



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

DPTO. INGENIERÍA DE COMUNICACIONES
TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES

TRABAJO FIN DE GRADO

SIMULACIÓN, MEDICIÓN Y ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO DE RECINTOS

GRADO EN INGENIERÍA
ELECTRÓNICA, ROBÓTICA Y MECATRÓNICA
MENCIÓN EN ROBÓTICA Y AUTOMATIZACIÓN

Autor: David Ruiz Ruiz
Tutor: Sergio Fortes Rodriguez
Cotutor: Hao Qiang Luo Chen

Málaga, Septiembre de 2023

SIMULACIÓN, MEDICIÓN Y ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO DE RECINTOS

Autor: David Ruiz Ruiz

Tutor: Sergio Fortes Rodriguez

Cotutor: Hao Qiang Luo Chen

Departamento: Ingeniería de Comunicaciones

Titulación: Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica.

Palabras clave: Acondicionamiento, Acústica, Estudio de grabación, Frecuencia, Medición, Reverberación, Resonancia.

Resumen

Los avances en el campo de la acústica han hecho que ésta adquiera un papel esencial a la hora de diseñar y acondicionar salas con determinados objetivos acústicos. En este Trabajo de Fin de Grado se ha realizado un estudio acústico de la Sala de Grabación del estudio de grabación Soho Sessions de Málaga.

Utilizando una fuente acústica omnidireccional y el software EASERA, se han realizado una serie de mediciones in-situ de la respuesta impulso, de la que se han obtenido y estudiado los parámetros acústicos que caracterizan la sala de grabación. Se ha realizado un modelo CAD de la Sala de Grabación y simulaciones acústicas usando el software EASE.

Con base a los resultados obtenidos, se ha elaborado una propuesta de acondicionamiento acústico de la sala para mejorar su acústica.

ENCLOSURES ACOUSTIC SIMULATION, MEASUREMENT AND CONDITIONING

Author: David Ruiz Ruiz

Supervisor: Sergio Fortes Rodriguez

Co-supervisor: Hao Qiang Luo Chen

Department: Ingeniería de Comunicaciones

Degree: Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Keywords: Acoustics, Acoustic treatment, Recording Studio, Frequency, Measuring, Reverberation, Resonance.

Abstract

Improvements in the field of acoustics have played an essential role on the designing and conditioning rooms with specific acoustic goals. In this Bachelor's Thesis, an acoustic study of the Recording Room of Soho Sessions Recording Studio has been carried out.

A set of acoustical measurements of the impulse response has been carried out in-situ using a omnidirectional loudspeaker and the EASERA software. From this set of measurements, the acoustic parameters that characterize the room have been studied. A CAD model of the Recording Room and a set of acoustic simulations have been made using the software EASE.

Based on the obtained results, a proposal of acoustic treatments of the room has been developed to improve its acoustics.

All you're doing is postponing decisions.
Limitations are what make great music.

Matt Wallace

Agradecimientos

A Hao, Sergio Fortes, Salvador Luna, y al departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de la UMA por su apoyo continuo, sus ánimos, y por permitirme realizar el TFG con su departamento en un campo de estudio tan apasionante como es la acústica.

A Javier Villalobos, Daniel Pineda, Daniel Benitez, y a todas aquellas personas que me han transmitido su pasión por el campo del Sonido Profesional.

A mi familia, por apoyarme y acompañarme en toda mi vida. Por sus ánimos, su apoyo, su ayuda.

Acrónimos

ADR	Automated Dialogue Replacement
ASIO	Audio Stream Input/Output
BBC	British Broadcasting Corporation
CAD	Computer Assisted Design, Diseño Asistido por Computador
dB	Decibelio
D/R Ratio	Direct to Reverberant energy Ratio, Relación entre campo Directo y campo Reverberante
EASE	Enhanced Acoustic Simulator for Engineers
EASERA	Electronic and Acoustic System Evaluation and Response Analysis
EDT	Early Decay Time
EII	Escuela de Ingenierías Industriales
ETSIT	Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación
TFG	Trabajo Fin de Grado
RT	Reverberation Time, Tiempo de Reverberación
RTm	RT medio, según definición de la BBC
SPL	Sound Pressure Level, Nivel de Presión Sonora

Glosario

Aislamiento Acústico	Tratamiento acústico cuyo objetivo es impedir que el sonido entre o salga de un recinto.
Acondicionamiento Acústico	Tratamiento acústico cuyo objetivo es mejorar la sonoridad de un recinto.
Altavoz	Caja acústica que genera sonido excitada por una corriente eléctrica. Se compone por la caja y uno o varios Drivers.
ASIO	Protocolo de audio digital propietario de Steinberg para Windows que proporciona baja latencia y alta fidelidad.
Decibelio	Unidad logarítmica que representa dos magnitudes. Si se comparan potencias $dB = 10\log(P1/Pref)$
Driver	Elemento que genera el sonido en un altavoz, se compone de una membrana, una bobina y un imán. La membrana vibra excitada por una corriente eléctrica que genera un campo magnético.
Fuente Omnidireccional	Altavoz que se caracteriza por tener un patrón polar omnidireccional, es decir, emite sonido por igual en todas las direcciones.
Interfaz de Audio	Tarjeta de sonido, digitaliza una señal de audio de entrada, y dispone de salidas de audio analógicas. Permite conectar micrófonos y altavoces al ordenador.

Micrófono de Medición	Micrófono diseñado para realizar mediciones acústicas. Se caracteriza por tener un patrón polar omnidireccional, y una respuesta en frecuencia plana.
Tiempo de Reverberación	Tiempo entre que una fuente deja de emitir sonido, hasta que su nivel disminuye en 60 dB SPL.
Señal impulso	Señal con valor $\delta_t = \begin{cases} \infty & \text{si } t = 0 \\ 0 & \text{si } t \neq 0 \end{cases} \quad (1)$ y además $\int_{-\infty}^{\infty} \delta_t dt = 1 \quad (2)$
SPL	Nivel de Presión Sonora medido en Decibelios. Se utiliza el nivel de referencia de $20\mu Pa$. $dB_{SPL} = P1/(20\mu Pa)$
Tweeter	Driver diseñado para reproducir frecuencias agudas.
Woofers	Driver diseñado para reproducir frecuencias medias.

Índice

Resumen	III
Abstract	V
Agradecimientos	IX
Acrónimos	XI
Glosario	XIII
1 Introducción	1
2 Fundamentos teóricos	3
2.1 Sonido	4
2.1.1 Presión sonora y nivel de presión sonora (SPL)	4
2.1.2 Comportamiento del sonido	5
2.1.3 Respuesta en frecuencia	5
2.2 Acústica de recintos	7
2.2.1 Tiempo de Reverberación	7
2.2.2 Early Decay Time	9
2.2.3 Definición	9
2.2.4 Claridad de la voz y Claridad musical	10
2.2.5 Bass Ratio o Calidez Acústica	11
2.2.6 D/R Ratio	11

2.2.7	%ALcons	11
2.2.8	Modos propios de una sala	11
3	Descripción de la Sala de Grabación de Soho Sessions	13
3.1	Descripción de la Sala	13
3.2	Planos de la Sala de Grabación	14
3.3	Materiales de acondicionamiento acústico	15
3.4	Imágenes del estudio	16
4	Estudio acústico de la Sala de grabación de Soho Sessions	19
4.1	Mediciones acústicas	19
4.1.1	Equipo utilizado	21
4.1.2	Configuración de software EASERA	22
4.1.3	Realización de las mediciones acústicas	27
4.2	Resultados experimentales	29
4.2.1	Diagrama Waterfall	30
4.2.2	Ruido ambiente	33
4.2.3	Tiempo de reverberación	36
4.2.4	Respuesta en frecuencia	46
4.2.5	Otros parámetros acústicos	48
5	Caracterización a partir de simulación	51
5.1	Modelado de la Sala de Grabación en 3D	51
5.2	Simulación acústica	54
5.3	Tiempo de reverberación	57
5.4	Respuesta en frecuencia	60
5.5	Gráfico Waterfall	61
6	Propuestas de mejora	63
6.1	Difusores acústicos	63
6.2	Resonadores	67

6.3 Presupuesto	75
Conclusiones	77
I ANEXOS	81
A Tabla de mediciones acústicas realizadas	83
B Diagramas Waterfall (Mediciones)	85
C Presupuesto	89
Bibliografía	93

Índice de figuras

2.1	Resultados de la simulación de respuesta en frecuencia de la Sala.	6
2.2	Ecograma de la Sala de Grabación.	7
2.3	Reflexión de ondas en una superficie. Cada vez que se produce una reflexión, el material absorbe energía en función del coeficiente de absorción.	8
2.4	Representación de alguno de los tipos de modos propios.	12
3.1	Situación del estudio de grabación Soho Sessions.	14
3.2	Plano de la Sala de Grabación.	15
3.3	Detalle de la Sala de Grabación.	16
3.4	Fotografías del estudio de grabación Soho Sessions.	17
4.1	Equipo utilizado para la obtención de las medidas experimentales.	21
4.2	Pantalla inicial de EASERA.	22
4.3	Ventana de configuración de EASERA.	23
4.4	Detalles del proceso de Calibrado de Salida en EASERA.	24
4.5	Detalles del proceso de calibrado de Entrada y micrófono en EASERA.	24
4.6	Selección de estímulos para realizar la medición.	25
4.7	Detalles del proceso de ajuste de nivel y configuración de la medición de EASERA.	26
4.8	Resultado de medición acústica en EASERA.	27
4.9	Esquema de conexonado del equipo de medición.	28
4.10	Fuente omnidireccional situada en la posición B.	29
4.11	Plano de situación de las diferentes posiciones de medida.	30

4.12 Diagrama Waterfall de la posición de medición A.	32
4.13 Detalles del proceso de construcción.	33
4.14 Recomendaciones de ruido de fondo.	34
4.15 Recomendaciones de ruido de fondo de la BBC.	35
4.16 Recomendaciones de Reverberación de la BBC para estudio de voz en función de T_m	38
4.17 Recomendaciones de Reverberación de la BBC para estudio de Musica grande en función de T_m	39
4.18 Valores Típicos de RT de estudios musicales, BBC WPH 021. . .	39
4.19 Mediciones de RT30 en la sala para los diferentes puntos.	40
4.20 RT30 promedio de todas las mediciones.	41
4.21 Mediciones en la sala de RT30 junto con tolerancias recomendadas por la BBC (Figura 4.16).	42
4.22 Mediciones de RT30 en la sala añadiendo frecuencias graves. . .	44
4.23 Detalle de difusores acústicos comerciales	45
4.24 Mediciones de respuesta en frecuencia de la fuente omnidireccional en la sala.	47
5.1 Plano de la sala basado en las mediciones realizadas in-situ. . . .	52
5.2 Sala cargada en EASE.	53
5.3 Modelos de Sketchup básico y completo.	54
5.4 Ventana de Optimize RT, con el tiempo de reverberación estimado, junto con el medido experimentalmente.	55
5.5 Ventana de EASE con las areas de escucha.	56
5.6 Resultados de RT30 promedio en las mediciones, y la simulación con Aura (sin y con alfombras).	57
5.7 Resultados de las mediciones y las simulaciones de RT30.	58
5.8 Resultados de la simulación de RT30 con curva de tolerancias de BBC para valores entre 20 Hz y 10000 Hz.	59
5.9 Resultados de la simulación de respuesta en frecuencia de la sala. .	61
5.10 Gráfico Waterfall obtenido en la simulación.	62
6.1 RPG Omnifussor.	64

6.2	Valores de Absorción y Scattering añadidos a la base de datos de materiales de EASE.	65
6.3	Sala con los difusores colocados (en negro).	66
6.4	RT30 con y sin difusores.	67
6.5	Tamaño de agujeros y diámetro en relación al porcentaje de perforación.	69
6.6	Coefficientes de absorción de diferentes paneles perforados.	69
6.7	Situación del panel perforado en la Sala.	70
6.8	Resultados de la simulación de RT30 al añadir los paneles perforados.	71
6.9	Tiempo de reverberación promedio, máximos y mínimos de RT30 simulados en sala.	73
6.10	Simulación de RT30 en sala antes y después de aplicar las propuestas de mejora (punto de medición A).	74

Índice de Tablas

4.1	Categorías de ruido ambiente establecidas por la BBC.	35
4.2	Resultados de mediciones de ruido ambiente.	36
4.3	Tabla de parámetros típicos en auditorios.	37
4.4	Mediciones de tiempo medio de reverberación con RT30, en s. . .	41
4.5	Tiempos de reverberación en frecuencias inferiores a 100 Hz en la posición A.	43
4.6	Mediciones de otros parámetros acústicos en la Sala de Grabación.	48
6.1	Resultados de los parámetros acústicos con paneles o con difusores.	65
A.1	Mediciones acústicas realizadas.	83

Capítulo 1

Introducción

Desde los orígenes del ser humano, la música ha formado parte de su existencia. Existen registros de instrumentos musicales encontrados que datan de hace 30000 años de antigüedad.

En su obra *De Architectura* [1], Marco Vitrubio Polio (80 a.C. - 15 a.C.), arquitecto de Julio Cesar, ya realizaba recomendaciones para diseñar y mejorar la acústica de teatros romanos. Recomendó, por ejemplo, el uso de vasos de bronce dimensionados en relación al teatro como resonadores afinados con respecto a las frecuencias de la voz y en series armónicas para potenciar el sonido en los teatros.

Ya en el Medioevo, es bien conocido que las iglesias de los monasterios cistercienses habrían sido proyectadas teniendo en cuenta un comportamiento acústico que favorecía escuchar los cantos sagrados [2]. Las desnudas bóvedas de cañón habrían servido para aumentar los tiempos de reverberación, lo que prolonga el sonido de los cantos gregorianos.

En 1895, Wallace Clement Sabine realizó una serie de experimentos con el objetivo de mejorar la acústica del Museo de Arte Fogg en la Universidad de Stanford [3]. Sabine se dió cuenta en aquel entonces de que aumentando el número de asientos con material aislante mejoraba la acústica de la sala. Descubrió que el tiempo que pasaba entre que dejaba de emitir un sonido y éste dejaba de ser audible es inversamente proporcional a la absorción de la sala. Este fenómeno se llama reverberación. Estos experimentos fueron los que dieron nacimiento a la Acústica Arquitectónica moderna tal como se conoce hoy en día.

La acústica se ha convertido hoy en un campo muy importante dentro de la ingeniería y la arquitectura. Los avances en el campo de la acústica y la simulación por ordenador permiten estudiar las características acústicas de una sala, inclu-

so antes de ser construida, con el objetivo de poder diseñar y acondicionar salas con respecto a ciertos objetivos acústicos o con propiedades acústicas óptimas.

Este Trabajo Fin de Grado (TFG) tiene como objetivo realizar un estudio técnico sobre la acústica de la Sala de Grabación del estudio de grabación Soho Sessions, y aportar una propuesta de acondicionamiento teniendo en cuenta las recomendaciones técnicas expuestas tanto en la normativa nacional UNE-EN ISO 3382-1 [4], como las recomendaciones de la BBC WHP 021 [5].

En primer lugar, se han realizado una serie de mediciones acústicas in-situ: respuesta en frecuencia, tiempo de reverberación, y otros parámetros acústicos de la Sala de Grabación de Soho Sessions, utilizando el software EASERA.

Seguidamente, se ha llevado a cabo un modelado en tres dimensiones de la Sala de Registro, que permite la posterior realización de un conjunto de simulaciones acústicas usando el programa informático EASE.

Tras realizar un análisis de los parámetros acústicos obtenidos en las mediciones y simulaciones acústicas anteriores, se realizan unas recomendaciones técnicas de acondicionamiento acústico con el objetivo de mejorar la sonoridad para su uso como estudio de grabación de música.

A pesar de no existir una normativa o un estándar específico para salas de grabación, se han de tener en cuenta diferentes recomendaciones profesionales. Conseguir unos criterios acústicos apropiados ayudará a simplificar la postproducción del material grabado, y mejorar el producto final [5].

El contenido de la presente Memoria se estructura de la siguiente manera. Tras este **Capítulo 1**, donde se realiza una breve introducción y aproximación histórica a la acústica, el **Capítulo 2** describe los fundamentos teóricos esenciales para comprender el desarrollo del TFG. El **Capítulo 3** describe la Sala de Grabación de Soho Sessions: aquí se presentan planos, fotografías, medidas de la misma, y se describen los materiales que componen su acondicionamiento acústico actual. En el **Capítulo 4** se realiza el estudio acústico de la sala, para posteriormente, en el **Capítulo 5**, realizar su modelado y simulación acústica. Finalmente, el TFG concluye con una serie de propuestas de mejora recogidas en el **Capítulo 6**.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

Contenido

2.1 Sonido	4
2.1.1 Presión sonora y nivel de presión sonora (SPL)	4
2.1.2 Comportamiento del sonido	5
2.1.3 Respuesta en frecuencia	5
2.2 Acústica de recintos	7
2.2.1 Tiempo de Reverberación	7
2.2.2 Early Decay Time	9
2.2.3 Definición	9
2.2.4 Claridad de la voz y Claridad musical	10
2.2.5 Bass Ratio o Calidez Acústica	11
2.2.6 D/R Ratio	11
2.2.7 %ALcons	11
2.2.8 Modos propios de una sala	11

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos más importantes de la acústica, con el objetivo de sentar las bases que ayuden al lector a comprender el estudio acústico que se realiza con posterioridad. Se comenzará definiendo qué es el sonido, su propagación, y los parámetros más importantes que serán utilizados en la realización del posterior estudio técnico.

2.1. Sonido

El sonido se define como una **variación de presión** que se propaga a través de un medio elástico y denso, nunca en el vacío. Se trata de una onda mecánica longitudinal, y es capaz de generar una sensación auditiva en el oyente. La presión sonora se mide en Pascales (Pa).

Es importante subrayar que cuando se habla de sonido, se habla de las variaciones de presión en el tiempo. Una fuente sonora realiza un cambio de presión en el entorno, y esto genera una vibración que se transmite por el aire, llegando hasta el oyente [6].

El sonido, a diferencia de la luz, necesita un medio material de transmisión, y las diferentes ondas sonoras que viajan por el mismo, se suman y se pueden propagar al mismo tiempo.

El oído humano puede apreciar las ondas sonoras comprendidas dentro del rango denominado por ello audible. Este rango es el comprendido aproximadamente entre 20 Hz y 20 kHz [7].

2.1.1. Presión sonora y nivel de presión sonora (SPL)

Cuando se habla de **presión sonora**, se habla de las variaciones de presión causadas por el movimiento del aire. Se miden en Pascales.

La **presión eficaz** (P_{RMS}), por su parte, se define como el valor eficaz de la presión acústica, y para una onda sinusoidal, toma el valor descrito en la fórmula 2.1.

$$P_{RMS} = \frac{P_{max}}{\sqrt{2}}. \quad (2.1)$$

No obstante, al hablar de sonido, habitualmente se trabaja con una escala logarítmica, ya que el oído humano no se comporta de manera lineal ante los cambios de presión.

El **decibelio** es una unidad adimensional, que compara magnitudes en una escala logarítmica. Expresa una relación entre un valor y un valor de referencia dado.

El **nivel de presión sonora (SPL)** es una medida logarítmica de la presión eficaz. Determina la intensidad de sonido que genera una presión sonora. Se establece como nivel de referencia el umbral de audición ($20\mu Pa$) que se corres-

ponde con 0 dB.

$$dB_{SPL} = 20 \log \frac{P_{RMS}}{20 \mu Pa}. \quad (2.2)$$

2.1.2. Comportamiento del sonido

Las ondas sonoras se ven alteradas en su recorrido por fenómenos ondulatorios tales como la reflexión o la absorción.

Cuando una onda sonora alcanza un cuerpo, parte de la energía que transporta será absorbida por el cuerpo, y otra parte de ella será reflejada. Estas dos componentes de las ondas tras la reflexión son muy importantes en el estudio de la acústica de salas.

El **coeficiente de absorción** (α) se define como la relación entre la energía sonora absorbida y la energía sonora incidente (Ecuación 2.3). Tiene valores normalizados entre 0 y 1. Este coeficiente se usa para caracterizar las propiedades acústicas de un material. Los materiales denominados absorbentes son los que tienen coeficientes de absorción más altos.

$$\alpha = \frac{\text{Energía absorbida}}{\text{Energía incidente}}. \quad (2.3)$$

2.1.3. Respuesta en frecuencia

Cualquier onda, incluidas las ondas sonoras, es una superposición de todas las componentes frecuenciales que la componen. La transformada de Fourier convierte una señal en el dominio del tiempo en una señal en el dominio de la frecuencia.

La **respuesta en frecuencia** se obtiene del estudio de la respuesta de un sistema ante entradas de diferente valor frecuencial (ondas de distintas frecuencias). Si la respuesta en frecuencia de un sistema es plana, quiere decir que el sistema no modifica la relación entre frecuencias de la onda de entrada. La Figura 2.1, por ejemplo, representa la respuesta en frecuencia de la Sala de Grabación de Soho Sessions simulada ante una entrada impulso.

El estudio de una señal acústica en el dominio de la frecuencia resulta muy útil, ya que permite estudiar las características del sonido en diferentes rangos frecuenciales.

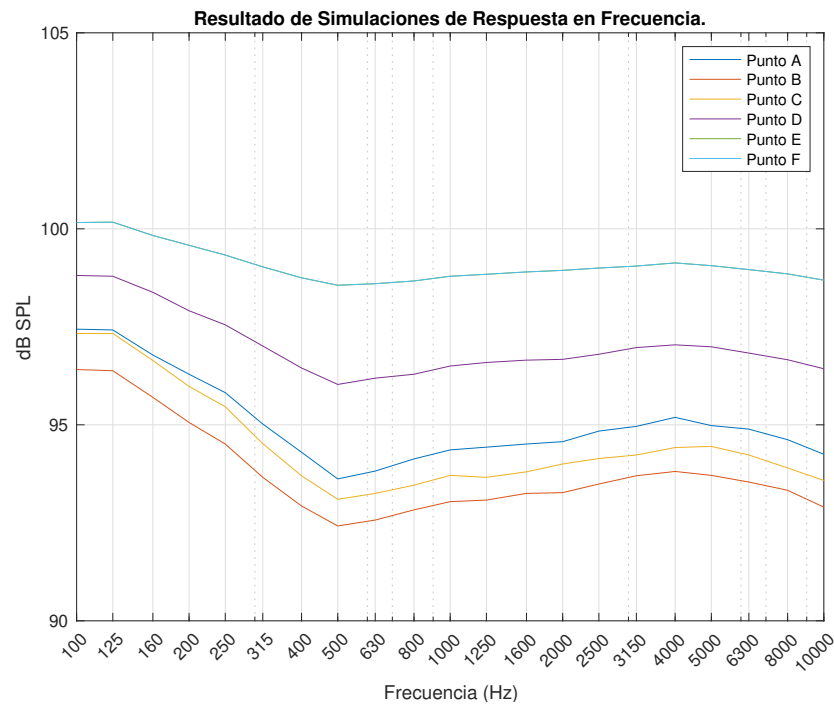


Figura 2.1: Resultados de la simulación de respuesta en frecuencia de la Sala.

Octava

Una octava es la distancia en frecuencias entre dos ondas cuyas frecuencias son una el doble de la otra.

Esta relación es muy importante en la música y la acústica, ya que los sonidos con distancia de octavas son percibidos por el cerebro humano como la misma nota, aunque más grave o más aguda.

En acústica, habitualmente se usan los tercios de octava cuando se estudia el comportamiento frecuencial de algún parámetro.

Armónicos

La serie armónica es la que se construye con los inversos de los números enteros de la frecuencia fundamental. Esta serie está relacionada con el comportamiento físico del sonido. Los armónicos de una frecuencia son los que siguen esta serie. La contribución de los diferentes armónicos entre sí, definen el timbre de un instrumento [6].

2.2. Acústica de recintos

La acústica de recintos, o acústica de salas, se encarga de estudiar el comportamiento del sonido cuando éste se encuentra dentro de un recinto cerrado.

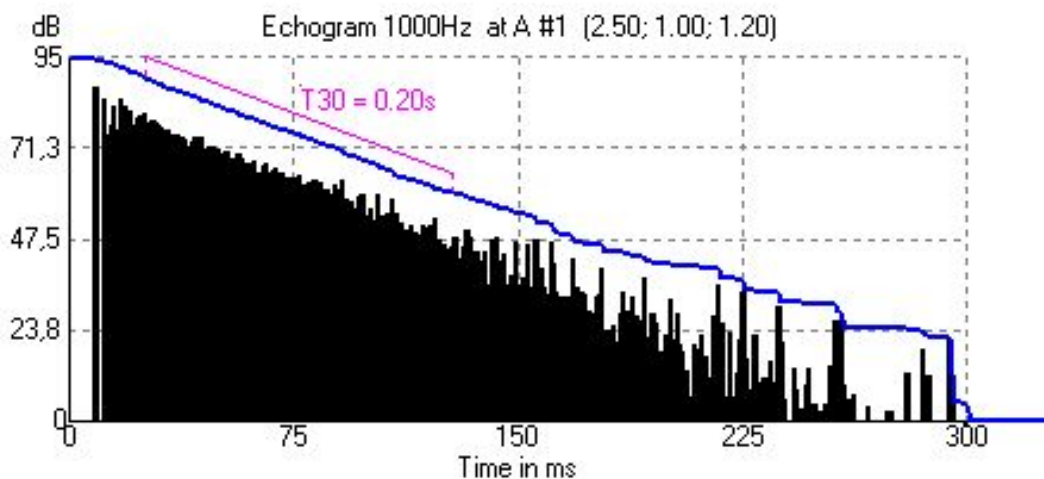
- **Campo Directo:** formado por las ondas que llegan directamente de la fuente sonora al oyente. Son percibidas con gran nitidez.
- **Campo Reverberante:** formado por las ondas sonoras reflejadas que llegan al oyente después del campo directo, tras la reflexión. En función de la cantidad de reflexiones, se compone de campo temprano y tardío.

