50 (%)	20.7	23.2	27.8	11.7	17.6	32.8	69.4
Y EDT (s)	4.69	6.389	6.794	6.651	5.044	3.344	1.311
Y T30 (s)	N/A	19.61	7.254	6.709	5.296	3.141	1.297
Y T20 (s)	N/A	6.267	7.172	6.77	5.374	3.236	1.367
Y C80 (dB)	-2.1	-4.1	-6.38	-6.89	-5.39	-2.7	6.26
Y D50 (%)	32.7	25.9	17	11.9	14.3	29.9	74.7

Tabla 5-10: Valores de los descriptores en micrófonos X e Y, grabación 10.

En la última medición del palacio el micrófono Y no capta suficiente decaimiento tanto para T30 como para T20 y el X solo para T30 en la primera octava. Para frecuencias medias y altas, los descriptores obtenidos de ambas grabaciones son parecidos. En este punto los tiempos de reverberación son muy parecidos a los medidos en otros puntos. A excepción del T30 en 250 Hz que de nuevo es muy largo. La D50 y C80 son muy bajas para todas las frecuencias menos para las muy altas como ya se observaba en otras mediciones.

5.1.10 Resultados grabación en cámara anecoica.

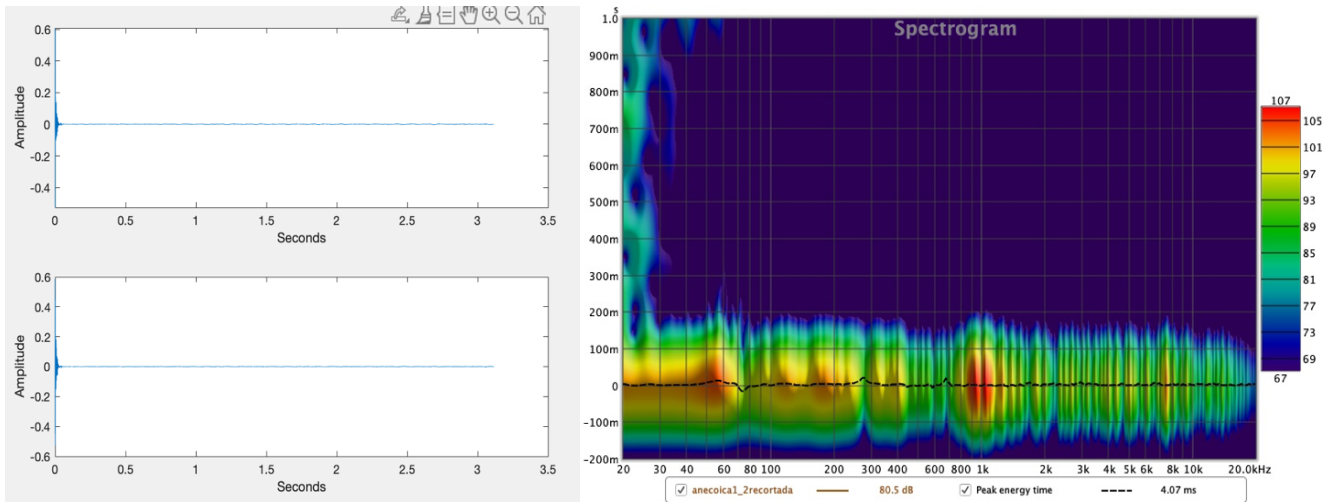


Figura 5-10: Respuestas al impulso y su espectrograma en cámara anecoica.

X EDT (s)	0.044
X T30 (s)	0.056
X T20 (s)	0.061
X C80 (dB)	37.6
X D50 (%)	100
Y EDT (s)	0.034
Y T30 (s)	0.063
Y T20 (s)	0.058
Y C80 (dB)	40.29
Y D50 (%)	100

Tabla 5-11: Valores medios de los descriptores en micrófonos X e Y, grabación en cámara anecoica.

