

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE GANDIA

I.T. Telecomunicación (Sonido e Imagen)



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Diseño acústico de una sala de grabación de uso personal integrada en una vivienda de Denia”

TRABAJO FINAL DE CARRERA

Autor:

Abel Soler Calatayud

Directores:

Rubén Picó Vila

Vicent Romero García

GANDIA, 2013

Agraïments

En primer lloc m'agradaria agrair als directors del projecte Rubén Picó Vila i Vicent Romero García tot el que han fet per a què aquest projecte haja pogut tindre un final, les seues classes a la carrera i tutories al projecte, que malgrat la distància han sigut possibles.

A Vicenta, ha sigut la persona que m'ha servit de suport als bons i no tan bons moments que he passat al transcurs de la carrera i el projecte, a la seua planificació i sobretot a la seua estima.

Als meus pares i germans, que al llarg de la meua vida m'han donat suport a cada una de les decisions que he pres i que han sigut la base del que sóc.

Als amics i companys de feina David, Sergi, Antonio (Torqui), Luis... que m'han presentat, des d'una perspectiva crítica i constructiva, el món de l'acústica i el paral·lel, el món dels "ingenieros" i "empresarios musicales".

A tots els moments durant la carrera que he viscut amb els amics i companys Dani, Joan, Joanje, Pablo, Carlos ... Començant per els primers exercicis d'electrònica amb tres condensadors en paral·lel (que no hi havia manera de traure-ho) i acabant pels dissenys amb OrCAD dels circuits a l'assignatura de PAS.

M'agradaria concloure aquest agraïment amb un fragment d'una cançó que ara més que mai té tot el seu significat.

*“... Al país de la infantesa
hi ha il·lusions a les palpentes
somniais dibuixats a l'aire
promeses a les orelles
Al país que jo m'estime
hi garde un tresor secret
un lligam que mai no es trenca
un amor que mai no es perd.”* (Obrint Pas – Al país de l'olivera)

Milers de gràcies a totes i tots per aquests anys.

Tabla de contenido

1. Introducción	7
2. Objetivos.....	7
2.1 Estudio previo de una sala para la grabación.....	7
2.2 Obtención de un t_R adecuado para el tipo de sala.....	8
2.3 Distribución homogénea del SPL.....	8
3. Conceptos previos	9
3.1 Modos propios de una sala	9
3.1.1 Fórmula de Rayleigh	11
3.1.2 Criterio de Bolt.....	12
3.1.3 Criterio de Gilford	13
3.1.4 Criterio de Bonello	13
3.2 Tiempos de reverberación	13
3.2.1 Sala de grabación.....	15
3.2.2 Sala de control	16
3.3 Diseño de salas.....	17
3.3.1 Sala de control	19
3.3.1.1 Rettinger.....	20
3.3.1.2 Davis	20
3.3.1.3 Veale.....	21
3.3.1.4 D'Antonio y Konnert.....	21
3.3.2 Sala de grabación.....	22
3.3.3 Espacios acoplados electroacústicamente.	22
3.4 Acondicionamiento acústico	22
3.4.1 Materiales	23
3.4.1.1 Lana de roca	23
3.4.1.2 Lana de vidrio	24
3.4.1.3 Moquetas y alfombras.....	24
3.4.2 Resonadores	25
3.4.2.1 Resonadores de membrana o diafragmático	26
3.4.2.2 Resonadores de cavidad simple (Helmholtz)	26
3.4.2.3 Resonadores de cavidad múltiple	27
3.4.3 Difusores	28
3.4.3.1 Difusor policilíndrico	29
3.4.3.2 Difusor de Schroeder o RPG	29
3.5 Sistema de monitores	31

4 Herramientas numéricas utilizadas	33
4.2 Matlab	33
4.3 CATT-Acoustic	34
5 Cálculos teóricos previos	35
5.1 Tiempos de reverberación	36
5.2 Modos propios de una sala	38
5.2.1 Frecuencia límite.....	38
5.2.2 Fórmula de Rayleigh	40
5.2.3 Diagrama de Bolt	42
5.3 Diseño de salas.....	43
5.3.1 Sala de grabación.....	43
5.3.2 Sala de control	44
5.4 Acondicionamiento acústico.....	48
5.4.1 Materiales	50
5.4.2 Membranas.....	54
5.4.3 Resonadores	59
5.4.4 Difusores	60
5.5 Sistema de monitores	62
6 Simulación de la solución propuesta	65
7 Ejemplos de diseño de los recintos	68
8 Conclusión	70
9 Referencias bibliográficas.....	71
9 Anexos	72
9.1 Anexo 1	72
9.2 Anexo 2	74
9.3 Anexo 3	76
9.4 Anexo 4	80
9.5 Anexo 5	85
9.6 Anexo 6	87
9.7 Anexo 7	89
9.8 Anexo 8	90
9.9 Anexo 9	91
9.10 Anexo 10	94

1. Introducción

En este trabajo se propone el diseño y acondicionamiento acústico de una sala de grabación para uso personal integrada en una vivienda de uso habitual. Seguidamente, en el apartado 2 se enumerarán y comentarán los objetivos que deberemos acometer para el diseño de la sala. En el apartado 3 presentaremos los diferentes conceptos teóricos a tener en cuenta para un buen diseño. En la siguiente sección (punto 4) se hará una pequeña explicación de las herramientas utilizadas en este proyecto cerrando así un primer bloque introductorio. Seguidamente, en el segundo bloque (apartados 5 y 6), se utilizarán los conceptos teóricos enumerados en los puntos anteriores y software necesario para realizar todos los cálculos.

Para finalizar, en el apartado 6 se realizará una breve conclusión de los cálculos y simulaciones obtenidas en este proyecto.

2. Objetivos

El objetivo de este proyecto es realizar una propuesta de diseño y acondicionamiento acústico de una sala de grabación ya existente para uso personal situada en la localidad de Denia para su posterior reforma con los cambios propuestos en este proyecto.

Actualmente esta sala está compuesta por dos recintos, el propio de la sala de grabación y el recinto anexo, que es la sala de control (donde se sitúa el técnico de sonido y decide si la grabación es válida o no para su posterior mezcla).

Para poder lograr el objetivo principal se plantean tres hitos principales; estudio previo de una sala para la grabación, obtención de tiempos de reverberación adecuados y la distribución del nivel de presión sonora (SPL) de manera homogénea en todas las frecuencias (ausencia de coloración en diferentes puntos de la sala a causa de los modos propios).

2.1 Estudio previo de una sala para la grabación

El primer paso antes de proceder al diseño de una sala es realizar un estudio previo que nos indique las virtudes o carencias que existen en la sala tales como: un tiempo de reverberación elevado, coloraciones producidas por los modos propios, etc.

Para realizar el estudio previo se utilizarán las teorías acústicas geométrica, estadística y ondulatoria. Con ellas podremos estimar el tiempo de reverberación existente en los recintos, calcular los modos propios existentes y posibles focalizaciones del sonido utilizando el trazado de rayos.

Después de calcular todos los parámetros que caracterizan nuestra sala hay que definir qué tipo de estudio de grabación se quiere diseñar por ejemplo, un estudio de grabación de música moderna, estudio de grabación de música clásica, grabación de locuciones... En base al tipo elegido se definirá el tiempo de reverberación adecuado (siguiente hito del proyecto).

2.2 Obtención de un t_R adecuado para el tipo de sala

Como se ha comentado en el punto anterior (punto 2.1), la definición del tipo de uso de la sala de grabación delimitará nuestro tiempo de reverberación. Esta limitación estará basada en tablas tabuladas de los diferentes estudios realizados por autores como Davis, Rettinger, D'Antonio, Konnert...

También hay que tener en cuenta que deberá contemplarse dos tiempos de reverberación diferentes, el adecuado para el recinto de grabación y el adecuado para el recinto de control, siendo el tiempo de reverberación del recinto de grabación mayor que el tiempo de reverberación del recinto de control. Esta premisa se define porque el t_R de la sala de control no debe modificar el t_R de la sala de grabación cuando se realice una escucha en la sala de control por parte del técnico de sonido.

2.3 Distribución homogénea del SPL

El siguiente hito definido que ayudará a definir el diseño es que no existan coloraciones en los diferentes puntos de la sala, es decir, que las curvas tonales sean lo más uniformes posibles o que exista una distribución homogénea del SPL en toda la sala. Para poder abordar este objetivo se realizará un estudio previo de los modos propios que pueden existir en los recintos utilizando para ello el diagrama de Bolt junto a la expresión de Rayleigh y algunos elementos acústicos tales como resonadores de membrana, resonadores de Helmholtz y difusores RPG.

La necesidad de este hito surge porque en muchas ocasiones existen puntos en una sala que tienen diferentes valores de presión (puede ser un pico o un valle) y debido a esto puede modificar la toma de sonido (en caso de la sala de grabación) o la recepción del mismo (en la sala de control). Particularmente en estos recintos, a causa de su reducido tamaño y sus paredes paralelepípedas, existe un alto riesgo de generación de modos propios.

3. Conceptos previos

Para poder abordar el estudio del acondicionamiento acústico en este proyecto se van a analizar las distintas teorías existentes: Acústica Geométrica, Acústica Estadística y Acústica Ondulatoria.

La Acústica Geométrica, de manera similar como se estudia en óptica, utiliza el trazado de rayos para poder visualizar posibles focalizaciones del sonido y tener una idea de la forma o geometría de la sala más adecuada. En el punto 3.3 se realizará un repaso por los diferentes modelos o tipologías geométricas existentes en el diseño de una sala.

Para poder determinar el tiempo de reverberación de una sala se utiliza la Acústica Estadística. Para la obtención de este tiempo de manera aproximada se pueden utilizar diferentes fórmulas: la de Sabine, la de Eyring o la de Millington. En el apartado 3.2 se analizarán los diferentes tiempos de reverberación según la aplicación de la sala.

Para el comportamiento físico del sonido se utiliza la Acústica Ondulatoria. Esta teoría permite determinar los modos de vibración del espacio en sus tres dimensiones, comúnmente conocidos como modos propios de una sala (apartado 3.1).

A modo de resumen, la Acústica Geométrica se utilizará para analizar las primeras reflexiones y el sonido directo, la Acústica Estadística nos permitirá determinar el estudio del tiempo de reverberación y finalmente la Acústica Ondulatoria se utilizará para analizar las posibles resonancias en una sala paralelepípeda.

3.1 Modos propios de una sala

Por teoría de vibraciones se sabe que todo elemento susceptible de vibrar, al separarlo de su posición de equilibrio y dejarlo libre, vibra siempre de unas determinadas formas que corresponden a lo que se denomina sus modos naturales de vibración. ^[1]

Análogamente ocurre con las salas o recintos ya que estos actúan como elementos vibrantes en el que los modos naturales de vibración llevan asociadas unas frecuencias propias de vibración. Estas frecuencias características se generan debido a que existen ondas estacionarias en la sala. Estas ondas estacionarias (ecuación 3.1.3) son ondas que después de realizar un recorrido por la sala, vuelve a encontrarse en el mismo punto donde se generó creando de manera heterogénea una distribución de niveles de presión acústica en la sala. (Figura 3.1a) ^[1]

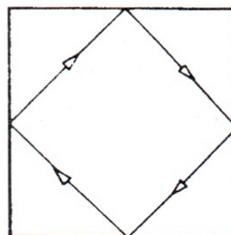


Figura 3.1a – Recorrido de una onda estacionaria en una sala cuadrada.

Prueba de ello es el conocido tubo de Kundt, en el que uno de los principales objetivos de este instrumento fue el estudio de las ondas estacionarias dentro del mismo. (Ver Figura 3.1b) [2]

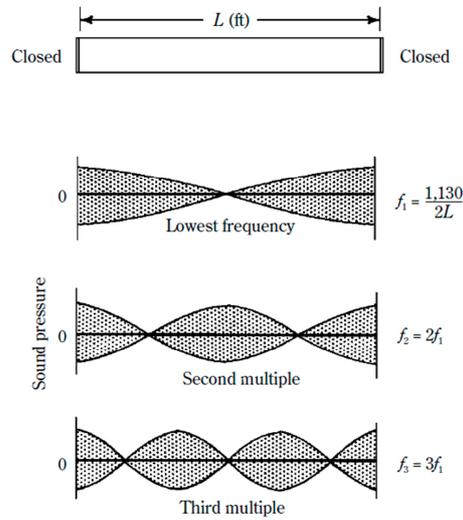


Figura 3.1b - Ondas estacionarias en un tubo de longitud L.

En las ondas estacionarias existen dos tipos de posiciones importantes: los nodos y los vientres (ver Figura 3.1c) [3]. Los nodos son aquellas posiciones donde las moléculas permanecen inmóviles y los vientres son aquellas posiciones donde las moléculas presentan un movimiento oscilatorio con la amplitud máxima.

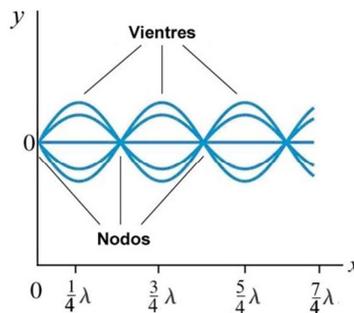


Figura 3.1c - Onda estacionaria en extremo cerrado en x=0.

La ecuación que describe dicha onda (ecuación 3.1.3) se puede determinar a partir de la superposición de una onda incidente (ecuación 3.1.1) y una onda reflejada (ecuación 3.1.2) en la misma dirección y sentidos opuestos.

$$y_1(x, t) = A \sin(kx + \omega t) \tag{3.1.1}$$

$$y_2(x, t) = A \sin(-kx + \omega t) \tag{3.1.2}$$

$$y(x, t) = y_1 + y_2 = 2A \cos(kx) \cdot \sin(\omega t) \tag{3.1.3}$$

Extrapolando el caso del tubo de Kundt al proyecto se puede plantear el estudio de ondas estacionarias para una sala paralelepípedica con paredes rígidas. Dentro de la sala se pueden generar tres tipos de modos propios: modos Axiales, modos Tangenciales y modos Oblicuos. (Ver Figura 3.1d) [2]

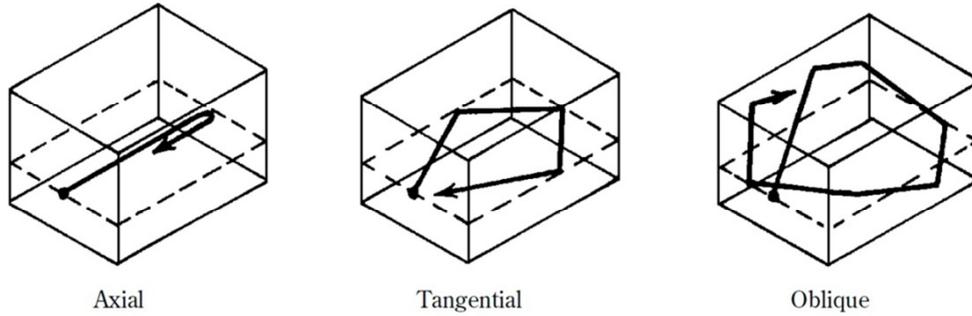


Figura 3.1d – Modos propios de una sala paralelepípeda utilizando trazado de rayos.

Al considerar la acústica de las salas pequeñas, el espectro audible se divide arbitrariamente en cuatro regiones: A, B, C y D (véase Figura 3.1e) [2]. Entre el límite inferior de percepción y F_1 (ecuación 3.1.4), se configura la zona A, cuya característica principal es la de contener un grupo de frecuencias en las que es muy difícil predecir su comportamiento. Entre F_1 y F_2 (también llamada frecuencia crítica de Schroeder, véase ecuación 3.1.5) se delimita una zona de bajas frecuencias (zona B). Esta zona es donde se encuentran las frecuencias de gran longitud de onda, vinculadas al volumen del recinto y al tiempo de reverberación. Es aquí donde se son válidos los modos propios que se han mencionado con anterioridad. La zona C está definida por las frecuencias F_2 y F_3 (ecuación 3.1.4.6) en el las frecuencias comprendidas dentro de esta zona tienen un comportamiento mixto, es decir, en parte como rayos, aplicando principios de acústica geométrica y en parte como ondas. Entre F_1 y el límite superior de percepción, se encuentra la zona D, donde el campo sonoro puede ser modelado por los conceptos de la acústica geométrica. En esta zona es donde existen mayores reflexiones, para controlar estos modos se pueden utilizar absorbentes y difusores acústicos. [4]

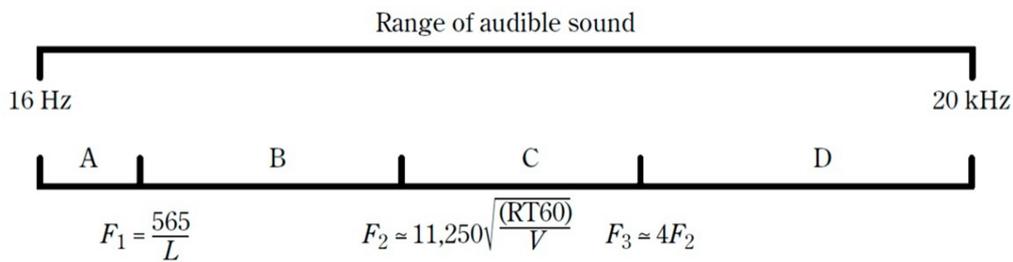


Figura 3.1e – Distribución de las zonas dentro del rango audible.

$$F_1 = \frac{c}{2L} \tag{3.1.4}$$

$$F_2 \cong 1849 \sqrt{\frac{t_R}{V}} \tag{3.1.5}$$

$$3F_2 \leq F_3 \leq 5F_2 \tag{3.1.6}$$

NOTA: $c=343\text{m/s}$, L = Longitud máxima del recinto (m), V = Volumen del recinto (m^3), t_r = tiempo de reverberación (s)

3.1.1 Fórmula de Rayleigh

Las frecuencias propias (asociadas a dichos modos) no vienen dadas de forma aleatoria si no que dependen de la geometría y las dimensiones del recinto a tratar, de forma que su determinación requiere métodos muy complejos de simulación y cálculo acústico. No obstante, para simplificar los cálculos, podemos suponer que el recinto es un paralelepípedo

compuesto de superficies reflectantes (Figura 3.1.1a) [1]. Una vez aplicada esta suposición, podemos calcular los modos propios del recinto (axiales, tangenciales y oblicuos) utilizando la fórmula de Rayleigh (ecuación 3.1.1.1).

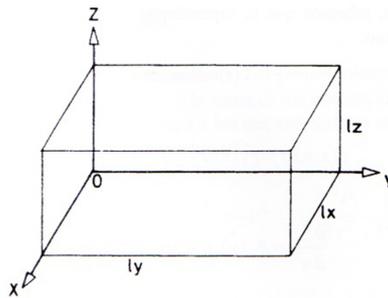


Figura 3.1.1a – Sala paralelepípeda con paredes rígidas.

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \tag{3.1.1.1}$$

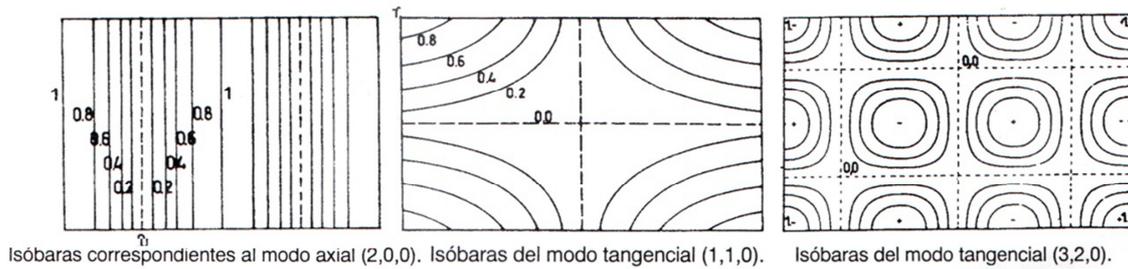


Figura 3.1.1b – Ejemplo de los distintos modos de una sala.

3.1.2 Criterio de Bolt

Richard H. Bolt (1946) plantea un criterio para poder diseñar una sala con una buena distribución modal basándose en las proporciones de la sala (salas pequeñas de forma paralelepípeda). Con ello propone un gráfico (ver Figura 3.1.2a) [2] en el que se puede observar una zona marcada con línea discontinua. Bolt afirma que si las proporciones (normalizadas a la altura) se encuentran dentro de la zona marcada, existe una buena distribución modal.

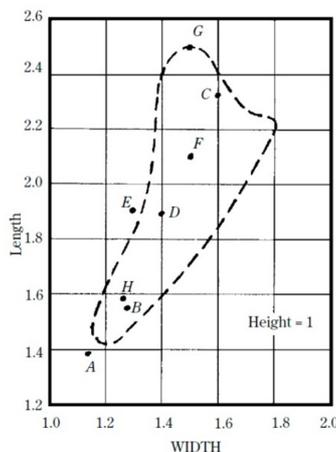


Figura 3.1.2a – Ejemplo de los distintos modos de una sala.

Author	Height	Width	Length	In Bolt's range?	
1. Sepmeyer ⁵	A	1.00	1.14	1.39	No
	B	1.00	1.28	1.54	Yes
	C	1.00	1.60	2.33	Yes
2. Louden ⁶ 3 best ratios	D	1.00	1.4	1.9	Yes
	E	1.00	1.3	1.9	No
	F	1.00	1.5	2.5	Yes
3. Volkmann ³ 2 : 3 : 5	G	1.00	1.5	2.5	Yes
4. Boner ⁴ 1: $\sqrt{2}$: $\sqrt{4}$	H	1.00	1.26	1.59	Yes

Tabla 3.1.2a – Tabla con proporciones óptimas para una buena distribución modal.

3.1.3 Criterio de Gilford

C. L. S. Gilford (1979) se basa en el análisis del comportamiento de los modos axiales, despreciando los tangenciales y oblicuos. Propone que la separación de estos modos no debería ser superior a los 20 Hz ya que si la diferencia es mayor el modo se podría “escuchar”. Hay que tener en cuenta que el valor de 20 Hz es relativamente alto para frecuencias graves, como por ejemplo 20 y 50 Hz, en cambio, para frecuencias comprendidas entre 200 y 300 Hz este valor no presenta mayor importancia.

3.1.4 Criterio de Bonello

Oscar J. Bonello (1981), en contraposición a Gilford, contempla todos los modos presentes, fijando el análisis sobre la base de porcentajes de la frecuencia modal y no a distancias fijas. Bonello establece que la separación máxima de frecuencias modales debe ser un 5% de la misma frecuencia. (Ver Figura 3.1.4a) [2]

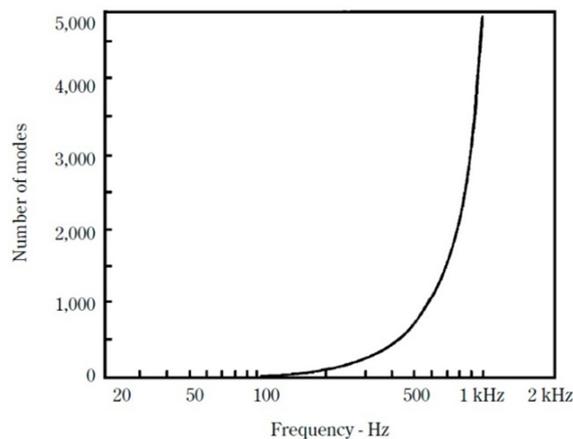


Figura 3.1.4a – Gráfica del número de modos en función de la frecuencia.