A la hora de caracterizar una sala, se tienen en cuenta varios parámetros, que se enumeran y se describen brevemente a continuación.

2.2.1. Tiempo de Reverberación

Las múltiples reflexiones del sonido en la sala generan un efecto acústico en el que se aprecia una permanencia del sonido una vez que la fuente original ha dejado de emitirlo. A este efecto se le denomina **reverberación**.

La Figura 2.2 muestra las reflexiones simuladas de la sala de grabación de Soho Sessions.



(c) EASE 4.4 / SketchUp 09 - Simple sk8 / 02/09/2023 8:03:43 / David Ruiz (UMA) david

Figura 2.2: Ecograma de la Sala de Grabación.

El Tiempo de Reverberación (RT) es una medida de la velocidad de decaimiento temporal del sonido. Se define como el tiempo que transcurre desde que una fuente sonora deja de emitir sonido hasta que la intensidad sonora decae 60 dB.

El tiempo de reverberación depende principalmente de las características de la sala, los materiales con que está construida, así como del nivel de ocupación de la misma (las personas actúan como buenos absorbentes sonoros [8]).

Una primera aproximación sobre el tiempo de reverberación se obtiene usando la conocida fórmula de Sabine; esta fórmula, definida por Wallace Clement Sabine [3], aproxima el tiempo de reverberación usando, únicamente, el volumen de la sala y el total de absorción de la sala.

Sabine tenía dos aulas a su disposición en las que añadía y eliminaba sillas así como diferentes materiales aislantes, y medía el tiempo que tardaba el sonido en decaer hasta que fuera inapreciable. De esta manera, se dio cuenta del efecto de la absorción en la reverberación de la sala, y comprobó que el tiempo de reverberación depende del volumen y la absorción de la sala. A mayor volumen, mayor tiempo de reverberación (el sonido se refleja en menor medida en las paredes), y a mayor material absorbente, menor tiempo de reverberación. Esto es así porque cada vez que una onda sonora llega a una pared, ésta se absorbe parcialmente perdiendo energía, y esta pérdida de energía dependerá del coeficiente de absorción del material. La Figura 2.3 representa la reflexión de ondas en una superficie según [6].

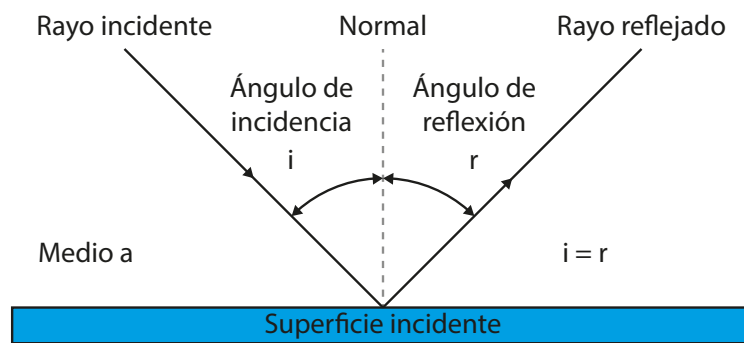


Figura 2.3: Reflexión de ondas en una superficie. Cada vez que se produce una reflexión, el material absorbe energía en función del coeficiente de absorción.

De esta manera, Sabine obtuvo una primera aproximación al tiempo de reverberación (Ec. 2.4):

$$T[s] = 0,161 \frac{V}{A}; \quad (2.4)$$

donde T es el tiempo de reverberación en s, V el volumen de la Sala en m^3 , y A el área de absorción efectiva en m^2 . El área de absorción efectiva depende de los materiales con que está construida la sala, y se puede calcular con la Ecuación 2.5 [7].

$$A = \frac{\sum S_i A_i}{\sum S_i}; \quad (2.5)$$

donde S_i es el área de cada material, y A_i el coeficiente de absorción acústica de cada material.

2.2.2. Early Decay Time

El *Early Decay Time* (o simplemente EDT) se calcula multiplicando por seis el tiempo que transcurre entre que el foco emisor deja de emitir sonido, hasta que el nivel de presión sonora cae 10 dB.

Es un parámetro muy importante que caracteriza el carácter acústico de una sala [9]. Si el valor del EDT es significativamente menor que el de RT, la impresión acústica será de una sala apagada, mientras que si el EDT es significativamente mayor que el valor de RT, la impresión será de una sala viva.

Cuando hay una difusión del sonido uniforme, el EDT y el RT deben ser del mismo orden de magnitud.

2.2.3. Definición

Este parámetro acústico, denominado definición **D**, es la diferencia entre la energía que llega en los primeros milisegundos, y la energía total recibida.

Mide la diferencia entre la energía de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo y la energía total, se usa como un indicador de la claridad de la voz [10]. Para que haya inteligibilidad, este valor debe ser superior a 0,50. Cuanto mayor sea, mejor inteligibilidad. La Ecuación 2.6 permite hallar la definición D

$$D = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \right); \quad (2.6)$$

donde p es la presión sonora en Pascales.

2.2.4. Claridad de la voz y Claridad musical

Se define como la diferencia en dB entre la energía temprana y la energía tardía. Esto es, la diferencia entre la energía recibida en primeros milisegundos, y la energía de reverberación en los milisegundos posteriores.

Claridad de la voz

La **claridad de la voz** C_{50} mide la diferencia entre los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo y las reflexiones posteriores, se usa como un indicador de la claridad de la voz.

$$C_{50} = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t) dt} \right). \quad (2.7)$$

Este parámetro se puede obtener a partir de la definición y viceversa, por lo que no es necesario medir ambos [4]. La Ecuación 2.8 relaciona ambos parámetros.

$$D = \frac{1}{1 + 10^{-\frac{C_{50}}{10}}}. \quad (2.8)$$

Para una inteligibilidad perfecta en aulas, por ejemplo, se recomienda que este valor sea superior a 6 dB [11].

Claridad Musical

La **claridad musical** C_{80} mide la diferencia entre los primeros 80 ms y las reflexiones posteriores, se usa como un indicador de la claridad de la música. Se calcula con la Ecuación 2.9:

$$C_{80} = 10 \log_{10} \left(\frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt} \right). \quad (2.9)$$

Se recomiendan valores de entre -2 y 4 dB para instrumentos de viento y para música clásica, y entre 2 y 8 dB para instrumentos de jazz, rock y percusión [12].

2.2.5. Bass Ratio o Calidez Acústica

Una medida de la sensación de calidez acústica, que suele estar relacionada con tiempos de reverberación algo más largos en bajas frecuencias [7].

Se define como la relación entre la suma de los tiempos de reverberación en 125 Hz y 250 Hz, y la suma entre los tiempos de reverberación en 500 Hz y 1 kHz.

$$BR = \frac{RT_{125} + RT_{250}}{RT_{500} + RT_{1000}}. \quad (2.10)$$

2.2.6. D/R Ratio

El D/R Ratio (Direct to Reverberant energy Ratio), o Relación entre campo Directo y campo Reverberante es la relación entre la energía directa recibida de la fuente sonora, y la energía recibida por las reflexiones.

Si este valor es igual a cero, la energía directa es igual que la energía reverberante. Se puede hallar con la Ecuación 2.11.

$$D/R_{ratio} = \log_{10} \frac{10^{SPLd}}{10^{SPLr}}. \quad (2.11)$$

2.2.7. %ALcons

El %ALcons es un parámetro basado del acrónimo en inglés Pérdida porcentual de articulación de las consonantes. Se trata de un porcentaje que representa la pérdida en la inteligibilidad de la palabra. Está basado en el estudio de la pérdida real de las consonantes por un grupo de personas [12].

2.2.8. Modos propios de una sala

La acústica ondulatoria estudia las interferencias entre las ondas incidentes y las ondas reflejadas. Como se ha descrito, el sonido en un punto es la suma de todas las ondas que inciden en éste.

Cuando en un punto ocurre que llegan dos ondas de la misma frecuencia opuestas en fase, éstas se restan; sin embargo, cuando llegan dos ondas con la misma frecuencia y fase, éstas se suman.

Cuando una onda sonora viaja, se refleja en la pared, vuelve y se refleja con la pared paralela a ésta, y así sucesivamente.

Si la onda reflejada es de la misma frecuencia y longitud de onda, se genera una **onda estacionaria**, esta onda es la que se causa una relación entre el sonido directo y las reflexiones estacionarias.

Cuando las dimensiones de la sala son múltiplos de la longitud de onda de la frecuencia de resonancia, se generan unos nodos y unos nudos de sonido que serán problemáticos en la sala de nuestro estudio, ya que generan puntos donde estas frecuencias resuenan, y puntos donde dejan de escucharse. A este efecto se le denomina “Modos Propios”, un objetivo será eliminar este efecto de resonancia en la medida de lo posible.

- **Modos axiales:** Son aquellos que se generan entre dos paredes opuestas de la habitación.
- **Modos tangenciales:** Son los que se reflejan entre diagonales opuestas.
- **Modos oblicuos:** Los que se generan entre una esquina y la opuesta en una sala rectangular.

La Figura 2.4, definida en [13] representa la longitud de onda de alguno de los modos propios de una sala rectangular.

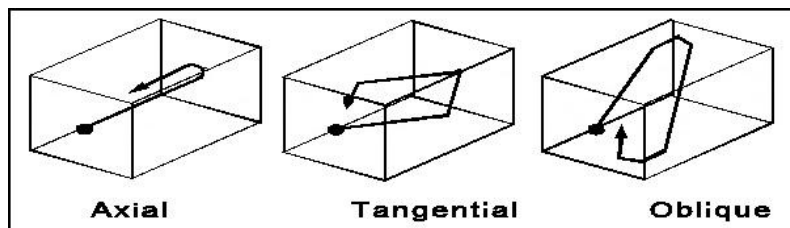


Figura 2.4: Representación de alguno de los tipos de modos propios.

Capítulo 3

Descripción de la Sala de Grabación de Soho Sessions

Contenido

3.1 Descripción de la Sala	13
3.2 Planos de la Sala de Grabación	14
3.3 Materiales de acondicionamiento acústico	15
3.4 Imágenes del estudio	16

En este capítulo, se presenta y describe la sala de grabación del estudio de grabación de Soho Sessions, situado en el céntrico barrio del Soho de Málaga.

3.1. Descripción de la Sala

El estudio de grabación Soho Sessions¹ es un estudio de grabación de música situado en el céntrico barrio del Soho de Málaga, dentro del Edificio Centro ubicado en la Calle Trinidad Grund 21. Este estudio ofrece servicios de grabación, edición, mezcla y masterización de audio.

Entre sus servicios de grabación se realizan, además de grabaciones musicales, grabación de locuciones, doblajes, ADR, sesiones de conexión remota, sesiones con grabación de video en directo entre otros.

La Figura 3.1 muestra la situación del estudio de grabación Soho Sessions sobre la base de [14].

¹Página web del estudio: <http://www.sohosessionsmalaga.com>



Figura 3.1: Situación del estudio de grabación Soho Sessions.

La Sala de Registro de Soho Sessions (*en adelante, Sala de Grabación*) es una sala rectangular diseñada y construida específicamente para el registro sonoro tanto de locuciones como de música de distintos estilos.

Anexa a esta Sala de Grabación, y separada por un doble acristalamiento aislante acústicamente, pero que permite la interacción óptica, se encuentra la denominada Sala de Audición, o Sala de Control, de los mismos estudios de grabación Soho Sessions.

Esta Sala de Grabación ha sido modificada acústicamente con anterioridad a la realización de este TFG, aislándola del exterior, modificando la arquitectura de las esquinas y acondicionándola acústicamente, pero sin realizar hasta el momento ningún estudio acústico.

3.2. Planos de la Sala de Grabación

Como no se dispone de planos de la Sala de Grabación, se han realizado medidas de las dimensiones internas de la sala con ayuda de un medidor láser para hacer un modelo en 3D de la sala, y así realizar simulaciones acústicas usando el software informático EASE. La Figura 3.2 muestra las dimensiones interiores medidas experimentalmente para la Sala de Grabación.

La puerta que aparece en la Figura 3.2 comunica la Sala de Grabación con la Sala de Control. La altura entre el suelo y el techo es de 2,63 m.

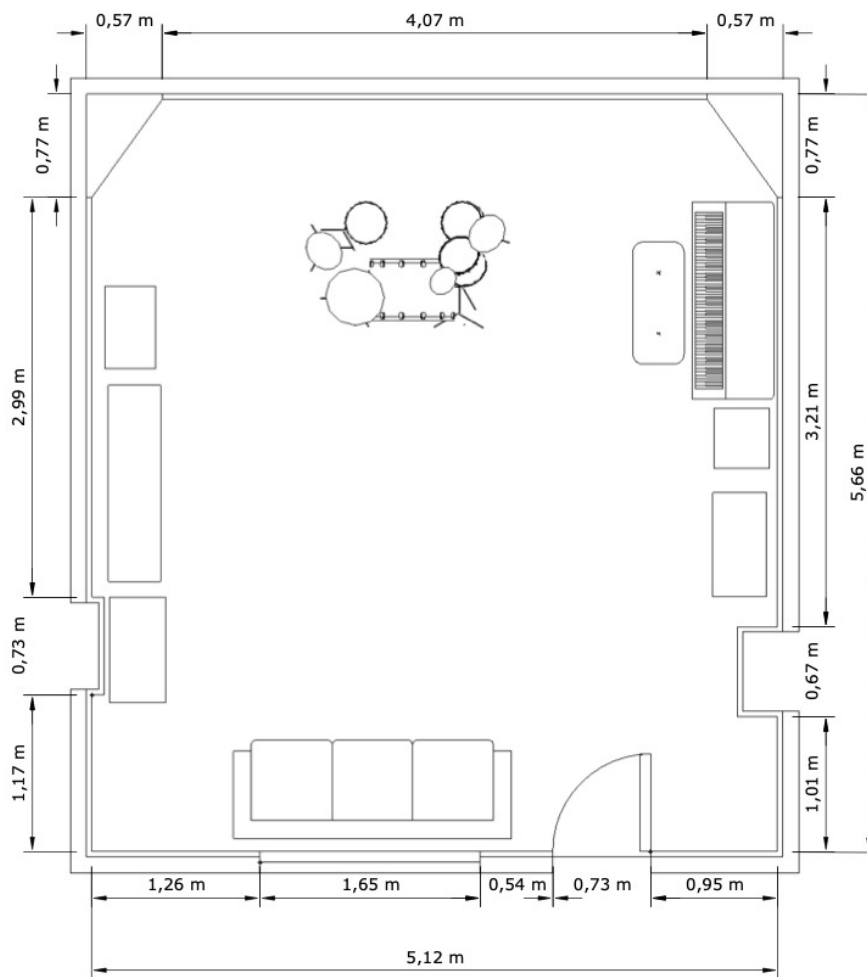


Figura 3.2: Plano de la Sala de Grabación.

3.3. Materiales de acondicionamiento acústico

Los materiales más usados para este aislamiento y acondicionamiento acústicos fueron placas de yeso laminado, aislante acústico “Copopren”, Lana de roca y Lana de algodón para aislar la sala del exterior, eliminar parte de las reflexiones y así reducir tanto el tiempo de reverberación como los modos propios (o resonancias) de ambas salas, de Grabación y de Control.

El suelo de la sala es suelo de madera laminado, y el techo es de yeso con gotelé, en el que se encuentran colgados paneles acústicos realizados con lana de roca y lana de algodón.

Las paredes se encuentran recubiertas en su mayor parte por material aislante acústico copoprén y por lana de roca, cubierto a la vez con textil transpirable. El primer metro de altura de gran parte de la sala se encuentra cubierto con un friso de madera de pino.

3.4. Imágenes del estudio

La Figura 3.3 recoge una fotografía del estado actual de la Sala de Grabación que se va a estudiar en el presente TFG.

Como se observa en la misma, además del tratamiento acústico dado a las paredes, del techo cuelgan varios paneles de aislamiento acústico.

La Sala de Grabación está amueblada con mobiliario diverso, así como instrumentos y equipamiento musical utilizado en el estudio de grabación: amplificadores de guitarra eléctrica, bajo eléctrico, un órgano electrónico, diferentes guitarras eléctricas, una batería, entre otro equipamiento musical, que afecta a las propiedades acústicas de la sala.

Del mismo modo, se dispone a gusto del técnico de grabación de paneles acústicos fabricados con lana mineral para poder modificar a voluntad la acústica de la sala en función del interés de la grabación, así como poder aislar entre sí diferentes instrumentistas.



Figura 3.3: Detalle de la Sala de Grabación.



(a) Sala de Control de Soho Sessions.

(b) Micrófono Neumann U87 dispuesto para una grabación vocal.



(c) Músicos grabando simultáneamente en Soho Sessions.

(d) Baterista grabando en Soho Sessions.



(e) Estudio listo para una sesión de doblaje.

(f) Cuarteto de Cuerda grabando en Soho Sessions.

Figura 3.4: Fotografías del estudio de grabación Soho Sessions.

Capítulo 4

Estudio acústico de la Sala de grabación de Soho Sessions

Contenido

4.1 Mediciones acústicas	19
4.1.1 Equipo utilizado	21
4.1.2 Configuración de software EASERA	22
4.1.3 Realización de las mediciones acústicas	27
4.2 Resultados experimentales	29
4.2.1 Diagrama Waterfall	30
4.2.2 Ruido ambiente	33
4.2.3 Tiempo de reverberación	36
4.2.4 Respuesta en frecuencia	46
4.2.5 Otros parámetros acústicos	48

En este capítulo, se explica el proceso de medición acústica llevado a cabo en la sala de grabación de Soho Sessions, se presentan los resultados de este estudio, y se exponen los parámetros acústicos obtenidos en relación a las diferentes recomendaciones profesionales.

4.1. Mediciones acústicas

A la hora de acondicionar un recinto acústicamente, el primer paso siempre es tomar las medidas acústicas del recinto que vamos a estudiar. Es muy importante

realizar mediciones acústicas para poder aislar los problemas acústicos que éste presenta y así poder realizar una propuesta de acondicionamiento en función a éstos. Aunque un recinto presente problemas acústicos evidentes, sin realizar unas mediciones de los parámetros acústicos, es muy difícil localizar su origen, y proponer soluciones específicas.

A pesar de que los avances en la simulación permiten simular el comportamiento acústico de cualquier recinto, los resultados que ofrecen las simulaciones no siempre son perfectos, ya que muchas veces es difícil especificar todos los parámetros acústicos de entrada para realizar una correcta simulación (materiales de la sala, dimensiones, aberturas que puedan generar resonancias, etc). Por ello, siempre que sea posible, será importante realizar mediciones acústicas, tanto para conocer el estado acústico del recinto, como para comprobar los resultados del tratamiento acústico realizado a una sala.

A continuación, se describen las mediciones acústicas realizadas en la Sala de Grabación de Soho Sessions. El objetivo es caracterizar esta sala polivalente de grabación y conocer los parámetros acústicos que caracterizan la situación acústica de este recinto.

Se realizan medidas del ruido de fondo de la sala, así como mediciones para obtener la **respuesta impulso** de la sala, usando como estímulo un barrido sinusoidal emitido por una Fuente Omnidireccional. Un Micrófono de Medición es posteriormente usado para captar el sonido de la sala al ser excitada por este barrido sinusoidal. Para reproducir y captar este sonido se utiliza un ordenador personal con un software de acústica, y una Interfaz de Audio. Esta caracterización permite estudiar algunos parámetros acústicos tales como:

- **Respuesta en Frecuencia.**
- **Tiempo de Reverberación en función de la frecuencia.**

A partir de esta información experimental se pueden calcular otros muchos parámetros acústicos como por ejemplo el BR, C50, C80, % ALcons o (RA)STI entre otros. Estos parámetros definen la sonoridad de la sala, y permiten localizar los problemas acústicos que presente.

Para llevar a cabo la toma de datos experimentales de los diferentes parámetros acústicos a evaluar se han seguido las recomendaciones encontradas en la norma UNE-EN ISO 3382-1 [4] junto con aquellas encontradas en la norma UNE-EN ISO 3382-2 [15].

4.1.1. Equipo utilizado

Para la realización de las mediciones de los diferentes parámetros acústicos que se describirán a lo largo de esta Memoria, se utilizó el siguiente equipo experimental (se muestra en la Figura 4.1):

- Un calibrador acústico Clase 1 B&H Modelo 4231 [16] (Fig 4.1a).
- Un micrófono de medición BEHRINGER ECM8000 [17] (Fig 4.1b).
- Un sonómetro de Clase 2 Svantek 973 [18] (Fig 4.1c).
- Una fuente Sonora omnidireccional (dodecaedro), junto con un amplificador (Fig 4.1d).
- Ordenador personal portátil con software de medición EASERA.



(a) Calibrador de micrófono.



(b) Micrófono ECM8000.



(c) Sonómetro SVANTEK 973.



(d) Fuente omnidireccional.

Figura 4.1: Equipo utilizado para la obtención de las medidas experimentales.

4.1.2. Configuración de software EASERA

Para el registro de las medidas experimentales se usa el software EASERA, junto con una interfaz de audio Roland y el micrófono de medición Behringer ECM8000 ya descrito.

El software EASERA [19] es un software desarrollado por la empresa AFMG (Ahnert Feistel Media Group), y dedicado a la realización de mediciones y análisis acústicos. Dispone de distintas opciones para realizar mediciones acústicas usando diferentes señales de excitación, así como un analizador en tiempo real.

Este software, a diferencia de otros paquetes informáticos en la industria como pueden ser Smaart o RiTA, está especialmente diseñado para realizar medidas acústicas de espacios arquitectónicos, mientras que Smaart o RiTA se centran más en la realización de mediciones experimentales enfocadas al ajuste de equipos de sonido en directo. La Figura 4.2 recoge la pantalla de inicio de este software comercial.

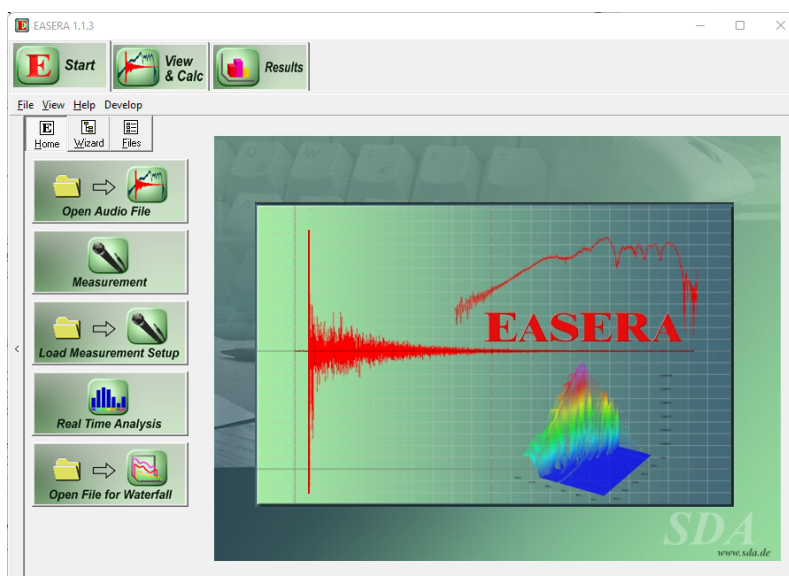


Figura 4.2: Pantalla inicial de EASERA.

Para comenzar el registro de las medidas experimentales se selecciona la pestaña “Measurement” (que aparece en la pantalla de inicio, Figura 4.2), y aparece una nueva ventana de Configuración, que se recoge en la Figura 4.3. En este punto, se elige y configura la tarjeta de sonido que vamos a usar (preferiblemente con controlador de tipo ASIO (Audio Stream Input/Output)).

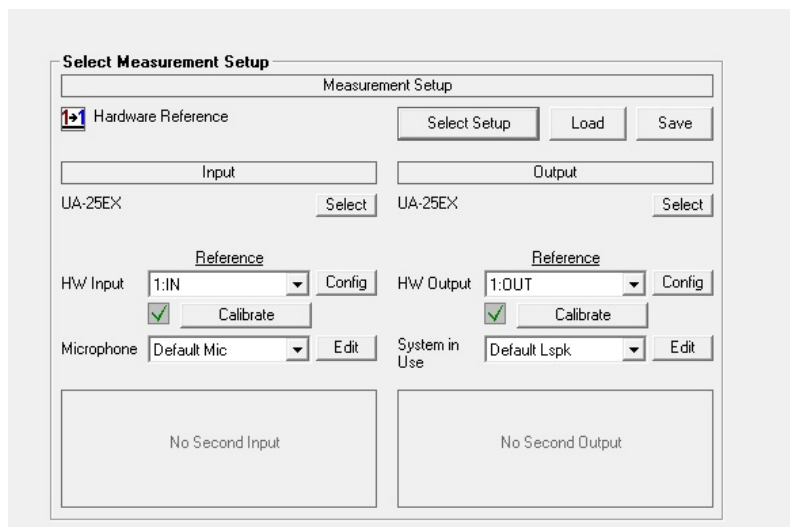


Figura 4.3: Ventana de configuración de EASERA.