En la sala anecoica la señal acústica medida no contará ni con reflexiones tempranas ni tardías ya que, para simular el campo abierto, se consigue una absorción de está cuando incide en los límites del recinto, por ello la medición es del sonido directo. Observando la gráfica de la respuesta al impulso esto se hace evidente, ya que se asemeja a lo que podría ser un impulso unidad, la D50 de ambos canales nos indica lo mismo ya que el 100% de la energía de la señal ocurre en los primeros 50 ms.

Para que una fuente pueda ser considerada adecuada para medir la respuesta al impulso de una sala tiene que dar una cobertura suficiente a todas las frecuencias del espectro auditivo. La explosión medida en la sala anecoica se podría considerar como la señal de la fuente sin pasar por ningún sistema que afecte a sus condiciones iniciales. Para ver si el globo es una fuente fiable obtengo el espectrograma de su explosión donde se puede ver que efectivamente su explosión cubre todas las frecuencias, aunque sí que genera una mayor energía a 1000Hz y bajas frecuencias.

5.2 Comparación e interpretación de las mediciones.

Para comparar las mediciones se han cogido los valores de los descriptores obtenidos gracias a Room Eq. Wizard, en este caso sin separar por octavas. Debido a que en muchas muestras a ciertas frecuencias no se llegaba a medir un decaimiento de 30dB, T30 no se comparará.

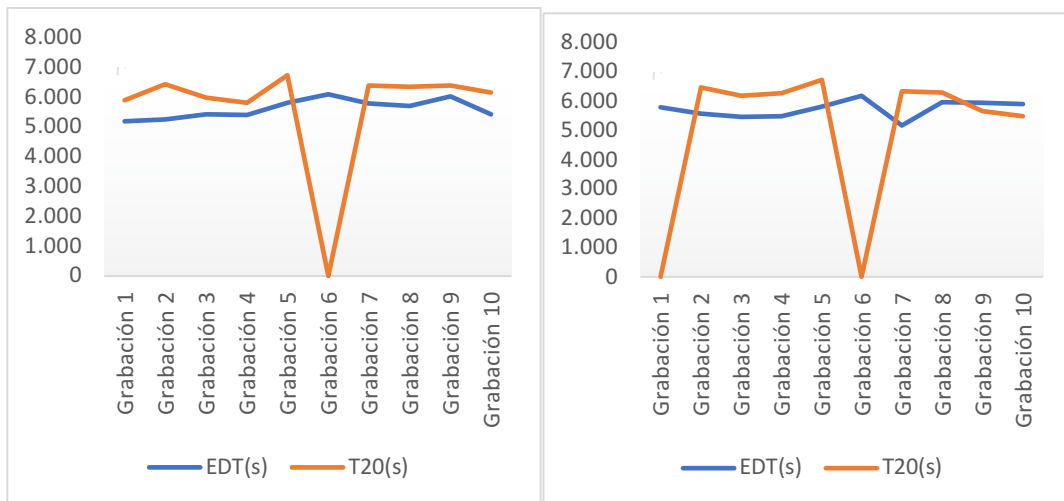


Figura 5-11: Tiempos de reverberación micrófono X/Y.

En la grabación 5 el canal Y da problemas a la hora de sacar los tiempos de reverberación y se han usado en este caso los del micrófono X, para construir la gráfica. Se puede observar que ambos micrófonos han medido una respuesta parecida en todas las mediciones excepto en la primera, en la cual el micrófono Y no captó suficiente decaimiento de la señal. Todos los puntos de la sala tienen un comportamiento similar, aunque en la grabación 6 parece que el hecho de poner un emisor debajo de la cúpula disminuye mucho la presión acústica percibida en las bóvedas, hasta el punto de que en ninguno de los 2 canales se ha podido obtener T20.

Los tiempos de reverberación obtenidos en todas las muestras son muy largos, esto indica que el palacio no tiene una acústica arquitectónica favorable ni para el habla ni para la música.