3.2 Tiempos de reverberación

El tiempo de reverberación (t_R) es un parámetro que se utiliza para cuantificar la reverberación de un determinado recinto. Se define como el tiempo que transcurre entre que se interrumpe la recepción directa de un sonido y la recepción de sus reflexiones [3]. La

importancia de este parámetro viene definida porque influye directamente en el resultado de los mensajes acústicos emitidos (ya sean hablados, musicales, etc.). Según las condiciones o aplicación la persistencia del sonido puede ser beneficiosa pero otras veces puede ser perjudicial ya que puede enmascarar sonidos sucesivos que tal vez no deseemos enmascarar. En el caso de nuestro proyecto se necesita definir tiempos de reverberación distintos para las dos salas (sala de Grabación y sala de Control), para ello existen tablas y gráficas en el que se recomiendan valores en función del volumen y la utilidad de la sala. (Ver Figura 3.2a) [2]

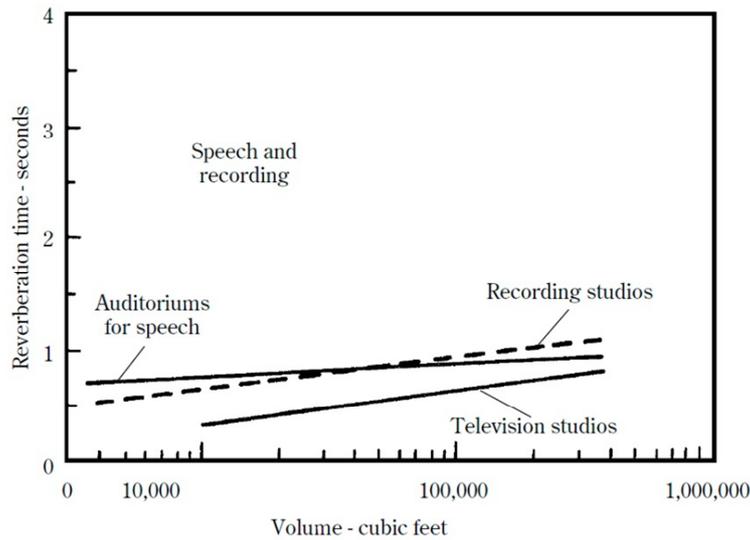


Figura 3.2a – Gráfica del tiempo de reverberación en función del volumen.

Mediante la teoría de la Acústica Estadística podemos hacer una aproximación del tiempo de reverberación de una sala. (Figura 3.2b) [1]

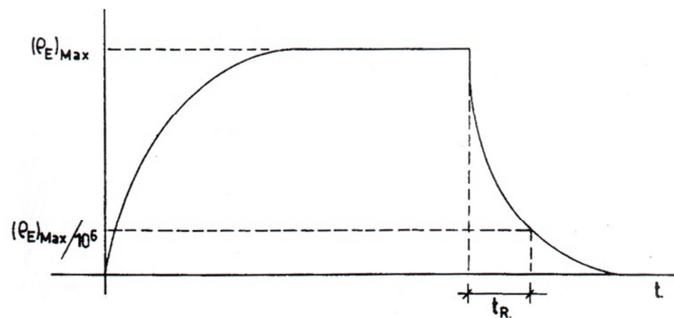


Figura 3.2b – Definición gráfica del tiempo de reverberación.

Para poder realizar dicha aproximación se puede partir de la expresión que da la variación de la densidad de energía en escala logarítmica, durante el proceso de reverberación (ecuación 3.2.1) cuando la densidad de energía es $\rho_E = \frac{4W}{Ac} \cdot 10^{-6}$, el tiempo transcurrido es el tiempo de reverberación. La ecuación obtenida para el tiempo de reverberación (ecuación 3.2.2) también se le conoce como tiempo de reverberación de Sabine o ecuación de Sabine.

$$\log \left(\rho_E / \frac{4W}{Ac} \right) = -t \frac{Ac}{4V} \log e \tag{3.2.1}$$

$$t_R = \frac{0.162V}{\sum \alpha_i S_i} \tag{3.2.2}$$

Sin embargo, la ecuación de Sabine, tiene una limitación cuando el coeficiente de absorción medio es superior a 0.2 cometiendo errores superiores al 10%. Reemplazando el coeficiente de absorción por un exponente de absorción $-(\ln(1 - \bar{\alpha}))$ se puede obtener el tiempo de reverberación de Eyring o fórmula de Eyring, válida para coeficientes iguales o superiores a 0.2. (Véase la ecuación 3.2.3)

$$t_R = \frac{0.162V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})} \tag{3.2.3}$$

Para el caso de campo abierto ($\bar{\alpha} = 1$) se obtiene un tiempo de reverberación nulo, un resultado razonable desde el punto de vista físico. Para valores de absorción pequeños coincidan las fórmulas de Sabine y Eyring.

Para materiales de alta absorción, las fórmulas de Sabine y Eyring dan resultados físicamente irracionales. La ecuación de Millington, introduciendo en la expresión de Sabine un nuevo coeficiente de absorción, nos asegura la imposibilidad matemática de obtener coeficientes de absorción mayores que la unidad. (Véase la ecuación 3.2.4)

$$t_R = \frac{0.162V}{\sum S_i \ln\left(\frac{1}{1 - \alpha'_i}\right)} \tag{3.2.4}$$

3.2.1 Sala de grabación

En 1924 se empieza a trabajar y aplicar el micrófono de los estudios de radio a las técnicas de grabación gramofónica, realizándose el primer registro por este método en 1926. Debido a que hoy en día la música está presente en nuestras vidas surge la necesidad de realizar grabaciones lo más semejantes a la realidad, al instrumento u objeto que ha generado el sonido.

Tal y como se comentaba en el punto 3.2, el tiempo de reverberación es un parámetro muy importante a tener en cuenta, es muy variable, ya que medidos los tiempos de reverberación en distintos recintos, muestran que dependen del volumen del recinto, de la absorción presente en el mismo, así como de la frecuencia de la fuente sonora. Las diferencias entre tiempo de reverberación a bajas y altas frecuencias, son en algunas salas del orden de cinco o seis segundos, y las diferencias entre los tiempos de reverberación óptimos para palabras y música, e incluso para distintos tipos de música, están entre 0.5 y 2 segundos. (Figura 3.2.1a) ^[5]

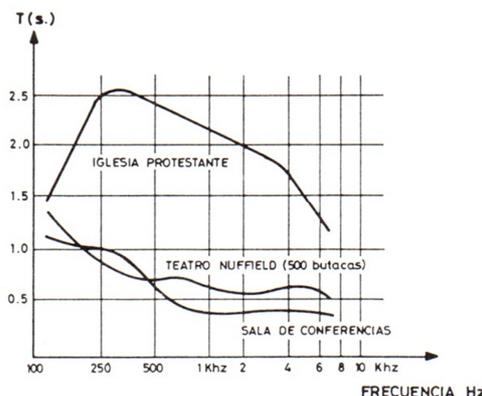


Figura 3.2.1a – Tiempos de reverberación medidos en distintos recintos.

La idea principal para la realización de un buen estudio de grabación es la calidad acústica del recinto, por eso a medida que pasa el tiempo tendemos a reducir lo más posible el tiempo de reverberación al intentar conseguir una escucha más natural (Figura 3.2.1b) [5]. El principal problema acústico es poder llegar a tener un tiempo de reverberación óptimo para cada tipo de grabación, por eso es necesario saber qué tipo de música se desea grabar y tener muy en cuenta las limitaciones físicas que tiene el estudio de grabación decidiendo entre:

1. Tener varios tipos de estudios especializados.
2. Tener un estudio único con un tiempo de reverberación medio.
3. Tener un estudio único con tiempo de reverberación variable mediante placas, paneles y resonadores.

Si se opta por la primera opción habrá que tener al menos tres estudios:

1. De reverberación alta (más de 2 segundos) para música romántica y melódica.
2. De reverberación media (aprox. 1.5 segundos) para música clásica.
3. De reverberación baja (menos de 1.5 segundos) para música moderna.

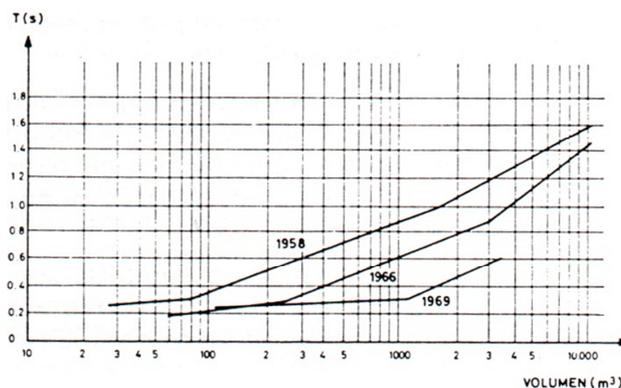


Figura 3.2.1b – Evolución del tiempo de reverberación de los estudios de grabación.

Tipo de estudio	Volumen (m ³)	t _R (s)
Estudio grande para grabación musical sin público	2000	1.5
		1.2
Estudio grande para grabación musical con público	5000	2.4
		1.7
		1.2
Estudio para música de cámara	1000	1.2
		0.9
Estudio para música de baile	800	0.9
		0.5
Estudio de música pop y rock	Pequeño	0.3

Tabla 3.2.1a – Tabla con los tiempos de reverberación según aplicación.

3.2.2 Sala de control

Al igual que en la sala de grabación, la sala de control debe tener un tiempo de reverberación óptimo (véase la Figura 3.2.2a) [5]. Con relación a la variación del tiempo de reverberación con la frecuencia, la mayor parte de autores coinciden en que no debe variar su valor con el fin de que las diferentes componentes de la señal desaparezcan gradualmente a la misma velocidad, para así que la grabación sonora no esté influenciada por las características acústicas del control (valor entre 0.2 y 0.3 s). Por otro lado, Davis encontró en su investigación, valores en las salas de control, comprendidas entre 0.13 y 0.2 s, aunque sugirió un valor de

0.47 s en su ejemplo concreto. En la siguiente sección (punto 3.3) se estudiará cómo se puede controlar este tiempo de reverberación y las diferentes configuraciones geométricas para la sala de control.

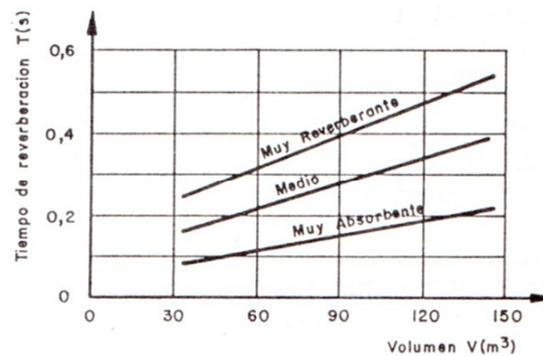


Figura 3.2.2a – Tiempos de reverberación de salas de control según Fierstein.

3.3 Diseño de salas

En este apartado se definirán posibles configuraciones para las salas de control y grabación. Como ya habíamos avanzado en la introducción, este apartado hace referencia a la acústica geométrica y el uso del trazado de rayos.

A continuación se explicarán algunas de las tipologías más utilizadas en el diseño de salas. Aunque estos diseños se han utilizado para las salas de conciertos y teatros, en algunos casos, también es aplicable a nuestro proyecto. Con el estudio de estos diseños se pretende tener una idea de las posibles focalizaciones del sonido dentro de un recinto.

- Salas de planta rectangular (“shoe-box halls”):

Como se puede observar en la Figura 3.3a ^[6] en un recinto con paredes paralelepípedas existe un alto grado de reflexiones en los laterales y una concentración de rayos en la mitad de la sala. Esta es la geometría típica de un estudio de grabación casero utilizando una habitación ya existente.

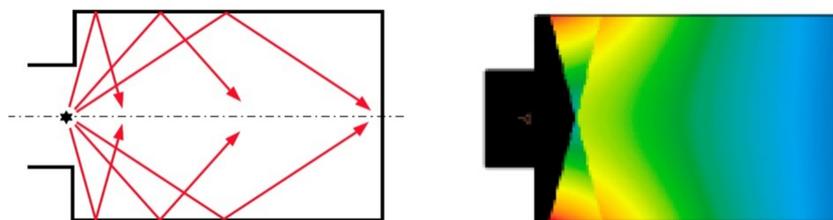


Figura 3.3a – Primeras reflexiones en una sala rectangular.

- Salas en forma de abanico (“fan-shaped halls”):

La configuración en forma de abanico (Figura 3.3b) ^[6] es la más utilizada en la sala de control de los estudios de grabación profesionales. Esta geometría ayuda a dirigir las primeras reflexiones hacia el fondo de la sala (uno de los principios en la configuración de una sala LEDE).

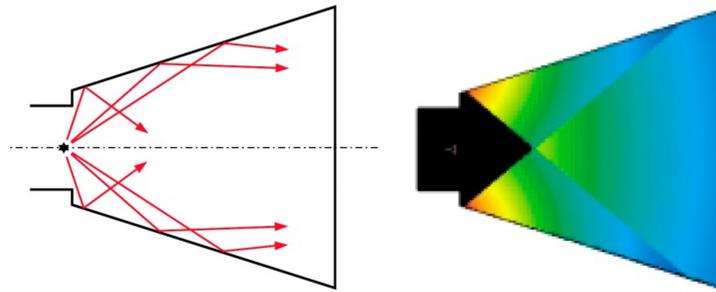


Figura 3.3b – Primeras reflexiones en una sala con forma de abanico.

- Salas en forma de abanico invertido (“reverse-splay halls”):

Uno de los principales problemas que ofrece esta geometría (Figura 3.3c) ^[6] es que existen un alto grado de primeras reflexiones laterales. La principal ventaja de esta configuración es que permite una distribución uniforme por el resto de la sala de los rayos reflejados.

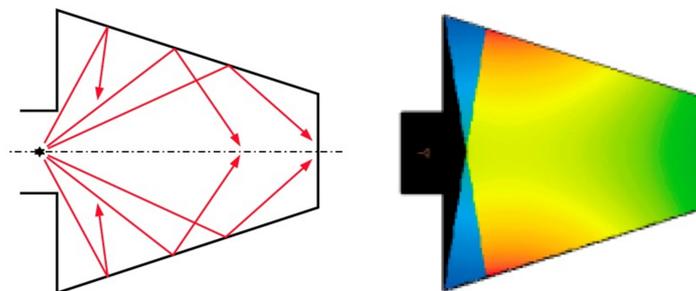


Figura 3.3c – Primeras reflexiones en una sala con forma de abanico invertido.

- Salas en forma de hexágono alargado (“elongated hexagon halls”):

Perfil obtenido de la combinación de la geometría de abanico con la geometría de abanico invertido (Figura 3.3d) ^[6]. Con esta configuración recoge la ventaja de ambas geometrías, ausencia de primeras reflexiones en la zona central y distribución uniforme de los rayos en la parte trasera de la sala.

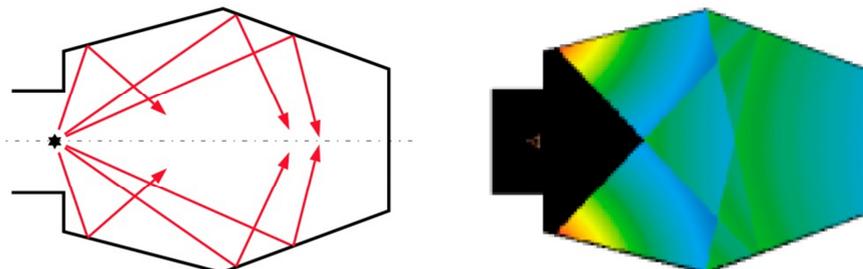


Figura 3.3d – Primeras reflexiones en una sala con forma hexagonal alargada.

- Salas en forma de herradura (“horseshoe halls”):

Este perfil, aunque no es utilizado en los estudios de grabación, es el más utilizado en los teatros y salas de conciertos (Figura 3.3e) ^[6]. Con esta geometría se consigue una baja energía de primeras reflexiones laterales pero pueden existir posibles focalizaciones en la parte posterior debido a la concavidad de la pared trasera.

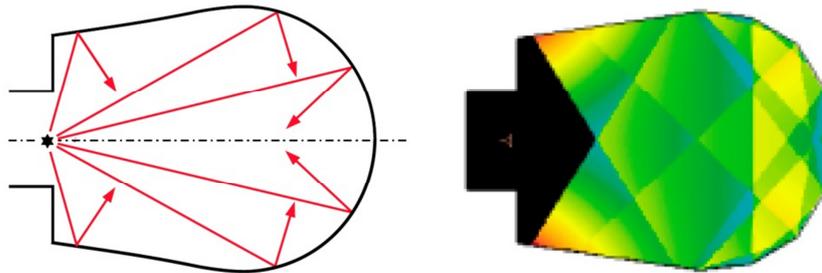


Figura 3.3e – Primeras reflexiones en una sala con forma de herradura.

3.3.1 Sala de control

En la sala de control es donde reside la mayor parte de los problemas acústicos y de diferencias a la hora de decidir que geometría utilizar. El objetivo principal de un buen diseño es evitar el filtro peine y la perturbación de la sensación excesiva de la reverberación. Para ello se necesita crear un ITDG (Initial Time Delay Gap, véase la Figura 3.3.1a) ^[2] alrededor de unos 20 ms para poder generar una sensación acústica de sala grande en una sala de dimensiones reducidas. ^[5] No obstante hay algunos autores que consideran ITDG del orden de 8 y 10 ms.

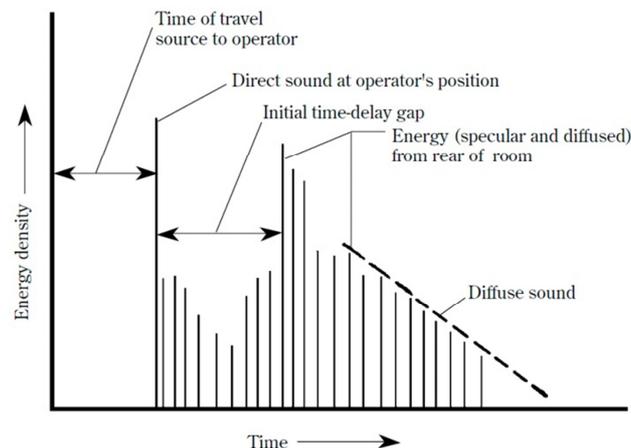


Figura 3.3.1a – ITDG de una sala de control.

Los estudios llevados a cabo por diferentes autores respecto al tratamiento de los controles de sonido en los estudios, les han llevado a propuestas diferentes, por ejemplo Queen sugiere “proporcionar la máxima absorción posible, pero aplicándola uniformemente a todas las superficies”, por otro lado Rettinger propone “la parte frontal del control, puede tener algunos paneles reflectores, mientras que la pared posterior debe tratarse con un material absorbente”, mientras que Davis indica que “la absorción estará en la parte frontal del control, el resto se tratará con material sin absorción”.

Como se puede apreciar estos tres puntos de vista sobre los controles de grabación son completamente distintas, ahora surge la pregunta sobre cuál escoger. Una sala de control debe proporcionar al técnico de sonido un buen ambiente acústico sin interferencias producidas por defectos acústicos del control. Un error comúnmente cometido es la equalización o ajuste de nivel sin conocer los fallos del control, esto conlleva a un producto final degradado ya que la mezcla no tendrá un sonido correcto en otros ambientes.

En la Figura 3.3.1b^[5] se muestra una primera aproximación a la problemática existente en la mayoría de los estudios de grabación no profesionales que disponen de una sala de control rectangular. Como se puede apreciar, la sala de control rectangular proporciona unos resultados con un retardo excesivo entre las señales directas y las reflexiones de primer orden. Mediante la colocación de unas superficies reflectoras (véase la Figura 3.3.1c)^[5], se soluciona de forma considerable el tiempo de retardo en las reflexiones de primer orden.

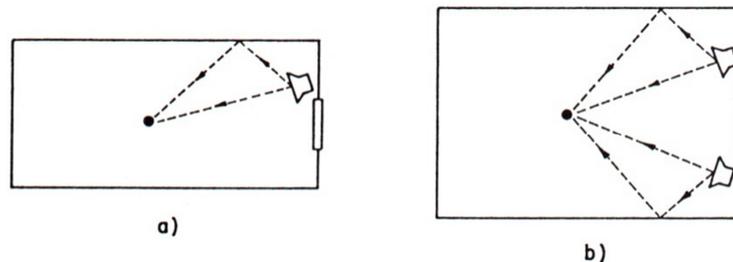


Figura 3.3.1b – Sala de control rectangular. a) alzado. b) planta.

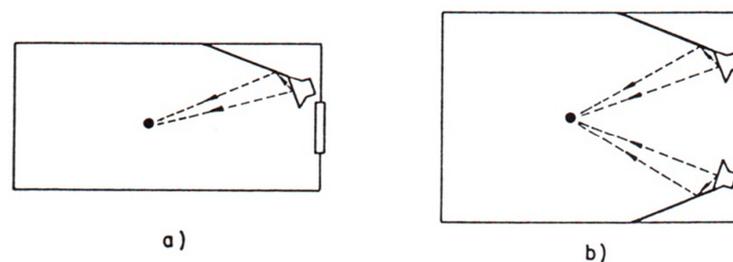


Figura 3.3.1c – Sala de control rectangular con superficies reflectantes. a) alzado. b) planta.

3.3.1.1 Rettinger

Con la creación de superficies convexas en la parte frontal del control (ver Figura 3.3.1.1a)^[5], Rettinger pretende obtener un retardo mínimo entre la señal directa y las primeras reflexiones en la posición del técnico en la mesa como el técnico que se encuentra detrás de la mesa. Para minimizar las reflexiones en la pared final que causan un retraso prolongado, Rettinger propone situar material absorbente.

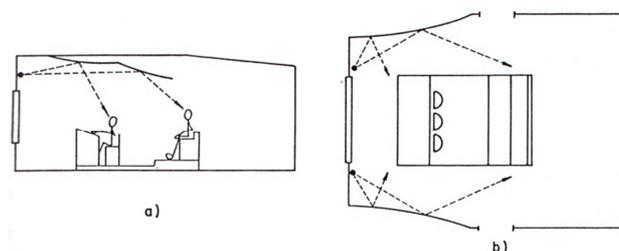


Figura 3.3.1.1a – Sala de control según Rettinger. a) alzado. b) planta.

3.3.1.2 Davis

En 1978 Davis creó un nuevo concepto de sala de control, la sala LEDE (Live End – Dead End). Este nuevo concepto consiste en colocar en la parte frontal del estudio material absorbente con el fin de solucionar las anomalías en respuesta causadas por el mezclador al recibir muchas primeras reflexiones y colocar superficies reflectantes en la parte posterior para aumentar las pocas reflexiones de orden superior. (Figura 3.3.1.2a)^[5]

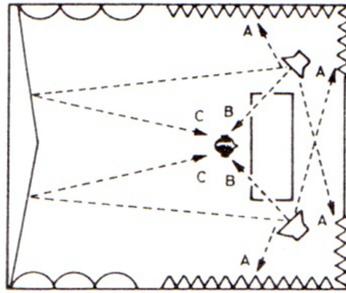


Figura 3.3.1.2a – Sala de control según Davis. Sala LEDE

3.3.1.3 Veale

Después de una serie de estudios e investigaciones, Veale supone que en un control sólo deben emplearse formas inertes y disipativas, por lo que excluye los resonadores de Helmholtz. Veale no da las especificaciones sobre cómo realizar un control pero exige que la parte frontal entre los altavoces y el control genere las primeras reflexiones utilizando también el techo para ello. El autor considera que las reflexiones entre 0 y 8 ms no son útiles, son de hecho los generadores filtro peine, que Davis minimiza con un frontal absorbente.

3.3.1.4 D'Antonio y Konnert

Peter D'Antonio y J. H. Konnert mejoran el concepto de LEDE, creado por Davis, al aplicar los avances realizados por M.R. Schroeder en materia de difusión (punto 3.4 de este documento) y prescindir del frontal absorbente, que proponía Davis en su idea inicial, creando un nuevo concepto llamado la zona sin reflexiones (RFZ). (Figura 3.3.1.4a) ^[2]

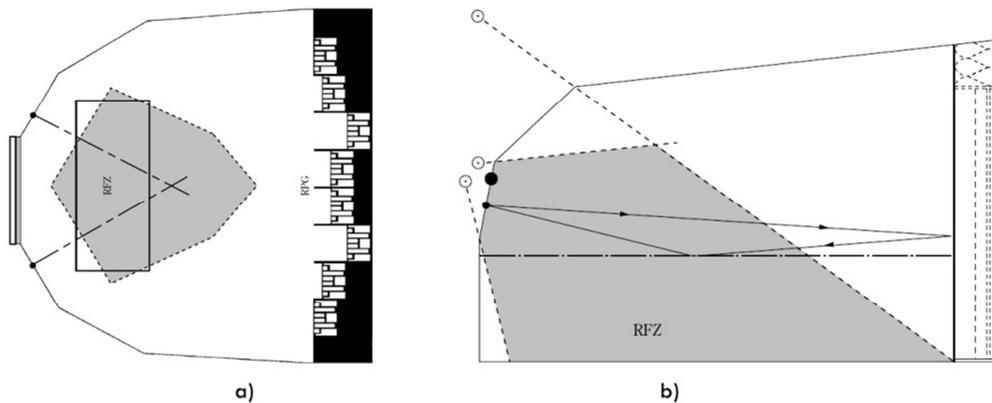


Figura 3.3.1.1a – Sala de control según D'Antonio y Konnert. a) planta. b) alzado.