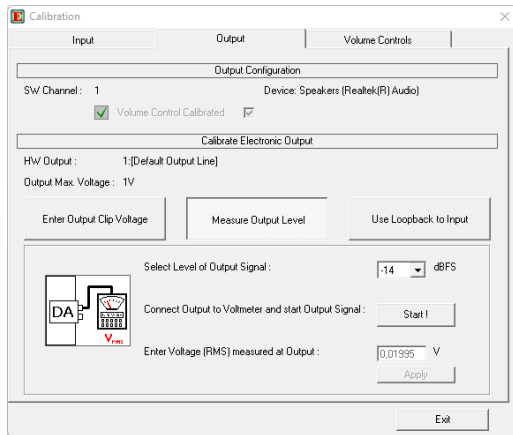
Lo primero que se debe hacer es calibrar el propio EASERA. Esta calibración inicial tiene como objetivo principal conocer la correlación existente entre el nivel de voltaje de entrada, y el SPL que recibe el micrófono de medición.

En primer lugar (aunque no es estrictamente necesario) se decide calibrar la salida de voltaje; para ello, se debe pulsar “**Calibrate**” debajo de “Reference”. Esto abre una nueva ventana en la que se puede generar una señal de calibración.

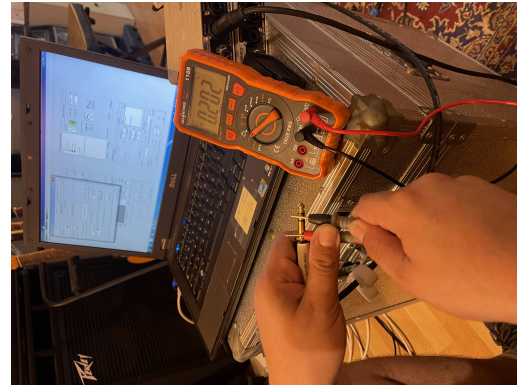
Se mide el voltaje de esta señal, y se introduce el valor de dicha diferencia de potencial en la ventana correspondiente del programa informático. De este modo, EASERA sabrá en todo momento a qué voltaje de salida se corresponde el tono generado. Posteriormente este voltaje se usará para amplificar la señal eléctrica en una acústica (Figura 4.4).

A continuación, se calibra el voltaje de entrada de referencia, para ello conectamos la salida que ya se ha calibrado con la entrada.

Para ello se pulsa “Calibrate” situado debajo de la referencia, y en la sección “Calibrate electronic input”. Se pulsa el botón “Use Output loopback signal”. Como la salida ya está calibrada, el ordenador ya conoce el voltaje de entrada al ordenador, y sabe la ganancia que se aplica al micrófono. De este modo, se podría usar un micrófono de medición sin necesidad de un calibrador, únicamente conociendo su sensibilidad (Figura 4.5).

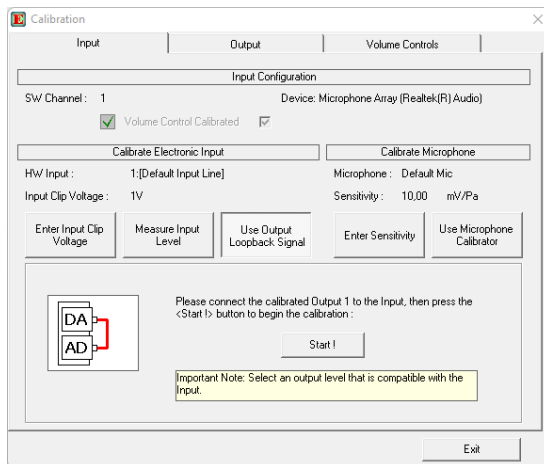


(a) Calibración de Voltaje de Salida en EASERA.

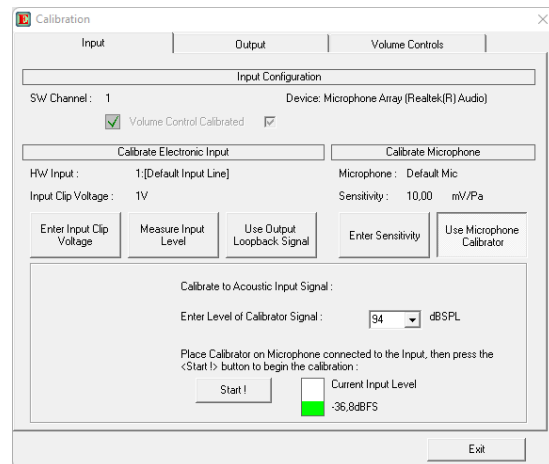


(b) Medida experimental de Voltaje de Salida con Multímetro.

Figura 4.4: Detalles del proceso de Calibrado de Salida en EASERA.



(a) Calibración de Entrada de EASERA.



(b) Calibración de Micrófono en EASERA.

Figura 4.5: Detalles del proceso de calibrado de Entrada y micrófono en EASERA.

Se ha de tener en cuenta que la salida no puede ser muy alta, ya que la ganancia ha de estar ajustada para obtener una buena medición con el micrófono, por lo que se recomienda ajustar la ganancia con el calibrador de micrófono evitando que no llega a generar distorsión de clipeo o clipping. Esto ocurre cuando

la forma de la señal sonora se deforma al superar el máximo de intensidad que se puede registrar, y se recortan los valores por encima de este valor máximo registrable.

Una vez se ha calibrado la entrada de micrófono, se ha de calibrar también la sensibilidad del micrófono. Para esto, se pulsa de nuevo el botón de calibración y en la sección de Calibrado de Micrófono se selecciona en “Use Microphone Calibrator”.

En este momento, se inserta el calibrador de micrófono en la cápsula del Micrófono y se enciende. Éste generará un tono de 94 dB. Se pulsa “Calibrate” y el sistema queda calibrado completamente. El equipo ya puede relacionar el nivel de entrada de audio con la presión sonora en dB que recibe la cápsula del micrófono.

Una vez se han configurado las entradas y salidas, se escoge la configuración del tipo de impulso que se usará para realizar la medición (Figura 4.6). Es recomendable realizar las mediciones con un barrido en ruido rosa, o ruido Weighted. El ruido Weighted es el recomendado por el programa EASERA [20] para minimizar problemas y aumentar la relación señal/ruido. Con el ánimo de estudiar las posibles diferencias en las medidas experimentales se han realizado mediciones tanto en ruido rosa como con la curva Weighted. Ambos métodos han presentado resultados prácticamente idénticos.

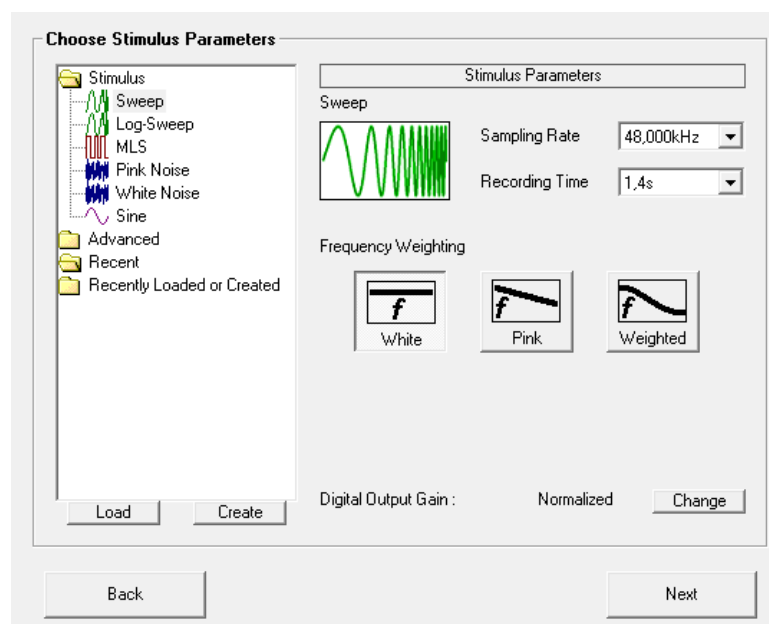
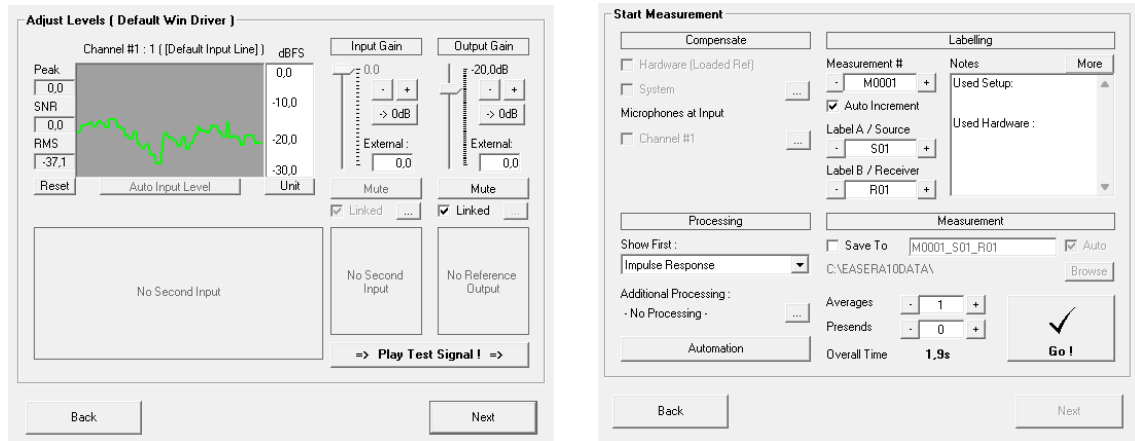


Figura 4.6: Selección de estímulos para realizar la medición.

Por último, y antes de realizar las mediciones, se comprueba que el nivel de entrada es razonable, sin distorsionar generando un tono. Se mide la salida que deberá ser de aproximadamente 85 dB. Para ello, se ajusta la ganancia del amplificador, que ajustará el volumen de los altavoces. También es posible reducir el nivel de salida de audio por parte del software EASERA (Figura 4.7).



(a) Ajuste de nivel en EASERA.

(b) Ventana previa a la medición.

Figura 4.7: Detalles del proceso de ajuste de nivel y configuración de la medición de EASERA.

Una vez se ha configurado correctamente EASERA para realizar las mediciones acústicas, está ajustada la ganancia del micrófono de medición, así como de la fuente omnidireccional, se pulsa “Go!”, y se realiza la medición acústica correspondiente.

Mientras se realiza esta medición, es importante mantenerse en completo silencio; además, se desecharán las medidas experimentales en las que se haya producido algún ruido externo (caso muy poco frecuente en la Sala de Grabación por su excelente aislamiento acústico respecto al exterior). Se debe intentar alejarse en la medida de lo posible de la fuente omnidireccional, así como del micrófono de medición para evitar alterar los resultados de la medición acústica.

También se recomienda realizar cada medición varias veces; para esto se puede configurar el número de promedios o “averages” en la ventana previa a la medición. Se dispararán, por lo tanto, varias señales, y el resultado será el promedio de todas esas medidas.

Cuando se ha realizado la medición completa, aparece una ventana con el resultado final, donde se pueden estudiar los valores de todos los parámetros

acústicos recogidos en la medición, o volver a realizar más mediciones (Figura 4.8).

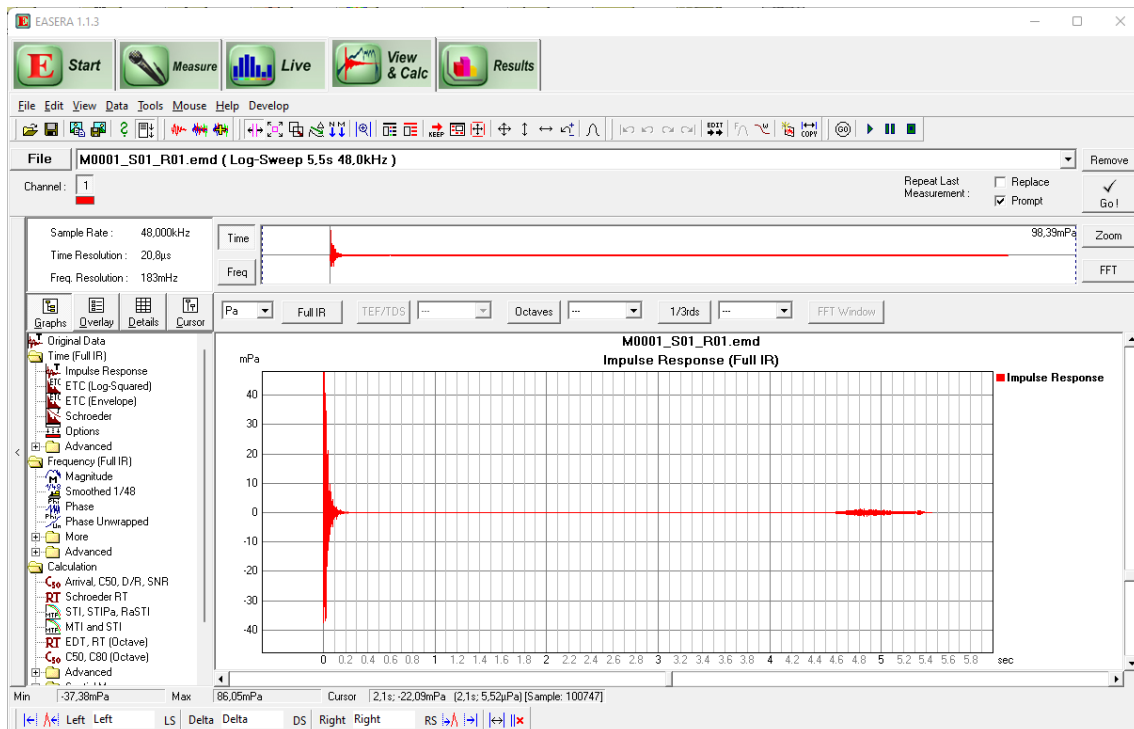


Figura 4.8: Resultado de medición acústica en EASERA.

4.1.3. Realización de las mediciones acústicas

Para realizar las mediciones acústicas, se instala la fuente sonora omnidireccional junto con su amplificador, el PC con la interfaz de sonido, y el micrófono de medición, y se configura el equipo como se indicó en el Apartado 4.1.2. La Figura 4.9 representa el conexionado para realizar una medición acústica.

Una vez se ha conectado y configurado el equipo como se ha descrito arriba, se realizan las mediciones acústicas experimentales. Para ello, previamente se debe determinar las distintas posiciones en las que situaremos la fuente omnidireccional (las llamaremos posición de la fuente), y para cada posición de la fuente sonora, las distintas posiciones donde se situará el micrófono de medición (las denominaremos posición de medida).

Las posiciones para la fuente sonora omnidireccional deben seleccionarse eligiendo los puntos más representativos de la sala. La norma ISO3382-1 [4]

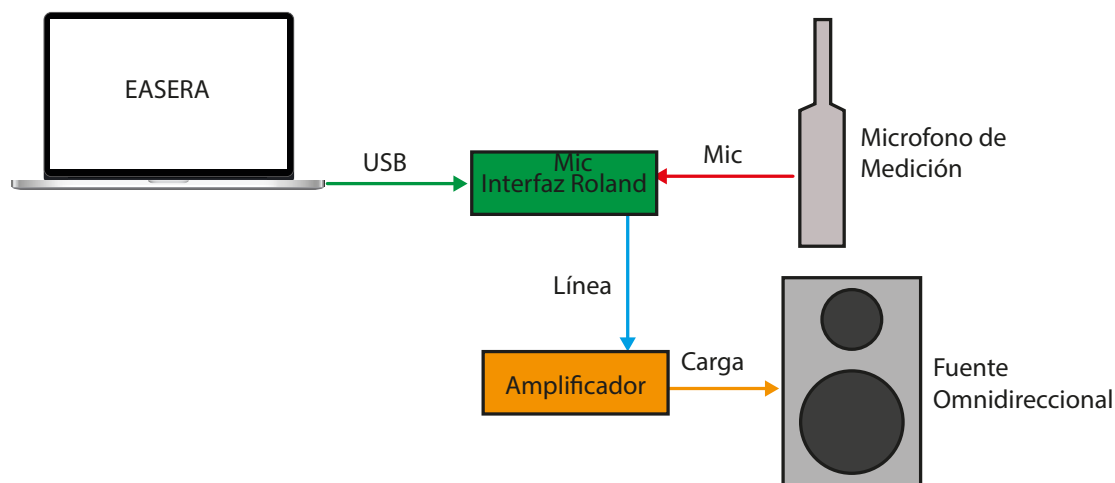


Figura 4.9: Esquema de conexionado del equipo de medición.

recomienda situar la fuente en posiciones representativas a las usadas por los intérpretes en la sala.

Es por esto que se escogen dos posiciones para la fuente omnidireccional:

- **Posición A:** Es la posición típica donde se suele colocar la batería acústica para grabar, así como instrumentos de alto SPL (percusiones, vientos metales, etc.). En esta posición de la fuente se realizan las medidas experimentales A, B, C, D, E, F (posiciones de medida).
- **Posición B:** Aquí se suelen colocar los cantantes, vocalistas, así como instrumentos acústicos (guitarra acústica, vientos madera, saxofones, etc.). En esta posición de la fuente sonora se realizan las medidas experimentales G, H, I, J, K (posiciones de medida). La Figura 4.10 representa una posición de la fuente omnidireccional.

La fuente omnidireccional se recomienda colocar a una altura de 1,5 m sobre el suelo, para evitar una modificación en la respuesta en las bajas frecuencias. La distancia entre la fuente y el micrófono de medición no debería ser inferior a 1,5 m.

Como ya se ha dicho, para cada una de estas posiciones para la fuente sonora omnidireccional se eligen diferentes puntos de medición para el micrófono; de esta manera se realizan mediciones en los puntos A, B, C, D, E, F con la posición A para la fuente, y en los puntos G, H, I, J, K con la fuente en la posición B. La Figura 4.11 recoge estas posiciones de medida en cada uno de los dos casos.



Figura 4.10: Fuente omnidireccional situada en la posición B.

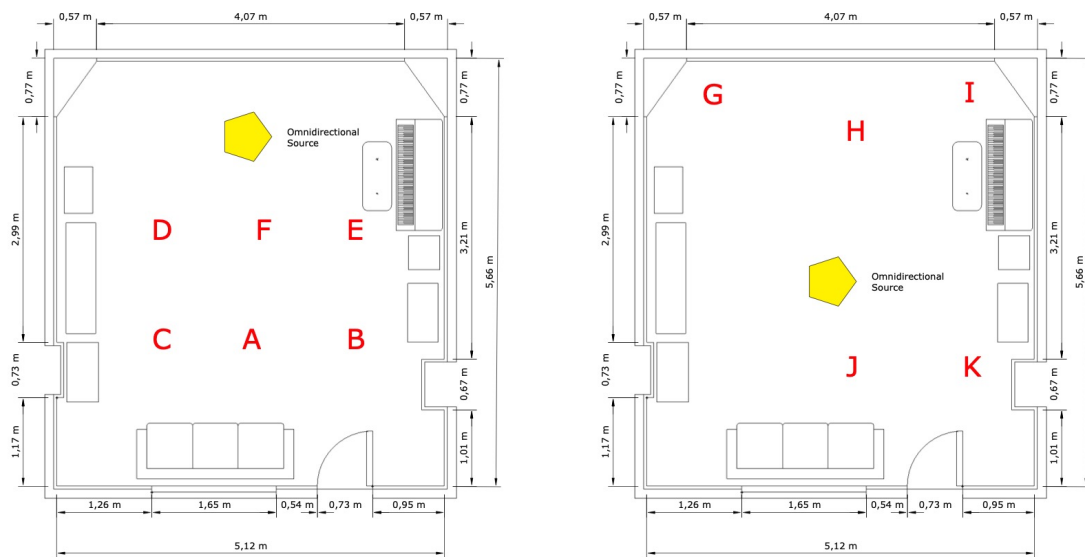
En cada una de estas posiciones se realizan varias medidas, se realizan medidas con una señal de excitación de tipo barrido, aunque se modifican los tipos de barrido, y se realizan también medidas con excitación de tipo ruido rosa.

No obstante, se aprecia que los resultados son prácticamente los mismos y la diferencia es mínima con estos métodos de excitación. El Anexo A muestra las diferentes medidas obtenidas en las diferentes posiciones de medida.

Tras evaluar las distintas mediciones en los mismos puntos, y comprobar que el resultado es prácticamente el mismo, se decide evaluar solamente las mediciones **M004**, **M0007**, **M0011**, **M0015**, **M0018**, **M0021**, **M0024**, **M0027**, **M0031**, **M0033**, **M0038**, y **M0045**. Éstas son las medidas que se usarán para estudiar los parámetros acústicos de nuestra Sala de Grabación.

4.2. Resultados experimentales

En las siguientes subsecciones se estudian en los diferentes resultados obtenidos de las medidas experimentales descritas en la sección anterior.



(a) Plano de situación de puntos de medida en la posición de fuente A.

(b) Plano de situación de puntos de medida en la posición de fuente B.

Figura 4.11: Plano de situación de las diferentes posiciones de medida.

4.2.1. Diagrama Waterfall

El diagrama Waterfall es un diagrama tridimensional que representa la intensidad de señal acústica en función tanto de la frecuencia como del tiempo. Para ello, representa en el eje de las x la frecuencia, en el eje y (eje vertical) la intensidad de la señal, y en el eje z el tiempo.

Este tipo de representación gráfica muestra la respuesta en frecuencia a una señal impulso a lo largo del tiempo. Es una manera de poder visualizar el comportamiento acústico de la Sala de un vistazo, y hacerse una idea al mismo tiempo de la respuesta en frecuencia junto con el decaimiento temporal en nuestra Sala de Registro. La Figura 4.12 muestra con mayor detalle un ejemplo de tal diagrama tridimensional, tomado para la posición de medida A.

El Anexo B muestra esta misma representación tridimensional para todas las posiciones de medida A-K. Las posiciones de medida A-F corresponden a la posición para la fuente A, y las posiciones de medida G-K corresponden a la posición para la fuente B.

De la simple observación y comparación de estas gráficas tridimensionales podemos extraer una serie de conclusiones:

- Existe un comportamiento en frecuencias y tiempo uniforme en los diferentes puntos de la sala. Esto es positivo, ya que significa que el comportamiento de la sala es similar independientemente del punto de escucha, y que no se producen puntos en los que se cancelan o se suman muchas frecuencia (nodos y nudos).
- Hay un pico en la respuesta en frecuencia cerca de los 250 Hz. Esto se puede deber a una característica en la construcción de la sala, o de la respuesta en frecuencia del altavoz omnidireccional.
- En la misma zona (cerca de los 250 Hz) hay un pico de decaimiento. Se puede suponer que en esta región de frecuencias exista algún tipo de problema acústico en la sala.
- En todas las gráficas se aprecia una resonancia entre los 30 y los 60 Hz. Esta zona tiene un tiempo de decaimiento muy superior al resto de la gráfica. Este comportamiento podría deberse a la propia frecuencia de resonancia del altavoz, y no a las características acústicas de la sala.

3D Waterfall of M0004_S01_R01.emd (Log-Sweep 5,5s 48.0kHz)

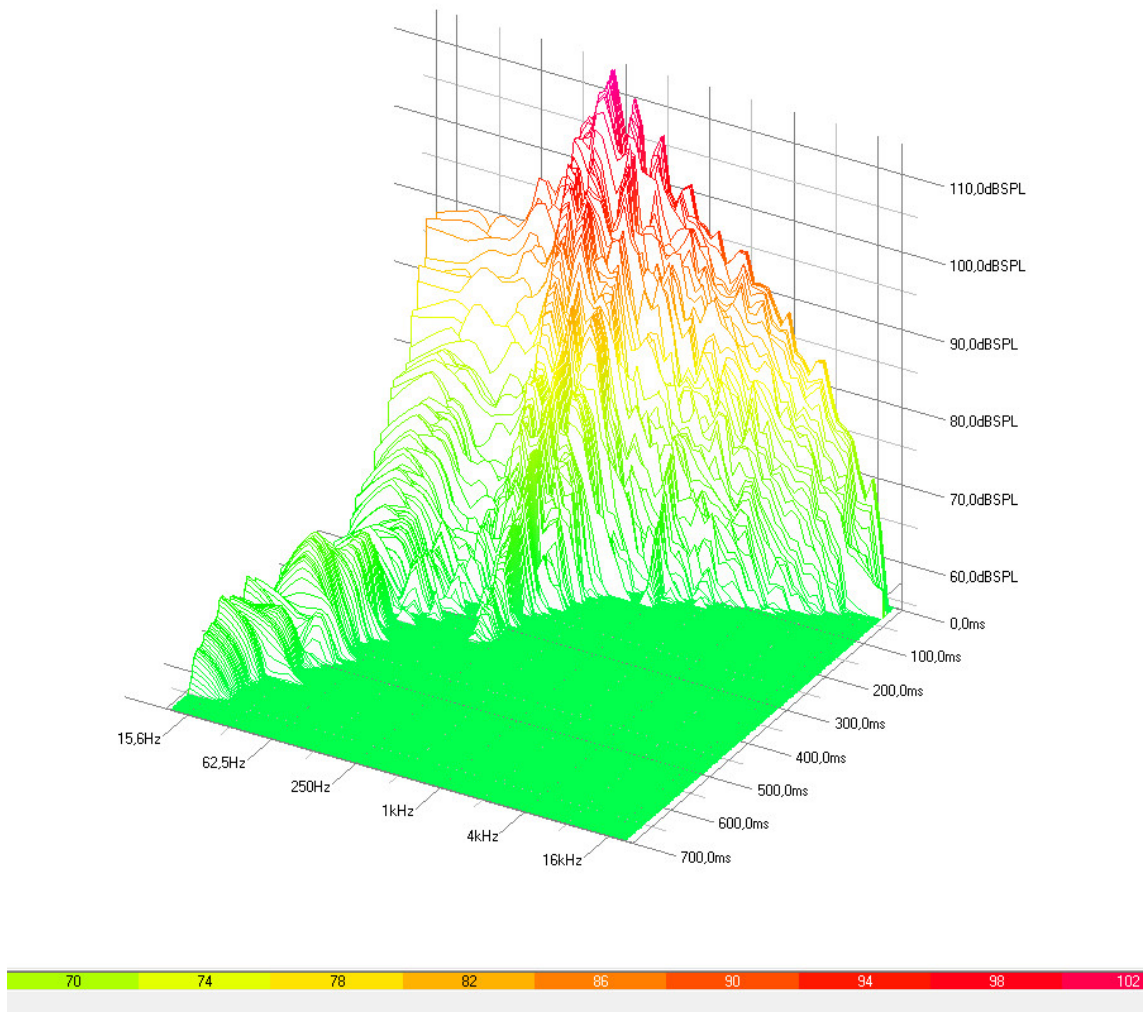


Figura 4.12: Diagrama Waterfall de la posición de medición A.