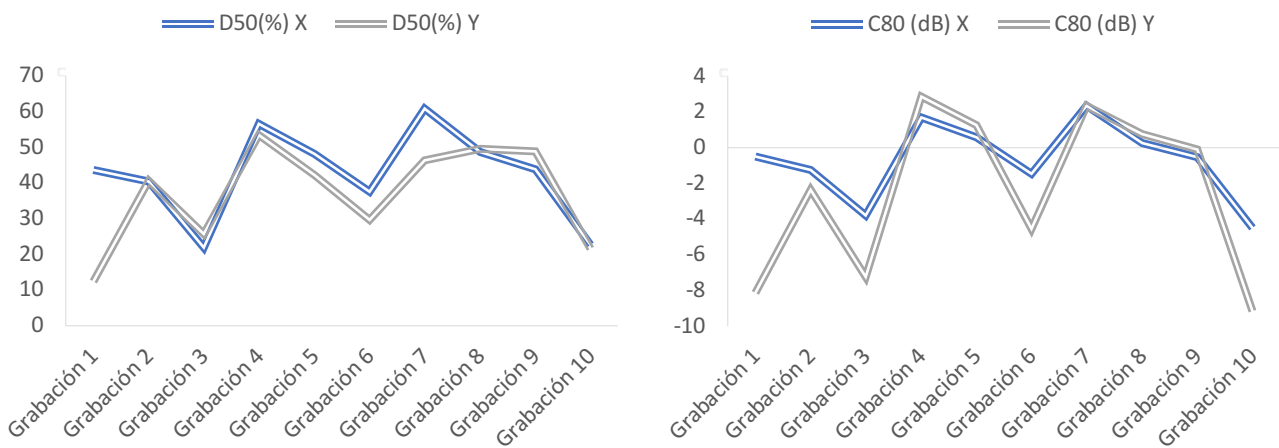


Figura 5-12: D50 y C80 de las mediciones.

La claridad en los primeros 80ms y definición en los primeros 50 ms, tienen comportamientos parecidos en ambos canales por cada grabación, la única en la que difiere el comportamiento de un micrófono a otro es en la grabación 1.

Mirando la D50 podemos ver que solo hay 2 grabaciones en las cuales se ha medido una señal que contenga más de un 50% de la energía en los primeros 50 ms.

En ambas, el emisor se colocaba cerca del centro de las bóvedas de cañón mientras que los receptores estaban colocados entre columnas en zonas donde el techo tenía una menor altura. Las grabaciones para las cuales D50 da peores resultados son en las cuales la explosión se hizo en el centro de las bóvedas de cañón y a poca distancia de la cúpula principal. Se puede observar claramente en la grabación 6 que colocar tanto al emisor como al receptor en puntos cercanos a esta zona influye muy negativamente en la inteligibilidad de la palabra.

Como ya se comentó previamente para que se pueda considerar como buena la acústica arquitectónica para la música el valor de C80 tiene que estar entre los -2dB y 3dB, este valor varía en su rango dependiendo del género musical. Casi todos los puntos de grabación responden con buenos valores para el C80, a excepción de los puntos 1, 3, 6 y 10.

La sala presenta por tanto un comportamiento que no favorece la articulación de la palabra debido principalmente a su volumen, cubriendo ciertos límites del recinto con materiales absorbentes se puede conseguir bajar los tiempos de reverberación, algunos tipos de música podrían encontrar una buena acústica para su desempeño en el palacio.

5.3 Análisis de tiempos de reverberación anormales.

Tras observar en las mediciones que en frecuencias bajas alrededor de 125 Hz algunas mediciones daban tiempos de reverberación muy largos, volví a escuchar los audios de las grabaciones, en los cuales al acabar las reflexiones tardías de la explosión lo único que se oía era el ruido de fondo que había en todo momento de pájaros piando. Por ello usando Matlab, volví a recortar .wav de la cuarta y novena grabación, ya que ambas mediciones tienen estos resultados.