La zona sombreada en gris es la parte del estudio donde se localiza el técnico y está libre de reflexiones, solamente recibe sonido directo. La anulación de primeras reflexiones se consigue dando al frontal de la sala de control una forma geométrica tal que las posibles primeras reflexiones son enviadas directamente hacia la pared trasera, donde son "troceadas" por los difusores acústicos diseñados por Schroeder.

Para el estudio del comportamiento en baja frecuencia, la estructura interna se considera inexistente y se aplican las leyes de acústica ondulatoria (modos propios de la sala) al recinto externo (se presupone que el recinto envolvente es de paredes suficientemente sólidas).

3.3.2 Sala de grabación

De manera distinta a las salas de control en los estudios de grabación, las salas de grabación varían el tiempo de reverberación en función de la música que se vaya a grabar. Como ya hemos mencionado anteriormente en el apartado de los tiempos de reverberación para las salas de grabación, en función de la dotación presupuestaria o del espacio disponible para ella, se debe tener en cuenta unos tiempos de reverberación concretos.

En referencia a la geometría de la sala no existen unos modelos en concreto de salas de grabación. El objetivo principal es tratar de evitar en la sala el paralelismo de las paredes opuestas para proveer una mayor difusión del sonido. El máximo efecto se consigue con una diferencia de 5° entre paredes opuestas.

Una buena opción para una sala de grabación polivalente y de reducidas dimensiones, como es en la mayoría de los casos en los estudios caseros, es utilizar elementos acústicos variables que dependiendo de la disposición de los mismos ayuden a tener diferentes tipos de acústica en un mismo recinto. (Ver Figuras 3.3.2a ^[6] y 3.3.2b ^[2])

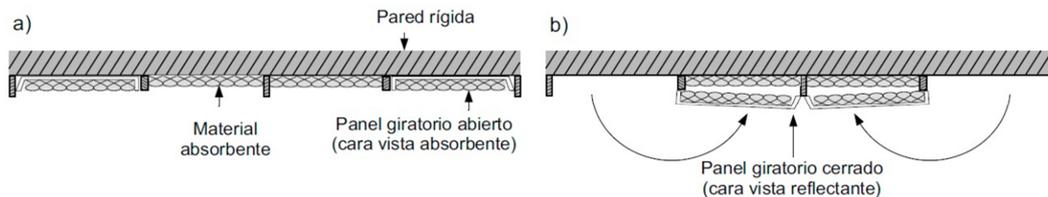


Figura 3.3.2a – Paneles giratorios, con una cara absorbente y otra reflectante, montados a modo de puertas sobre la pared (vista en planta). a) posición de máxima absorción. b) posición de mínima absorción.



Figura 3.3.2b – Utilización de cortinas para variar el grado de absorción de la pared.

3.3.3 Espacios acoplados electroacústicamente.

En el momento que tenemos dos salas con tiempos de reverberación diferentes y procedemos a escuchar una grabación hecha en la otra sala, se presenta el problema de los espacios acoplados electroacústicamente. Este problema afecta directamente a la mezcla realizada en la sala de control y hay que tener en cuenta una serie de reglas ^[2]:

- La suma total del t_R es mayor a cualquiera de los dos t_R de manera individual
- La suma total del t_R es aproximadamente igual al t_R mayor.
- Si un t_R es muy corto, la suma total del t_R será aproximadamente igual al t_R mayor.
- Si los dos t_R son idénticos, el t_R resultante será 20.8% del t_R de una de las dos salas.

3.4 Acondicionamiento acústico

Como ya se ha venido comentando en puntos anteriores, existe la necesidad de controlar los tiempos de reverberación en las salas: evitar coloraciones, focalizaciones

innecesarias, etc. Para ello, dependiendo de la frecuencia, se pueden utilizar materiales porosos o elementos resonadores (véase Figura 3.4a y b) [6]. Actualmente existen infinidad de materiales en el mercado para el acondicionamiento acústico, pero en este apartado se hará referencia a los materiales utilizados para la realización de este proyecto.

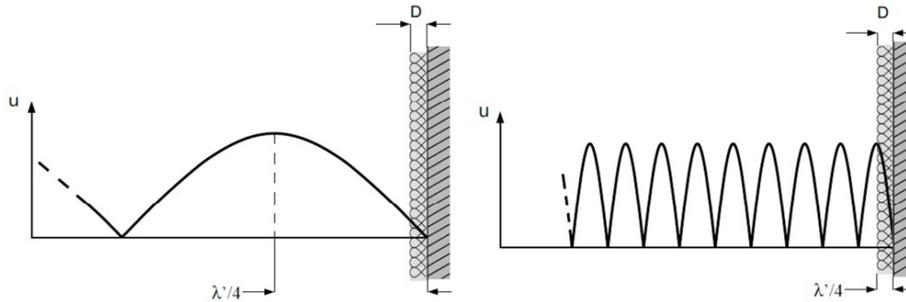


Figura 3.4a – La longitud de onda para frecuencias bajas es muy grande para utilizar materiales porosos.

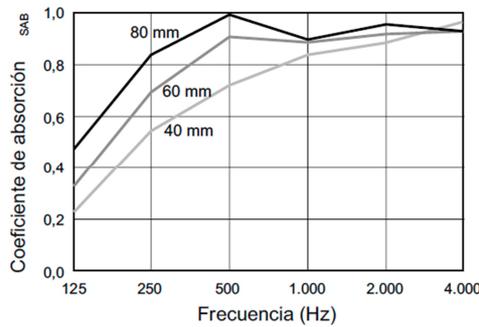


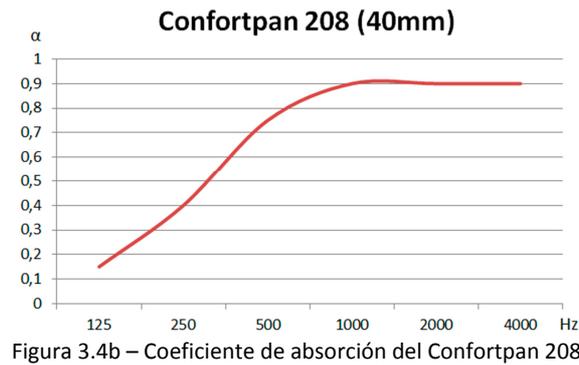
Figura 3.4b – Variación de la absorción en función de la frecuencia para diferentes espesores de un material absorbente comercial a base de lana de vidrio.

3.4.1 Materiales

3.4.1.1 Lana de roca

La lana de roca es un material utilizado por muchas industrias, a parte de la acústica, como componente aislante y prácticamente ignífugo (mantiene sus propiedades casi intactas superando incluso los 1000°). Las propiedades de la lana de roca que se utilizan en la acústica es la absorción y la flexibilidad, que hacen ideal para obtener sistemas masa-muelle-masa, donde la lana de roca actúa como muelle.

Las densidades habituales en cada aplicación responden a un compromiso de estas dos propiedades: flexibilidad y absorción. En paredes y techo, la densidad habitual es de 30 - 50 Kg/m³ que presentan mejor absorción acústica. También se define el espesor en función del montante (40 - 70 mm), aunque es cierto que si la cámara es amplia, se recomienda mayores espesores, para obtener mejor aislamiento en baja frecuencia.



3.4.1.2 Lana de vidrio

La lana de vidrio, al igual que la lana de roca, es comúnmente utilizada en la construcción como aislante térmico en los techos y paredes (ver Figura 3.4.1.2a) ^[8]. A parte de ser un material aislante, como material acústico es eficiente y de fácil manejo. El material posee una muy buena relación resistencia térmica / precio, siendo un material muy apropiado para aislamiento acústico.

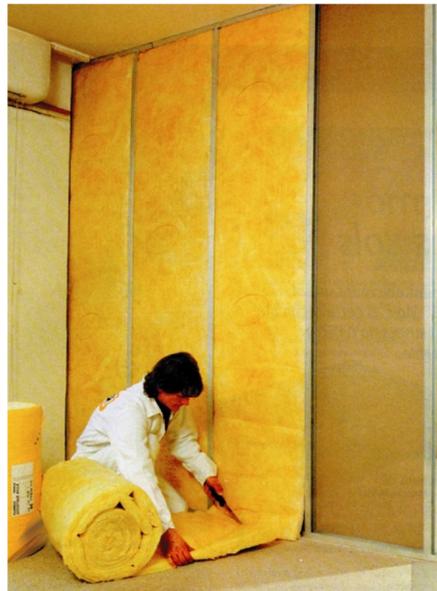


Figura 3.4.1.2a – Colocación de lana de vidrio en la pared como aislante acústico.

3.4.1.3 Moquetas y alfombras

Las moquetas y alfombras se han venido utilizando históricamente en salas de control para evitar reflexiones del suelo. Luego ha ido evolucionando llegando a combinar moqueta y/o alfombras junto madera (suelo de tarima flotante con alfombras). En las salas de grabación se utilizan a modo de panel para conseguir variar la acústica de la sala, por ejemplo en la grabación de voces en un estudio relativamente grande para esa aplicación. (Figura 3.4.1.3a) ^[9]



Figura 3.4.1.3a – Utilización de alfombras para la grabación de voces.

3.4.2 Resonadores

Como se ha visto en la introducción del punto 3.4, los absorbentes con una espesor estándar colocados sobre techo o pared rígida ofrecen una absorción pobre a bajas frecuencias, ya que para tener una buena absorción necesitaríamos un espesor del orden de su longitud de onda y para frecuencias bajas es muy grande. Para poder obtener una gran absorción a frecuencias bajas hay que hacer uso de absorbentes selectivos o resonadores.

Estos resonadores presentan una curva de absorción con un valor máximo en la frecuencia de diseño, pudiendo variar esta curva rellenando el interior de mismo con materiales absorbentes (véase Figura 3.4.2a) ^[6]. Las frecuencias típicas a tratar con este tipo de elementos se sitúa por debajo de los 500 Hz pudiéndose utilizar de forma independiente o como complemento a los materiales absorbentes.

Básicamente, existen los siguientes tipos de resonadores:

- Resonador de membrana o diafragmático.
- Resonador de cavidad simple (Helmholtz).
- Resonador de cavidad múltiple a base de paneles perforados.

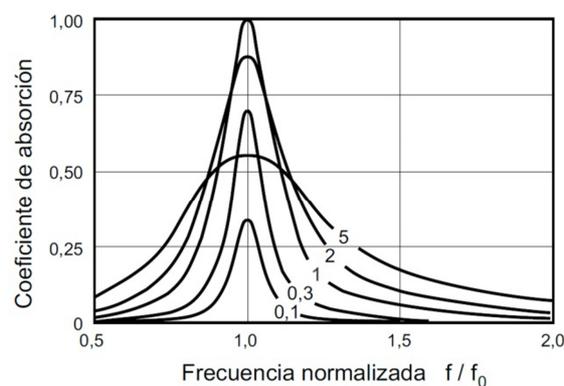


Figura 3.4.2a – Coeficiente de absorción de una membrana utilizando diferentes materiales absorbentes en su interior.

3.4.2.1 Resonadores de membrana o diafragmático

El resonador de membrana está formado por un panel de un material no poroso y flexible como por ejemplo un tablero de madera MDF de 3 mm. Estas membranas se sitúan entre dos montantes en la pared creando una cavidad cerrada entre las dos superficies. (Figura 3.4.2.1a) ^[6]

El funcionamiento físico de estos resonadores es muy básico. Cuando una onda incide sobre la membrana, ésta entra en vibración y dicha vibración, cuya amplitud depende de la frecuencia de diseño, provoca una cierta deformación del material provocando una pérdida de la energía incidente que se disipa en forma de calor. Por otro lado, el material provoca también una pequeña radiación pero a efectos prácticos resulta totalmente inaudible.

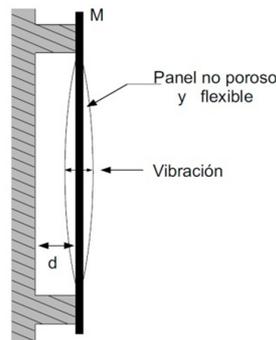


Figura 3.4.2.1a – Esquema básico de un resonador de membrana.

Para la realización del diseño de un resonador de membrana se utiliza la ecuación 3.4.2.1.1 en el que la masa por unidad de superficie del panel (M) está en Kg/m^2 , la frecuencia (f_0) está en Hz y la distancia del panel a la pared rígida (d) está en cm. Esta expresión puede considerarse suficientemente aproximada para espesores del panel de hasta 20 mm y siempre y cuando la distancia entre puntos de apoyo no sea inferior a 80 cm.

$$f_0 = \frac{600}{\sqrt{Md}} \quad (3.4.2.1.1)$$

3.4.2.2 Resonadores de cavidad simple (Helmholtz)

El resonador de Helmholtz está formado por una cavidad simple cerrada de aire con una abertura o cuello estrecho (Figura 3.4.2.2a) ^[6], esta abertura es la que conecta el resonador con la sala en la que se ha instalado.

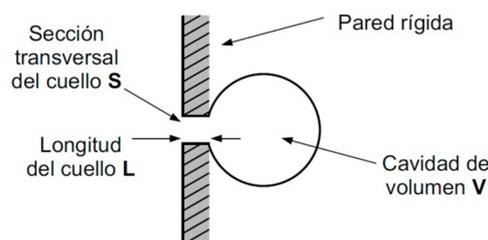


Figura 3.4.2.2a – Esquema básico de un resonador de Helmholtz.

El principio básico de funcionamiento del resonador es de masa muelle, en el que el aire del cuello se mueve como una unidad constituyendo el elemento de masa, mientras que

el aire de la cavidad se comporta como un muelle. De forma análoga a los resonadores de membrana, el aire de la cavidad del resonador presenta un pico de absorción a la frecuencia de diseño.

La ecuación 3.4.2.2.1 permite calcular la frecuencia de resonancia del resonador. Como se puede observar la expresión va en función del volumen de la cavidad (V) en cm³, la longitud del cuello (L) en cm y la sección transversal del cuello en cm². Por otro lado, hay que tener en cuenta que la longitud del cuello L con sección circular necesita de un factor corrector (ecuación 3.4.2.2.2).

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{S}{L'V}} \tag{3.4.2.2.1}$$

$$L' = L + L_c = L + 2(0.8r) = L + 1.6r \tag{3.4.2.2.2}$$

3.4.2.3 Resonadores de cavidad múltiple

El resonador de cavidad múltiple está formado por un panel de material no poroso y rígido de espesor “D”, con perforaciones o ranuras en el panel y éste situado a una distancia “d” de la pared (Figura 3.4.2.3a) [6]. Este resonador puede tener varias interpretaciones:

- Como un resonador de membrana en el que la masa M del panel ha sido sustituido por la masa de aire contenido en las perforaciones que entra en vibración cuando una onda incide sobre las mismas.
- Como múltiples resonadores simples de Helmholtz que comparten una misma cavidad.

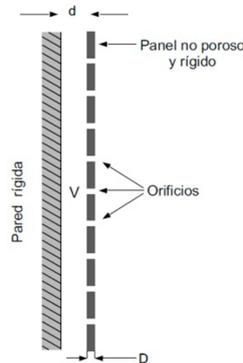


Figura 3.4.2.3a – Esquema básico de un resonador de perforaciones múltiples.

La expresión que permite calcular la frecuencia de resonancia es análoga al resonador de cavidad simple o Helmholtz (ecuación 3.4.2.3.1) pero con una dependencia al porcentaje de perforaciones o ranuras “p”.

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{p}{D'd}} \tag{3.4.2.3.1}$$

- Para panel con perforaciones:

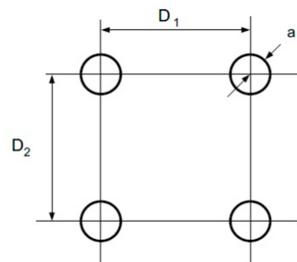


Figura 3.4.2.3b – Detalle de las perforaciones.

$$D' = D + 1.6a \quad (3.4.2.2.2)$$

$$p = \frac{\pi a^2}{D_1 D_2} \quad (3.4.2.2.3)$$

NOTA: D_1 y D_2 están en cm.

- Para panel con ranuras:

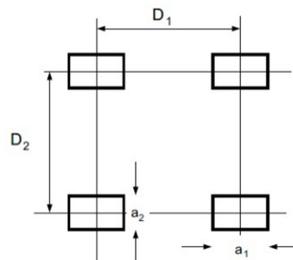


Figura 3.4.2.3c – Detalle de las ranuras.

$$D' = D + 1.6a_{eq} \quad (3.4.2.2.4)$$

$$a_{eq} = \sqrt{\frac{a_1 a_2}{\pi}} \quad (3.4.2.2.5)$$

$$p = \frac{a_1 a_2}{D_1 D_2} \quad (3.4.2.2.6)$$

NOTA: a_{eq} , D_1 y D_2 están en cm.

3.4.3 Difusores

Los elementos difusores también forman parte del acondicionamiento acústico de una sala al igual que los materiales absorbentes. La función principal de un difusor, tal y como su propio nombre indica, es dispersar una onda incidente en múltiples direcciones. (Véase la Figura 3.4.3a) ^[6]. Actualmente existen dos tipos de difusores, el difusor policilíndrico y el difusor de Schroeder o RPG (red de fase por reflexión). La utilización de uno u otro depende del espacio disponible (los difusores policilíndricos se necesita un mayor espacio debido a sus dimensiones) y la postura del técnico (algunos técnicos de sonido opinan que los difusores RPG generan un sonido no natural y metálico).

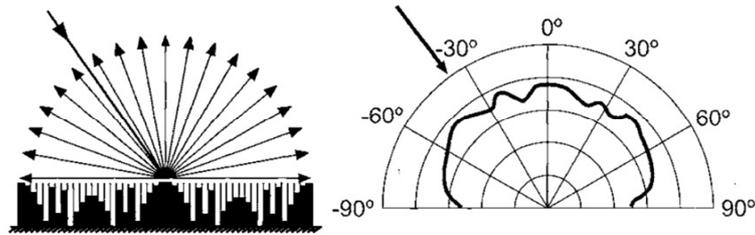


Figura 3.4.3a – Respuesta de un difusor RPG.

Aunque la necesidad inicial de disponer de una buena difusión fueron las salas de conciertos, actualmente se utilizan en estudios de grabación (tanto en la sala de grabación como en la sala de control). (Figura 3.4.3b) ^[10]



Figura 3.4.3b – Difusores policilíndricos en Estudis Ground (Cornellà del Terri).

3.4.3.1 Difusor policilíndrico

Como se ha visto en la imagen anterior (Figura 3.4.3b) ^[10], el difusor policilíndrico es una superficie lisa convexa, normalmente de madera, que se colocan de manera secuencial (Figura 3.4.3.1a) ^[2]. Solamente hay que tener en cuenta que el radio de curvatura del difusor no sea superior a 5 m, ya que el difusor pasaría a comportarse como un reflector plano en vez de un difusor.

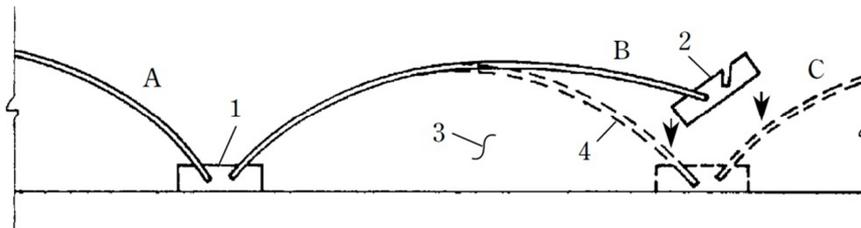


Figura 3.4.3.1a – Ejemplo de montaje de difusores policilíndricos.

3.4.3.2 Difusor de Schroeder o RPG

Estos difusores fueron inventados por Manfred R. Schroeder y el principio básico de funcionamiento es la red de fase por reflexión basado en las redes de difracción óptica. La teoría desarrollada por Schroeder se conoce como “teoría de los números” estando

fundamentada por distintas secuencias matemáticas previamente prefijadas. El material utilizado para la construcción del difusor es la madera. Existen tres tipos de difusores:

- Difusor MLS:

Los difusores MLS (“Maximum Length Sequence”) están basados en unas secuencias pseudoaleatorias periódicas, denominadas de longitud máxima o de Galois, que sólo pueden adquirir dos valores diferentes: -1 y +1 [6]. (Ver la Figura 3.4.3.2a) [6]

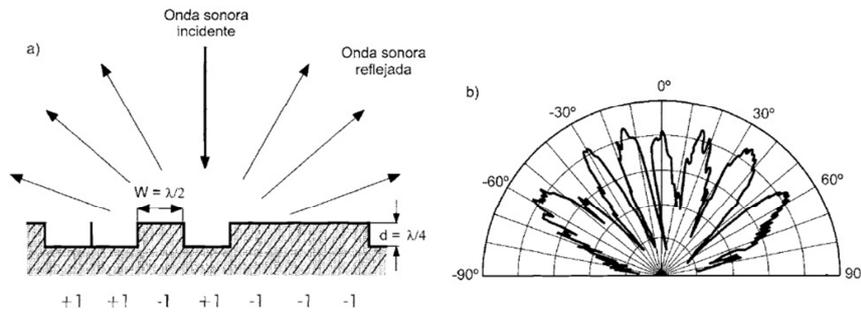


Figura 3.4.3.2a – Difusor MLS.

Este tipo de difusores tienen una ventaja a los QRD y PRD ya que no ofrecen apenas absorción a frecuencias bajas, pudiendo instalar tantos difusores como se necesite sin modificar la respuesta de la sala a bajas frecuencias. No obstante, este tipo de difusores son poco utilizados.

- Difusor QRD:

Existen dos tipos de difusores QRD:

- QRD Unidimensional:

Son los más utilizados a nivel práctico en estudios de grabación (tanto en salas de grabación como en las salas de control). Estos difusores están formados por una serie de ranuras paralelas de forma rectangular, separadas por divisores delgados y rígidos, de igual anchura y diferente profundidad (Figura 3.4.3.2b) [6]. La profundidad de las ranuras se obtiene mediante una secuencia matemática prefijada (Ecuación 3.4.3.1.1). Donde “P” es un número primo, “n” es un número entero que va de 0 a P-1 y “mod” es el resto de la división.

$$S_n = n^2 \text{mod}(P) \tag{3.4.3.1.1}$$

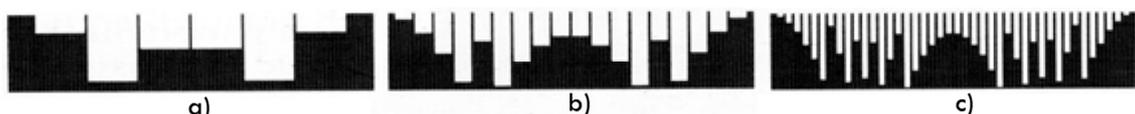


Figura 3.4.3.2b – Perfiles de difusores QRD. a) P=7. b) P=19. c) P=43.