4.2.2. Ruido ambiente

Uno de los objetivos más importante al diseñar y construir una sala de grabación es reducir al máximo el ruido ambiente o ruido de fondo. Es por ello que, durante la construcción del estudio y previamente a la realización de este trabajo se llevó a cabo un trabajo de aislamiento tanto de la Sala de Grabación como de la Sala de Control.

Se añadió un sandwich de aislante termoacústico lana de roca junto con una plancha de carton-yeso por encima de las paredes o fábrica de ladrillo del cerramiento exterior.

El paramento interior o muro de separación entre la Sala de Control y la Sala de Grabación se realizó con una doble capa de cartón yeso, doble capa de lana de roca, y de nuevo doble capa de cartón yeso. Además, se instaló una estructura metálica interior para reforzar y soportar el peso del doble acristalamiento entre las dos salas.

La puerta de madera maciza que separa la Sala de Grabación y el Control se reforzó añadiendo aislante acústico de alta densidad, junto con varias capas de madera, y se instaló un cierre de presión para el sellado de la Sala de Grabación.

La Figura 4.13 muestra fotografías del proceso de construcción y aislamiento de la Sala de Grabación.



(a) Detalle de la construcción de partición interior entre Control y Sala.



(b) Detalle de aislamiento de puerta.

Figura 4.13: Detalles del proceso de construcción.

Finalmente, no se añadió suelo flotante ni techo flotante para evitar superar los límites estructurales del edificio, así como por limitación de presupuesto.

Consideraciones

Lo importante en este punto es garantizar que la cantidad de ruido ambiente no sea lo suficiente intenso como para apreciarse en las grabaciones. Esto dependerá en gran medida del instrumento que se grabe, así como de la presión sonora en la interpretación. Se ha de ser más exigentes para una grabación vocal de una locución, por ejemplo, que para una grabación de un instrumento de alto SPL como puede ser el amplificador de una guitarra o bajo eléctrico, o una batería acústica.

Varios autores establecen diferentes recomendaciones en lo que respecta a ruido ambiente tolerable en una grabación, y en función de la frecuencia. La Figura 4.14 establece los niveles de ruido máximos permitidos, en función de la frecuencia según [21].

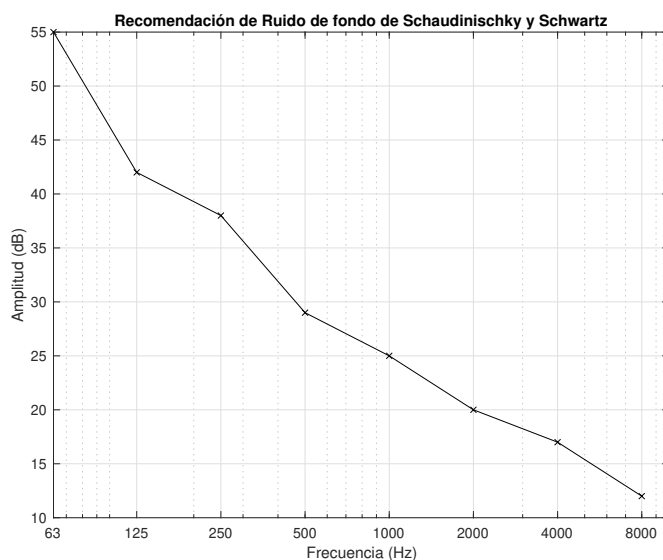


Figura 4.14: Recomendaciones de ruido de fondo.

La *BBC (British Broadcasting Corporation)* [22], por su parte, establece tres criterios muy estrictos en función del tipo de grabación que se vaya a realizar, estableciendo las siguientes categorías, que se recogen en la Tabla 4.1:

Uso del estudio	Sala de Grabación	Sala de Control
Radio		
Drama	(iii)	(ii)
Locuciones	(ii)	(ii)
Continuidad	(ii)	(ii)
Musical - Recital	(ii)	(ii)
Otras categorías	(i)	(i)
TELEVISIÓN		
Todas las categorías	(ii)	(ii)

Tabla 4.1: Categorías de ruido ambiente establecidas por la BBC.

En la Figura 4.15 se pueden apreciar las recomendaciones del ruido máximo de fondo que establece la BBC en dB sobre $20 \mu\text{Pa}$ r.m.s. para cada una de las tres categorías que aparecen en la tabla anterior.

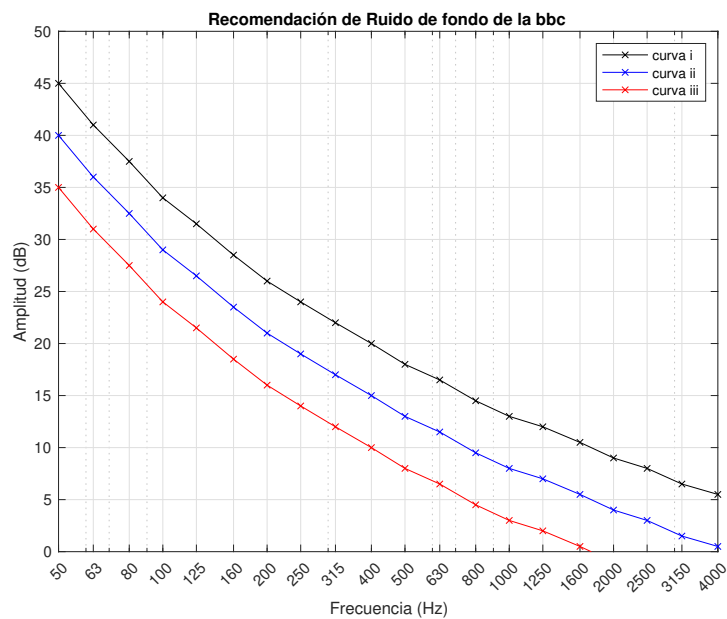


Figura 4.15: Recomendaciones de ruido de fondo de la BBC.

Finalmente, y aunque no es importante de cara al producto final (grabación), el aislamiento acústico de un estudio de grabación es también necesario para que la actividad que se desarrolla en el estudio no sea molesta para posibles vecinos.

Resultado de las mediciones de ruido ambiente

Lo primero que se realizan son unas medidas del ruido ambiente. Para ello, en primer lugar se calibra el sonómetro (descrito arriba), y se realizan una serie de medidas en diferentes puntos, tanto con el equipo de aire acondicionado encendido como apagado. La medición del ruido de fondo se realizó con el sonómetro usando una curva de tipo “A”, obteniendo los siguientes valores (que se recogen en la Tabla 4.2):

Distancia de equipo de A/C	A/C apagado	A/C a máxima potencia
1,0 m	25 dB	42,0 dB
2,5 m	25 dB	36,5 dB
4,0 m	25 dB	34,5 dB

Tabla 4.2: Resultados de mediciones de ruido ambiente.

Se dispone de medidas del ruido ambiente en tercios de octava de la sala, pero no sirven para caracterizarla porque fueron realizadas con el equipo encendido, lo que aumentan la presión sonora en más de 25 dB. También se ha de tener en cuenta que la medición de 25 dB de ruido ambiente se realizó con un sonómetro de Clase 2, y con dos personas en la sala; en todo caso, los resultados indican que la Sala de Registro se puede encontrar entre las categorías de ruido ambiente i y ii de la BBC (según Tabla 4.1).

4.2.3. Tiempo de reverberación

Como consideración general, si el tiempo de reverberación es muy largo, se podrían enmascarar las palabras y si es muy corto se podría perder carácter en las grabaciones, especialmente en las grabaciones musicales [7].

La Sala de Grabación de estudio es una sala “relativamente” pequeña, por lo que las primeras reflexiones ocurrirán rápido, y la sonoridad de la reverberación será diferente del de una sala más grande como puede ser un auditorio, un estadio, o una sala de conciertos.

Además, se tiene en cuenta que, por las características acústicas de una sala pequeña, pueden aparecer resonancias o problemas relacionados con los modos propios de la sala. Estas resonancias suelen generar unos picos sonoros y de reverberación en frecuencias múltiplos de las dimensiones de la sala. Este fenómeno se observa más a fondo en el análisis frecuencial de la sala.

Estos modos de la sala no deberían ser considerados reverberación, ya que no se deben a las reflexiones del sonido, y a su decaimiento, sino a la correspondencia de la longitud de onda de una frecuencia determinada con las principales dimensiones de la sala (distancia entre superficies paralelas).

Consideraciones

Del mismo modo que con el ruido ambiente (o ruido de fondo), a la hora de acondicionar una sala de grabación, existen varias recomendaciones profesionales a seguir. La primera es la Norma ISO 3382-1 [4], norma que especifica la forma de medición de los parámetros acústicos en salas de espectáculos.

A pesar de que la norma ISO 3382-1 [4] no es una norma específica para salas de grabación, se han seguido sus criterios para realizar las mediciones acústicas en este trabajo. Además, se incluye una tabla de rango típico en las medidas acústicas en Auditorios y espacios polivalentes, que sirven como una primera referencia, como se puede observar en la Tabla 4.3 [4].

Aspecto subjetivo del oyente	Magnitud acústica	Promediado en frecuencia de número único ^a Hz	Umbral diferencial (<i>Just noticeable difference</i> , JND)	Rango típico ^b
Nivel sonoro subjetivo	Fuerza sonora, G , en decibelios	500 a 1 000	1 dB	-2 dB; +10 dB
Reverberación percibida	Tiempo de reverberación inicial (<i>Early decay time</i> , EDT) en segundos	500 a 1 000	Rel. 5 %	1,0 s; 3,0 s
Claridad del sonido percibida	Claridad, C_{80} , en decibelios Definición, D_{50} Tiempo central, T_S , en milisegundos	500 a 1 000 500 a 1 000 500 a 1 000	1 dB 0,05 10 ms	-5 dB; +5 dB 0,3; 0,7 60 ms; 260 ms
Ancho aparente de la fuente (<i>Apparent source width</i> , ASW)	Fracción de energía lateral precoz, J_{LF} o J_{LFC}	125 a 1 000	0,05	0,05; 0,35
Envolvente del oyente (<i>Listener envelopment</i> , LEV)	Nivel sonoro lateral final, L_j , en decibelios	125 a 1 000	Desconocido	-14 dB; +1 dB

^a El promediado en frecuencia de número único indica la media aritmética para las bandas de octava, excepto para L_j , que se debe promediar energéticamente [véase la ecuación (A.17)].

^b Valores promediados en frecuencia en posiciones únicas en salas de conciertos y en salas polivalentes vacías hasta 25 000 m³.

Tabla 4.3: Tabla de parámetros típicos en auditorios.

Por otro lado, las recomendaciones profesionales más específicas las encon-

tramos, entre otras fuentes, en las descritas por la BBC (*British Broadcasting Corporation*), en sus publicaciones [5] y [23].

La BBC [5] establece las siguientes tolerancias para estudio de voz en función de su tiempo promedio de reverberación T_m (medido en bandas de tercio de octava entre 200 Hz y 3150 Hz). Se presentan estas tolerancias en la Figura 4.16.

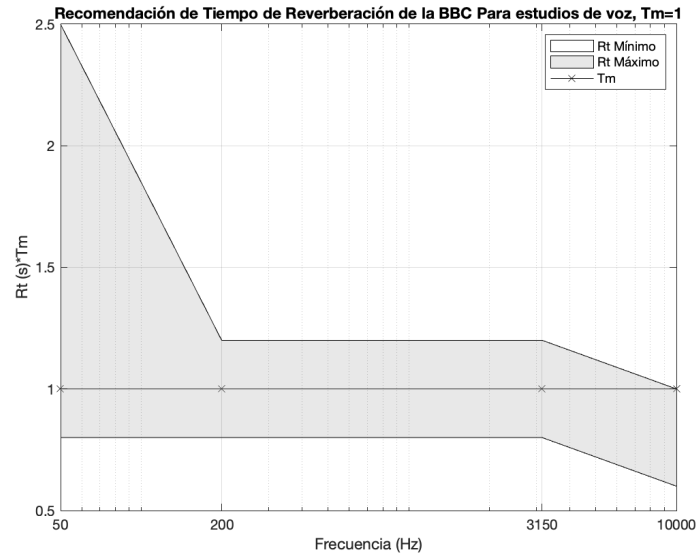


Figura 4.16: Recomendaciones de Reverberación de la BBC para estudio de voz en función de T_m .

Sin embargo, para grandes estudios de música, la BBC es algo más estricta en su criterio [5]. La Figura 4.17 muestra estas recomendaciones para estudios de música grandes. En este caso, sin embargo, se suelen encontrar menos problemas de resonancias en salas suficientemente grandes.

Por último, la BBC establece en [5] un rango de valores para T_m aceptables para estudios de grabación, en función de su volumen. Estos valores los recoge la Figura 4.18 [5].

También el conocido libro *Master Handbook of Acoustics* [7], sugiere un tiempo de reverberación para estudios de grabación.

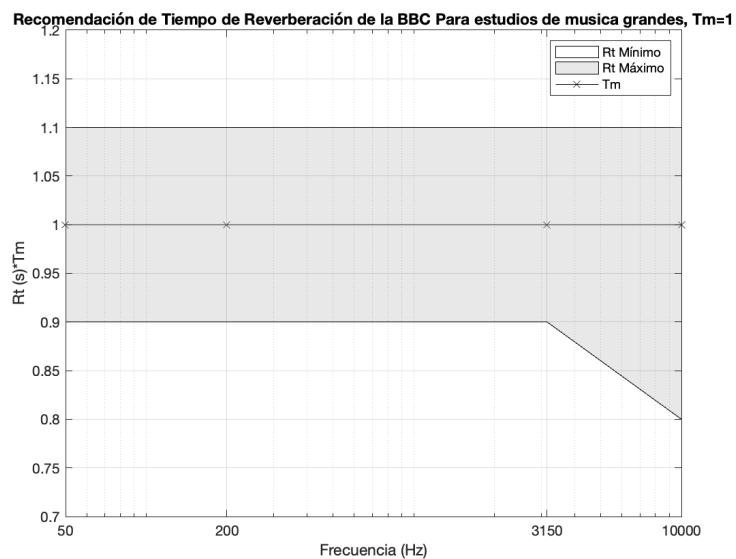


Figura 4.17: Recomendaciones de Reverberación de la BBC para estudio de Musica grande en función de Tm.

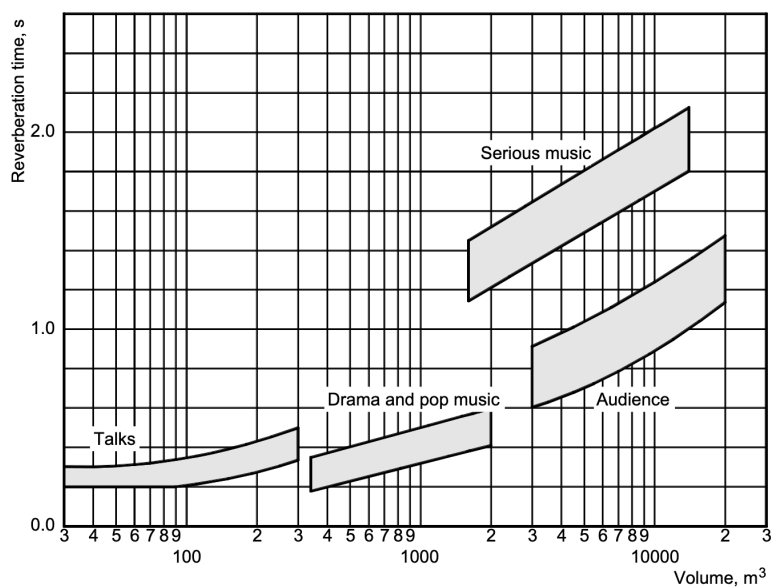


Fig. 2a Typical reverberation time of sound studios

Figura 4.18: Valores Típicos de RT de estudios musicales, BBC WPH 021.

Resultado de las mediciones de tiempo de reverberación

A la hora de medir el tiempo de reverberación, es prácticamente imposible medir el RT, por lo que éste se aproxima midiendo el RT30, es decir, el tiempo en que el sonido tarda en decaer 30 dB.

Para medir el RT, se necesita excitar la sala con un nivel superior a 65 dB sobre el ruido ambiente, es decir, más de 100 dB para nuestra sala con el equipo de amplificación encendido. Este nivel es muy elevado para realizar las mediciones.

A pesar de medir el tiempo que el sonido tarda en decaer 30 dB, se extrapola a 60 dB, por lo que el resultado que se obtiene aproxima el tiempo de reverberación RT realizando mediciones de decaimiento de 30 dB.

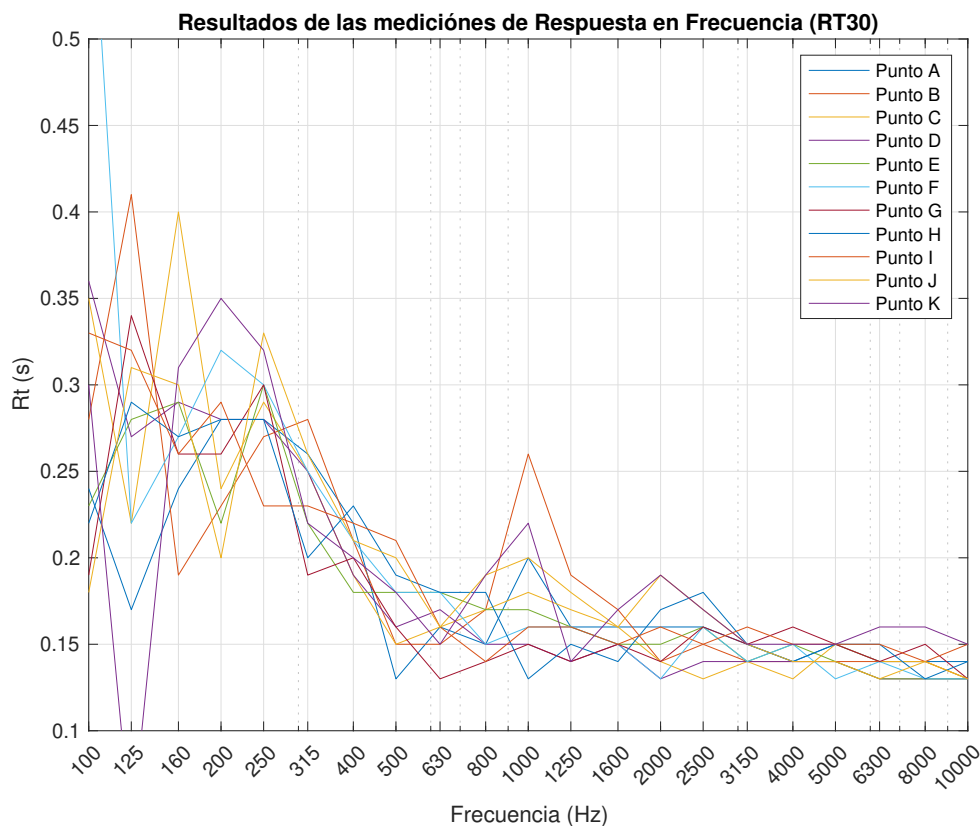


Figura 4.19: Mediciones de RT30 en la sala para los diferentes puntos.

La Figura 4.19 presenta los resultados de las mediciones de RT30 en bandas de tercio de octava para todos los puntos de medición de la sala. Como ya se dijo arriba, las posiciones de medida A, B, C, D, E y F corresponden a la primera posición de la fuente omnidireccional (posición de grabación de baterías), mientras

que las posiciones de medida G, H, I, J y K corresponden a la segunda posición de la fuente omnidireccional (posición de grabación vocal).

La Figura 4.20 muestra el promedio de todas las mediciones de RT30 en tercios de octava, medido entre 200 y 3150 Hz. Para ello, se realiza la media aritmética de los resultados anteriores de RT en bandas de tercio de octava entre 200 y 3150 Hz.

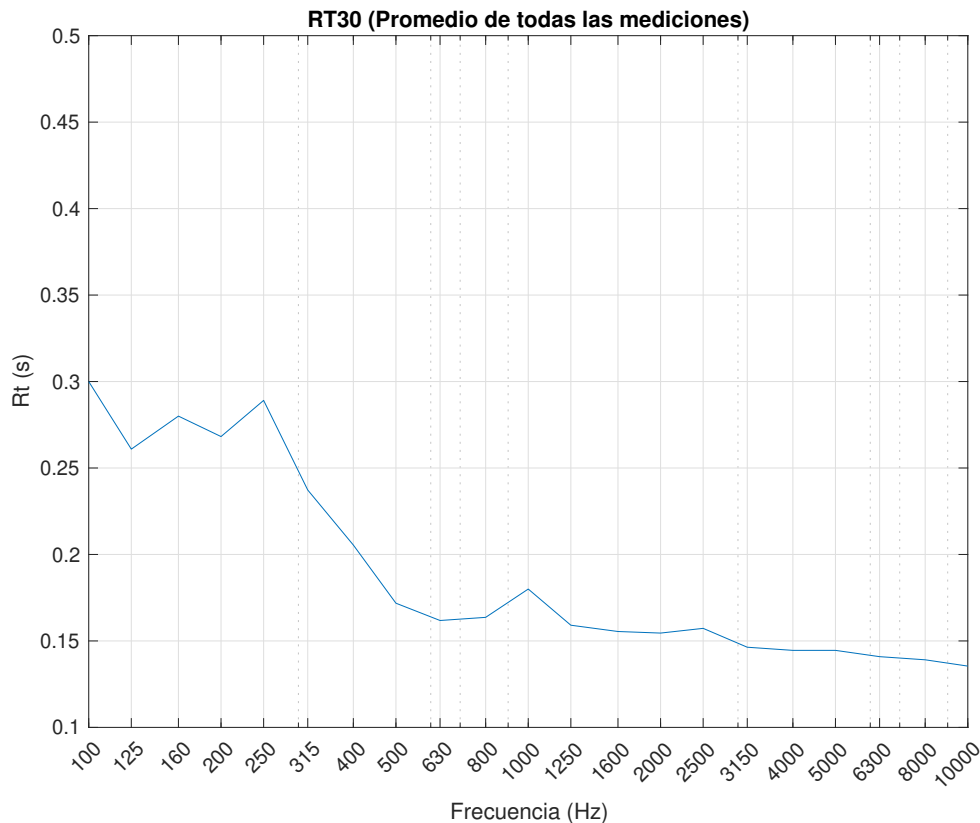


Figura 4.20: RT30 promedio de todas las mediciones.

Posición	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
T30m	0,26	0,25	0,24	0,25	0,23	0,27	0,23	0,25	0,25	0,25	0,24
T30m (BBC)	0,19	0,19	0,18	0,18	0,18	0,19	0,17	0,19	0,19	0,2	0,2

Tabla 4.4: Mediciones de tiempo medio de reverberación con RT30, en s.

La Tabla 4.4 presenta los resultados de las medidas de tiempo de reverberación RT30 promedio, así como los obtenidos de promediar los valores de RT30 en bandas de tercio de octava entre 200 y 3125 Hz para los diferentes puntos de

medición, tal y como establece la BBC para establecer su margen de tolerancia [5].

El promedio de todas estas medidas es **0,187 s** que se encuentra al límite inferior en el margen de valores típicos de RT establecido por la BBC para un estudio de $70,73 \text{ m}^3$ de volumen.

La BBC establece estos márgenes como orientativos, por lo que no supone un problema que la sala se encuentre en el margen inferior, sin embargo esto indica que el estudio es especialmente seco.

Por último, se comparan los resultados de nuestras mediciones de tiempo de reverberación en tercios de octava con las tolerancias recomendadas por la BBC para una sala de $T_{30m} = 0,187 \text{ s}$ como la sala a la que se refiere esta Memoria. Estos resultados se muestran en la Figura 4.21, superpuesta a la Figura 4.16 [5] parametrizada con el RT_m de la sala.