En esta ocasión recorté hasta el momento en el que solo se oía el ruido ambiente, compuesto principalmente por el sonido que realizan estos animales, realicé un espectrograma para entender que frecuencias son más comunes en el tiempo donde solo se escucha el paisaje sonoro del palacio.

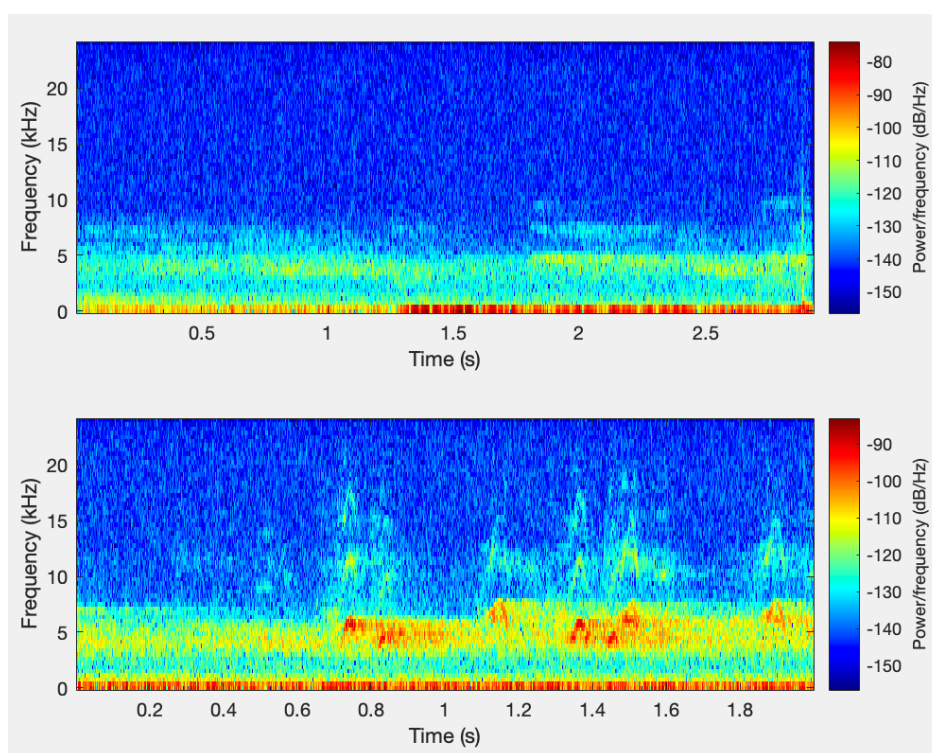


Figura 5-13: Espectrogramas de sonido ambiente de grabación 4 y 9.

Tras obtener los espectrogramas se hace evidente que el piar de los pájaros tiene un amplio rango de frecuencias, aunque mayoritariamente se compone por bajas y más cercanas a la primera octava. Es por esto por lo que en algunas mediciones se encuentran resultados poco fiables alrededor de 125 Hz.

6 Conclusiones y trabajo futuro

6.1 Conclusiones

Teniendo en cuenta que es un edificio de finales del s.XIX construido durante las Exposiciones Universales con el objetivo de enseñar materiales hasta entonces poco utilizados en la arquitectura, mejorar la acústica de un espacio arquitectónico de estas características solo es posible añadiendo pequeños elementos, que a poder ser no afecten al diseño original, el cual en conjunto con sus materiales de construcción fue concebido para hacer la función de invernadero en el que guardar especies de plantas exóticas.

En el trabajo se partía de la premisa de usar estos elementos y diferentes posicionamientos de fuente y receptor para poder adaptar el palacio a diferentes situaciones sonoras ya que actualmente se usa únicamente como un espacio de exposiciones. Tras las mediciones se ha podido observar que las dimensiones de la sala no favorecen la acústica ni para el uso de la palabra ni para el de la música debido a sus altos tiempos de reverberación, que dificultan la inteligibilidad y el confort acústico de los posibles asistentes a un evento.