- QRD Bidimensional:

Los difusores QRD Bidimensionales surgieron como una generalización de los unidimensionales con el objetivo de obtener una mejor difusión del sonido incidente en todas las direcciones del espacio. La única diferencia a nivel de estructura es que no son ranuras, son trozos que normalmente tienen forma cuadrada. (Figura 3.4.3.2c) [11]



Figura 3.4.3.2c – Difusor QRD mod. Auralex WA2

La expresión para obtener las profundidades de las hendiduras es similar a la del difusor unidimensional, siendo “m” y “n” son números enteros desde 0 hasta P-1. (Ecuación 3.4.3.1.2)

$$S_{m,n} = (m^2 + n^2) \text{mod}(P) \tag{3.4.3.1.2}$$

- Difusor PRD:

Los difusores de raíces primitivas PRD (“Primitive-Root Diffusor”) son análogos a los difusores unidimensionales QRD. Solamente cambia la manera de obtener la profundidad de las ranuras con otra expresión generadora (Ecuación 3.4.3.1.3), donde “g” es la raíz primitiva de “P” y “n” es un número entero que va desde 1 hasta P-1.

$$S_n = g^n \text{mod}(P) \tag{3.4.3.1.3}$$

3.5 Sistema de monitores

Otra parte importante en el correcto diseño de un estudio de grabación una distribución óptima del sistema de monitores o altavoces. De ello depende que el técnico del estudio tenga una buena escena musical, entendiendo como escena musical a la imagen virtual generada por la posición de los altavoces frontales. (Figura 3.5a) ^[12]

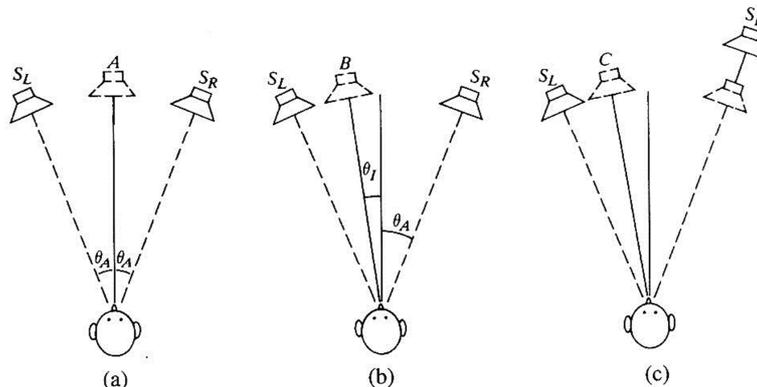


Figura 3.5a – Posiciones de altavoces. a) posición correcta. b) S_R tiene una mayor presión sonora que S_L. c) S_R tiene un retardo respecto a S_L.

Don Davis muestra en uno de sus libros ^[12] una posible configuración sobre los ángulos (en el plano horizontal) que debe haber entre monitores y monitores – técnico (ver Figura 3.5b) ^[12]. Por otra parte, la European Broadcasting Union (EBU) en su especificación técnica sobre disposición de altavoces ^[13] difiere ligeramente de la propuesta por Davis (ver Figura 3.5c) ^[13]. Sobre la altura de los altavoces respecto al suelo, propone que debe ser aproximadamente a 1.2 m. Esta altura viene definida, en este caso, por las orejas del técnico de sonido que se encuentra en una posición sentada frente la mesa de sonido. Sobre la inclinación de los monitores en el plano vertical, la EBU limita que el ángulo no debe ser superior a 10° respecto al plano horizontal de los monitores.

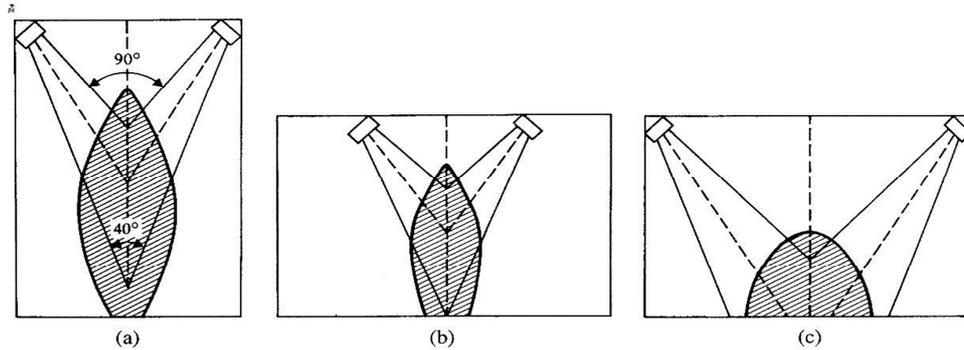


Figura 3.5b – Posiciones de altavoces. a) Posición correcta. b) Monitores muy juntos. c) Monitores muy alejados.

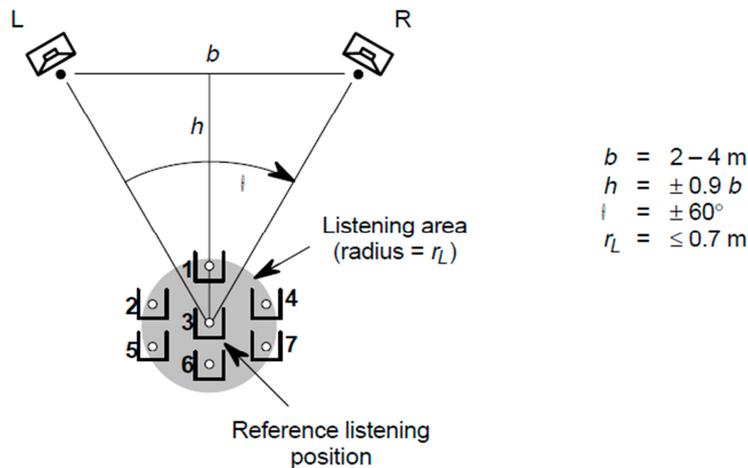


Figura 3.5c – Posición correcta de los altavoces según la EBU.

4 Herramientas numéricas utilizadas

En este apartado se hará una pequeña introducción a las herramientas utilizadas en este proyecto para poder realizar todos los cálculos matemáticos y simulaciones necesarias. Existen otras herramientas que pueden sustituir a las que se van a mencionar pero se ha elegido el software utilizado en las asignaturas de la carrera.

4.2 Matlab

Matlab (MATrix LABORatory) fue creado por Cleve Moler en 1984. La versión que se utiliza en este proyecto es R2011a de 64-bit bajo Windows 64-bit, pero también existe para otros sistemas operativos como OSX o Unix. Matlab es un software matemático con un lenguaje de programación propio, el lenguaje M. Gracias a su lenguaje de programación se pueden realizar funciones con algoritmos, manipulación de matrices, interfaces de usuario, comunicación con programas de otro lenguaje e incluso con otros dispositivos hardware. Este programa dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, Simulink y GUIDE. Además se puede ampliar la capacidad de Matlab con cajas de herramientas o toolboxes.

En la Figura 4.2a ^[10] se muestra una captura de la pantalla inicial de Matlab. Como se puede observar, existen 5 zonas claramente definidas. En la parte superior izquierda se encuentra el árbol de navegación dentro de tu sistema operativo que te permite ver el contenido de tus carpetas. En la parte inferior izquierda se muestran los detalles del fichero seleccionado en la parte superior. En la parte derecha existen dos zonas, la superior que nos indica las variables que tenemos en este momento en memoria y en la parte inferior un historial de acciones por si queremos recuperar alguna instrucción. Finalmente, en la parte central del programa se encuentra la ventana de comandos. En esta ventana es donde se escribirán los comandos introducidos por nosotros.

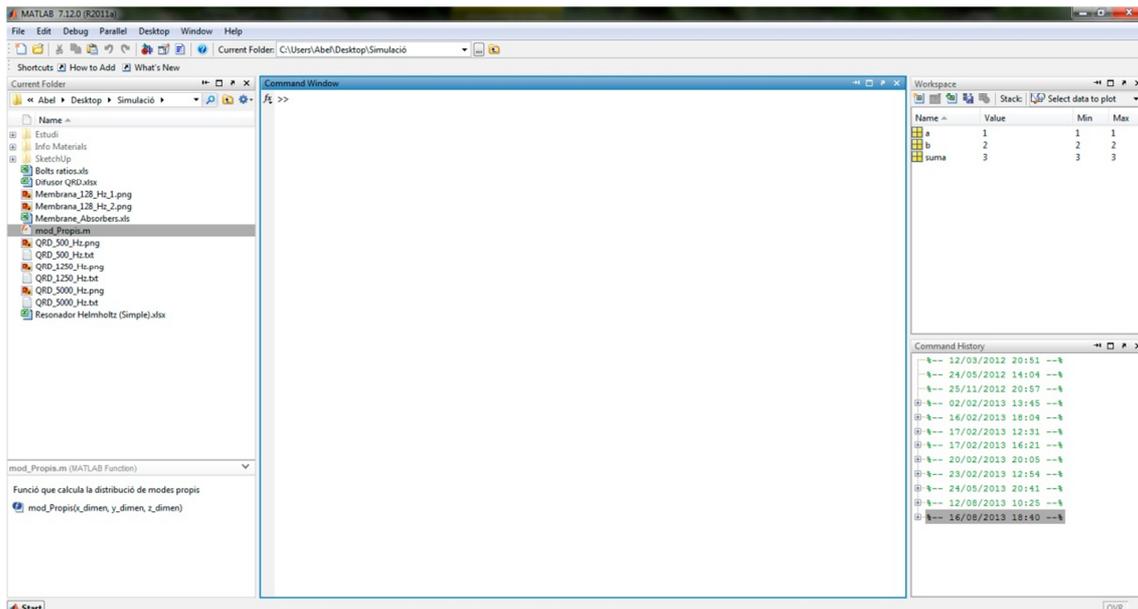


Figura 4.2a – Pantalla inicial de Matlab.

4.3 CATT-Acoustic

CATT Acoustic fue creado por CATT (Computer Aided Theater Technique) en 1988. Actualmente solo existe la versión 9.0 de 32-bit para Windows pero también es compatible para Windows de 64-bit. Es un software que permite realizar simulaciones acústicas sobre un diseño de una sala pudiendo estimar el comportamiento acústico de la sala antes de construirla. Para la creación del recinto o sala se puede utilizar el mismo editor de texto de CATT o incluso realizar un importado de un archivo CAD. (Figura 4.3a) [10]

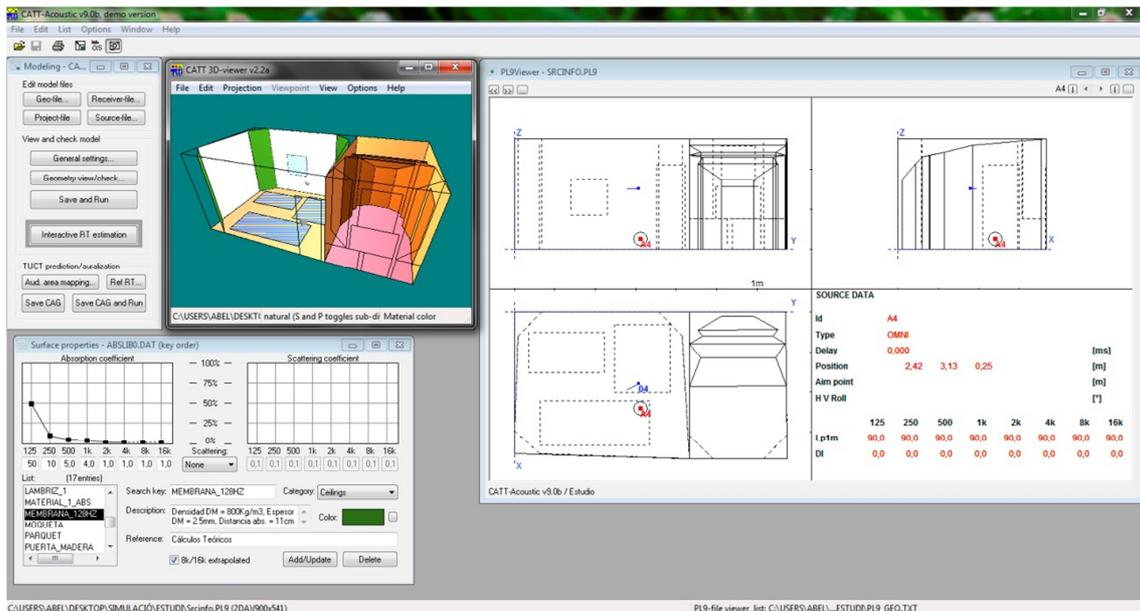


Figura 4.3a – Pantalla de CATT-Acoustic con una simulación cargada.

En la Figura 4.3a [10] se muestra un ejemplo de una simulación realizada con el programa. En la parte derecha tienes una ventana que te permite ver toda la información de la sala, como por ejemplo: información de la fuente, diferentes vistas geométricas, información de los planos, etc. Existe otro módulo que es el CATT 3D-viewer (ventana central) que permite ver en 3D la sala creada. En la parte inferior izquierda de la imagen se encuentra una ventana que te permite editar las propiedades del material. En esta ventana se introducen los coeficientes de absorción y scattering de los distintos materiales que se utilizarán en la futura sala. El menú que se encuentra en la parte izquierda de la pantalla es el menú principal en el que puedes configurar todos los parámetros relativos a la simulación, como por ejemplo: activar/desactivar fuentes, activar/desactivar receptores, acceder al fichero de la geometría de la sala y editarlo, realizar la simulación para obtener el t_R , etc.

Para no redundar la información, cuando se esté diseñando la sala, se explicará cómo definir las fuentes, los receptores, los planos, realizar simulaciones, etc.

5 Cálculos teóricos previos

Después de una introducción teórica de los conceptos y herramientas que se utilizarán en este proyecto, en este apartado se presentan los cálculos previos necesarios para poder introducir los datos obtenidos en CATT Acoustic y así realizar una simulación con el diseño propuesto (sección 6). Como documentación inicial se dispone de fotografías del estado actual del estudio de grabación (Figura 4.5a) ^[10] y también de un plano con medidas del recinto. (Figura 4.5b) ^[10]



Figura 4.5a – Fotografías del estado actual del estudio de grabación.

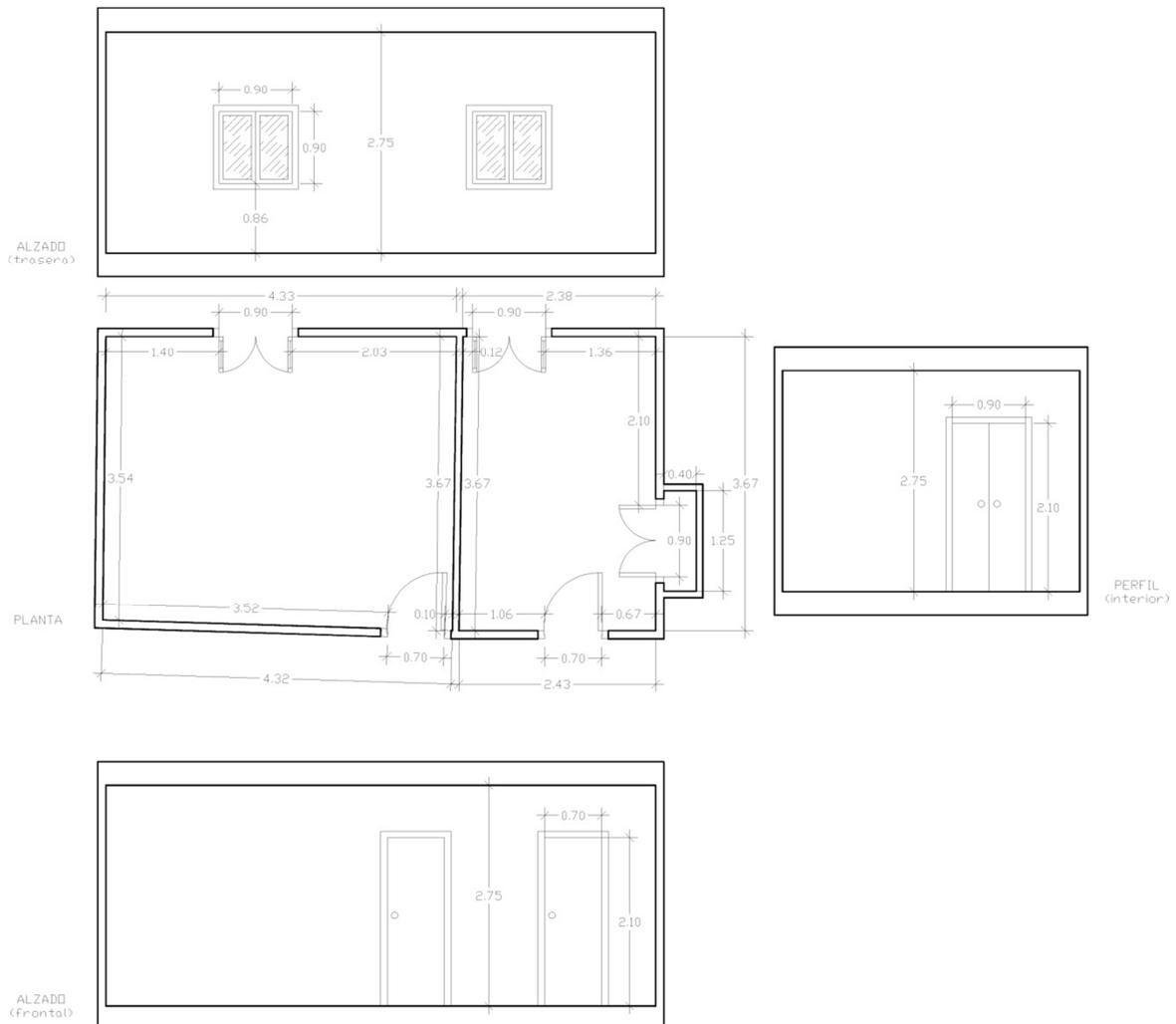


Figura 4.5b – Plano con las medidas de las dos salas.

5.1 Tiempos de reverberación

Por medio de las ecuaciones de Sabine (Ecuación 3.2.2), Eyring (Ecuación 3.2.3) y Millington (Ecuación 3.2.4) podremos tener una primera idea sobre cuales son los tiempos de reverberación de las salas (Tabla 5.1a) ^[10]. En el Anexo 2 se encuentra toda la información y cálculos realizados para la obtención de estos t_R .

Método	t_R RR	t_R CR
Sabine	3,25 s	2,52 s
Eyring	2,71 s	2,02 s
Millington	3,19 s	2,48 s

Tabla 5.1a – Tiempos de reverberación de las salas a 1000 Hz.

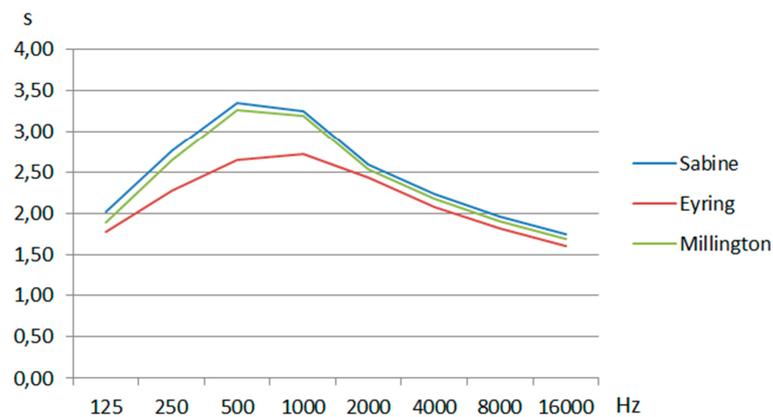


Figura 5.1a – Gráfica comparativa de los tres métodos de cálculo para el t_R en la sala de grabación (RR).

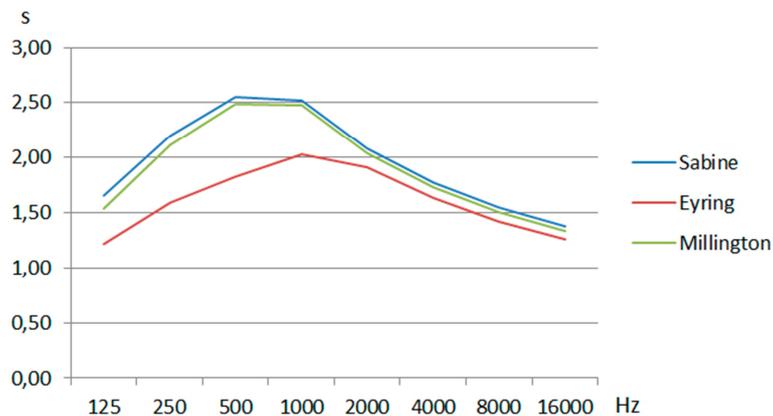


Figura 5.1b – Gráfica comparativa de los tres métodos de cálculo para el t_R en la sala de control (CR).

Viendo las gráficas comparativas de los resultados obtenidos con las distintas ecuaciones (Figuras 5.1a y 5.1b) ^[10] se puede apreciar un exceso de tiempo de reverberación a frecuencias medias (500 y 1000 Hz) con respecto a las otras frecuencias. Estos cálculos realizados se utilizarán también para contrastar con los datos obtenidos de la simulación de CATT Acoustic.

Una vez obtenida una primera aproximación del t_R teórico de las salas utilizando las expresiones matemáticas, se va a diseñar y simular el comportamiento de los recintos por medio de un software basado en el método de trazado de rayos (CATT Acoustic). El objetivo consiste en obtener resultados de los tiempos de reverberación de los distintos recintos y compararlos con los obtenidos anteriormente (Tabla 5.1b) ^[10]. En el Anexo 3 se detalla la definición de los elementos para poder realizar la simulación.

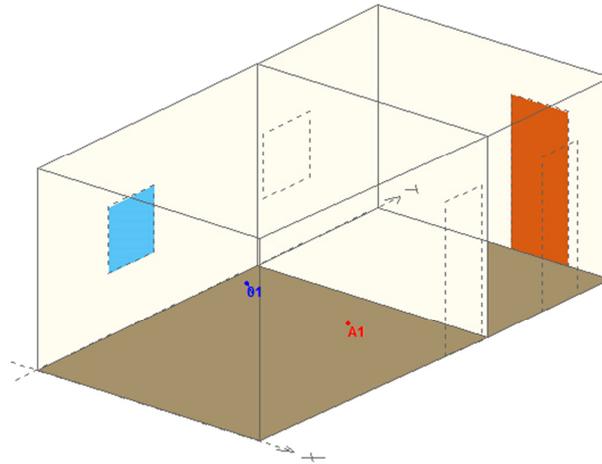


Figura 5.1c – Modelado 3D realizado con CATT Acoustic de los recintos.

Método	t_R RR	t_R CR
Sabine Teórico	3,25 s	2,52 s
Sabine CATT_1	2,97 s	2,35 s
Sabine CATT_2	3,17 s	3,16 s
Eyring Teórico	2,71 s	2,02 s
Eyring CATT_1	2,93 s	2,32 s
Eyring CATT_2	3,17 s	3,13 s
Millington Teórico	3,19 s	2,48 s

Tabla 5.1b – Tabla comparativa con los resultados obtenidos por CATT Acoustic.

En las Figuras 5.1d y 5.1e ^[10] se muestra una gráfica comparativa de todos los tiempos de reverberación calculados de manera teórica y los calculados mediante CATT Acoustic. Los cálculos correspondientes a CATT_1 están realizados con la opción de “Interactive RT Estimation”, en cambio, los correspondientes a CATT_2 están realizados con el plugin TUCT de CATT Acoustic ya que ofrecen una simulación mucho más precisa.

Como se puede observar en la tabla 5.1b ^[10], los cálculos previos del t_R son aproximadamente iguales a los valores obtenidos mediante la simulación con CATT Acoustic. El tiempo de reverberación obtenido en todas las frecuencias es elevado y especialmente en la banda de 500 y 1000 Hz. A parte de la reducción del t_R en todas las frecuencias mediante un acondicionamiento acústico, se deberá buscar materiales que actúen en esta banda problemática consiguiendo un t_R más uniforme.

El objetivo final es obtener un tiempo de reverberación aproximado a los valores de referencia propuestos por los autores Davis y Fierstein citados en el punto 3.2 (t_R alrededor de 0.4 s).