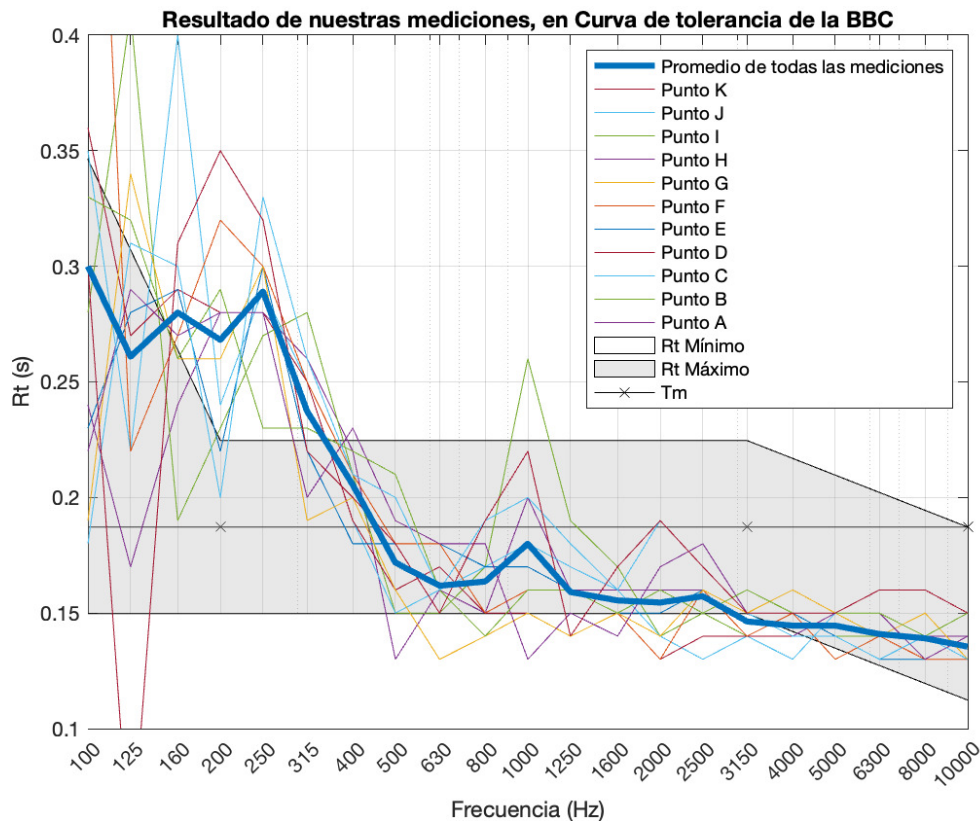


Figura 4.21: Mediciones en la sala de RT_{30} junto con tolerancias recomendadas por la BBC (Figura 4.16).

Tiempo de Reverberación para frecuencias inferiores a 100 Hz

EASERA por defecto calcula el RT en bandas de tercio de octava a partir de los 100 Hz. Resulta interesante conocer el tiempo de reverberación de la sala por debajo de los 100 Hz, para estudiar posibles problemas en las frecuencias más graves determinadas por los modos de la sala, como ya fue observado estudiando los diagramas Waterfall (ver Subsección 4.2.1).

Para calcular los tiempos de reverberación inferiores a los 100 Hz, se debe aplicar un filtro y obtener el tiempo de reverberación de cada banda de tercio de octava en cada medida por separado. Este proceso se explica en los recursos en la pagina web de EASE [24].

Se realiza el proceso para las bandas de tercio de octava en la medida A, obteniendo los siguientes resultados, que se agrupan en la Tabla 4.5:

	25 Hz	32 Hz	40 Hz	50 Hz	63 Hz	80 Hz
EDT	0,85 s	0,92 s	0,69 s	0,30 s	0,31 s	0,34 s
RT10	1,14 s	1,17 s	1,11 s	0,12 s	0,16 s	0,31 s
RT20	1,78 s	1,68 s	1,72 s	1,30 s	0,20 s	0,21 s
RT30	1,36 s	1,30 s	1,26 s	1,25 s	0,79 s	0,29 s

Tabla 4.5: Tiempos de reverberación en frecuencias inferiores a 100 Hz en la posición A.

La Figura 4.22, que se muestra a continuación, es similar a la Figura 4.21, pero añadiendo las bandas de frecuencias inferiores a 100 Hz, para el punto A.

De esta figura no es posible obtener muchas conclusiones; hay una resonancia importante en frecuencias inferiores a 100 Hz, sin embargo, por debajo de esta frecuencia un altavoz como el que se usa para realizar las medidas acústicas no es capaz de reproducir frecuencias graves, para ello se necesitaría un Woofer más grande, o un subwoofer, por lo que no se pueden obtener conclusiones al respecto.

Se deben estudiar los modos propios de la sala para encontrar posibles resonancias en estas frecuencias. Por otro lado si se dispusiese del datasheet de la fuente omnidireccional, o por lo menos de los conos de ésta, se podría aislar su frecuencia resonante. Todo altavoz presenta un pico de impedancia por debajo de las frecuencias que puede reproducir fielmente. Este pico de impedancia coincide con la frecuencia en las que el altavoz resuena.

Probablemente el pico que se observa sobre los 15 Hz coincida con la resonancia del cono, este pico se observa mejor en el Diagrama Waterfall ya visto en

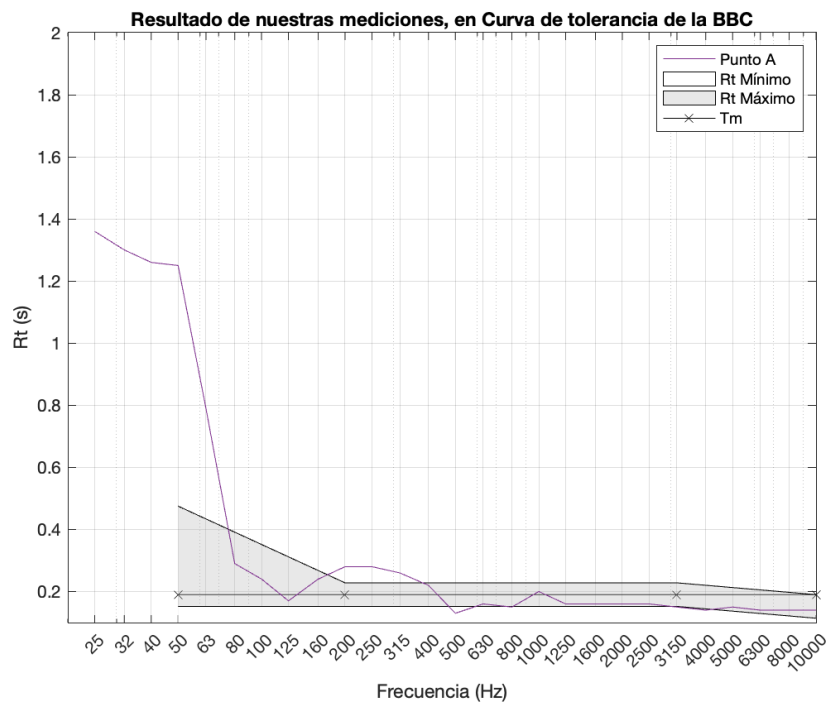


Figura 4.22: Mediciones de RT30 en la sala añadiendo frecuencias graves.

la Figura 4.12. Las resonancias relacionadas con los modos propios se estudiarán en el Capítulo 5.

Observaciones

En reglas generales, la sala de grabación es bastante “seca”, con unos tiempos de reverberación bastante pequeños. Esto se debe en gran medida a que la Sala de Grabación de Soho Sessions es una sala de pequeñas dimensiones, por debajo de las dimensiones de las salas de grabación de los estudios punteros, y ha sido tratada en gran medida con aislante acústico.

Para mejorar la sonoridad de la sala, y obtener una sala algo más viva en agudos, es recomendable cambiar parte del aislante que recubre la sala por paneles difusores acústicos como los mostrados en la Figura 4.23. Estos paneles evitan las resonancias de la sala, pero en lugar de aislar el sonido, lo reflejan dispersándolo en muchas direcciones. Se gana algo de viveza y tiempo de reverberación en la sala, especialmente en frecuencias agudas, pero al dispersar el sonido en múltiples direcciones evitamos problemas de resonancias.

En la Figura 4.23 se muestran unos difusores acústicos comerciales [25].



Figura 4.23: Detalle de difusores acústicos comerciales .

El comportamiento del tiempo de reverberación es uniforme en todas las medidas en el rango de frecuencias entre los 500 Hz y 10 kHz. Esto significa que en las distintas posiciones de la sala en la que se han tomado datos experimentales, los resultados son semejantes, y esto es bueno de cara a la calidad de la Sala de Grabación. Existe un pequeño pico de resonancia cerca de los 1000 Hz en las mediciones realizadas en la posición de fuente A (*A, B, C, D*), aunque no es muy problemático. Pueden deberse al acristalamiento de la sala (ventana que la separa del Control, la denominada “pecera”), o a algún objeto resonante de la sala (se ha de tener en cuenta que, a pesar de sacar la batería, la sala se encuentra en su estado habitual con altavoces e instrumentos acústicos en su interior).

Debido a las dimensiones de la sala, aparece un pico de reverberación en las frecuencias por debajo de los 500 Hz que se debe mejorar. Entre los 160 y 400 Hz se debe trabajar para que la sala cumpla con las tolerancias recomendadas por la BBC con el objetivo de cumplir las recomendaciones de tolerancia de la BBC. Como la sala ya tiene mucho tratamiento con aislante acústico, se recomienda recurrir a otros remedios tales como trampas de graves o, posiblemente resonadores.

Estos problemas se acentúan por debajo de los 200 Hz, cuando aparecen nodos y nudos acústicos, es decir, puntos donde las frecuencias suman y se forma una resonancia, y puntos donde las frecuencias se restan. El tiempo de reverberación varía en función de la posición de medida. Estos problemas están

relacionados con los modos de la sala, son comunes a todas las salas pequeñas y para ser mejorados debemos usar métodos de acondicionamiento acústico más complejos.

En el Capítulo 5, dedicado a simulación se estudiará más a fondo algunos de estos problemas, y proporcionar posibles mejoras que solucionen o remedien estos inconvenientes acústicos.

4.2.4. Respuesta en frecuencia

Consideraciones

Las recomendaciones técnicas no hablan ni establecen recomendaciones acerca de la respuesta en frecuencia de la habitación. Esto es así, porque la respuesta en frecuencia de una habitación se compone de la respuesta en frecuencia del sonido directo más la respuesta en frecuencia del sonido debido a las reflexiones.

- La respuesta en frecuencia del sonido en campo abierto depende de varios factores, tales como distancia de la fuente o temperatura. Existe una atenuación en bajas frecuencias dependiente de factores como la presión y la temperatura [26] [27], esta atenuación es característica del aire, y no de una sala concreta.
- La respuesta en frecuencia de las reflexiones ya fue estudiada previamente, y es la que realmente caracteriza la respuesta en frecuencia de la sala.

A la hora de realizar la medición acústica de la sala, se ha utilizado una fuente omnidireccional, la cual no se caracteriza por ser plana en todo el rango frecuencial de emisión.

Esto impide caracterizar adecuadamente la respuesta en frecuencia de la sala usando las mediciones acústicas que se han realizado, ya que a la hora de analizar los resultados, la propia curva de respuesta en frecuencia de nuestra fuente omnidireccional estará distorsionando los resultados.

Sería interesante disponer de una caracterización espectral de esta fuente acústica de emisión realizada en una cámara anecóica para tener su respuesta en frecuencia, y poder, de este modo, normalizar los resultados de nuestras mediciones experimentales para obtener así mejores conclusiones sobre la respuesta en frecuencia de nuestra Sala de Grabación o Sala de Registro.

La Figura 4.24 compara las mediciones de respuesta en frecuencia en los puntos descritos en la Figura 4.11.

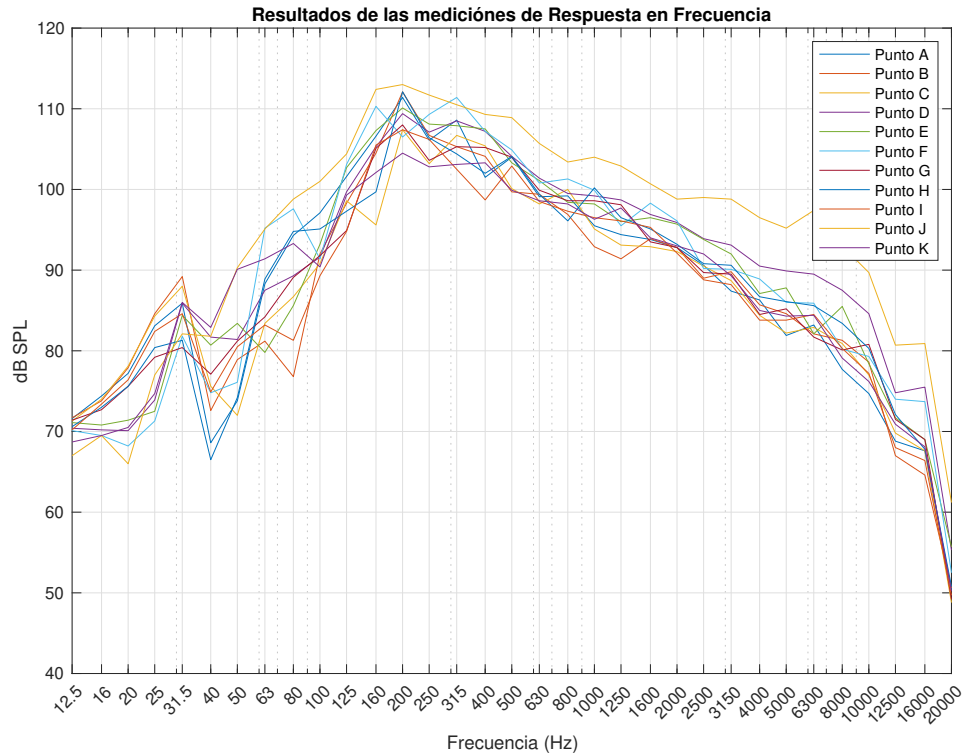


Figura 4.24: Mediciones de respuesta en frecuencia de la fuente omnidireccional en la sala.

Como se ha dicho, las siguientes conclusiones han de considerarse provisionales, en tanto no sea posible conocer la propia respuesta en frecuencia de la fuente omnidireccional:

- El pico cerca de los 200 Hz-250 Hz, que puede deberse a una resonancia de la sala.
- Las frecuencias graves se ven atenuadas, esto es así porque la fuente omnidireccional se compone de un único Driver que difícilmente podrá reproducir estas frecuencias.
- Las frecuencias agudas también se ven atenuadas, debido a que la fuente omnidireccional no tiene Tweeter, únicamente un Woofer.

4.2.5. Otros parámetros acústicos

Resultado de las mediciones de otros parámetros acústicos

Se presentan los resultados experimentales obtenidos para otros parámetros acústicos definidos en la Sección 2.2, y se recogen en la Tabla 4.6. El Bass Ratio ha sido únicamente calculado para la posición de medida A.

Posición	EDT	T30	C50	C80	%ALcons	(RA)STI	BR
A	0,21	0,26	13,7 dB	19,8 dB	1,307	0,911	0,23
B	0,18	0,25	13,8 dB	22,3 dB	1,161	0,926	
C	0,20	0,24	15,4 dB	22,5 dB	1,220	0,922	
D	0,17	0,25	16,6 dB	24,9 dB	1,125	0,943	
E	0,25	0,23	14,0 dB	20,9 dB	1,224	0,931	
F	0,20	0,27	13,6 dB	21,9 dB	1,177	0,938	
G	0,23	0,23	14,5 dB	19,9 dB	1,346	0,918	
H	0,23	0,25	14,6 dB	21,7 dB	1,220	0,933	
I	0,20	0,25	14,1 dB	20,3 dB	1,284	0,922	
K	0,20	0,24	15,7 dB	25,1 dB	1,239	0,910	

Tabla 4.6: Mediciones de otros parámetros acústicos en la Sala de Grabación.

Los resultados anteriores arrojan las siguientes conclusiones:

- La sala se comporta de una manera especialmente seca, esto ya se observó anteriormente al estudiar el tiempo de reverberación y comparándolo con las recomendaciones de la BBC [5]. En este caso, el EDT es inferior al T30, por lo que el sonido decae rápidamente en las primeras reflexiones. Para obtener una sala algo más viva se recomienda sustituir parte del tratamiento acústico de lana de roca por paneles difusores.

Esto repercutirá en la calidad del sonido, especialmente en grabaciones musicales, ya que es esperable obtener unas tomas con un sonido más natural, y más fácil de trabajar con él [22].

- La inteligibilidad es muy buena; todos los indicadores tales como C50, C80, Alcons y (RA)STI indican niveles muy altos de inteligibilidad y muy bajos de pérdida de consonantes. La sala, por lo tanto es idónea para realizar locuciones y grabaciones de voz.
- No se recomienda un bass ratio superior a 1,45 para salas con tiempo de reverberación menor a 1 s; además, para locuciones lo ideal es que se

encuentre en un rango lo más cercano a 1. El valor de este parámetro nos expresa la problemática ya descrita de la sala con resonancias en bajas frecuencias.

Capítulo 5

Caracterización a partir de simulación

Contenido

5.1 Modelado de la Sala de Grabación en 3D	51
5.2 Simulación acústica	54
5.3 Tiempo de reverberación	57
5.4 Respuesta en frecuencia	60
5.5 Gráfico Waterfall	61

En el presente capítulo, en primer lugar se comenta el proceso de modelado de la sala de grabación que se ha llevado a cabo usando el software de CAD Sketchup. Posteriormente, se presenta la simulación acústica que se ha realizado con EASE. Finalmente, se estudian los parámetros acústicos que se obtienen de la simulación acústica de la sala, y se comparan con los obtenidos anteriormente en el Capítulo 4.

5.1. Modelado de la Sala de Grabación en 3D

Se ha realizado un proceso de modelado en tres dimensiones de la Sala de Grabación de Soho Sessions para, posteriormente, poder realizar simulaciones acústicas usando el software de simulación acústica comercial EASE, de la firma AFMG (Ahnert Feistel Media Group).

Para realizar este modelado 3D se ha decidido usar el software de modelado Sketchup, ya que el editor interno de EASE es muy básico y complejo de usar

para diseños algo más complejos, siendo más adecuado, por tanto, un software como Sketchup.

Sketchup [28] es un programa informático de modelado 3D muy intuitivo y sencillo de utilizar, pero que posee todas las características atribuibles a un software de modelado en tres dimensiones profesional.

Partiendo de las mediciones que se realizaron in-situ con el medidor láser, se procedió a dibujar la base y sobre ésta levantar las paredes y añadir el mobiliario. La Figura 5.1 representa las medidas obtenidas en la sala.

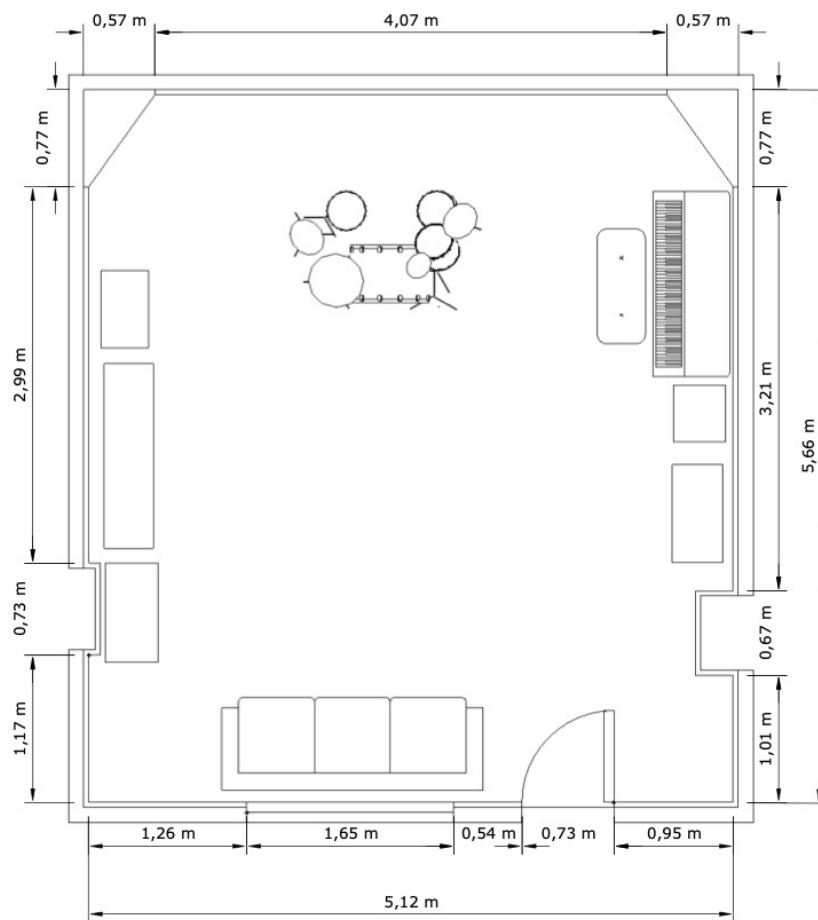


Figura 5.1: Plano de la sala basado en las mediciones realizadas in-situ.

A la hora de realizar el modelado hay que seguir una serie de convenciones y reglas para que posteriormente EASE reconozca el modelo 3D. Estas características están especificadas en la Guía de Usuario de EASE [12], así como en sus recursos web [29].

En primer lugar, se intentó exportar el modelo 3D como archivo .dwg para importarlo en EASE; la importación era correcta, pero, sin embargo, EASE triangulaba todas las caras, y no realizaba bien la simulación.

Finalmente se tuvo que exportar el modelo como SKP versión 7, ya que EASE no reconoce versiones posteriores de Sketchup. Sin embargo, para poder realizar simulaciones en EASE con un modelo, éste debe ser un modelo cerrado, y no tener huecos. Un modelo cerrado es un modelo que no se encuentra al aire libre, y que esta cerrado por todos sus lados. Si un modelo tiene huecos, implica que a la hora de realizar la simulación hay aperturas que conectan con el exterior.

Si se deseara realizar una simulación de un modelo al aire libre, entonces el modelo deberá ser abierto, pero en este caso se trata de una habitación cerrada y hermética. En primer lugar, se desmarca la casilla de Room open, y se pulsa en check holes. EASE detectaba múltiples errores, que no se podían arreglar fácilmente. Se comprobó que el problema residía en que había líneas que coincidían en el mismo lugar que otras en Sketchup (ver Figura 5.2), por lo que finalmente se decidió volver a modelar desde cero.

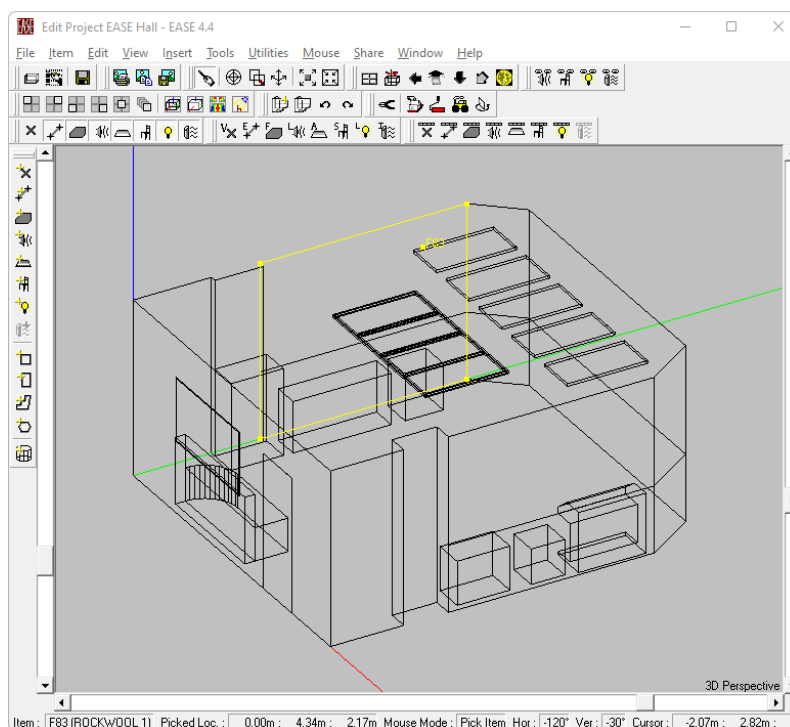
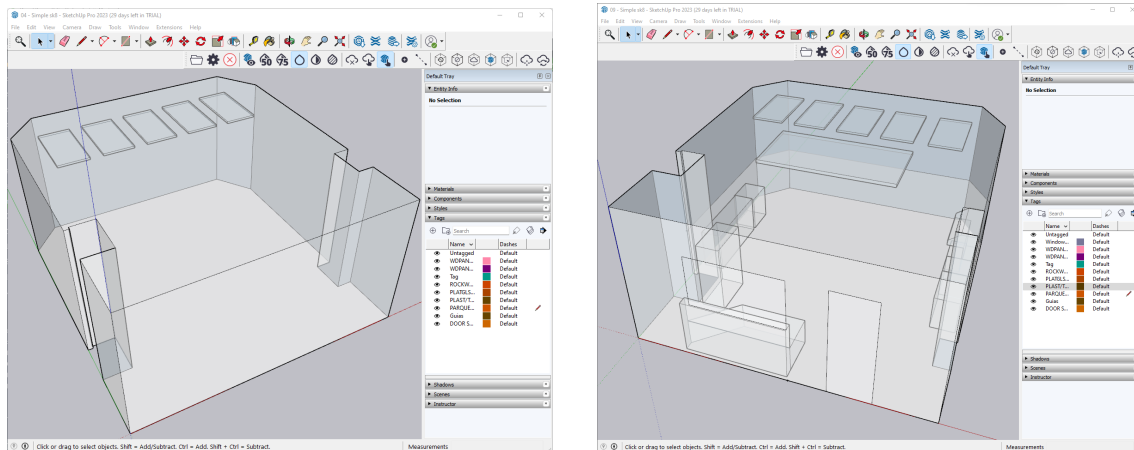


Figura 5.2: Sala cargada en EASE.