Mejorar la acústica usando resonadores, absorbentes, reflectores o difusores es posible, pero al ser un edificio con las características anteriormente descritas habría que diseñar sujeciones para estos elementos que puedan ser portables y adaptables a diferentes situaciones y que no sean difíciles de instalar y desinstalar en el palacio.

La sala es ya de por sí muy espaciosa y por ello los tiempos de reverberación serán altos, una posible solución fácil de aplicar para bajarlos puede ser añadir cortinas de materiales porosos que cubran los ventanales, pero aun así dudo que sea suficiente para bajarlos a 0.7-1.2s si la sala se tiene que usar para el habla o 1.5-2.2s para el caso de música no religiosa, la cual sí que fue concebida para ser cantada en edificios con mucha reverberación como catedrales.

En el caso de la metodología utilizada, se puede ver que los globos pueden ser una fuente adecuada para obtener la respuesta al impulso de una sala.

6.2 Trabajo futuro

Tras ver los resultados y la imposibilidad de añadir muchos elementos al palacio para mejorar su respuesta acústica, se podría continuar desde la rama del diseño industrial, construyendo soportes para los elementos acústicos que puedan ser portables y de fácil montaje para adaptar la sala sin afectar al diseño original de esta.

Otro lado por el que se podría continuar es por la del modelado 3D, construyendo un espacio 3D con herramientas de diseño como Unreal Engine, una herramienta avanzada que sirve tanto para la creación de efectos especiales como para el diseño de videojuegos. Nos permite no solo recrear el palacio si no también construir un entorno sonoro 3D que se asemeje a como se comporta la sala en el mundo real ante el sonido en diferentes puntos, lo cual se puede usar para simulaciones de realidad virtual, esta técnica recibe el nombre de auralización.

Bibliografía

- [1] D. Masovic, “Room Acoustics Lecture Notes” Technische Universitat Berlin, 2018, pp. 7, 106, 8, 149-155, 128-132, 100, 95.
- [2] A. Carrión Isbert, “Diseño acústico de espacios arquitectónicos” Ediciones UPC, 1998, pp. 123-135, 115-122, 75-77, 89-108, 74.
- [3] T. Lokki, J. Pätynen, “Lateral reflections are favorable in concert halls due to binaural loudness.” *J. Acoust. Soc. Am.* 2011, 130, EL345–EL351.
- [4] B. V. Pentcheva, “Icons of Sound: Auralizing the Lost Voice of Hagia Sophia”. Stanford University, <https://www.journals.uchicago.edu/doi/full/10.1086/693439>
- [5] N. M. Papadakis, G. E. Stavroulakis, “Low Cost Omnidirectional Sound Source Utilizing a Common Directional Loudspeaker for Impulse Response Measurements”, Technological Educational Institute of Crete, 2018.
- [6] K. Jambrosic, M. Horvat, H. Domitrovic, “Reverberation time measuring methods.” *J. Acoust. Soc. Am.* **2008**, 123, 3617.
- [7] Wayverb software. <https://reuk.github.io/wayverb/>
- [8] Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios (ISO 3382-2:2008)
- [9] D. Ramos “Tecnologías de Audio, Tema 2: Sistemas de audio” pp. 69, 71.
- [10] D. Ramos “Tecnologías de Audio, Tema 3: Electroacústica, micrófonos”
- [11] <https://delegacion.madrid.csic.es/wp-content/uploads/2020/11/ITEFI.pdf>
- [12] Diseños de Poloro, 3D Warehouse. <https://3dwarehouse.sketchup.com/user/1095825361383531898102355/Poloro>
- [13] H.E. Bass, L.C. Sutherland, A.J. Zuckerwar, D.T. Blackstock, D.T. Hester (1995) Atmospheric absorption of sound: Further developments. *J. Acoust. Soc. Am.* 97, 680
- [14] CERN BOOK BACK MATTER
https://cds.cern.ch/record/1251519/files/978-3-540-48830-9_BookBackMatter.pdf