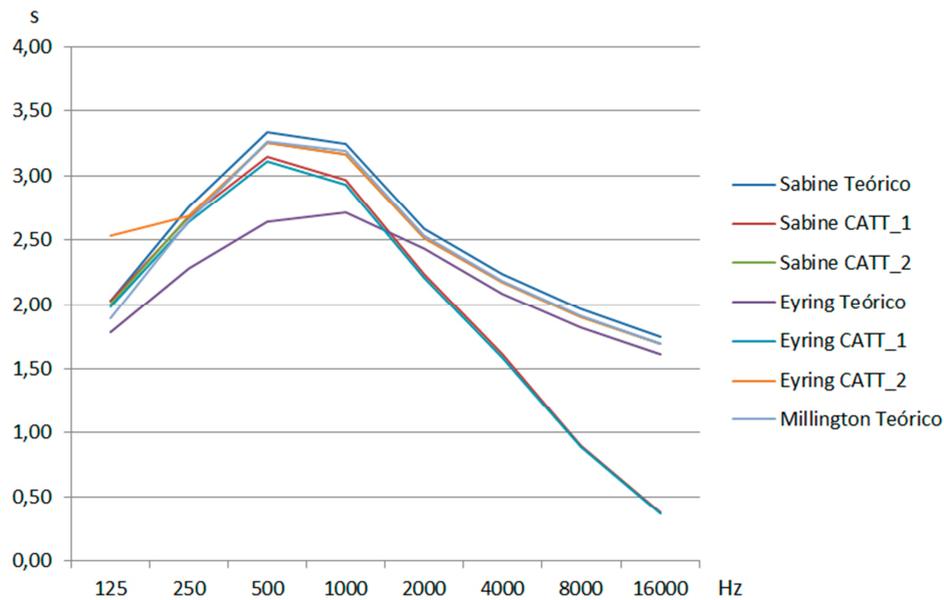


Figura 5.1d – Gráfica comparativa de los métodos de cálculo para del t_r en la sala de grabación (RR).



Figura 5.1e – Gráfica comparativa de los métodos de cálculo para del t_r en la sala de control (CR).

5.2 Modos propios de una sala

Una vez realizados los cálculos del tiempo de reverberación y antes de especificar el diseño geométrico de las salas, se estudiarán las proporciones de los recintos (utilizando el diagrama de Bolt) y la distribución de modos propios (se utilizará una pequeña función realizada con Matlab).

5.2.1 Frecuencia límite

Rescatando la Figura mostrada en el apartado 3.1 (Figura 5.2.1a) ^[10], en este punto se calculará la F1 y F2 (ecuaciones 3.1.3 y 3.1.4) que define la zona donde la distribución de

modos propios es significativa (zona B). Después de obtener los datos de manera teórica, se obtendrán los datos de CATT Acoustic y se compararán.

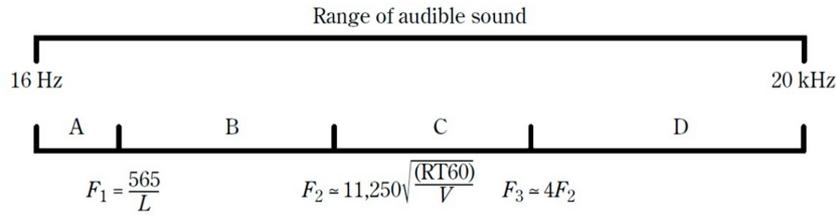


Figura 5.2.1a – Distribución de las zonas dentro del rango audible.

- Sala de grabación:

$$F_{1RR} = \frac{c}{2L} = \frac{343}{2 \cdot 4.33} = 40 \text{ Hz}$$

$$F_{2RR_{SABINE}} \cong 1849 \sqrt{\frac{t_R}{V}} = 1849 \sqrt{\frac{2.395}{43.02}} = 436 \text{ Hz}$$

$$F_{2RR_{EYRING}} \cong 1849 \sqrt{\frac{t_R}{V}} = 1849 \sqrt{\frac{2.03}{43.02}} = 402 \text{ Hz}$$

$$F_{2RR_{MILLINGTON}} \cong 1849 \sqrt{\frac{t_R}{V}} = 1849 \sqrt{\frac{2.27}{43.02}} = 425 \text{ Hz}$$

- Sala de control:

$$F_{1CR} = \frac{c}{2L} = \frac{343}{2 \cdot 3.67} = 47 \text{ Hz}$$

$$F_{2CR_{SABINE}} \cong 1849 \sqrt{\frac{t_R}{V}} = 1849 \sqrt{\frac{1.925}{24.58}} = 517 \text{ Hz}$$

$$F_{2CR_{EYRING}} \cong 1849 \sqrt{\frac{t_R}{V}} = 1849 \sqrt{\frac{1.405}{24.58}} = 442 \text{ Hz}$$

$$F_{2CR_{MILLINGTON}} \cong 1849 \sqrt{\frac{t_R}{V}} = 1849 \sqrt{\frac{1.825}{24.58}} = 504 \text{ Hz}$$

NOTA: t_R = la media entre el $t_{R, 125}$ y el $t_{R, 250}$ para que el resultado se pueda comparar con los resultados de CATT Acoustic.

Después de obtener las diferentes frecuencias que acotan la zona a tener en cuenta en los modos propios, en la Tabla 5.2.1a ^[10] se muestran una tabla con todos los datos obtenidos de manera teórica y mediante los dos métodos de cálculo de CATT Acoustic.

Método	RR	CR
Sabine Teórico	436 Hz	517 Hz
Sabine CATT_1	433 Hz	514 Hz
Sabine CATT_2	433 Hz	507 Hz
Eyring Teórico	402 Hz	442 Hz
Eyring CATT_1	428 Hz	508 Hz
Eyring CATT_2	474 Hz	547 Hz
Millington	425 Hz	504 Hz
PROMEDIO	433 Hz	506 Hz

Tabla 5.2.1a – Tabla comparativa de los distintos métodos.

Los datos obtenidos entre los diferentes métodos de cálculo se puede apreciar que son del mismo orden, no obstante, calculando el promedio para tener una frecuencia de referencia, podemos observar que las frecuencias son relativamente altas si las comparamos con los valores enunciados por los diferentes autores (frecuencia en torno a 250 – 300 Hz). Esta divergencia se debe a que tenemos un tiempo de reverberación alto para un recinto con un volumen muy pequeño.

5.2.2 Fórmula de Rayleigh

Después de establecer los valores límite aproximados de las frecuencias que delimitan el rango sobre el que tenemos que hacer el estudio de los modos propios, en este apartado se van a calcular los modos propios de la sala. Según el libro de M. Recuero ^[5] para realizar un estudio correcto de los modos, hay que empezar por el modo axial (1, 0, 0) hasta el modo oblicuo (5, 5, 5). Como el cálculo de modos propios es un proceso repetitivo utilizando la fórmula de Rayleigh (ecuación 3.1.1.1) se ha utilizado el Matlab para crear una función matemática a la que se le pasa como parámetro las dimensiones (largo, ancho y alto) de la sala. Esta función es válida para recintos paralelepípedos o cuasi paralelepípedos (que entre paredes paralelas no difieran más de 5°) ya que la fórmula de Rayleigh solamente es válida para este tipo de recintos. En el Anexo 4 se encuentran los cálculos realizados y la función de Matlab. Tras la ejecución de la función `mod_Propis(3.605, 4.325, 2.75)` en Matlab para obtener los modos correspondientes a las salas, obtenemos los siguientes resultados:

- Sala de grabación:

X	Y	Z	Frecuencia (Hz)	Distancia al siguiente nodo (Hz)
0	1	0	40	8
1	0	0	48	14
1	1	0	62	14
0	0	1	62	12
0	1	1	74	12
1	0	1	78	5
0	2	0	79	9
1	1	1	88	9
2	0	0	95	6
0	2	1	101	6
2	1	0	103	8
1	2	1	112	8

Tabla 5.2.2a – Tabla con los modos propios que se deben tratar.

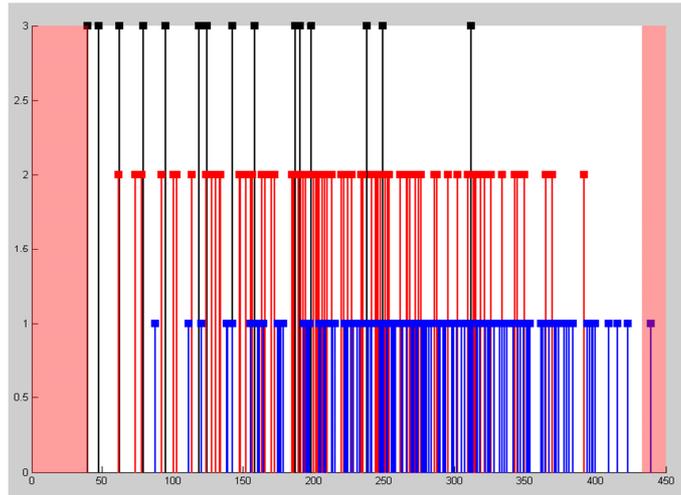


Figura 5.2.2a – Gráfica de todos los modos propios. Modos Axiales (negro). Modos Tangenciales (rojo). Modos Oblicuos (azul). La zona sombreada en rojo está fuera del rango de F_1 (40Hz) y F_2 (433 Hz).

- Sala de control:

X	Y	Z	Frecuencia (Hz)	Distancia al siguiente nodo (Hz)
1	0	0	47	16
0	0	1	62	16
0	1	0	68	9
1	0	1	78	9
1	1	0	83	10
0	1	1	93	10
2	0	0	93	10
1	1	1	104	10
2	0	1	112	9
2	1	0	116	9
0	0	2	125	9
2	1	1	132	7
1	2	1	158	8

Tabla 5.2.2b – Tabla con los modos propios que se deben tratar.

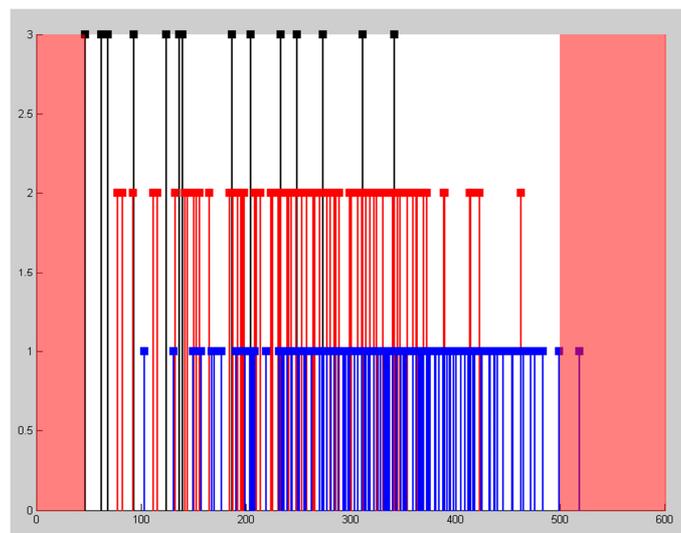


Figura 5.2.2b – Gráfica de todos los modos propios. Modos Axiales (negro). Modos Tangenciales (rojo). Modos Oblicuos (azul). La zona sombreada en rojo está fuera del rango de F_1 (47Hz) y F_2 (506 Hz).

Si se comparan las tablas (Tablas 5.2.2a y 5.2.2b)^[10] con los gráficos (Figuras 5.2.2a y 5.2.2b)^[10] se puede observar que en las tablas no se contemplan todos los modos presentes en las salas. En el algoritmo implementado en Matlab se ha utilizado el criterio de Bonello (considerar aquellos modos que tengan una separación de más del 5% de la f_0 respecto a los modos adyacentes), si se utilizara el criterio de Gilford (la separación debe ser de 20 Hz) no se consideraría ningún modo propio en ambas salas.

Interpretando los datos de las tablas se puede extraer que existe una gran concentración de modos propios a bajas frecuencias. Esto significa que existe una gran coloración a esas frecuencias que deberemos tratar con alguna trampa de graves (poner resonadores de membrana en las esquinas) y con algún resonador de Helmholtz. A parte de introducir estos elementos en las salas, también se variará la geometría para intentar que las paredes difieran como mínimo 5° y minimizar el efecto de coloración.

5.2.3 Diagrama de Bolt

Para poder utilizar el diagrama de Bolt, primero hay que normalizar todas las medidas a la altura (Figura 5.2.3a)^[10]. Como se puede ver en la Figura 5.2.3b^[10] la sala de grabación se encuentra dentro del ratio que propone Bolt, incluso se encuentra cerca de ratios propuestos por Empeller y Banner. En cambio, la sala de control se encuentra fuera de la “huella” de Bolt. Es cierto que Bolt propone este gráfico como regla general, pero si las proporciones no son las correctas, el autor comenta que se debe evitar relaciones enteras entre dimensiones (x:y:z), por ejemplo: 2:2:1, 4:2:1, etc.

$$\begin{aligned}
 Z_{RR} &= 2.75 \text{ m} \rightarrow \bar{Z}_{RR} = 1 \\
 X_{RR} &= 3.605 \text{ m} \rightarrow \bar{X}_{RR} = \frac{3.605}{2.75} \approx 1.3 \\
 Y_{RR} &= 4.325 \text{ m} \rightarrow \bar{Y}_{RR} = \frac{4.325}{2.75} \approx 1.6 \\
 \text{RATIO}_{RR} &= 1.3 : 1.6 : 1 \\
 Z_{CR} &= 2.75 \text{ m} \rightarrow \bar{Z}_{CR} = 1 \\
 X_{CR} &= 3.67 \text{ m} \rightarrow \bar{X}_{CR} = \frac{3.67}{2.75} \approx 1.3 \\
 Y_{CR} &= 2.505 \text{ m} \rightarrow \bar{Y}_{CR} = \frac{2.505}{2.75} \approx 0.9 \\
 \text{RATIO}_{CR} &= 1.3 : 0.9 : 1
 \end{aligned}$$

Figura 5.2.3a – Normalización de las dimensiones y sus ratios.

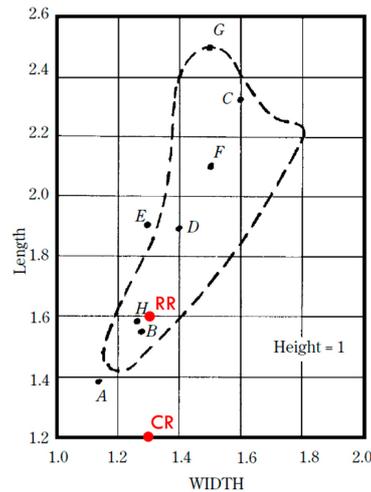


Figura 5.2.3b – Diagrama de Bolt. Sala de grabación (RR). Sala de control (CR).

5.3 Diseño de salas

Una vez realizado un primer análisis del comportamiento acústico de los dos recintos, se va a diseñar la geometría de las salas utilizando, en algunos casos, el trazado de rayos. No obstante, a parte de estos diseños geométricos, en el siguiente apartado se realizará el diseño de elementos acústicos para complementar las carencias que el diseño geométrico no puede solucionar.

5.3.1 Sala de grabación

En la sala de grabación no es necesario realizar grandes modificaciones geométricas, ya que como se ha visto en el apartado anterior, porque tiene un ratio de dimensiones dentro del rango definido por Bolt. Sin embargo, se realizará un pequeño cambio que puede ayudar a eliminar parte del paralelismo existente entre sus paredes. Teniendo en cuenta las pequeñas dimensiones del recinto de grabación, solamente se modificarán las dos paredes que están paralelas para que entre ellas exista un ángulo superior a 5° (Figura 5.3.1a) ^[10].

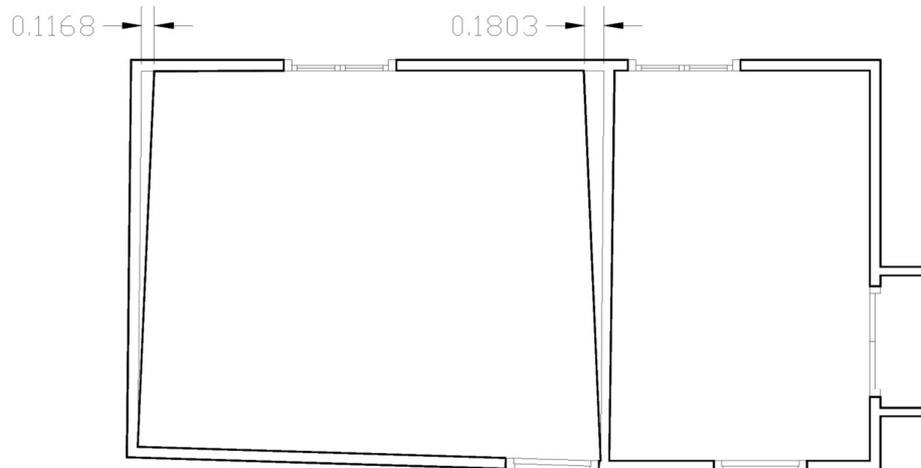


Figura 5.3.1a – Desplazamiento realizado sobre las paredes de la sala de grabación (en metros).

5.3.2 Sala de control

En la sala de control se requiere de una mayor modificación ya que como se puede apreciar en la figura anterior, es completamente paralelepípeda y además está fuera del rango de ratios de Bolt. Como se ha comentado en la introducción de este apartado, se utilizará el trazado de rayos para poder diseñar una correcta distribución de superficies reflectantes que permita dirigir las primeras reflexiones hacia el final del recinto.

El principio básico sobre el que se va a sostener el criterio de nuestro diseño es el mismo que D'Antonio y Konnert plantearon en su día, el diseño de una sala LEDE mejorada. Existe principalmente una limitación en esta sala y es el reducido tamaño que hay para poder realizar este tipo de configuración (se necesitan como mínimo 3.5 m de ancho para poder diseñar correctamente una sala LEDE mejorada), no obstante, se realizará una versión ad-hoc de LEDE Mejorada.

A parte de la idea de D'Antonio y Konnert, se utilizará parte de un diseño propuesto por W. Jensen a mediados de 1970 (véase la Figura 5.3.2a) ^[14] en que se pretende direccionar las primeras reflexiones producidas en los laterales introduciendo superficies reflectantes y absorbentes creando un “diente de sierra” en los laterales del estudio.

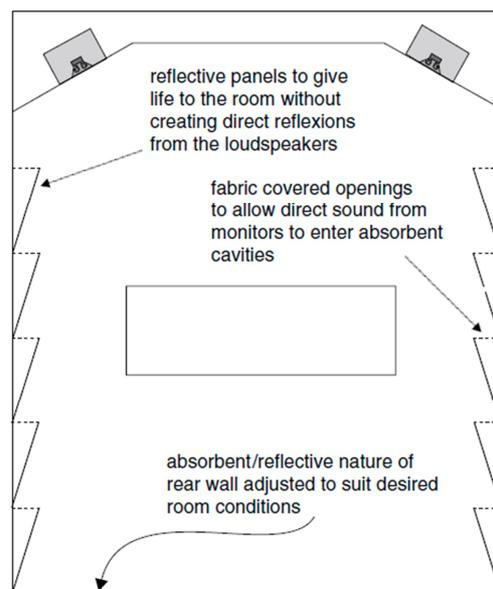


Figura 5.3.2a – Sala de control diseñada por Jensen.

Después de contemplar varias posibles distribuciones dentro de la sala, se ha optado por situar la mesa de sonido en la parte opuesta a la puerta. Esta decisión viene tomada por qué se necesita crear una estructura en frente de la mesa de sonido y si se encuentra la puerta, no es posible. Por otro lado, también se ha optado por suprimir la ventana existente por la misma razón, la estructura creada inutilizaría la ventana. Como sustituto de la ventana se debe crear un circuito de refrigeración de la sala (caso fuera de este proyecto). (Figura 5.3.2b) ^[10]

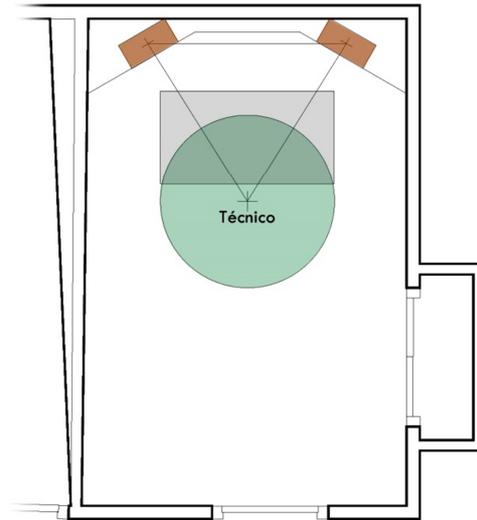


Figura 5.3.2b – Situación inicial de la sala de control.

Visualizando la figura anterior (Figura 5.3.2b) ^[10], existe una zona sombreada de color verde que corresponde al radio de escucha (0.6 m). En la parte frontal se encuentran situados los altavoces (sombreados con color marrón). La distancia entre ellos es de 1.48 m formando un triángulo equilátero con la posición del técnico de sonido. Debido a las limitaciones de tamaño de la sala, no se ha podido aplicar la norma EBU donde especificaba que la distancia entre altavoces ha de estar comprendida entre 2-4 m. Finalmente, la parte sombreada en gris corresponde a la mesa de sonido.

A partir de esta situación inicial, se procederá al diseño de la estructura frontal de la sala LEDE distribuyendo las superficies reflectantes en el plano horizontal (Figura 5.3.2c) ^[10]. Una vez diseñado la estructura en el plano horizontal, hay que diseñar en el plano vertical otras superficies formando una concha acústica (Figura 5.3.2d) ^[10]. Para más detalles del diseño, ver el Anexo 5.

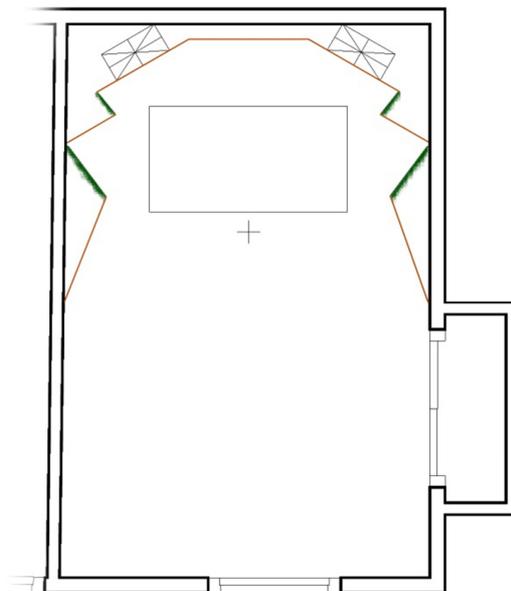


Figura 5.3.2c – Vista de la planta de la sala de control.

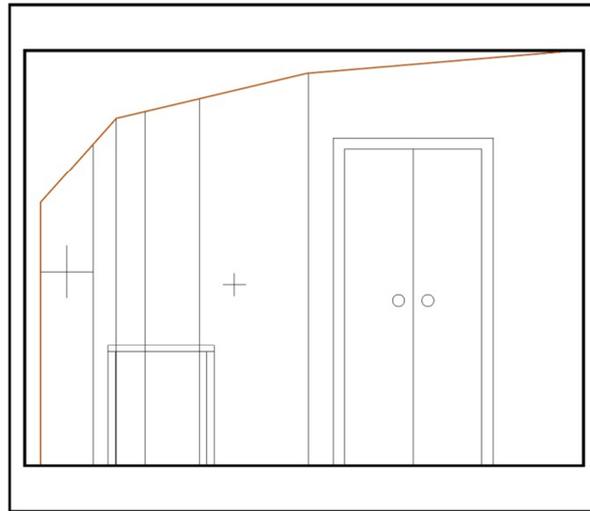


Figura 5.3.2d – Vista de perfil de la sala de control.

Como se puede ver en las figuras anteriores (Figuras 5.3.2c y 5.3.2d) ^[10], la zona coloreada verde oscura representa un material altamente absorbente para evitar que esa cara de la estructura provoque reflexiones hacia el interior. La zona coloreada de marrón corresponde a un material semi-reflectante como puede ser la madera.

En las Figuras 5.3.2e y 5.3.2f ^[10] se muestra un trazado de las primeras reflexiones para verificar que existe realmente una zona RFZ (zona libre de reflexiones) donde se encuentra el técnico de sonido. En el Anexo 5 hay un ejemplo de trazado de rayo y todos los focos utilizados.