Se realizó un modelo simplificando al máximo posible cada elemento, y añadiendo elementos poco a poco para estar seguros de que EASE reconociera en

todo momento el modelo.

El primer modelo sobre el que se probó, muy simplificado, es el que se muestra en la Figura 5.3a. Este modelo fue reconocido por EASE sin dificultad, y al pulsar en delete holes en la ventana de check holes no apareció ningún problema. Sobre este modelo se fueron añadiendo detalles paso a paso hasta obtener el modelo de la Figura 5.3b, totalmente funcional en EASE, y mucho más aproximado a la realidad de la Sala de Grabación.



(a) Primer modelo de Sala funcional.

(b) Modelo de Sala completo.

Figura 5.3: Modelos de Sketchup básico y completo.

Finalmente, se consiguió importar el modelo en EASE, y que lo reconociera e interpretara correctamente. Al pulsar en Close Holes, aparece un mensaje que indica que todo es correcto (“Well Done”). Se puede continuar, abriendo la ventana de room data, y pulsando en recalcular. La habitación, según EASE, tiene un volumen de **70,73 m³** y un área efectiva de **153,31 m²**.

5.2. Simulación acústica

Una vez se dispone de un modelo funcional en EASE, el primer paso es revisar el tiempo de reverberación obtenido en el simulador, y compararlo con el obtenido en las mediciones de la sala. El objetivo de este proceso es intentar partir con una simulación lo más fiel a la realidad posible. Para ello, se accede al apartado de “Optimize RT” que proporciona el simulador EASE.

Se abre una ventana en la cual se introduce un tiempo de reverberación en

bandas de tercio de octava objetivo (éste es el tiempo de reverberación obtenido en las mediciones). La Figura 5.4 muestra cómo llevar a cabo esta operación. Esta ventana permite ajustar los parámetros acústicos de los materiales para que sean lo más fieles a la realidad, con el objetivo de que el tiempo de reverberación simulado sea lo más cercano al medido. Es posible, por ejemplo, cambiar el tipo de madera de nuestro suelo laminado, o el tipo de aislante acústico que se usa en las paredes.

La Figura 5.4 muestra el tiempo de reverberación simulado en azul, junto con el tiempo de reverberación objetivo en negro, con un margen de tolerancia.

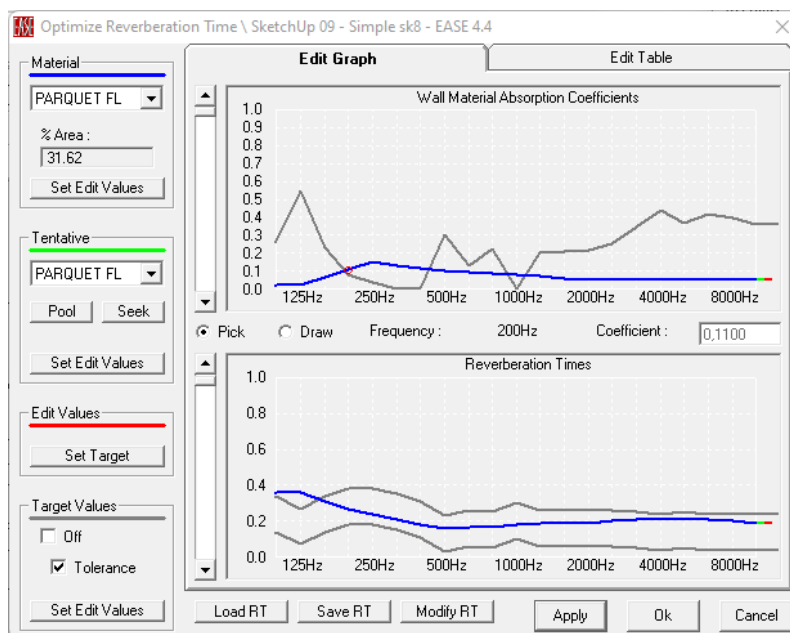


Figura 5.4: Ventana de Optimize RT, con el tiempo de reverberación estimado, junto con el medido experimentalmente.

Tras comprobar que el tiempo de reverberación simulado corresponde con el medido en la sala al menos de forma aproximada, se procede añadiendo una fuente omnidireccional, junto con un área de medida y varios asientos de escucha, imitando las mediciones que se realizaron en la posición de fuente A descrita en la Figura 4.11a. En la Figura 5.5 se observa la ventana de EASE con la fuente omnidireccional, así como las áreas y asientos de escucha ya situados donde corresponde.

De esta forma, se comienza con las simulaciones acústicas. Para ello, se utiliza el Módulo AURA que incluye la licencia de EASE. Este módulo es un motor de simulación avanzado que utiliza la teoría de rayos. Con este módulo se pueden

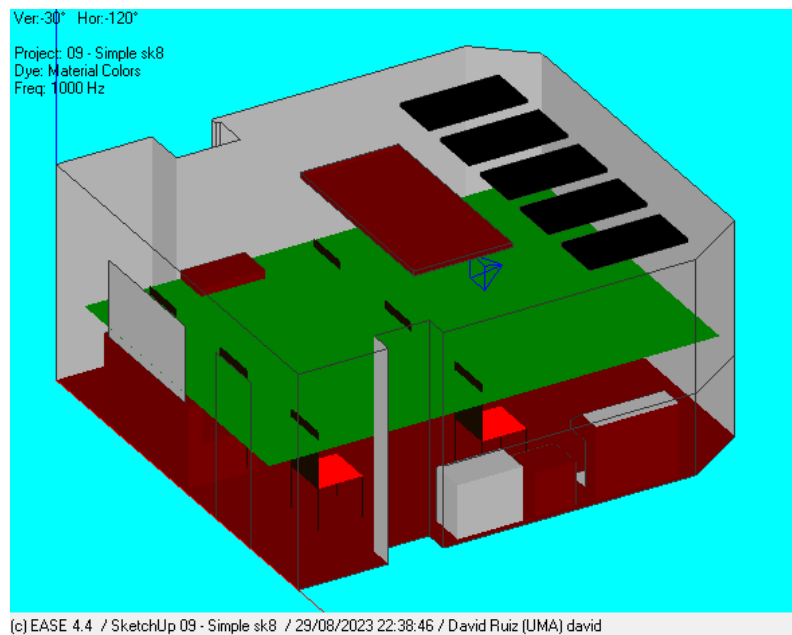


Figura 5.5: Ventana de EASE con las áreas de escucha.

realizar simulaciones mucho más precisas que con otras aproximaciones. En primer lugar, se realiza un Mapa Aura seleccionando tanto el área de escucha junto con los puntos de escucha.

Se observa en un primer momento cómo el tiempo de reverberación es algo superior al obtenido en las mediciones. No obstante, esto es algo normal, ya que ni la simulación ni el modelo pueden representar absolutamente todos los parámetros de la realidad. La sala se encuentra más vacía que en la realidad, los parámetros de absorción de los materiales son orientativos, el techo es de gotelé que actúa como difusor, la temperatura del aire varía, las mediciones se realizaron con dos personas en la sala actuando como aislantes, etc. Todos estos parámetros, y otros, no son tenidos en cuenta por la simulación.

Para intentar acercarse más aún al valor del tiempo de reverberación obtenido en las mediciones experimentales y así tener un modelo más fiel de la Sala de Grabación, se decide añadir a nuestro modelo 3D dos alfombras que se hallan presentes en el suelo de la Sala de Grabación, y ver el resultado de la simulación con éstas. Se comprueba que su introducción reduce ligeramente el tiempo de reverberación en medios-agudos, aunque no demasiado.

Estas alfombras se colocaron en la sala con el objetivo de reducir un poco el

flutter echo¹ que había entre el suelo y el techo, además de servir de un punto de apoyo para colocar la batería en el suelo y que no se desplace durante las grabaciones.

La Figura 5.6 muestra una comparativa entre la simulación sin alfombras y con alfombras, y el tiempo de Reverberación RT30 medido en la sala.

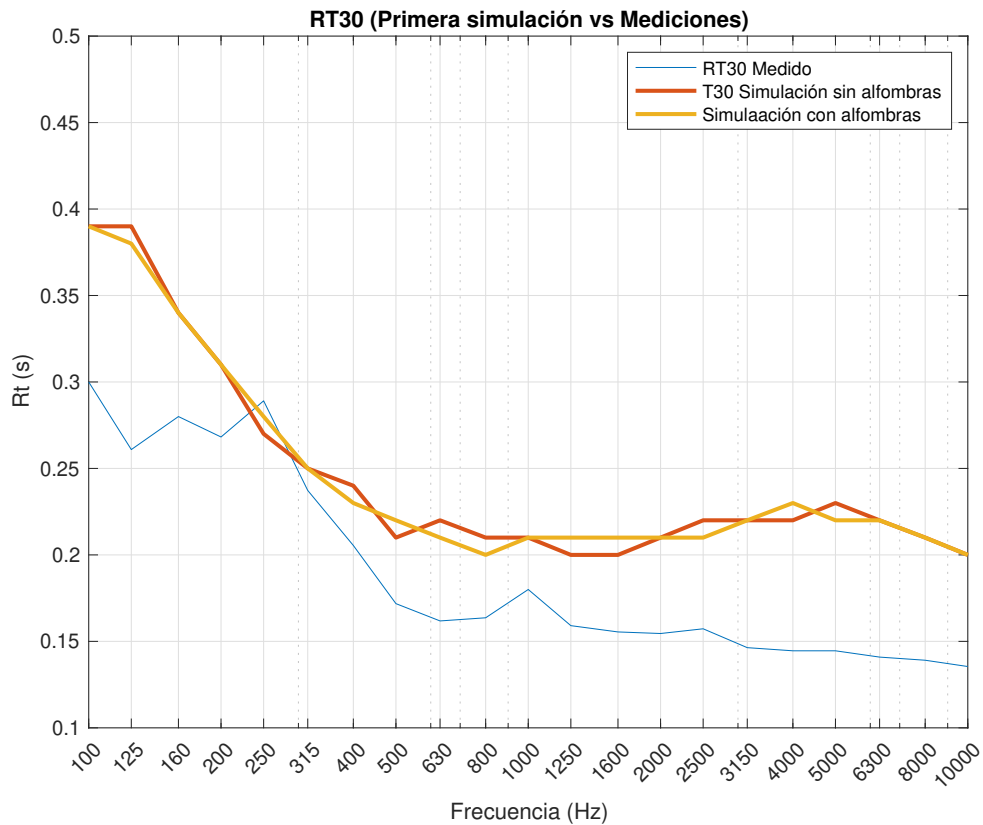


Figura 5.6: Resultados de RT30 promedio en las mediciones, y la simulación con Aura (sin y con alfombras).

5.3. Tiempo de reverberación

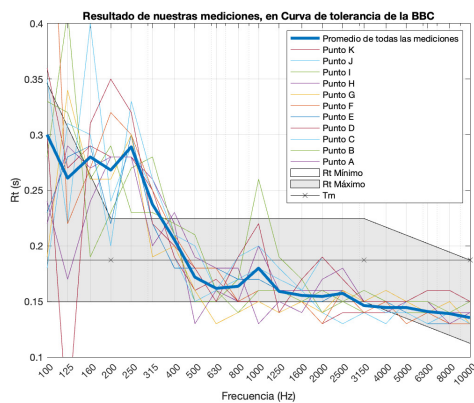
Se ha realizado una simulación del tiempo de reverberación RT30 en los asientos de escucha A, B, C, D, E, F que se corresponden con las posiciones

¹Flutter Echo: efecto audible de las reflexiones entre dos superficies reflectantes.

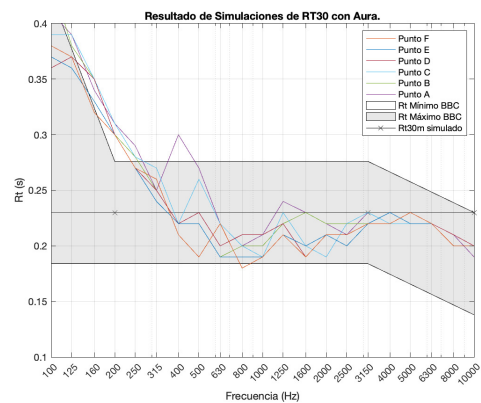
de medida homónimas. Se calcula un tiempo de reverberación RT30 promedio de **0,23 s**.

La Figura 5.7 muestra una comparación entre los resultados experimentales obtenidos en las medidas de los tiempos de reverberación con los resultados obtenidos para las simulaciones acústicas para este mismo parámetro.

Las Figuras 5.7a (copia de la Figura 4.21) y 5.7b comparan los tiempos de reverberación RT30 simulados en los diferentes asientos de escucha con las recomendaciones de la BBC, junto con la misma gráfica realizada con los datos de las mediciones.



(a) Resultados de las Mediciones.



(b) Resultados de las Simulaciones.

Figura 5.7: Resultados de las mediciones y las simulaciones de RT30.

La Figura 5.8, por su parte, muestra el tiempo de reverberación incluyendo las bandas de frecuencia inferiores a 100 Hz. Esto se ha realizado con EASERA usando el mismo procedimiento descrito en la Sección 4.1.3.

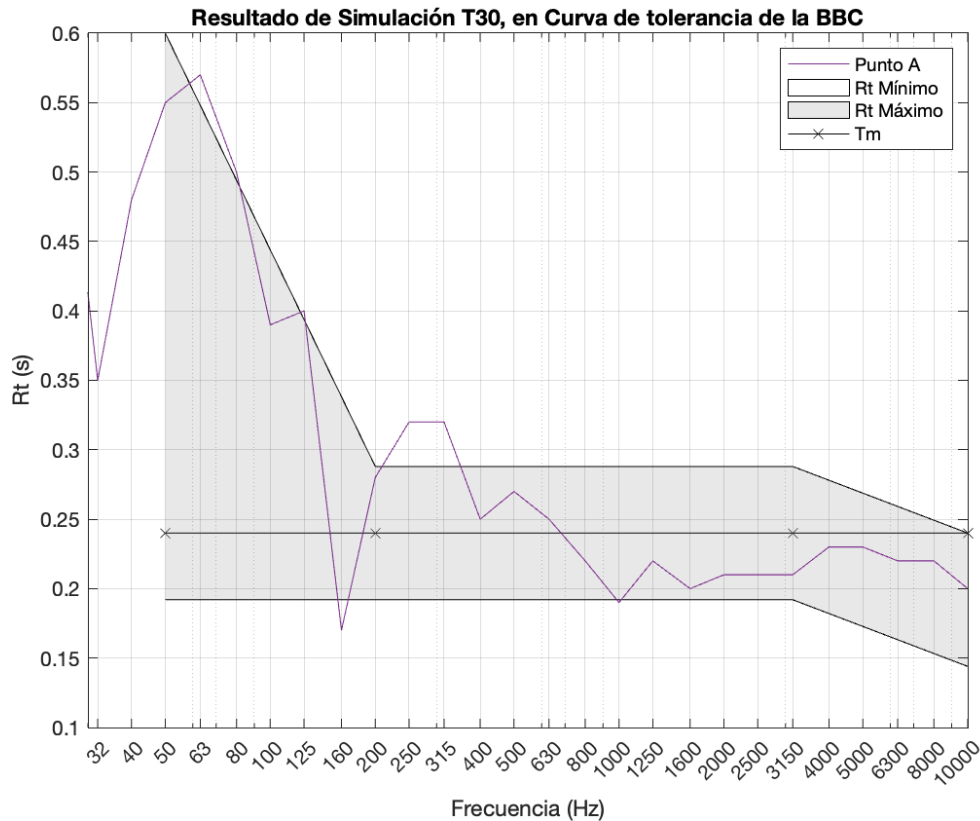


Figura 5.8: Resultados de la simulación de RT30 con curva de tolerancias de BBC para valores entre 20 Hz y 10000 Hz.

Se pueden obtener conclusiones muy interesantes de la Figura 5.8. En ella se aprecian tres resonancias en la sala importantes en los máximos de esta curva. Estas tres resonancias se encuentran alrededor de 63 Hz, 125 Hz y 250 Hz.

Cerca de los 63 Hz se observa una relación con la longitud de onda entre techo y suelo. La distancia entre techo y suelo es de 263 cm.

Existe una relación geométrica entre estas figuras:

$$63Hz * 2 \approx 125Hz$$

$$63Hz * 4 \approx 250Hz$$

Esta relación no es casual; esas tres frecuencias son armónicos de la frecuencia primera. 125 Hz y 250 Hz son el primer y el tercer armónico de 63 Hz respectivamente.

Estas resonancias son las que ya se describieron como **Modos Propios**, están generadas en frecuencias con longitudes de onda múltiplos de la distancia entre paredes paralelas. Cuando se reproduce un tono de una frecuencia, éste genera gradientes de presión variables, estos sonidos se reflejan, y se suman con los que se emitieron en primera instancia. La Sección 2.2.8 profundiza en la teoría de los modos propios de una sala.

Si la longitud de onda del sonido emitido es el doble de la longitud entre dos paredes paralelas, cuando el pico del sonido se refleja entre superficies paralelas, se generan nodos, o puntos donde la frecuencia emitida con la reflejada se suman y generan una resonancia.

En la sala, la distancia entre suelo y techo es de 2,63 m. La frecuencia de una onda cuya longitud de onda es $2,63m * 2 = 5,26m$ es de:

$$f = \frac{v}{\lambda}; \quad (5.1)$$

$$f = \frac{343m/s}{5,26m} = 65,209Hz.$$

Si se actúa intentando eliminar la resonancia a esta frecuencia, también se reducirán las frecuencias múltiplos de ésta, relacionadas con este mismo fenómeno [30].

5.4. Respuesta en frecuencia

Usando el módulo de Aura, en este caso sí que es posible obtener conclusiones fiables de la respuesta en frecuencia de la sala simulada, ya que la fuente situada en el simulador es una fuente ideal, y por tanto, plana en su respuesta espectral de emisión.

Los resultados de las mediciones de respuesta en frecuencia se observan en la Figura 5.9.

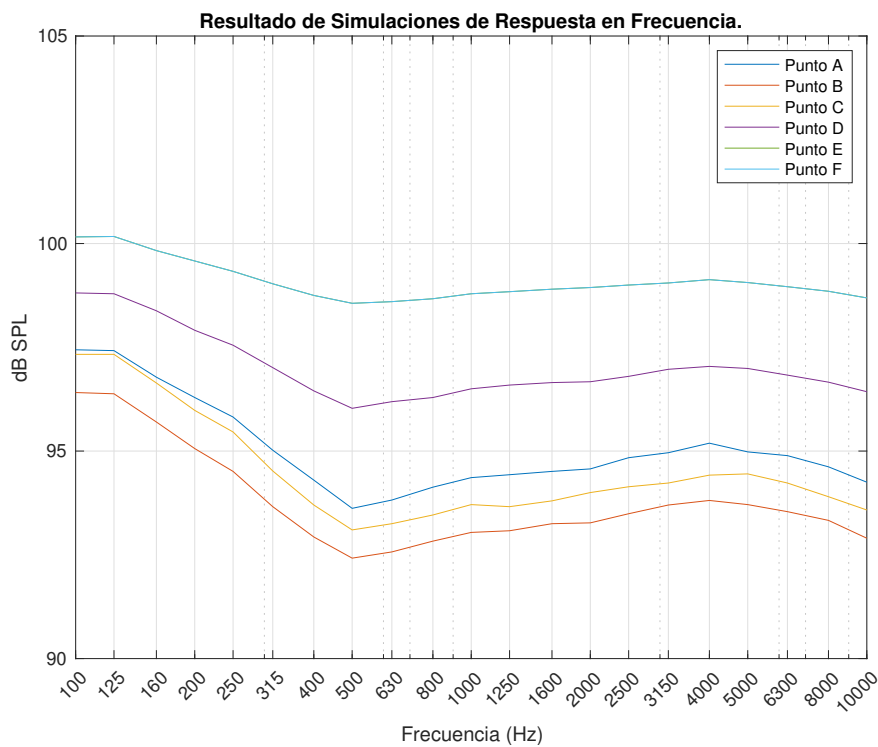


Figura 5.9: Resultados de la simulación de respuesta en frecuencia de la sala.

5.5. Gráfico Waterfall

La Figura 5.10 muestra el gráfico Waterfall obtenido tras realizar una simulación con AURA a la máxima resolución posible.

En esta figura se puede apreciar bastante bien el comportamiento modal de la sala descrito anteriormente, se aprecia bastante energía en el tiempo en las frecuencias que corresponden con estos modos.

A pesar de tener este comportamiento modal, el tiempo de reverberación en bajas frecuencias no es especialmente elevado, y no debe suponer un problema para las grabaciones musicales, aunque se recomienda trabajar para reducirlo en la medida de lo posible.

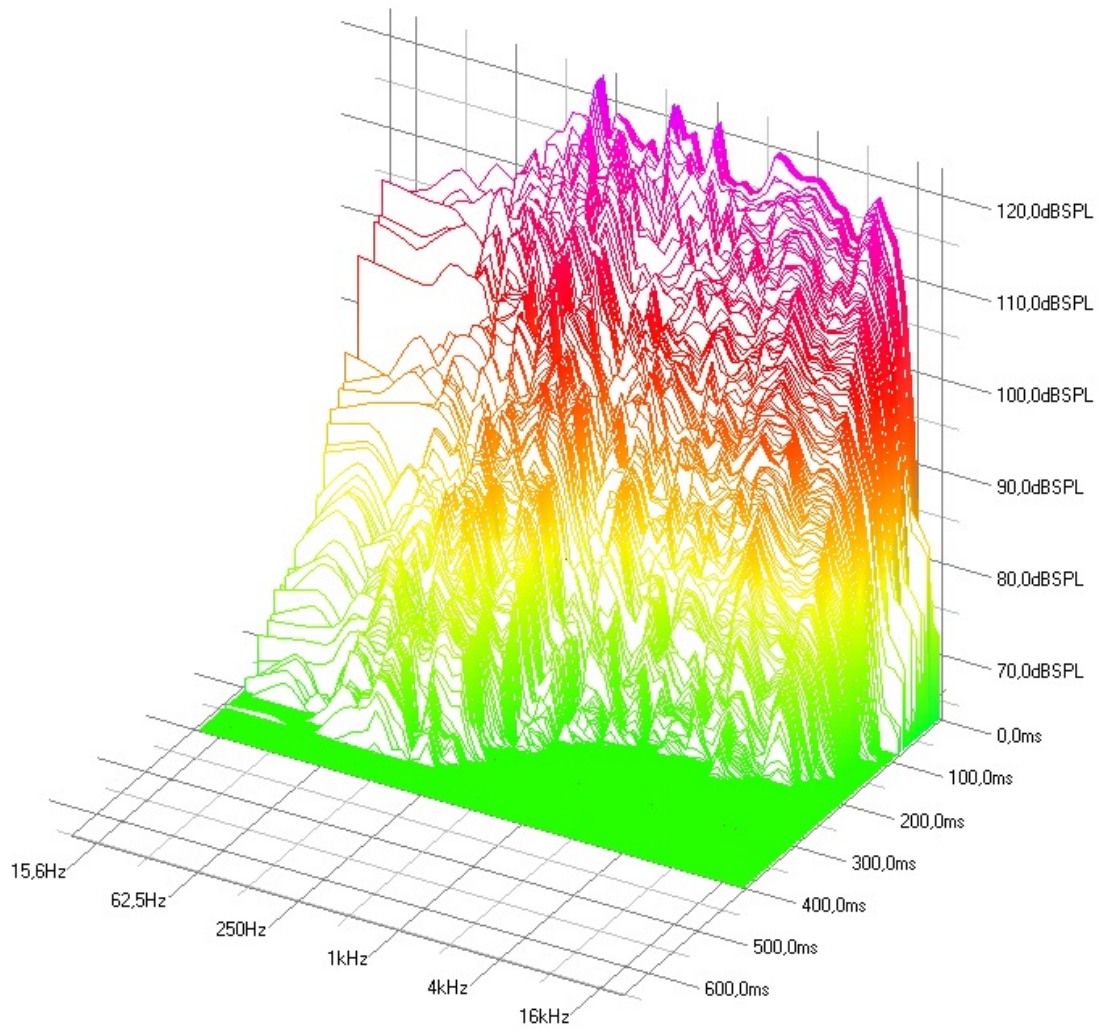


Figura 5.10: Gráfico Waterfall obtenido en la simulación.

Capítulo 6

Propuestas de mejora

Contenido

6.1 Difusores acústicos	63
6.2 Resonadores	67
6.3 Presupuesto	75

En este Capítulo, se presentan los metodos que se proponen para mejorar la situación acústica de la sala de grabación del estudio Soho Sessions. Para ello, analizando los valores obtenidos hasta el momento, se plantean posibles soluciones, y se simula comprobando la mejoría de la sonoridad de la sala.

6.1. Difusores acústicos

Para aumentar ligeramente el tiempo de reverberación en altas frecuencias de la sala, mejorar la relación del EDT con respecto al RT30, y mejorar la sonoridad de la sala haciéndola algo más viva sin sacrificar otros parámetros acústicos, se propone sustituir los paneles acústicos que cubren el techo por paneles difusores.