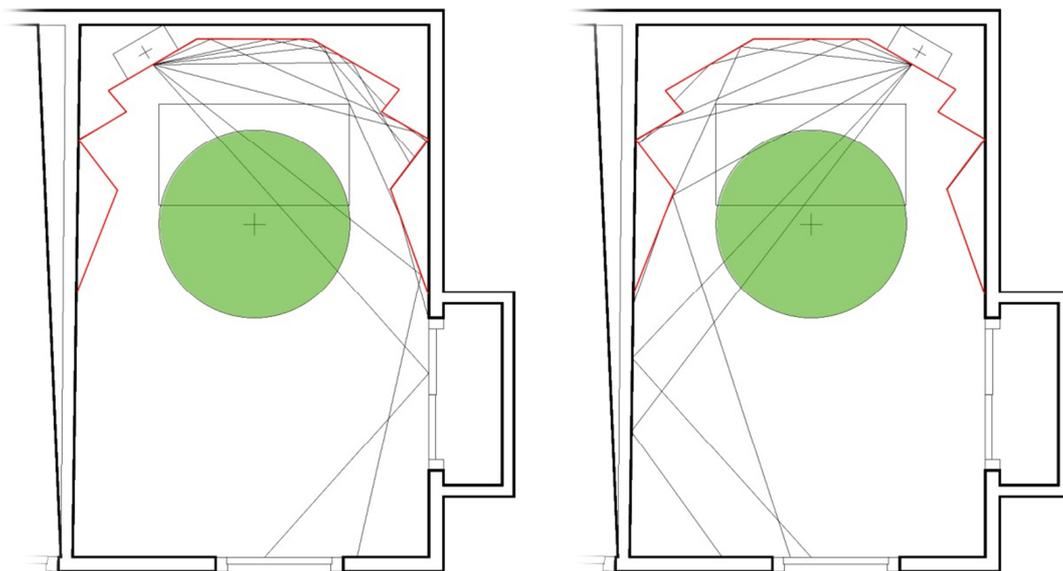


Figura 5.3.2e – Vista de la planta de la sala de control.

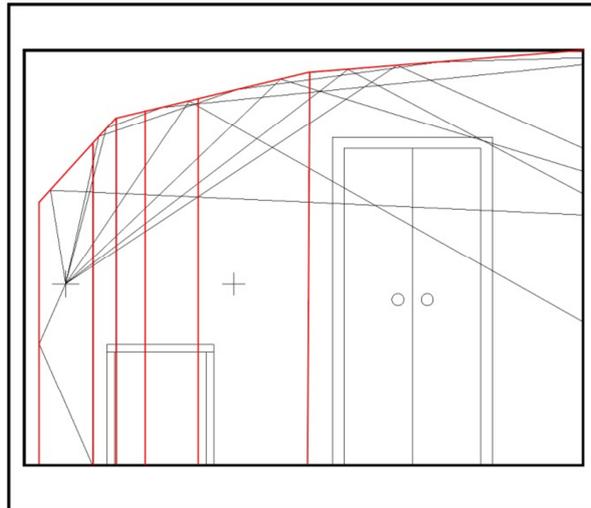


Figura 5.3.2f – Vista de perfil de la sala de control.

En la Figura 5.3.2g ^[10] se muestra definida la zona RFZ resultante de la mezcla de los rayos producidos por la fuente L y por la fuente R. Como se puede apreciar, la zona RFZ comprende todo el espacio definido anteriormente como el radio de escucha del técnico de sonido.

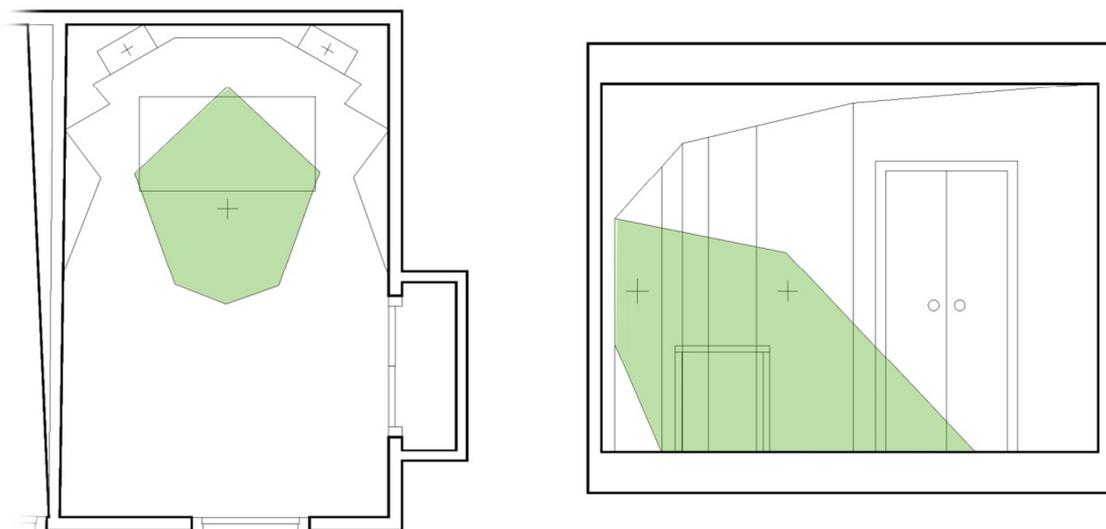


Figura 5.3.2g – Visualización de la zona RFZ de la sala de control.

Una vez definidos todos los puntos correspondientes a la estructura, se insertan en CATT Acoustic (ver Figuras 5.3.2h y 5.3.2i) ^[10] y se realiza la simulación para ver la respuesta que tienen las salas para empezar a definir materiales y diseñar las membranas, resonadores de Helmholtz, etc.

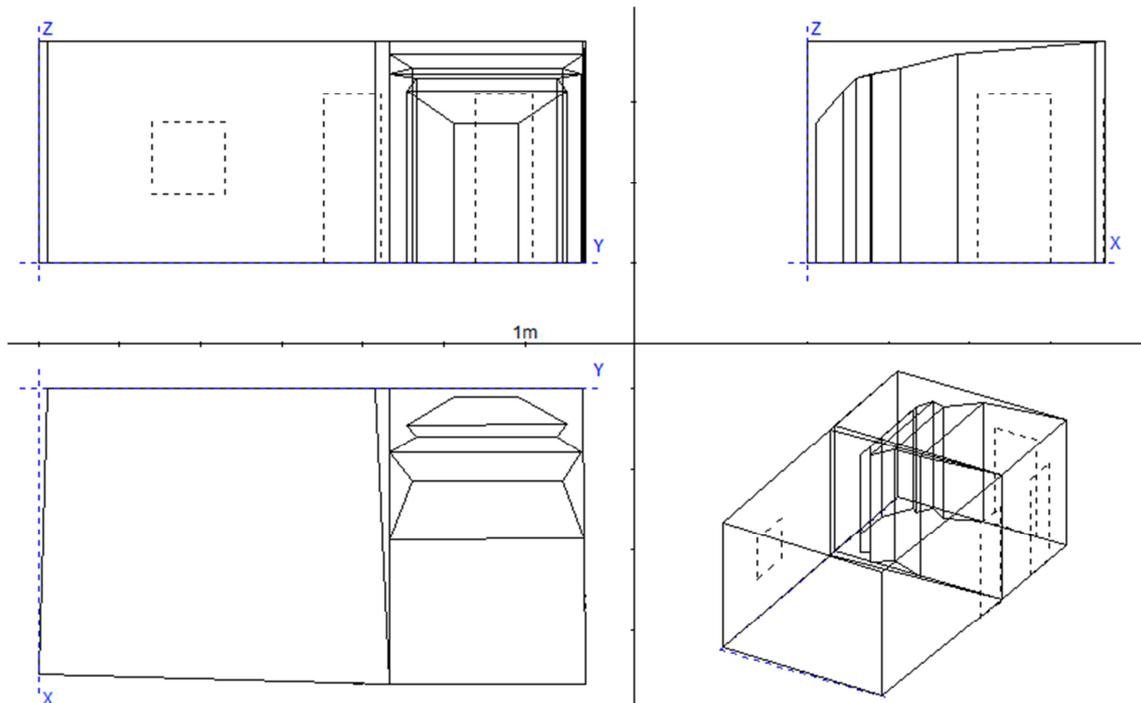


Figura 5.3.2h – Alzado, planta y perfil de las salas en CATT Acoustic.

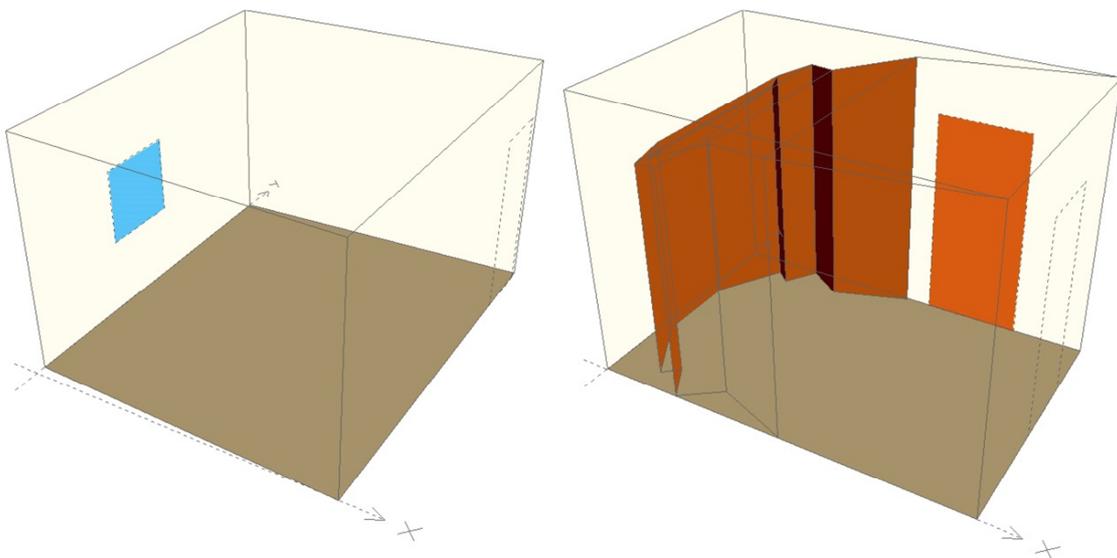


Figura 5.3.2i – Visualización de las salas en el modelado 3D de CATT Acoustic.

5.4 Acondicionamiento acústico

Después de insertar en CATT Acoustic el modelado geométrico calculado y diseñado en el punto anterior (apartado 5.3.2 y la Figura 5.3.2i ^[10]), se ha realizado una nueva simulación para obtener nuevos tiempos de reverberación (Tabla 5.4a) ^[10]. Lo que se pretende con esta nueva simulación es saber que variación del t_r se ha producido debido a estos cambios (se ha variado el volumen a causa de la estructura interna en la sala de control, se han eliminado algunas paredes paralelepípedas con la inserción de superficies semi-reflectantes, etc.).

Una vez obtenidos los nuevos t_R de los recintos, utilizando la fórmula de Sabine y la ayuda de una plantilla extraída del libro de M. Recuero (ver Tabla 5.4b) [5], se calcula la cantidad de material absorbente necesario calculando el área de absorción equivalente para obtener el t_R deseado.

El tiempo de reverberación en la sala de grabación la pequeña variación existente está causada por la disminución del volumen de la sala (a causa de la modificación de las paredes). Los t_R de esta sala están lejos de los deseados (alrededor de 0.5 s para una sala polivalente) por lo que habrá que tratarla con bastante material acústico. En cambio, para la sala de control tenemos una reducción considerable del tiempo de reverberación acercándose al resultado deseado (valor alrededor de 0.3 – 0.4 s). A parte de la disminución del volumen total de la sala, la reducción del t_R viene condicionada también porque se ha insertado material altamente absorbente (Confortpan 208 [15] de 40 mm de espesor) en alguna de las superficies para que el diseño tuviese un comportamiento lo más próximo al diseñado.

Método	t_R RR (inicial)	t_R RR	t_R CR (inicial)	t_R CR
Sabine Teórico	3,25 s	3,22 s	2,52 s	0,74 s
Sabine CATT_1	2,97 s	2,95 s	2,35 s	0,58 s
Sabine CATT_2	3,17 s	3,13 s	3,16 s	0,89 s
Eyring Teórico	2,71 s	2,69 s	2,02 s	0,35 s
Eyring CATT_1	2,93 s	2,91 s	2,32 s	0,56 s
Eyring CATT_2	3,17 s	3,15 s	3,13 s	0,9 s
Millington Teórico	3,19 s	3,16 s	2,48 s	0,38 s

Tabla 5.4a – Tabla comparativa con los nuevos resultados obtenidos por CATT Acoustic.

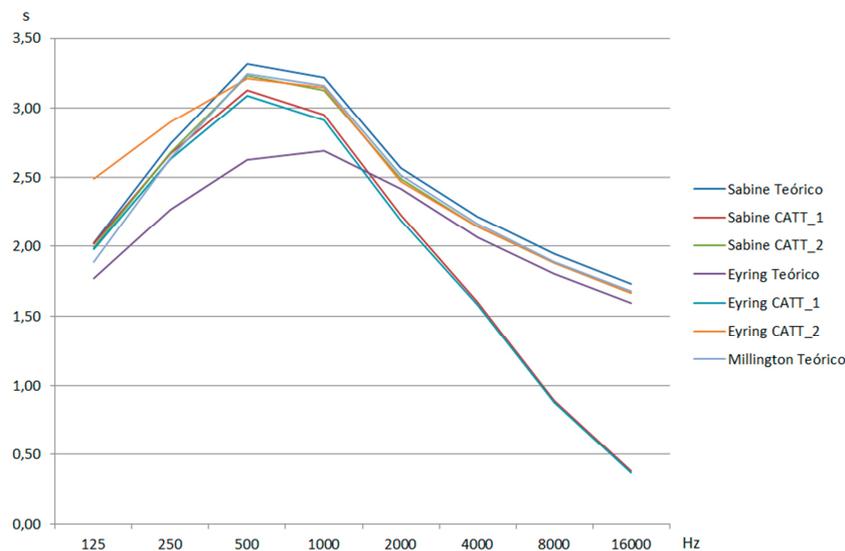


Figura 5.4a – Gráfica comparativa de los métodos de cálculo para del t_R en la sala de grabación (RR).



Figura 5.4b – Gráfica comparativa de los métodos de cálculo para del t_r en la sala de control (CR).

Descripción de las superficies y sus materiales	Área de las superficies (m ²)	Absorción sonora a la frecuencia de (Hz)											
		125		250		500		1.000		2.000		4.000	
		α	A	α	A	α	A	α	A	α	A	α	A
1. Material A													
2. Material B													
3. Material C													
4. Material D													
5. Material E													
6. Material F													
7. Material G													
Absorción sonora adicional A _a (m ²)													

Tabla 5.4b – Tabla con los valores de absorción sonora necesaria para obtener un t_r adecuado.

5.4.1 Materiales

Para saber cuánto necesitamos absorber para tener el tiempo de reverberación deseado, se ha calculado el área de absorción equivalente en función de la frecuencia para las dos salas (Tabla 5.4.1a) ^[10]. Hay que tener en cuenta que para incrementar la absorción a bajas frecuencias se utilizarán resonadores y membranas (punto 5.4.2 y 5.4.3), sin embargo, para incrementar la absorción a altas frecuencias se utilizarán materiales acústicos tales como la moqueta, alfombras, lana de roca, etc. Para calcular el área de absorción equivalente se ha supuesto un tiempo de reverberación de 0.55 s en la sala de grabación y de 0.35 s en la sala de control.

	Área de absorción equivalente RR							
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz
A. teórica	12,262	12,262	12,262	12,262	12,262	12,262	12,262	12,262
A. real	3,389	2,516	2,088	2,155	2,708	3,151	3,587	4,038
A. necesaria	8,873	9,745	10,174	10,107	9,553	9,110	8,675	8,224
	Área de absorción equivalente CR							
A. teórica	9,257	9,257	9,257	9,257	9,257	9,257	9,257	9,257
A. real	3,951	3,560	3,724	3,640	3,767	4,101	4,438	4,696
A. necesaria	5,306	5,697	5,533	5,617	5,490	5,156	4,819	4,561

Tabla 5.4.1a – Tabla con los valores de absorción equivalente de las dos salas.

- Sala de grabación:

Antes de calcular la cantidad de absorbente necesario, se ha cambiado el material de las paredes, suelo y techo. Se ha intentado utilizar diferentes materiales en los diversos cerramientos para poder aprovechar las distintas características acústicas de los mismos (Tabla 5.4.1b) ^[10]. Con ello se ha calculado el incremento de las áreas de absorción equivalentes de todos los cerramientos y se ha restado a la que teníamos anteriormente.

Material	Coeficientes de absorción							
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz
Yeso de 30 mm con 50 mm de cámara de aire	0,32	0,12	0,07	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
Parqué de madera de 15 mm sobre listones	0,02	0,12	0,12	0,1	0,1	0,07	0,04	0,01
Moqueta gruesa sobre 20 mm de foam	0,08	0,27	0,39	0,45	0,48	0,53	0,57	0,58
Lambriz de contrachapado de 6 mm con 50 mm de lana de vidrio	0,57	0,43	0,35	0,12	0,08	0,08	0,08	0,08
Ladrillo visto sin barnizar, pintar ni enlucir	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05
Doble placa de yeso (2 x 16 mm)	0,28	0,12	0,1	0,17	0,13	0,12	0,11	0,1

Tabla 5.4.1b – Tabla con los valores de absorción de los distintos materiales utilizados.

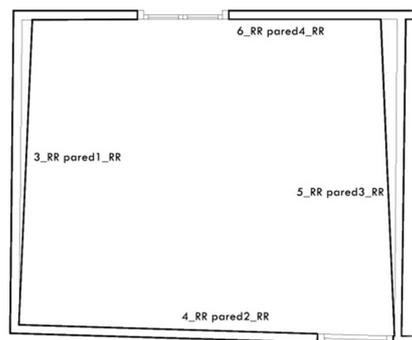


Figura 5.4.1a – Nombre de los cerramientos de la sala de grabación.

Viendo la imagen anterior (Figura 5.4.1a) ^[10] y la tabla de materiales (Tabla 5.4.1b) ^[10], se ha asignado de esta manera los materiales a los distintos cerramientos:

- 3_RR pared1_RR: Pared con doble placa de yeso.
- 4_RR pared2_RR: Pared de ladrillo visto sin barnizar, pintar ni enlucir.
- 5_RR pared3_RR: Pared de lambriz de contrachapado con lana de vidrio.
- 6_RR pared4_RR: Pared con doble placa de yeso.
- 1_RR suelo_RR: Suelo de parqué sobre listones.
- 2_RR techo_RR: Techo de placas de yeso con cámara de aire trasera.

Con esta nueva configuración, como se puede observar en la Figura 5.4.1b ^[10], ha bajado considerablemente el t_R respecto a las condiciones iniciales. A parte de estos cambios, también se necesita reducir el t_R para las frecuencias medias y altas. Para ello se ha utilizado

materiales como alfombras y Herakustik F25 que actúan sobre todo a las frecuencias que nos interesan. (Tabla 5.4.1c) [10]

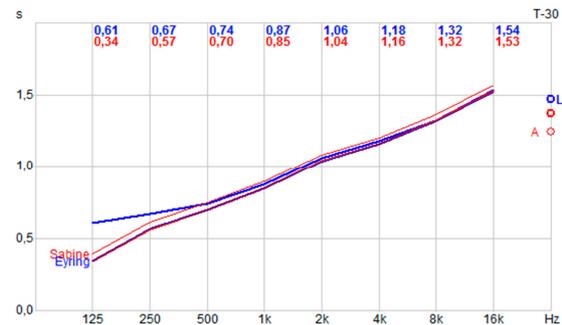


Figura 5.4.1b – Tiempo de reverberación calculado con CATT Acoustic.

Material	Coeficientes de absorción							
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz
Herakustik F25 mm adosado al techo	0,01	0,12	0,25	0,65	0,75	0,7	0,65	0,6
Alfombra gruesa de pelo enlazado con almohadilla de 1.4 mm	0,03	0,21	0,55	0,71	0,78	0,8	0,82	0,84

Tabla 5.4.1c – Tabla con los coeficientes de absorción de los materiales utilizados.

Con los nuevos t_R obtenemos nuevos valores de las áreas de absorción equivalente (Tabla 5.4.1d) [10] que comparamos con el esperado para saber cuánto material absorbente debemos añadir.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz
t_R	0,61 s	0,67 s	0,74 s	0,87 s	1,06 s	1,18 s	1,32 s	1,54 s
A. real	11,056	10,066	9,114	7,752	6,362	5,715	5,109	4,379
A. necesaria	12,262	12,262	12,262	12,262	12,262	12,262	12,262	12,262
Diferencia de áreas	1,206	2,196	3,148	4,510	5,900	6,547	7,153	7,883

Tabla 5.4.1d – Tabla con las áreas de absorción equivalentes.

Una vez calculado la diferencia entre áreas, se calcula con los materiales el área de absorción equivalente producida por los mismos. Para la asignación de superficies se ha tenido en cuenta, por ejemplo, si la superficie del material se puede variar fácilmente para cambiar los tiempos de reverberación de la sala. Para el material Herakustik F25, como tiene que ir emplazado en el techo de la sala, se asignado un área aproximadamente al 25% de superficie del techo, el resto, se han utilizado diferentes superficies de alfombra gruesa. Estas alfombras nos ayudarán a variar fácilmente la acústica del recinto pudiendo cambiar su superficie enrollándolas, plegándolas, etc.

Material	Superficie
Herakustik F25 mm adosado al techo	3,680 m ²
Alfombra gruesa de pelo enlazado con almohadilla de 1.4 mm	7,228 m ²

Tabla 5.4.1e – Tabla con las superficies de los distintos materiales.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz
Diferencia de áreas inicial	1,206	2,196	3,148	4,510	5,900	6,547	7,153	7,883
A. obtenida	0,254	1,959	4,895	7,524	8,398	8,358	8,319	8,280
Diferencia de áreas final	0,952	0,237	-1,747	-3,014	-2,498	-1,812	-1,166	-0,397

Tabla 5.4.1f – Tabla con los valores finales de área acústica.

Viendo la Tabla 5.4.1f [10] para las frecuencias de 125 y 250 Hz no se ha llegado al total de área de absorción equivalente necesaria. Para solucionar este problema se utilizarán membranas y/o resonadores que ayuden a reducir el t_R . Por otra parte, en las frecuencias de 1000 y 2000 Hz existe un exceso de absorción pero este problema se solucionará con un difusor QRD diseñado para que actúe sobre estas frecuencias incrementando el t_R . Para el resto de frecuencias el incremento del área acústica equivalente es el correcto.

- Sala de control:

Análogamente a la sala de grabación, se procede a calcular la cantidad de material absorbente en este recinto. Primero, se ha decidido cambiar el suelo de baldosa pulida que es muy poco absorbente por un suelo de moqueta. Con ello conseguimos reducir considerablemente el tiempo de reverberación a frecuencias medias y altas (Figura 5.4.1c) [10].

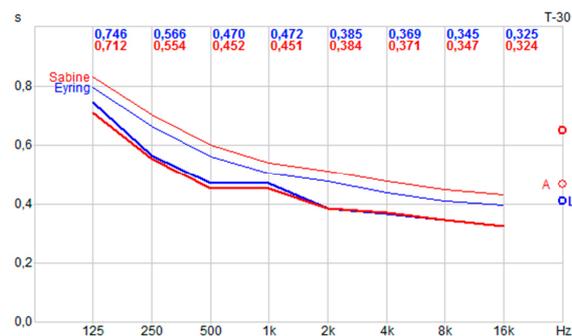


Figura 5.4.1c – Tiempo de reverberación calculado con CATT Acoustic.

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz
Moqueta gruesa sobre 20 mm de foam	0,08	0,27	0,39	0,45	0,48	0,53	0,57	0,58

Tabla 5.4.1g – Tabla con los coeficientes de absorción del material utilizado.

Como se puede observar en la Figura 5.4.1c [10], solamente cambiando el material de la superficie correspondiente al suelo se tiene un t_R a frecuencias altas dentro del propuesto (aprox. 0.35 s). A partir de este nuevo resultado, volvemos a calcular las áreas de absorción equivalente del recinto para obtener un nuevo resultado de área de absorción equivalente necesaria para llegar al tiempo de reverberación propuesto.

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz
t_R	0,746 s	0,566 s	0,47 s	0,472 s	0,385 s	0,369 s	0,345 s	0,325 s
A. real	4,343	5,724	6,894	6,864	8,416	8,780	9,391	9,969
A. necesaria	9,257	9,257	9,257	9,257	9,257	9,257	9,257	9,257
Diferencia de áreas	4,914	3,533	2,364	2,393	0,842	0,477	-0,134	-0,712

Tabla 5.4.1h – Tabla con las áreas de absorción equivalentes.

Después de obtener unas nuevas áreas de absorción equivalente podemos observar en la figura anterior que para frecuencias altas es correcto, en cambio para frecuencias medias y bajas todavía se necesita absorbente para llegar al t_R propuesto. Antes de aplicar material absorbente para tratar las frecuencias medias, debido a que el recinto es muy pequeño y solamente se puede aplicar material absorbente en la parte trasera, se ha decidido cambiar el material de alguna de las superficies superiores que forman la estructura creada. El material

elegido para ello ya se ha utilizado en el tratamiento de un cerramiento de la sala de grabación, lambriz de contrachapado de 6 mm con 50 mm de lana de vidrio.

Material	Superficie	Área de absorción equivalente							
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz
Lambriz de 6 mm con 50 mm de lana de vidrio	5,953 m ²	3,393	2,56	2,084	0,714	0,476	0,476	0,476	0,476
Madera maciza de 20 mm barnizada	5,953 m ²	0,893	0,655	0,595	0,417	0,417	0,417	0,417	0,417

Tabla 5.4.1i – Tabla con las áreas de absorción equivalentes.

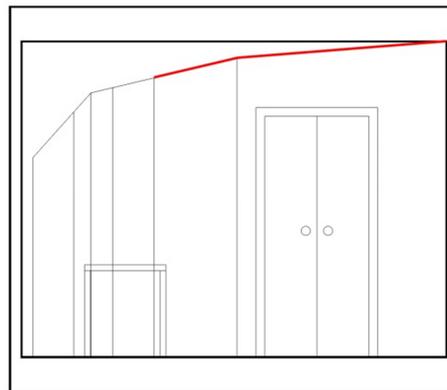


Figura 5.4.1d – Superficies modificadas.

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz
t_R	0,746 s	0,566 s	0,47 s	0,472 s	0,385 s	0,369 s	0,345 s	0,325 s
A. real	4,343	5,724	6,894	6,864	8,416	8,780	9,391	9,969
A. necesaria	9,257	9,257	9,257	9,257	9,257	9,257	9,257	9,257
Diferencia de áreas inicial	4,914	3,533	2,364	2,393	0,842	0,477	-0,134	-0,712
A. quitando la madera	5,807	4,188	2,959	2,809	1,258	0,893	0,283	-0,295
A. con lambriz	2,414	1,628	0,875	2,095	0,782	0,417	-0,194	-0,772
Diferencia de áreas final	2,500	1,905	1,488	0,298	0,060	0,060	0,060	0,060

Tabla 5.4.1j – Tabla con las áreas de absorción equivalentes.

Después de reemplazar el material de algunas superficies, obtenemos una buena área de absorción equivalente total en frecuencias medias y altas. Para frecuencias bajas también se ha podido aumentar el área de absorción equivalente pero todavía falta reducir el t_R hasta el valor deseado. En el siguiente punto (sección 5.4.2) abordaremos el caso para estas frecuencias bajas.

5.4.2 Membranas

Una vez realizado el acondicionamiento acústico para frecuencias medias y altas, utilizaremos membranas para minimizar el t_R a frecuencias bajas (125 y 250 Hz). Como se comentó en la introducción teórica a las membranas, existen membranas que pueden tener un ‘backing’ de aire o utilizar un ‘backing’ con material absorbente para incrementar la absorción a la frecuencia de diseño. A. Carrión ^[6] comenta que cuando se diseña una membrana a una frecuencia, en la realidad la frecuencia de diseño no corresponde a la calculada teóricamente, por eso realizaremos un cálculo aproximado alrededor de nuestras frecuencias de interés. Para

realizar el diseño de la membrana a la frecuencia deseada se ha utilizado la ecuación 3.4.2.1.1 y una hoja de cálculo de Excel creada por J. Sheaffer [16].

- Diseño de una membrana para 250 Hz:

Para el diseño de esta membrana se utilizará una madera MDF de 2.5 mm de grosor y de densidad 700 kg/m³, es decir, 1.75 kg/m² de densidad másica. El tipo de absorbente a colocar en la parte trasera de la membrana será lana de vidrio de 10 mm de espesor separada 12 mm de la membrana.

El cálculo para una membrana con el ‘backing’ de aire es:

$$250 = \frac{600}{\sqrt{1.75 \cdot d}} \rightarrow d = 3.291 \cong 3.3 \text{ cm}$$

Introduciendo estos parámetros en la hoja de cálculo obtenemos la siguiente gráfica (ver Figura 5.4.2b) [16]:

Global Parameters	
Density of Air - ρ ₀	1,21 kgm ⁻³
Velocity of Sound - c ₀	343,5 ms ⁻¹
Char. Impedance Air - Z ₀	415,635 N·m/s

Cavity	
Total Cavity Depth	32,91 mm
Resonant Angular - ω ₀	1574,48 rads ⁻¹
Resonant Freq - f ₀	250,59 Hz
Damping Coefficient	82,66

Membrane	
Material	MDF
Material ID	7
Density	700 kgm ⁻³
Thickness	2,5 mm
Mass per Area - m	1,75 kgm ⁻²
Loss Factor - η	0,03
Panel Resistance	82,66
Resonant Angular Porou:	1309,09 rads ⁻¹
Resonant Freq Porous	208,35 Hz
Panel Resistance Porous	68,73

Figura 5.4.2a – Parámetros introducidos en la hoja Excel.

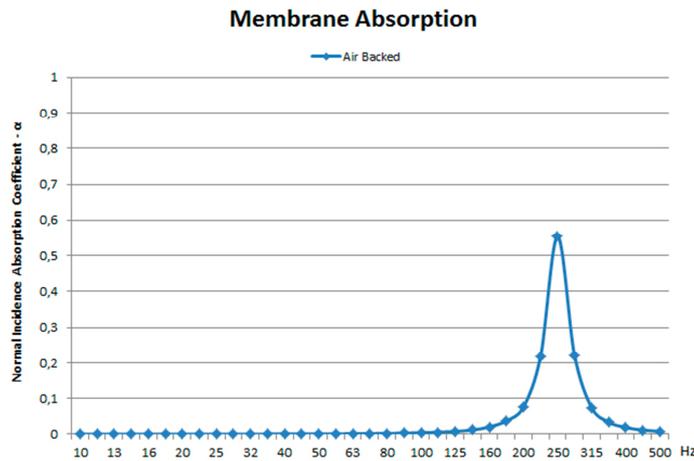


Figura 5.4.2b – Coeficiente de absorción de la membrana.

Viendo los resultados obtenidos en la hoja Excel, coinciden los resultados obtenidos. El motivo de utilizar esta hoja de Excel es que te permite introducir un material absorbente definiendo sus características calculando los coeficientes de absorción comparando los resultados con o sin material absorbente. Después de probar diferentes configuraciones y parámetros, la configuración final ha sido:

Global Parameters	
Density of Air - ρ_0	1,21 kgm ⁻³
Velocity of Sound - c_0	343,5 ms ⁻¹
Char. Impedance Air - Z_0	415,635 N/m/s

Cavity	
Total Cavity Depth	22 mm
Resonant Angular - ω_0	1925,70 rads ⁻¹
Resonant Freq - f_0	306,48 Hz
Damping Coefficient	101,10

Porous Layer	
Flow Resistivity - σ	2700 rayls/m
Depth of Absorber - d_2	10 mm
Depth of Airspace - d_1	12 mm
Velocity of Sound in Absorb	285,6 ms ⁻¹

Membrane	
Material	MDF
Material ID	7
Density	700 kgm ⁻³
Thickness	2,5 mm
Mass per Area - m	1,75 kgm ⁻²
Loss Factor - η	0,03
Panel Resistance	101,10
Resonant Angular Porou:	1601,11 rads ⁻¹
Resonant Freq Porous	254,82 Hz
Panel Resistance Porous	84,06

Figura 5.4.2c – Parámetros introducidos en la hoja Excel.

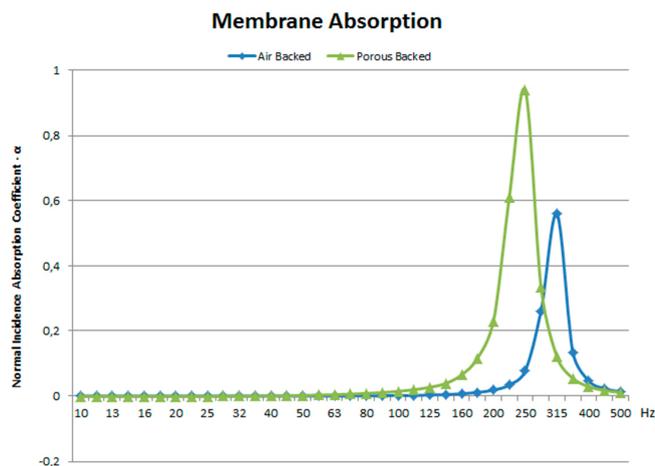


Figura 5.4.2d – Coeficiente de absorción de la membrana con y sin material absorbente.

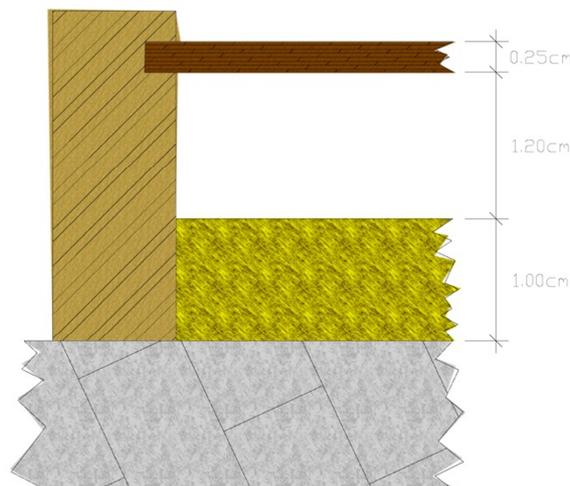


Figura 5.4.2e – Medidas de la sección de la membrana.

- Diseño de una membrana para 125 Hz:

Análogamente a la membrana de 250 Hz, para el diseño de ésta se utilizará una madera MDF de 2.5 mm de grosor y de densidad 700 kg/m³ (1.75 kg/m² de densidad másica). El tipo de absorbente a colocar en la parte trasera de la membrana será lana de vidrio de 20 mm de espesor separada 65 mm de la membrana.

El cálculo para una membrana con el 'backing' de aire es:

$$125 = \frac{600}{\sqrt{1.75 \cdot d}} \rightarrow d = 13.165 \cong 13.2 \text{ cm}$$

Introduciendo estos parámetros en la hoja de cálculo obtenemos la siguiente gráfica (ver Figura 5.4.2g) [16]:

Global Parameters	
Density of Air - ρ_0	1,21 kgm ⁻³
Velocity of Sound - c_0	343,5 ms ⁻¹
Char. Impedance Air - Z_0	415,635 N·m/s

Cavity	
Total Cavity Depth	131,65 mm
Resonant Angular - ω_0	787,21 rads ⁻¹
Resonant Freq - f_0	125,29 Hz
Damping Coefficient	41,33

Membrane	
Material	MDF
Material ID	7
Density	700 kgm ⁻³
Thickness	2,5 mm
Mass per Area - m	1,75 kgm ⁻²
Loss Factor - η	0,03
Panel Resistance	41,33
Resonant Angular Porou:	654,52 rads ⁻¹
Resonant Freq Porous	104,17 Hz
Panel Resistance Porous	34,36

Figura 5.4.2f – Parámetros introducidos en la hoja Excel.

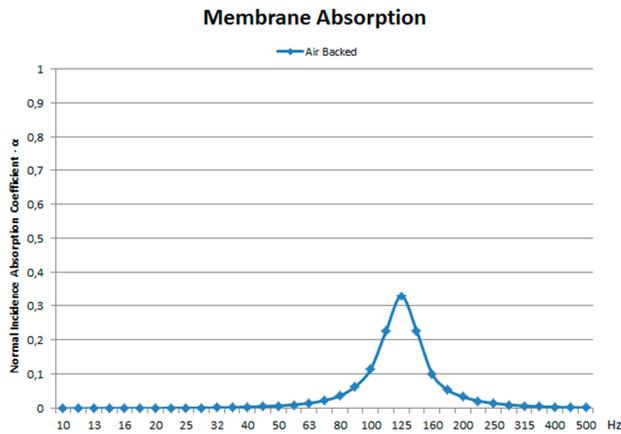


Figura 5.4.2g – Coeficiente de absorción de la membrana.

Una vez calculados los parámetros para un 'backing' de aire, se prueban diferentes configuraciones y parámetros en la hoja Excel, obteniendo la siguiente configuración final:

Global Parameters	
Density of Air - ρ_0	1,21 kgm ⁻³
Velocity of Sound - c_0	343,5 ms ⁻¹
Char. Impedance Air - Z_0	415,635 N·m/s

Cavity	
Total Cavity Depth	85 mm
Resonant Angular - ω_0	979,70 rads ⁻¹
Resonant Freq - f_0	155,92 Hz
Damping Coefficient	51,43

Porous Layer	
Flow Resistivity - σ	2700 rayls/m
Depth of Absorber - d_2	20 mm
Depth of Airspace - d_1	65 mm
Velocity of Sound in Absorb	285,6 ms ⁻¹

Membrane	
Material	MDF
Material ID	7
Density	700 kgm ⁻³
Thickness	2,5 mm
Mass per Area - m	1,75 kgm ⁻²
Loss Factor - η	0,03
Panel Resistance	51,43
Resonant Angular Porou:	814,56 rads ⁻¹
Resonant Freq Porous	129,64 Hz
Panel Resistance Porous	42,76

Figura 5.4.2h – Parámetros introducidos en la hoja Excel.

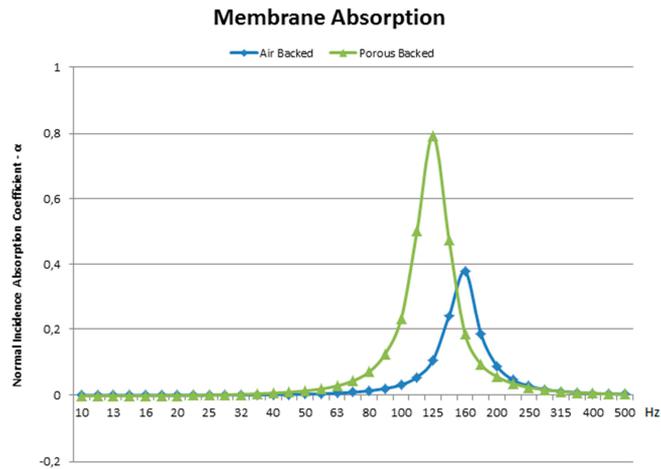


Figura 5.4.2i – Coeficiente de absorción de la membrana con y sin material absorbente.



Figura 5.4.2j – Medidas de la sección de la membrana.

Después de diseñar ambas membranas y teniendo en cuenta que la distancia entre puntos de apoyo debe ser mayor a 80 cm, hay que situarlas en las salas de grabación y control (Figura 5.4.2k) ^[10]. En la sala de grabación no existe problema de espacio, pero en la sala de control hay esta restricción. Por este motivo, se ha decidido colocar solamente dos membranas de 125 Hz y en la parte inferior se situarán múltiples resonadores de Helmholtz de cavidad simple (que posteriormente calcularemos en el apartado 5.4.3). Para más información sobre las medidas y posiciones de las membranas ver el Anexo 7.

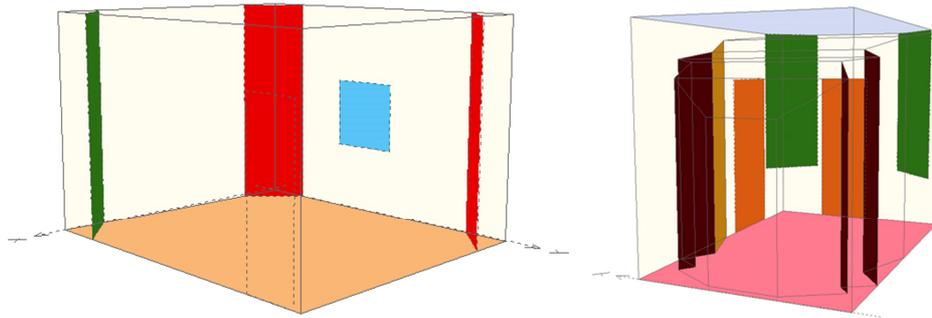


Figura 5.4.2k – Vista 3D generada por CATT Acoustic.

5.4.3 Resonadores

Para poder reducir el tiempo de reverberación a 250 Hz, se diseñará un resonador de cavidad simple de Helmholtz sintonizado a esa frecuencia, este resonador se utilizará únicamente en la sala de control. Se crearán múltiples resonadores de cavidad simple para emular a uno de cavidad múltiple, pudiendo así variar la acústica introduciendo o quitando resonadores simples.

Para el cálculo del resonador se han utilizado las fórmulas 3.4.2.2.1 y 3.4.2.2 y una hoja de cálculo de Excel para poder variar los parámetros fácilmente y conseguir el resonador deseado.

$$L'(cm) = L + 1.6r = 2 + 1.6 \cdot 4 = 8.4 \text{ cm}$$

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{S}{L'V}} = 5480 \sqrt{\frac{\pi \cdot 4^2}{8.4 \cdot 13 \cdot 13 \cdot 17}} = 250.09 \cong 250 \text{ Hz}$$

Por otra parte, para calcular el área de absorción del resonador se han utilizado las ecuaciones 5.4.3.1 [17] y 5.4.3.2 [17]. En la Tabla 5.4.3a [10] se muestra los parámetros introducidos en la hoja Excel.

$$Q_A = \frac{\pi}{V} \cdot \left(\frac{c}{\omega_0}\right)^3 = \frac{\pi}{0.002873} \cdot \left(\frac{343}{2 \cdot \pi \cdot 250}\right)^3 = 11.37 \tag{5.4.3.1}$$

NOTA: El significado físico de Q_A es similar al del factor Q, está relacionado con las frecuencias en las que el coeficiente de absorción ha disminuido a la mitad de su valor máximo. [17]

$$A(\omega) = \frac{\frac{\lambda_0^2}{2\pi}}{1 + Q_A^2 \cdot \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}\right)^2} \tag{5.4.3.2}$$

$$A(\omega_0) = A_{m\acute{a}x} = \frac{\frac{\lambda_0^2}{2\pi}}{1 + Q_A^2 \cdot \left(\frac{\omega_0 - \omega_0}{\omega_0}\right)^2} = \frac{\lambda_0^2}{2\pi} = \frac{343^2}{2\pi} = 0.299 \cong 0.3$$

Radio	0,04 m	c	0,17 m
L (cuello)	0,02 m	Volumen	0,002873 m ³
L efectiva	0,084 m	Superficie	0,00502655 m ²
a	0,13 m	c	343 m/s
b	0,13 m	f ₀	250,09 Hz

Tabla 5.4.3a – Parámetros introducidos en la hoja Excel.

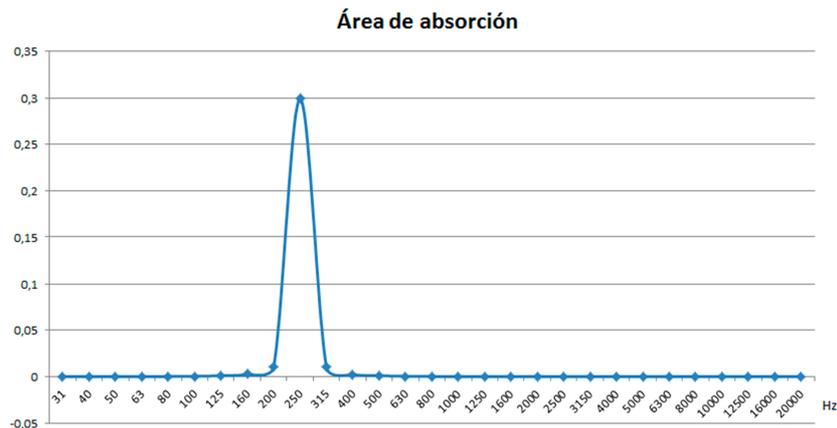


Figura 5.4.3a – Área de absorción del resonador.

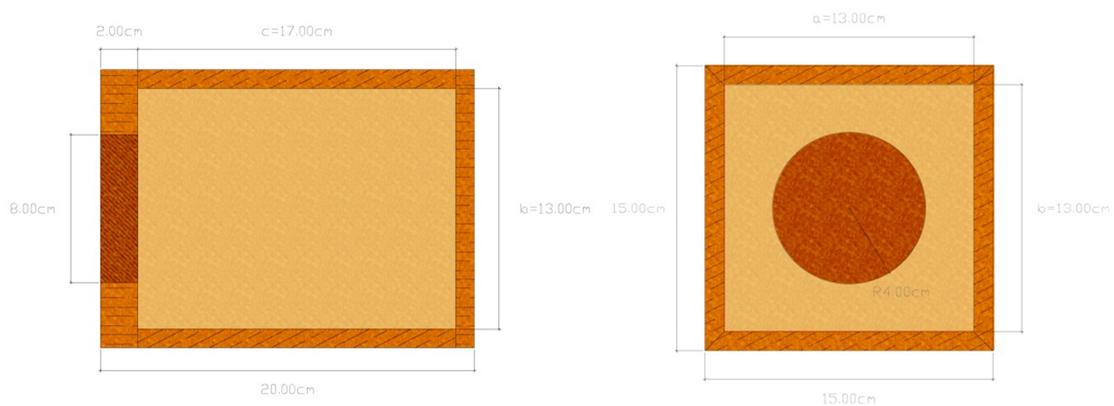


Figura 5.4.3b – Dimensiones del resonador.

5.4.4 Difusores

En la sala de grabación se necesita un difusor QRD unidimensional a una frecuencia de diseño de 1250 Hz aprox. Para poder incrementar el tiempo de reverberación a esa frecuencia. También, en la sala de control se necesita el mismo tipo de difusor pero diseñado para una frecuencia alta, alrededor de 5000 Hz. Para el diseño se utilizará la fórmula enunciada en la introducción teórica de los difusores QRD unidimensionales (ecuación 3.4.3.1.1). Antes de realizar el diseño, hay que tener algunas consideraciones:

- A mayor frecuencia de diseño, menor es el ancho de las ranuras.
- El espesor del separador (T) debe ser lo menor posible.
- Al aumentar “p” (número primo), aumenta el grado de difusión.
- La relación entre profundidad y anchura de las ranuras tiene un límite, puesto que las ranuras estrechas y muy profundas producen un exceso de absorción acústica.

Para calcular las profundidades de los dos difusores se ha generado una hoja de cálculo Excel. En el Anexo 8 se especifican las medidas de los difusores.

- Difusor con $f_0=1250$ Hz:

$$f_{max} = \frac{p \cdot f_0}{2 \cdot m_{max}} = \frac{17 \cdot 1250}{2 \cdot 4} = 2656.25 \cong 2656 \text{ Hz}$$

$$W = \frac{c}{2 \cdot f_{max}} - T = \frac{343}{2 \cdot 2656.25} - 2 \cdot 10^{-3} = 6.256 \cong 6.26 \text{ cm}$$

$$n^\circ \text{ de l\u00f3bulos} = (2 \cdot m_{max}) + 1 = (2 \cdot 4) + 1 = 9 \text{ l\u00f3bulos (entre } 90^\circ \text{ y } -90^\circ)$$

Para la obtenci\u00f3n de la secuencia del difusor se ha utilizado la hoja de c\u00e1lculo de Excel introduciendo los par\u00e1metros calculados anteriormente.

c	343 m/s
m _{max}	4
f ₀	1250 Hz
p	17
T	2 mm

Tabla 5.4.4a – Par\u00e1metros introducidos en la hoja Excel.

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8
S _n	0	1	4	9	16	8	2	15	13
d _n (cm)	0,00	0,81	3,23	7,26	12,91	6,46	1,61	12,11	10,49

n	9	10	11	12	13	14	15	16
S _n	13	15	2	8	16	9	4	1
d _n (cm)	10,49	12,11	1,61	6,46	12,91	7,26	3,23	0,81

Tabla 5.4.4b – Secuencia del difusor obtenida.



Figura 5.4.4a – Dise\u00f1o del difusor con f₀ = 1250 Hz.