Estos paneles difusores, a diferencia de los paneles aislantes, actúan en la acústica de las salas, en lugar de absorbiendo el sonido, reflejándolo en muchas direcciones. Esto ayuda a evitar reflexiones y resonancias molestas, pero aporta cierta viveza a la sala, algo que se ha detectado que falta en la Sala de Grabación de Soho Sessions.

Para caracterizar un difusor acústico, se utiliza, además del coeficiente de

absorción α , el coeficiente de Difusión α_s , o el coeficiente de Scattering.

Los coeficientes de difusión y de scattering aportan información sobre cómo las ondas sonoras se reflejan en múltiples direcciones [31], [32].

Se propone un difusor comercial “RPG Omnifusor” de madera suministrado por la empresa británica GRB Acoustics [33]. La Figura 6.1 muestra un ejemplo de estos difusores comerciales.

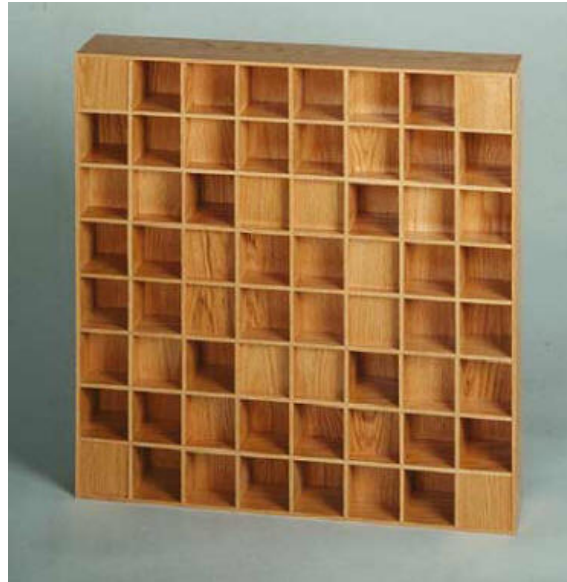


Figura 6.1: RPG Omnifusor.
Fuente [33]

El datasheet [34] del difusor aporta información sobre su coeficiente de absorción, de difusión y de scattering. Para comprobar el funcionamiento de estos difusores en la sala, se ha de crear un nuevo material en EASE con los valores obtenidos. Para ello, se abre la ventana “Add new material” en EASE, y se importa los valores del coeficiente de absorción y de scattering proporcionados en la ficha técnica ; dándole como nombre RPG Omnifusor. La Figura 6.2 muestra este proceso.

Posteriormente, se cambia en la simulación el material inicial de los cinco paneles acústicos de $60 \times 120 \text{ cm}^2$ que conforman el techo, junto con el panel grande de $240 \times 120 \text{ cm}^2$ por el RPG Omnifusor. Para cubrir esta superficie entera se necesita de 18 difusores acústicos, ya que se fabrican en medidas de $60 \times 60 \text{ cm}^2$. En la Figura 6.3 puede apreciarse este cambio de elementos acústicos en la ventana de la simulación del programa informático EASE. La Figura 6.3 muestra la sala con los difusores acústicos en color negro.

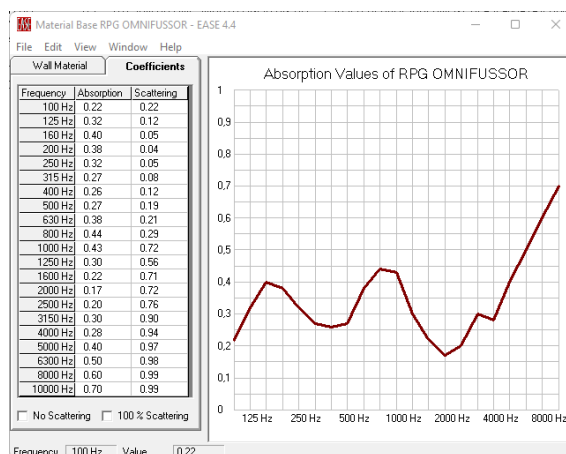


Figura 6.2: Valores de Absorción y Scattering añadidos a la base de datos de materiales de EASE.

Los resultados se recogen en la Figura 6.4; se muestra la diferencia en bandas de tercio de octava de RT30 de la sala original con paneles acústicos formados por lana de roca, y sustituyendo éstos por difusores Acústicos RPG Omnisfussor.

La Tabla 6.1 detalla los parámetros acústicos de la simulación antes y después de cambiar los paneles acústicos por difusores.

	EDT	T30	C50	C80	%ALcons	(RA)STI
Con Paneles	0,20	0,22	14,6 dB	22,5 dB	1,495	0,921
Con Difusores	0,21	0,25	12,9 dB	20,4 dB	1,579	0,896

Tabla 6.1: Resultados de los parámetros acústicos con paneles o con difusores.

En la Figura 6.4 puede observarse un crecimiento de los valores para el tiempo de reverberación, especialmente en las frecuencias agudas (entre 1300 Hz y 4000 Hz). Con la introducción de estos difusores, por tanto, se consigue una sala ligeramente más viva, un aspecto especialmente positivo para las grabaciones musicales.

Existen alternativas más económicas a los RPG Omnisfussor como los difusores Hoffa Diffusor Set. También se pueden diseñar y construir los difusores a mano. Para diseñar, o caracterizar otros difusores acústicamente se puede usar la herramienta EASE Reflex, también propietaria de AFMG, con la que se puede diseñar un patrón y estudiar su coeficiente de absorción y Scattering para posteriormente añadirlo como material en EASE para realizar simulaciones acústicas. En la referencia [31] se expone de manera bastante detallada cómo se puede

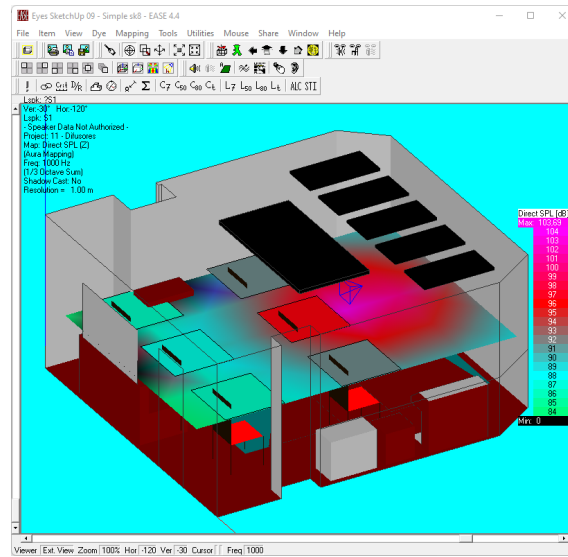


Figura 6.3: Sala con los difusores colocados (en negro).

realizar este proceso de diseño y posterior simulación.

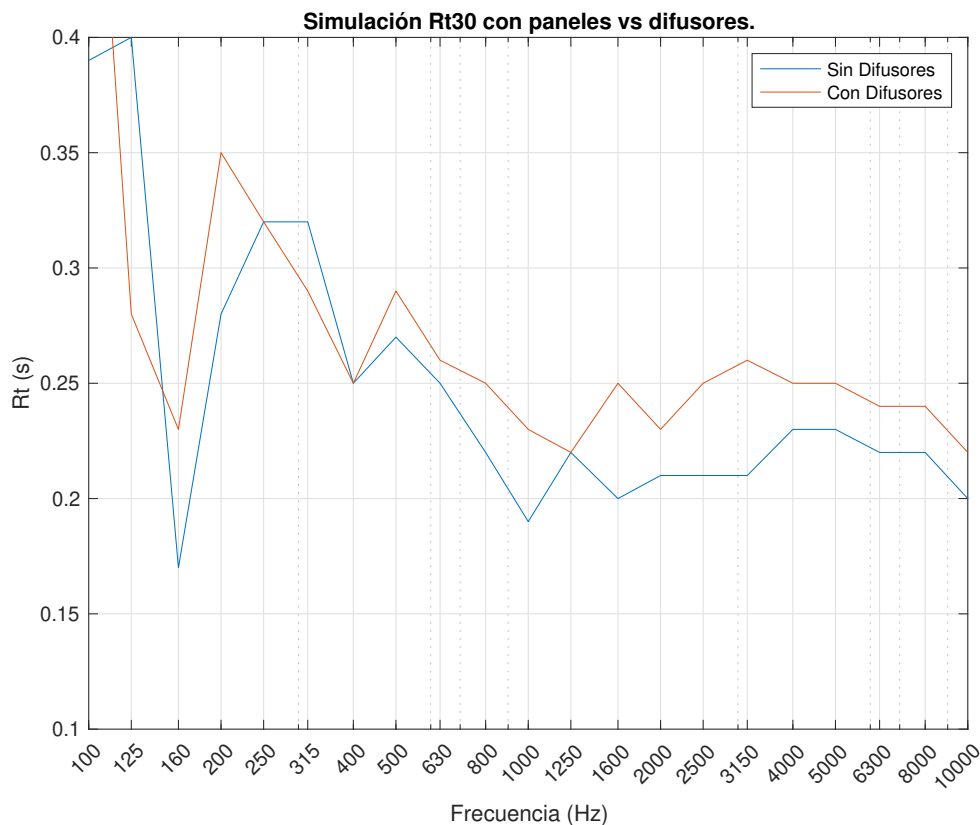


Figura 6.4: RT30 con y sin difusores.

6.2. Resonadores

Con el objetivo de reducir en la medida de lo posible el comportamiento modal de la Sala de Grabación, esto es, eliminar los picos de resonancia encontrados en las frecuencias correspondientes a los modos propios, se propone añadir un resonador ajustado a 65 Hz. Existen dos formas de conseguir este objetivo:

Resonadores de Helmholtz Se trata de una caja con una abertura rellena de material aislante. En el interior de esta cavidad el aire se comporta como una masa resonante.

La frecuencia de resonancia es función del volumen de la caja, el tamaño y la dimensión de la apertura. Al llenar la caja de material aislante, el efecto es obtener un coeficiente de absorción muy alto en una frecuencia específica. Esta frecuencia debe corresponder con la frecuencia de resonancia que deseemos eliminar.

Para fabricar un resonador de Helmholtz se puede usar la conocida fórmula de Helmholtz, un software de diseño de cajas acústicas, o una calculadora online¹.

Panel Microperforado Se trata de un panel con múltiples aberturas perforadas con cierta separación de la pared. Cada apertura se comporta como la cavidad de un Resonador de Helmholtz. La frecuencia de resonancia se puede aproximar con la siguiente fórmula:

$$f_0 = 200 \sqrt{\frac{p}{dt}}; \quad (6.1)$$

donde f_0 es la frecuencia de resonancia, p es el porcentaje de perforación, d es el diámetro de perforación y t es la longitud efectiva de la perforación. Estos parámetros, así como su construcción se encuentran detallados en [7].

Se decide usar un panel microperforado, por su facilidad de fabricación, y se escogen las siguientes dimensiones:

- Espacio de aire entre pared y panel: 20,3 cm. La mitad rellena de lana de roca
- Grosor del panel = 4 mm
- % Perforación = 0,18 %

El porcentaje de perforación se puede calcular con ayuda de las fórmulas de la Figura 6.5, descritas en [7].

La Figura 6.6 muestra los coeficientes de absorción de diferentes paneles perforados en función de la frecuencia [7]. Se aprecian coeficientes de absorción muy elevados en las frecuencias a la que están ajustados.

Este panel se encuentra en la base de datos de EASE como PERFPANEL1. Se añade al proyecto de simulación: se sustituye la sección frontal de friso de madera por este panel. La Figura 6.7 muestra en amarillo el panel situado en la sala de grabación.

La Figura 6.8 muestra los resultados de la simulación tras introducir en el modelo los paneles perforados en el paramento frontal de la Sala de Grabación.

¹Calculador de Helmholtz: <http://www.mh-audio.nl/Acoustics/HHReso.html>

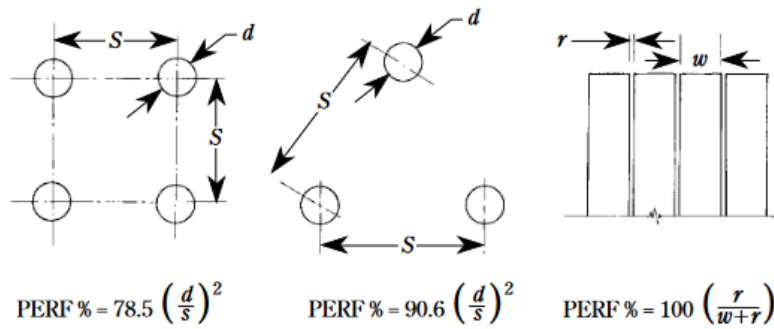


Figura 6.5: Tamaño de agujeros y diámetro en relación al porcentaje de perforación.

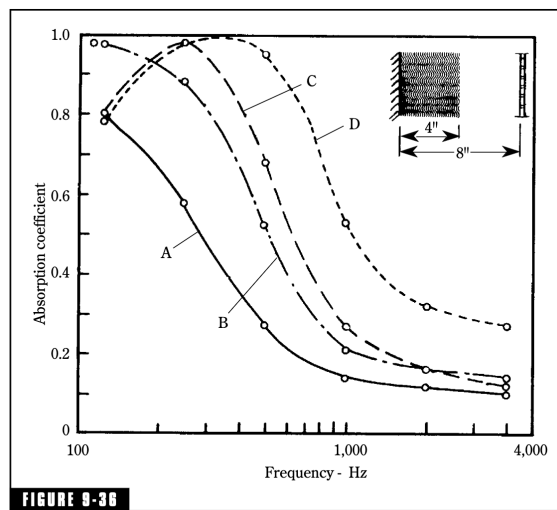


FIGURE 9-36
 Actual absorption measurements on the same perforated panel absorbers of Fig. 9-35 except that the air space is increased to 8", half of which is taken up with mineral fiber. Panel thickness is 5/32". (A) Perforation 0.18%. (B) Perforation 0.79%. (C) Perforation 1.4%. (D) Perforation 8.7%. (Data from Mankovsky.⁹)

Figura 6.6: Coeficientes de absorcion de diferentes paneles perforados.

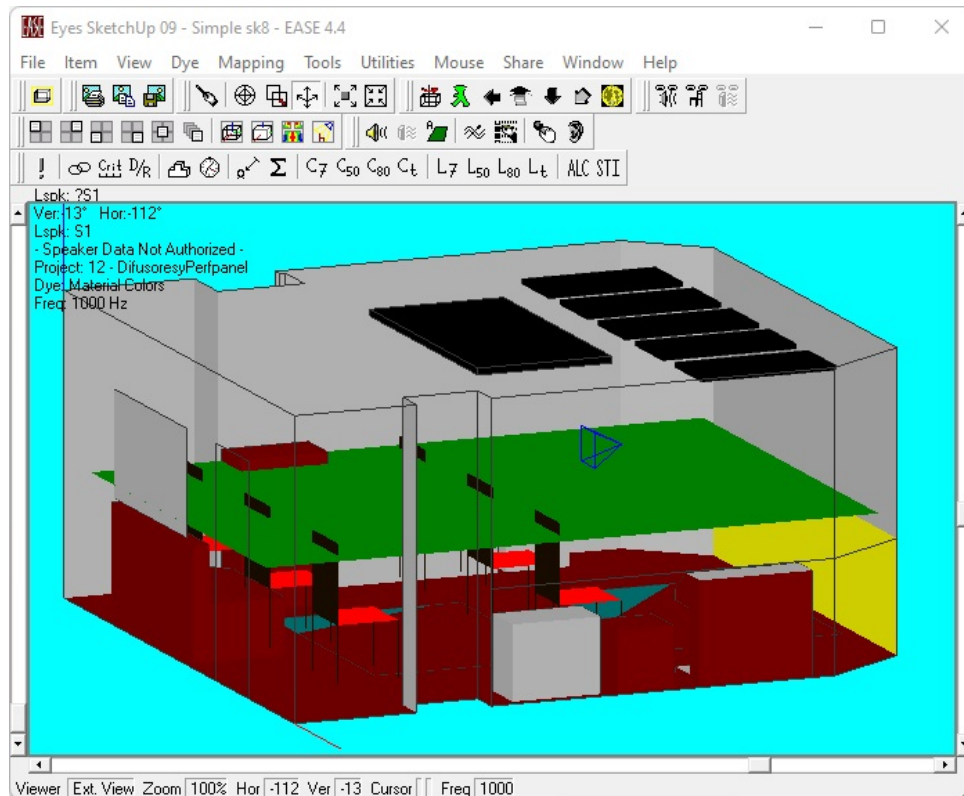


Figura 6.7: Situación del panel perforado en la Sala.

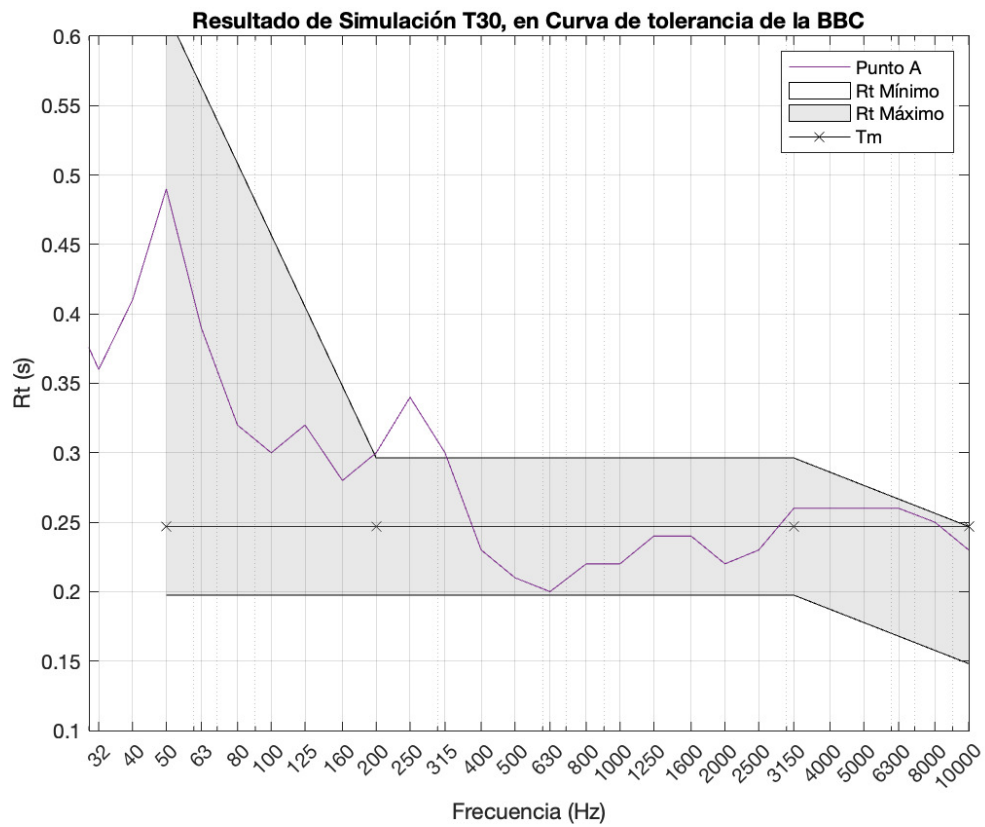


Figura 6.8: Resultados de la simulación de RT30 al añadir los paneles perforados.

Con la introducción de los paneles perforados, se ha eliminado de un plumazo la resonancia problemática cercana a los 63 Hz. Por último, queda por reducir la resonancia de 250 Hz para que la Sala de Grabación cumpla con los estándares para las tolerancias propuestos por la BBC.

Para ello, se utiliza un panel microperforado de 1,4% de porcentaje de perforación, y 20,3 cm de espaciado entre pared y panel. La mitad rellena con aire y la mitad con lana de roca. La frecuencia de resonancia de esta combinación es de 250 Hz. Este panel se llama "PERFPANEL3" en la base de datos de materiales de EASE.

Se sustituyen los laterales del friso de madera por este panel en ambos lados de la sala, y se realiza de nuevo la simulación.

La Figura 6.9 representa los tiempos de reverberación RT30 promedio, máximos, mínimos en bandas de octava de frecuencia de la sala simulada con AURA, y con todo el tratamiento acústico aplicado (difusores acústicos, y paneles perforados PERFPANEL en el frontal del friso, así como Paneles Perforados PERFPANEL3 en los laterales del friso). Como se ha hecho varias veces a lo largo de esta Memoria, estos datos se representan superponiéndolos a las curvas para las Tolerancias recomendadas por la BBC (Figura 4.16 [5]).

Finalmente, la Figura 6.10 muestra el tiempo de reverberación RT30 en bandas de tercio de octava simulado sobre el punto de medida A de la Sala de Grabación de Soho Sessions antes y después de aplicar las propuestas de mejora. Igualmente, se representan junto las curvas de tolerancia recomendadas por la BBC.

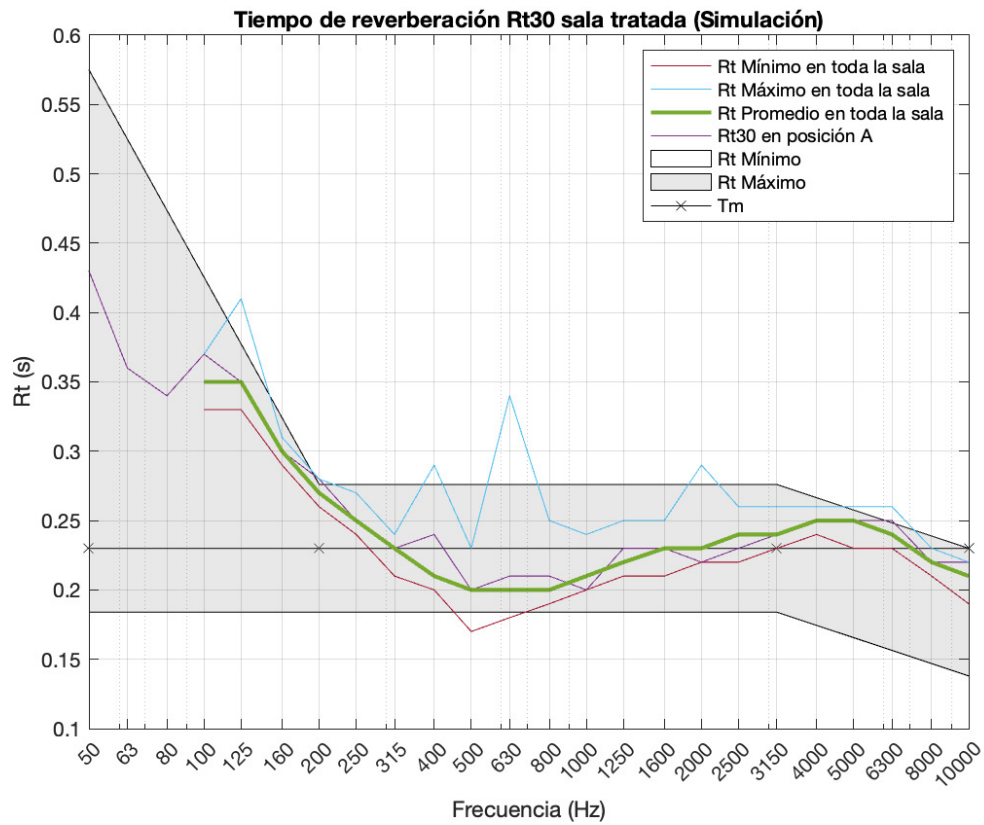


Figura 6.9: Tiempo de reverberación promedio, máximos y mínimos de RT30 simulados en sala.

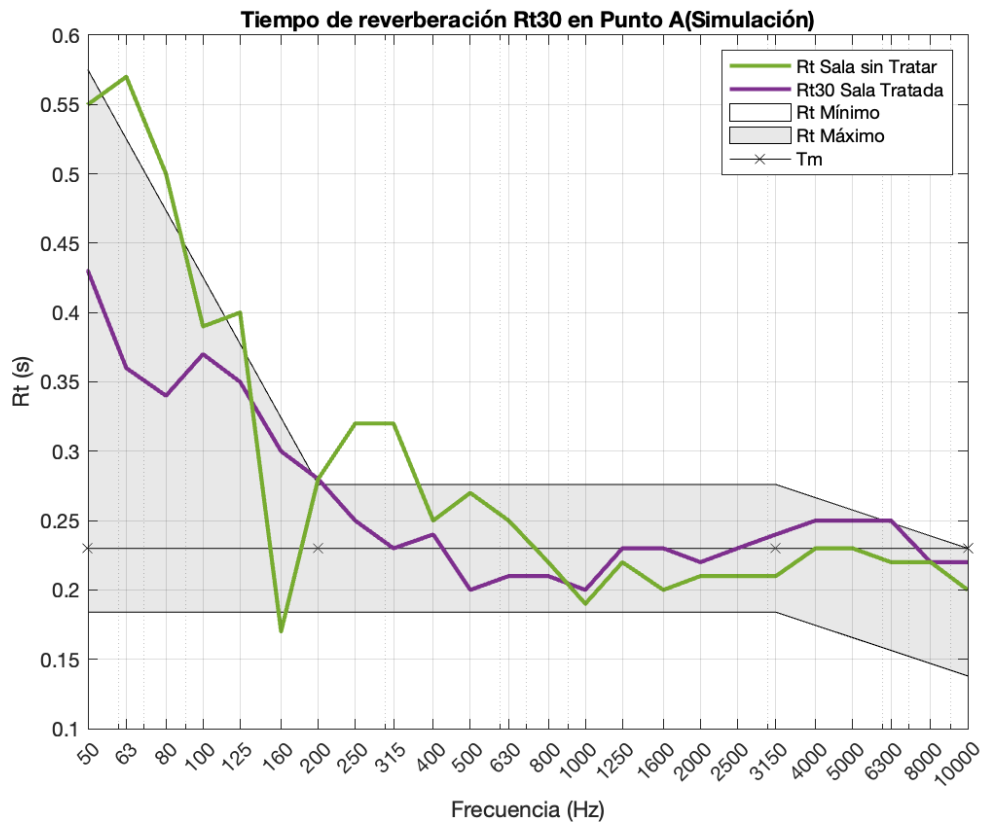


Figura 6.10: Simulación de RT30 en sala antes y después de aplicar las propuestas de mejora (punto de medición A).

6.3. Presupuesto

Se presenta una estimación del coste de la realización de un estudio acústico como el que se expone en este TFG, así como la instalación de las propuestas de acondicionamiento planteadas.

Para tener una estimación realista, se han obtenido los precios de los paneles acústicos de un distribuidor europeo [35], y los precios de los materiales de construcción de un conocido almacén de construcción [36].

Los gastos de ingeniería se establecen teniendo en cuenta las horas de dedicación y la alta especialización para trabajos de estas características. Los gastos de montaje se han establecido teniendo en cuenta precios de diferentes empresas de montaje.

El presupuesto se ha realizado para el estudio acústico, las propuestas de mejora, la elaboración de un proyecto técnico y la implementación de éstas. No se ha considerado apropiado añadir las horas de redacción y realización de este TFG, ya que se trata de un trabajo académico, con detalles y explicaciones para el lector fuera de lugar en la propuesta técnica que pueda desarrollar una empresa acústica.

El presupuesto se encuentra detallado en el Anexo C.

Conclusiones

En esta Memoria se presenta el resultado de un **estudio acústico realizado sobre la Sala de Grabación** o Sala de Registro de los Estudios de Grabación Soho Sessions, ubicados en el céntrico barrio del Soho de la capital malagueña. También se ha realizado el estudio de la Sala de Control, aunque estos resultados finalmente no aparecen en esta Memoria de Trabajo Fin de Grado.

En una primera parte, se han tomado **medidas experimentales del comportamiento acústico** de la Sala de Grabación. A partir de los datos obtenidos, con ayuda de un programa informático comercial, se han obtenido los valores de los parámetros acústicos más importantes que caracterizan el comportamiento de la sala.

Asimismo, se ha utilizado un software de simulación acústica para, a partir de la geometría y ocupación de la Sala de Grabación, reproducir los valores experimentalmente medidos y llevar a cabo una segunda **caracterización de la Sala de Grabación, esta vez a partir de simulaciones numéricas**.

Estos dos estudios paralelos tienen como objetivo la **caracterización del acondicionamiento acústico de la sala**, así como la **propuesta de medidas que mejoren su desarrollo acústico** para las actividades para las que dicho Estudio de Grabación ha sido concebido, diseñado y construido.

En la realización de este TFG se han estudiado y profundizado los conceptos más teóricos del campo de la acústica, especialmente del campo de la acústica de salas. Se han adquirido **conocimientos y competencias** en programas de CAD y en el software de simulación acústica EASE, además de conocimientos prácticos sobre la caracterización acústica, la obtención de mediciones de la Respuesta Impulso de una sala, y la interpretación de las mismas.

Las conclusiones más importantes a que se ha podido llegar en la primera parte de este estudio (medidas acústicas experimentales) son las siguientes:

1. Se han llevado a cabo **medidas experimentales** situando una fuente sonora omnidireccional en dos posiciones diferentes y **representativas** de la

Sala de Grabación, y en cada caso, eligiendo varias posiciones de medida donde estudiar la respuesta de la Sala a la onda de presión sonora producida por la fuente.

2. Los resultados obtenidos en las diferentes posiciones de medida han resultado ser similares, lo que muestra que la **respuesta espacial** de la Sala de Grabación es bastante plana, siendo esta propiedad algo relevante.
3. Se han representado diagramas Waterfall en todas las posiciones de medida; de ellas se puede deducir que el **comportamiento en el dominio temporal y en el de frecuencias es también uniforme**. Se han descrito, sin embargo, algunos problemas en el rango de frecuencias bajas (resonancia entre 30 y 60 Hz y pico de decaimiento alrededor de 250 Hz).
4. Respecto al **aislamiento acústico**, éste resulta ser considerable, ya que las mediciones de ruido ambiente permiten catalogar la Sala de Grabación entre las categorías i) y ii) según la clasificación definida por la BBC.
5. Respecto al **tiempo de reverberación RT**, los resultados y su comparación con los valores aceptados en la literatura profesional al respecto permiten catalogar la Sala de Grabación como una **sala “seca”**, con un tiempo promedio de reverberación de **0.187 segundos**. Asimismo, se tienen valores excesivamente altos para el RT en el rango de frecuencias entre 160 y 400 Hz en comparación con los estándares de la BBC; para solventar este problema, se proponen las actuaciones pertinentes que permitan mejorar el desarrollo acústico de la Sala en este punto.
6. Respecto al comportamiento en el **dominio de las frecuencias**, existen asimismo deficiencias en el rango de los 200-250 Hz, aunque las conclusiones en este punto son inciertas debido a que la fuente sonora omnidireccional utilizada no ha sido debidamente caracterizada en frecuencias.

Por otro lado, las conclusiones más relevantes obtenidas en la segunda parte de este estudio (simulaciones numéricas) son las siguientes:

1. Se ha **modelado en tres dimensiones la Sala de Grabación** con ayuda de un programa informático apropiado, permitiendo su utilización en un programa comercial de simulación acústica avanzada.
2. La utilización del modelo 3D y el software de simulación han permitido **reproducir**, dentro del error experimental, los valores promedio, en función de la frecuencia, del **tiempo de reverberación medido experimentalmente**, con un acuerdo aceptable.

3. El **tiempo de reverberación RT** promedio simulado resulta ser de unos **0.23 segundos**. Se han podido comparar los valores experimentales y los resultados de la simulación para las curvas RT en función de la frecuencia para las distintas posiciones de medición seleccionadas.
4. Asimismo, se han simulado los **valores para RT por debajo de los 100 Hz**, valores inaccesibles en la subsección dedicada a las medidas experimentales.
5. Se han identificado tres picos en esta curva RT en función de la frecuencia, y se han asignado a los modos propios debidos a **resonancias** con el doble de la distancia suelo-techo.
6. Respecto a la **respuesta en el dominio de las frecuencias**, los resultados de la simulación son más fiables que los medidos experimentales, y muestran una dependencia suave con la frecuencia, mostrando comportamientos “paralelos” si comparamos unas posiciones de medida con otras.
7. El **diagrama Waterfall** muestra el comportamiento modal descrito antes y valores de RT a bajas frecuencias no elevados, lo que supone que las grabaciones musicales deberían realizarse sin problemas.

Finalmente, y en cuanto a las posibilidades de mejora, se mencionan dos elementos que añadirían valor a la ya de por sí buena respuesta acústica de la Sala de Grabación:

1. Utilización de **difusores acústicos** sustituyendo alguno de los paneles aislantes instalados, lo que mejoraría el valor de RT a altas frecuencias y, por tanto, la sonoridad de la Sala de Grabación. Se han realizado simulaciones acústicas que apoyan esta sugerencia de mejora.
2. Sustitución de parte del friso de madera de la parte inferior de los paramentos verticales por **paneles microperforados**, lo que elimina las resonancias mencionadas anteriormente. Las simulaciones, de nuevo, apoyan la eficacia de esta propuesta de mejora acústica de la sala.

Parte I
ANEXOS

Apéndice A

Tabla de mediciones acústicas realizadas

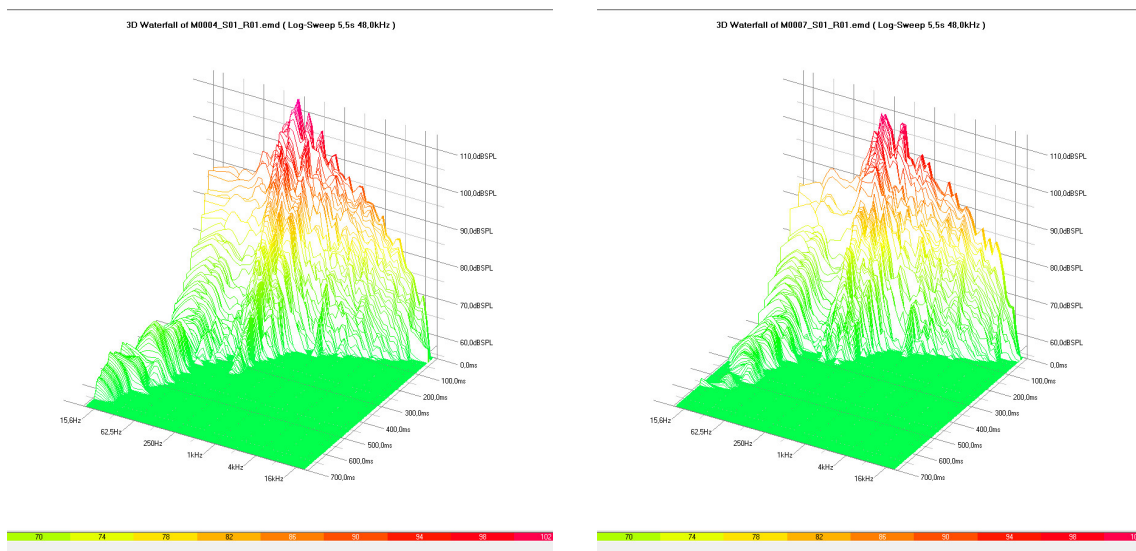
Tabla A.1: Mediciones acústicas realizadas.

Posición de Medida	Nombre de Medida	Observación
Posición A	M0001	2,5 m entre micrófono y fuente
	M0002	Se apaga aire acondicionado
	M0003	
	M0004	
	M0005	
	M0006	
Posición B	M0007	3 m entre micrófono y fuente
	M0008	
	M0009	
	M00010 M00011	Se eliminan Paneles acústicos
Posición C	M0012	3m entre micrófono y fuente
	M0013	Errónea (se descarta)
	M0014	
	M0015	
Posición D	M0016	1,5 m entre micrófono y fuente
	M0017	
	M0018	
Posición E	M0019	1,5 m entre micrófono y fuente
	M0020	

	M0021	
Posición F	M0022	1,22 m entre micrófono y fuente Medición con Ruido Rosa
	M0023	
	M0024	
	M0025	
Posición G	M0026	2,3 m; Ruido Rosa
	M0027	Medición con Sweep
	M0028 M0029	
Posición H	M0030	2,15 m
	M0031	
	M0032	
Posición I	M0033	2,68 m
	M0034	
	M0035	
Posición J	M0036	0,7 m, saturado
	M0037	0,77 m
	M0038	
	M0039	
	M0040	Ruido Rosa
	M0041	
M0042		
	M0043	Sweep
Posición K	M0044	2,44 m; Sweep
	M0045	Medición con Sweep
	M0046	
	M0047	
	M0048	Ruido Rosa

Apéndice B

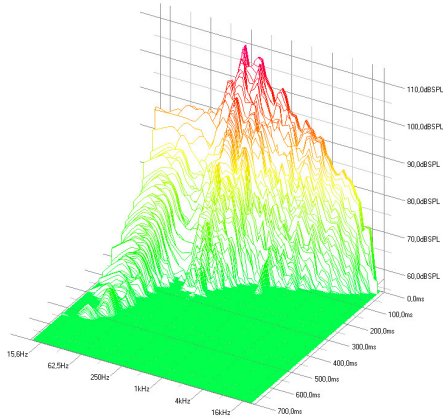
Diagramas Waterfall (Mediciones)



(a) Punto A.

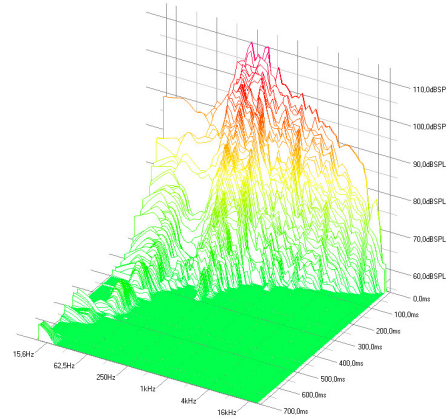
(b) Punto B.

3D Waterfall of M0015_SB1_R01.emd (Log-Sweep 5.5s 40.0kHz)



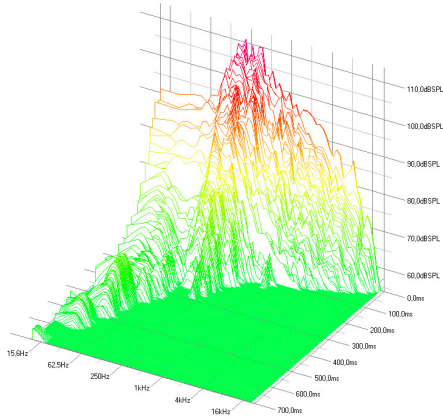
(a) Punto C.

3D Waterfall of M0018_SB1_R01.emd (Log-Sweep 5.5s 40.0kHz)



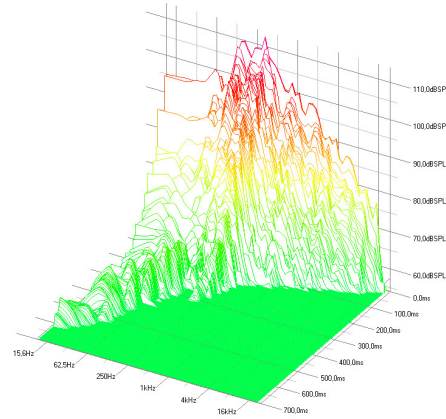
(b) Punto D.

3D Waterfall of M0021_SB1_R01.emd (Log-Sweep 5.5s 40.0kHz)



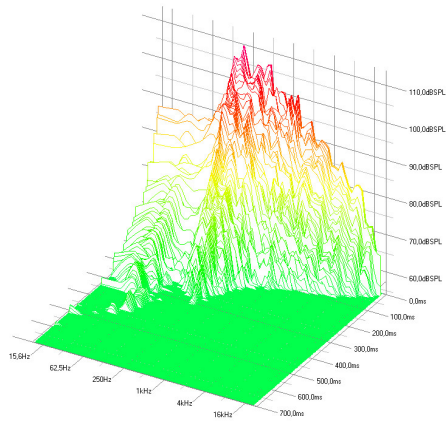
(a) Punto E.

3D Waterfall of M0024_SB1_R01.emd (Log-Sweep 5.5s 40.0kHz)



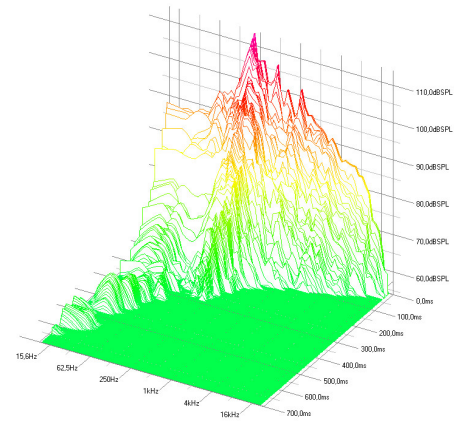
(b) Punto F.

3D Waterfall of M0027_S01_R01.emd (Log Sweep 5.5s 48.0kHz)



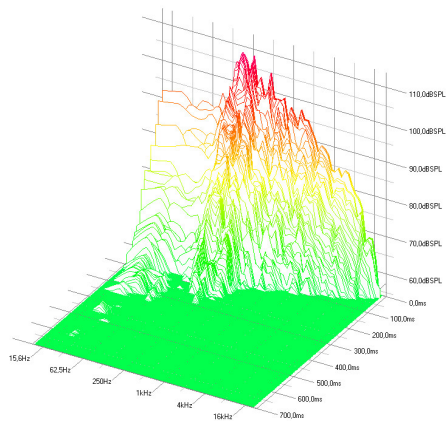
(a) Punto G.

3D Waterfall of M0031_S01_R01.emd (Log Sweep 5.5s 48.0kHz)



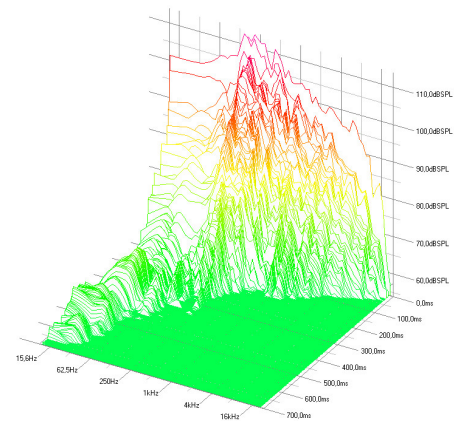
(b) Punto H.

3D Waterfall of M0033_S01_R01.emd (Log Sweep 5.5s 48.0kHz)



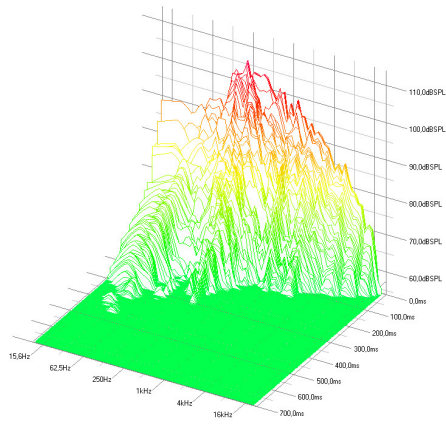
(a) Punto I.

3D Waterfall of M0038_S01_R01.emd (Log Sweep 5.5s 48.0kHz)



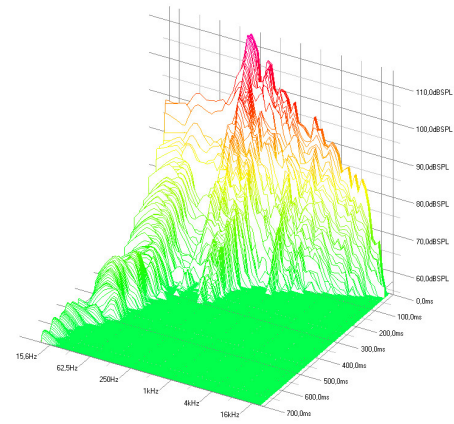
(b) Punto J.

3D Waterfall of M0045_S01_R01.emd (Log-Sweep 5.5s 48.0kHz)



(a) Punto K.

3D Waterfall of M0011_S01_R01.emd (Log-Sweep 5.5s 48.0kHz)



(b) Punto B (Sin paneles).

Apéndice C

Presupuesto

Presupuesto: PRE2023A11

Cliente: 00000-
Dirección: , ESPAÑA
NIF:

Fecha: 28-08-2023
Serie: General
Número: 11

Referencia - Descripción	Cantidad	Precio	Neto	Impuesto
Realización de Mediciones con equipo de medición	5	50,00	250,00	21,00%
Trabajo de Simulación	1	500,00	500,00	21,00%
Elaboración de un proyecto técnico	1	500,00	500,00	21,00%
Montaje	1	300,00	300,00	21,00%
Difusores RPG Omnifusor	18	250,00	4 500,00	21,00%
Tablero de contrachapado 244*122	6	30,00	180,00	21,00%
Listones	20	7,00	140,00	21,00%
Pack 12 paneles SONOROCK ECO 135X60X4CM	2	50,00	100,00	21,00%
Materiales (Tornillería, clavos, pegamento...)	1	100,00	100,00	21,00%

Divisa	Neto	Impuestos	Total
EURO	6 570,00	1 379,70	7 949,70

Forma de pago	Vencimiento
Tarjeta de crédito	

Bibliografía

- [1] M. Vitruvio Polion. *Los Diez Libros de Arquitectura*. Colección Fuentes de Arte. Ediciones Akal, 1992.
- [2] E. Carrero. Oír la arquitectura medieval. sobre la experiencia sonora en los monasterios de cister. *Respondámosle a concierto: estudios en homenaje a Maricarmen Gómez Muntané, UAB-Insitut d'Estudis Medievals, 2020*, pages 77–98, 02 2021.
- [3] S. Wallace Clement. *Collected papers on acoustics*. Peninsula Pub., 1992.
- [4] AENOR. UNE-EN ISO 3382-1. Acústica – Medición de Parámetros Acústicos en Recintos – Parte 1: Salas de espectáculos. Standard, UNE, ISO, 2010.
- [5] R. Walker. Acoustic criteria and specification. Technical Report WHP 021, British Broadcasting Corporation, Salt Lake City, UT, January 2002.
- [6] D. Benitez and D. Ruiz. *Técnico Superior de Sonido - Primer Curso*. Auto-producido, 2018. ISBN: 978-8409039647.
- [7] F.A. Everest and K.C. Pohlmann. *The master handbook of acoustics*, volume 4. McGraw-hill New York, 2001.
- [8] H.F. Kingsbury and W.J. Wallace. Acoustic absorption characteristics of people. *Sound and Vibration*, 2(12):15–16, 1968.
- [9] M. Cain. *A Subjective Analysis of Early Decay Time Using a Simulated Soundfield*. PhD thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, 2008.
- [10] I.A. Carrión. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Universitat Politècnica de Catalunya, 1998.
- [11] J. Christensson. Good acoustics for teaching and learning. *Euronoise*, 2018.

- [12] EASE Software © Copyright ADA (Acoustic Design Ahnert), Germany. *EASE 4.3 User's Guide & Tutorial*, 4.3.6 edition, October 2009. Available at <https://www.afmg.eu/en/ease-4-tutorial>.
- [13] D. Shevyn. What are room modes. *GIK Acoustics*, 2009. <https://gikacoustics.net/what-are-room-modes/>.
- [14] Atlas Nacional de España (ANE). www.ign.es/resources/ane/participantes.pdf. Accessed: 2023-08-31.
- [15] AENOR. UNE-EN ISO 3382-2. Acústica – Medición de Parámetros Acústicos en Recintos – Parte 2: Tiempo de Reverberación en recintos ordinarios. Standard, UNE, ISO, 2010.
- [16] Brüel and Kjaer. Product Data BP 1311 – 19. <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp1311.ashx>. Accessed: 2023-08-06.
- [17] Behringer. MEASUREMENT CONDENSER MICROPHONE ECM8000 Technical Specifications. https://mediadl.musictribe.com/media/sys_master/h47/hde/8849927929886.pdf. Accessed: 2023-08-06.
- [18] Svantek. SV 973A – Class 2 Sound Level Meter Technical Specifications. https://svantek.com/wp-content/uploads/2023/07/SV_973A_eng_2023-1.pdf. Accessed: 2023-08-06.
- [19] Easera website. <https://www.afmg.eu/en/afmg-easera>. Accessed: 2023-09-01.
- [20] EASE Software © Copyright ADA (Acoustic Design Ahnert), Germany. *EASERA Tutorial*, 1.2 edition, October 2012. Available at http://www.afmg-support.de/SoftwareDownloadBase/AFMG/EASERA12/EASERATutorial_EN.pdf.
- [21] L. Schaudinischky and A. Schwartz. The acoustical design of multi-purpose recording studios in existing buildings. *Applied Acoustics*, 1970.
- [22] K.F.L. Lansdowne and D.J. Meares. Revised background noise criteria for broadcasting studios. Technical Report WHP 021, British Broadcasting Corporation, August 1980.
- [23] A.N. Burd, C.L.S. Gilford, and N.F. Spring. Data for the acoustic design of studios. Technical Report Monograph 64, British Broadcasting Corporation, November 1966.

- [24] AFMG. Resources. How to calculate RT for low frequencies. <https://www.afmg.eu/en/how-calculate-rt-low-frequencies>. Accessed: 2023-08-28.
- [25] UA Acoustics. Acoustic Diffuser Skyline. Picture. <https://ua-acoustics.com/acoustic-diffuser-skyline>. Accessed: 2023-09-01.
- [26] M.C. Bérengier, B. Gauvreau, P. Blanc-Benon, and D. Juvé. Outdoor sound propagation: A short review on analytical and numerical approaches. *Acta Acustica united with Acustica*, 89(6):980–991, 2003.
- [27] K. Attenborough. *Sound Propagation in the Atmosphere*, pages 117–155. Springer, 01 2014.
- [28] Sketchup website. <https://www.sketchup.com/>.
- [29] AFMG. How do i create a new ease 4.x project from a sketchup model? <https://www.afmg.eu/en/how-do-i-create-new-ease-4x-project-sketchup-model> [Visitado: 20/08/2023].
- [30] B. Fazenda. *Perception of room modes in critical listening spaces*. PhD thesis, University of Salford, 2004.
- [31] D. Corregidor Luna. Estudio acústico de la sala de control de los estudios de grabación sadman. Unpublished, February 2016.
- [32] T. Cox, B.I.L. Dalenback, P. D’Antonio, J.J. Embrechts, J.Y. Jeon, E. Momertz, and M. Vorlaender. A tutorial on scattering and diffusion coefficients for room acoustic surfaces. *Acta Acustica united with Acustica*, 92:1–15, 01 2006.
- [33] RPG Omnifusor. <https://www.rpgeurope.com/products/product/omnifusor.html>. Accessed: 2023-08-31.
- [34] RPG Diffusor Systems, Inc. RPG Omnifusor Random Incidence Performance Data. https://www.rpgeurope.com/component/option,com_downloads/task,view/id,33/Itemid,241/. Accessed: 2023-08-31.
- [35] Everything Acoustic. <https://everythingacoustic.co.uk>. Accessed: 2023-09-03.
- [36] Obramat. <https://www.obramat.es/>. Accessed: 2023-09-03.