- Difusor con f₀=5000 Hz:

$$f_{max} = \frac{p \cdot f_0}{2 \cdot m_{max}} = \frac{17 \cdot 5000}{2 \cdot 4} = 10625 \text{ Hz}$$

$$W = \frac{c}{2 \cdot f_{max}} - T = \frac{343}{2 \cdot 10625} - 2 \cdot 10^{-3} = 1.414 \cong 1.4 \text{ cm}$$

$$n^\circ \text{ de l\u00f3bulos} = (2 \cdot m_{max}) + 1 = (2 \cdot 4) + 1 = 9 \text{ l\u00f3bulos (entre } 90^\circ \text{ y } -90^\circ)$$

Para la obtenci\u00f3n de la secuencia del difusor se ha utilizado la hoja de c\u00e1lculo de Excel introduciendo los par\u00e1metros calculados anteriormente.

c	343 m/s
m_{max}	4
f_0	5000 Hz
p	17
T	2 mm

Tabla 5.4.4c – Parámetros introducidos en la hoja Excel.

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8
S_n	0	1	4	9	16	8	2	15	13
d_n (cm)	0,00	0,20	0,81	1,82	3,23	1,61	0,40	3,03	2,62

n	9	10	11	12	13	14	15	16
S_n	13	15	2	8	16	9	4	1
d_n (cm)	2,62	3,03	0,40	1,61	3,23	1,82	0,81	0,20

Tabla 5.4.4d – Secuencia del difusor obtenida.



Figura 5.4.4b – Diseño del difusor con $f_0 = 5000$ Hz.

5.5 Sistema de monitores

El último elemento que queda por definir en el diseño es la distribución de los monitores de escucha. Partiendo de la respuesta en frecuencia de un monitor típico que pueda existir en el mercado (Figura 5.5a) [14] podemos observar que, a parte de la directividad a altas frecuencias, puede existir un problema a bajas frecuencias debido a la respuesta omnidireccional del altavoz.

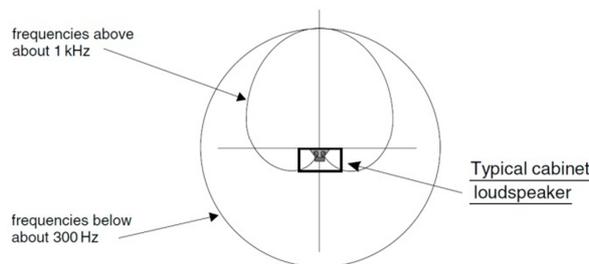


Figura 5.5a – Diagrama de directividad de un altavoz.

En las figura 5.5b y 5.5c [14] se puede ver que si situamos un monitor cerca de una pared, se crea un frente de onda que puede crear picos resonantes o cancelaciones profundas de la señal inicial (normalmente por debajo de los 400 Hz) variando la respuesta en frecuencia

recibida en el lugar donde se situará el técnico. En la figura 5.5d [14] se muestra un ejemplo de una cámara reverberante donde en la que se sitúa un monitor empotrado en una pared (a) y un monitor situado sobre un montante a una distancia “x” de la pared (b) pudiendo observar cómo se generan las primeras reflexiones.

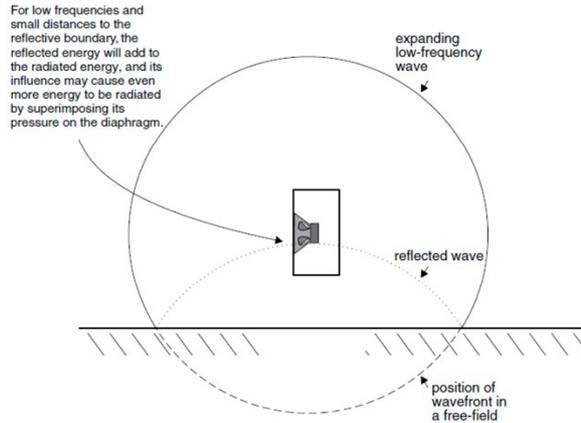


Figura 5.5b – Suma de onda en bajas frecuencias.

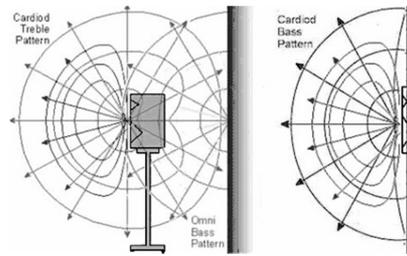


Figura 5.5c – Ejemplo de monitor sobre pedestal y monitor empotrado.

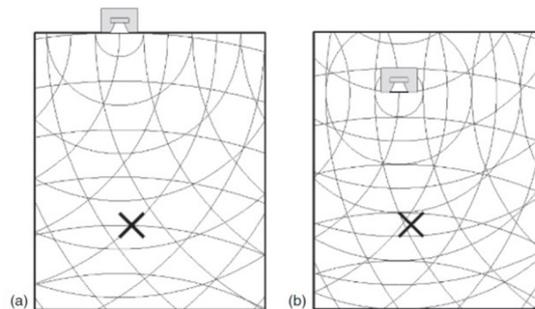


Figura 5.5d – Distribución de bajas frecuencias.

(a) Monitor empotrado. (b) Monitor sobre un soporte.

Esta problemática genera un aumento en el SBIR (Speaker Boundary Interference Response) que es la interferencia por reflejos cercanos (Figura 5.5d) [14]. Una posible solución práctica es el uso de monitores nearfield (o de campo cercano), acercándolos al operador y alejarlos lo más posible de las paredes, de esta manera el sonido directo es mucho mayor al reflejado.

Utilizando los monitores nearfield hay que tener cuidado porque si no se colocan correctamente la mesa de sonido puede ejercer como superficie reflectante y producir el mismo efecto que se ha comentado anteriormente (Figura 5.5e) [14].

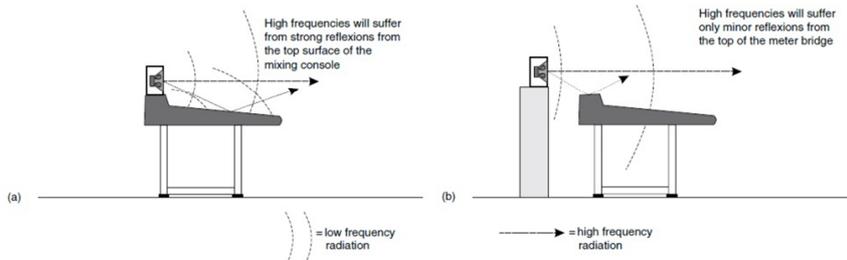


Figura 5.5e – Ondas reflejadas de un altavoz sobre la mesa de sonido.

Por estos motivos y las pequeñas dimensiones de la sala de control, finalmente se ha decidido en utilizar los monitores empotrados o ‘Soffit Mount’. Con ello eliminamos el problema de reflexiones de las paredes cercanas y de la mesa de sonido.

Después de definir la situación de los monitores, existe otra característica de los monitores que deberemos tener en cuenta. En el libro de Philip Newel [14], el autor comenta que a la hora de comprar o fabricar un monitor es mejor que disponga de dos altavoces para frecuencias graves en lugar de uno (Figura 5.5f) [14].

Gracias a la incorporación de un segundo woofer, la respuesta en frecuencia final que tendremos en el lugar de escucha será más plana, eliminando posibles cancelaciones generadas ambos woofer.

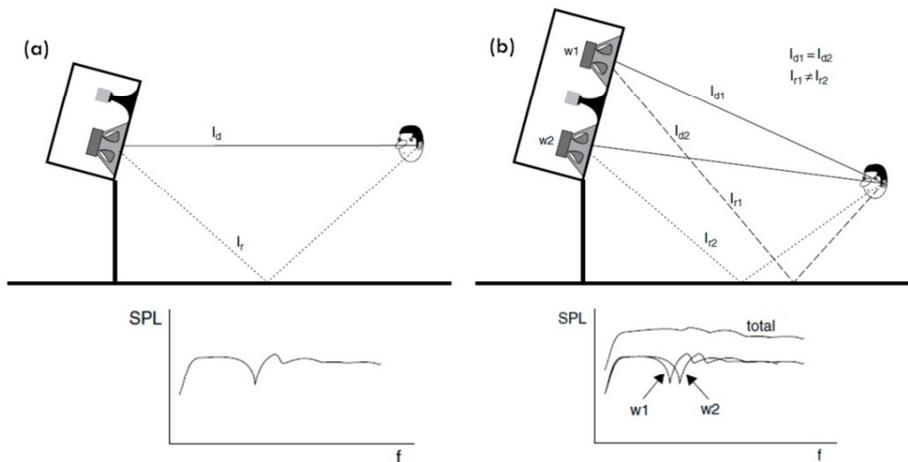


Figura 5.5f – Respuesta en frecuencia de diferentes monitores.

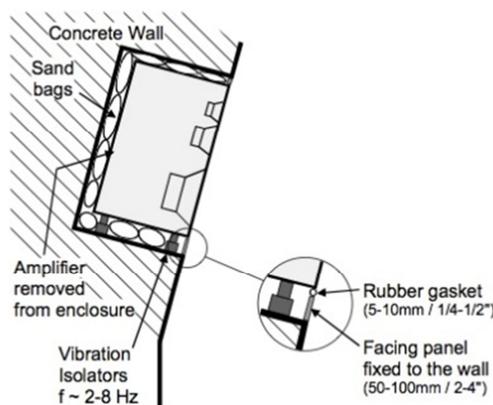


Figura 5.5g – Ejemplo de montaje de un monitor empotrado.

6 Simulación de la solución propuesta

Después de definir tiempos de reverberación de las salas de control y grabación, cálculo de superficie de material absorbente, diseño de resonadores, membranas y difusores, en este apartado se mostrarán los resultados obtenidos con la simulación en CATT Acoustic después de introducir todos los elementos definidos anteriormente.

Aunque en CATT Acoustic no es necesario, para medir el tiempo de reverberación en ambas salas se utilizarán dos posiciones diferentes de fuentes alternando con tres posiciones diferentes de receptores. Una vez obtenido cinco valores tiempos de reverberación, se realizará una media aritmética para tener un t_R final. Véase el Anexo 9 para más detalle.

- Sala de grabación:

En la siguiente tabla (Tabla 6a) ^[10] se muestra el valor del tiempo de reverberación de todas las posiciones de fuente y receptor.

	Tiempo de reverberación RR (segundos)							
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz
tR S_A4 R_01	0,465	0,533	0,540	0,499	0,530	0,544	0,558	0,573
tR S_A4 R_03	0,466	0,535	0,535	0,506	0,530	0,544	0,565	0,577
tR S_A4 R_06	0,466	0,534	0,538	0,499	0,528	0,538	0,566	0,578
tR S_A3 R_05	0,466	0,534	0,540	0,498	0,529	0,540	0,567	0,581
tR S_A3 R_07	0,467	0,533	0,539	0,500	0,523	0,537	0,561	0,579
Promedio	0,47	0,53	0,54	0,50	0,53	0,54	0,56	0,58

Tabla 6a – Tabla con el resultado de los t_R obtenidos en diferentes posiciones de la sala de grabación.

Según la especificación del tiempo de reverberación en el documento de la EBU ^[13], se especifica que el t_R debe de estar dentro de unos valores superiores e inferiores límite. En la figura 6a ^[10] se muestra el promedio del tiempo de reverberación obtenido anteriormente aplicándole la máscara propuesta por la EBU.



Figura 6a – Gráfica del t_R promedio con los valores propuestos por la EBU.

Después de insertar el valor promedio del t_R entre los límites de tolerancia, podemos observar que existen dos picos a 125 Hz y a 1000 Hz aproximadamente, no obstante, se puede considerar unos valores válidos ya que estos resultados pueden diferir cuando se lleve a la práctica este proyecto. Por otra parte, el pico de 1000 Hz se ha solucionado mediante un

difusor diseñado anteriormente a una $f_0=1250$ Hz con una $f_{inferior}= 938$ Hz y una $f_{superior}= 4562$ Hz (este difusor no estaba incorporado en la simulación de CATT Acoustic).

Otro de los objetivos a perseguir en este proyecto era que el nivel de presión sonora en las diferentes frecuencias fuera lo más plano posible. También se ha medido en las mismas posiciones que el t_R , el SPL correspondiente. (Tabla 6b) ^[10]

	Nivel de presión sonora (dB)							
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz
tR S_A4 R_01	94,3	94,7	94,4	93,8	93,9	94,0	94,2	94,4
tR S_A4 R_03	94,5	95,1	94,7	94,0	94,1	94,3	94,4	94,5
tR S_A4 R_06	94,6	95,1	94,6	94,0	94,1	94,2	94,4	94,6
tR S_A3 R_05	94,6	94,9	94,9	94,5	94,6	94,8	94,9	95,3
tR S_A3 R_07	94,8	94,8	95,0	94,5	94,5	94,8	94,9	95,1
Promedio	94,6	94,9	94,7	94,2	94,2	94,4	94,6	94,8

Tabla 6b – Tabla con el resultado del SPL obtenido en las diferentes posiciones de la sala de grabación.

La EBU, en el mismo documento, también propone una máscara que define un límite superior e inferior para el nivel de presión sonora en una sala.

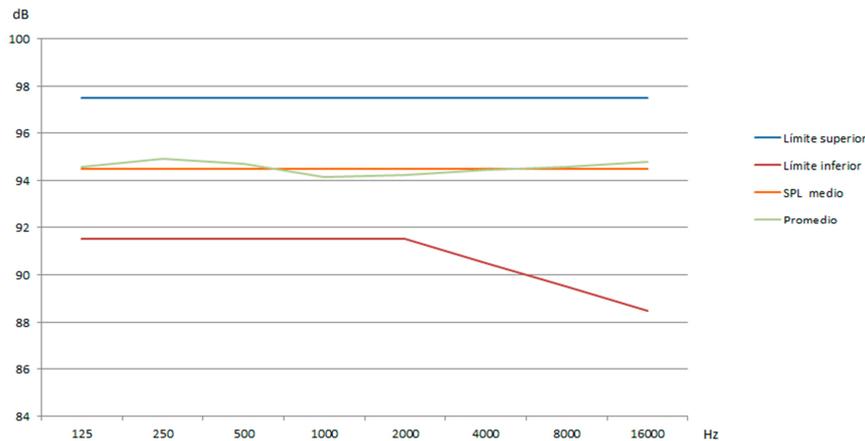


Figura 6b – Gráfica del SPL promedio con los valores propuestos por la EBU.

Como se puede observar en la figura anterior (Figura 6b) ^[10], los valores promedios de SPL están dentro del rango definido por la EBU y son bastante constantes, lo que nos indica que no existe un efecto de coloración en alguna frecuencia concreta.

- Sala de control:

Al igual que en la sala de grabación, en la sala de control se han realizado las medidas del tiempo de reverberación en distintas posiciones (Tabla 6c) ^[10].

	Tiempo de reverberación CR (segundos)							
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz
tR S_A5 R_08	0,427	0,382	0,380	0,404	0,395	0,364	0,344	0,332
tR S_A5 R_09	0,430	0,384	0,383	0,402	0,397	0,366	0,353	0,339
tR S_A5 R_11	0,433	0,387	0,385	0,401	0,403	0,371	0,345	0,341
tR S_A6 R_10	0,433	0,391	0,383	0,404	0,394	0,371	0,346	0,340
tR S_A6 R_11	0,430	0,386	0,382	0,400	0,399	0,370	0,354	0,338
Promedio	0,43	0,39	0,38	0,40	0,40	0,37	0,35	0,34

Tabla 6c – Tabla con el resultado del t_R obtenido en las diferentes posiciones de la sala de control.

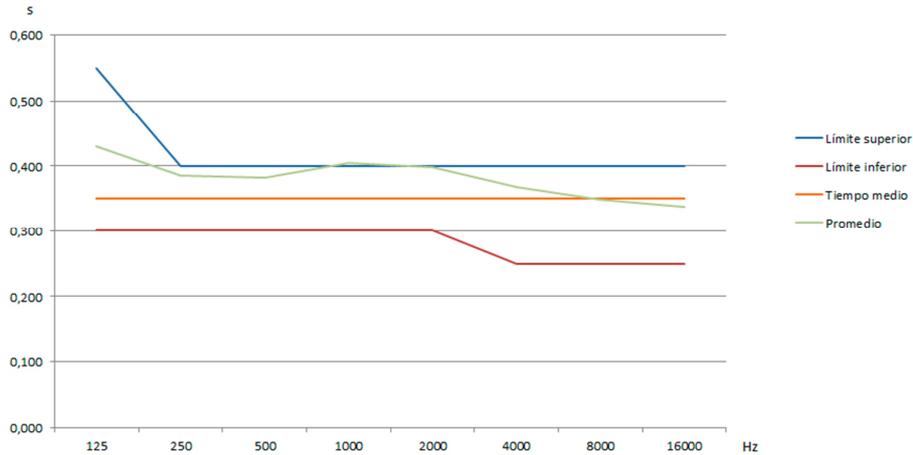


Figura 6c – Gráfica del t_R promedio con los valores propuestos por la EBU.

En la figura anterior (Figura 6c) [10] podemos apreciar como los resultados del tiempo de reverberación final se encuentran dentro del rango definido por la EBU. No obstante, a partir de 5000 Hz existe un descenso del t_R , aunque se encuentra dentro del rango, como solución se ha definido un difusor a esta frecuencia para poder incrementar este t_R y así no existir tanta diferencia respecto a los valores del t_R a frecuencias más inferiores. Este difusor tiene una $f_{inferior}= 3750$ Hz y una $f_{superior}= 18248$ Hz.

En la siguiente tabla (Tabla 6d) [10] se muestran los valores de SPL obtenidos con CATT Acoustic en las diferentes posiciones de fuente y receptor.

	Nivel de presión sonora (dB)							
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz
tR S_A5 R_08	97,2	96,2	95,7	95,5	95,3	95,0	94,7	94,6
tR S_A5 R_09	96,8	95,9	95,4	95,3	95,3	95,0	94,7	94,5
tR S_A5 R_11	96,1	95,3	94,9	94,9	94,8	94,4	94,1	94,0
tR S_A6 R_10	95,9	95,1	94,6	94,7	94,7	94,3	94,0	93,8
tR S_A6 R_11	96,4	95,7	95,2	95,3	95,3	94,9	94,5	94,4
Promedio	96,5	95,7	95,2	95,1	95,1	94,7	94,4	94,3

Tabla 6d – Tabla con el resultado del SPL obtenido en las diferentes posiciones de la sala de control.

Aplicando la máscara de la EBU, podemos observar en la Figura 6d [10] que los valores de SPL obtenidos se encuentran dentro del rango.

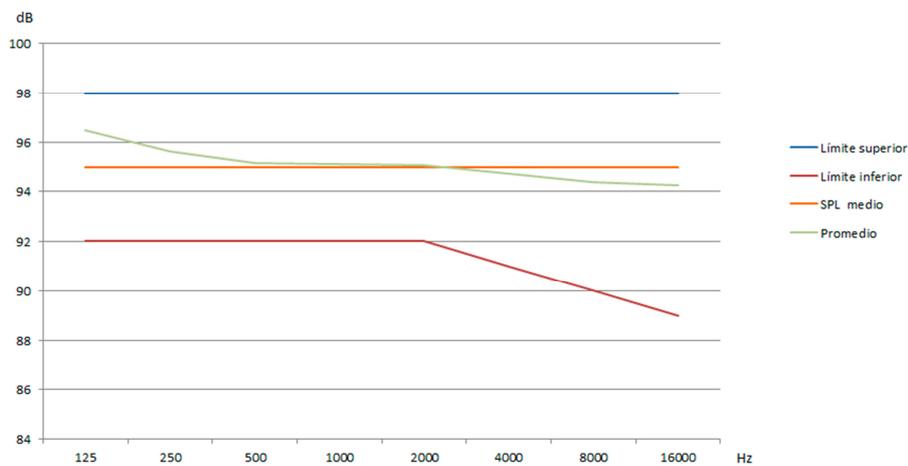


Figura 6d – Gráfica del SPL promedio con los valores propuestos por la EBU.

7 Ejemplos de diseño de los recintos

En este apartado se muestran ejemplos de una posible distribución en las salas de control y de grabación realizados con el software de modelado 3D Sketchup y el plugin V-Ray.



Figura 7a – Vista de la sala de grabación.



Figura 7b – Vista de la sala de grabación.



Figura 7c – Vista de la sala de grabación.



Figura 7d – Vista de la sala de control.



Figura 7e – Vista de la sala de control.



Figura 7f – Vista de la sala de control.

8 Conclusión

Para poder abordar el objetivo de este proyecto, realizar una propuesta de diseño y acondicionamiento acústico para una sala de grabación existente, se han manejado conceptos teóricos relacionados con el acondicionamiento acústico como son los tiempos de reverberación, resonadores de Helmholtz, materiales absorbentes, difusores RPG..., conceptos de diseño de salas como la sala LEDE mejorada y la utilización de software de predicción acústica como es CATT Acoustic.

Con el fin de conseguir el objetivo propuesto, el proyecto se ha estructurado de la siguiente manera: realización de un estudio previo de una sala para la grabación, obtención de un tiempo de reverberación adecuado al tipo de sala y distribución homogénea de los niveles de presión sonora en ambos recintos.

Realizando el estudio previo de la sala de grabación se han podido obtener mediante las ecuaciones de Sabine, Eyring y Millington los tiempos de reverberación de los recintos y con la expresión de Rayleigh y el diagrama de Bolt realizar un estudio de los modos propios de las salas. Una vez calculados estos parámetros se ha podido analizar que problemáticas presentaban estos recintos.

Basándose en los tiempos de reverberación propuestos por Davis y Fierstein se han definido unos t_r adecuados a cada sala para posteriormente compararlos con los obtenidos de manera teórica y estudiar qué soluciones son las más adecuadas en función de los resultados (que frecuencias necesitan absorción, que frecuencias necesitan una mayor difusión...).

Utilizando los principios de trazado de rayos y superficies reflectantes se ha realizado una propuesta de diseño para la sala de control aproximándose al diseño realizado por D'Antonio y Rettinger, una sala LEDE mejorada. Con lo que respecta a la sala de grabación se han realizado modificaciones en dos paredes laterales que presentaban paralelismo entre ellas, introduciendo una inclinación de 3° aproximadamente en ambas y evitar ese paralelismo.

A parte de estas modificaciones en los recintos, se han utilizado materiales absorbentes tales como lana de roca, fibra de vidrio, moqueta, alfombras... con el objetivo de reducir el t_r en frecuencias medias y altas hasta los valores que se han propuesto. Para conseguir esta reducción en las frecuencias graves se han utilizado elementos acústicos como membranas y resonadores de Helmholtz para realizar una absorción selectiva sobre las frecuencias de interés.

Con la utilización de difusores y resonadores se ha podido minimizar el efecto de coloración de los modos propios de las salas generando una distribución homogénea de los niveles de presión en las salas. En ambos recintos se han situado, en las esquinas, resonadores de membrana para minimizar los modos propios a bajas frecuencias. Para minimizar este efecto en altas frecuencias se han situado difusores RPG entre paredes paralelas.

A modo de conclusión se puede decir que el proyecto ha cumplido satisfactoriamente con los hitos planteados, presentando una propuesta de diseño y acondicionamiento acústico para los recintos existentes.

9 Referencias bibliográficas

- [1] Llinares J., Llopis A. y Sancho J.: *Acústica arquitectónica y urbanística*. SPUPV [1996].
- [2] F. Alton Everest: *Master Handbook of Acoustics*. McGraw-Hill Companies, Inc. [2001].
- [3] Página web: es.wikipedia.org
- [4] Cox and D'Antonio: *Room dimensions for critical listening environments*. AES Convention: 110, pp. 5353 May 2001.
- [5] Manuel Recuero López: *Acústica de Estudios para Grabación Sonora*. IORTV de RTVE [1993].
- [6] Antoni Carrión Isbert: *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Edicions UPC [1998].
- [7] Mankovsky, V.S.: *Acoustics of Studios and Auditoria*. Focal Press [1971].
- [8] Página web: www.isover.es
- [9] Grabación de "A la sombra de la sierra" del grupo "La Raíz" en RPM Estudios [2013].
- [10] Fuente propia.
- [11] Página web: www.fullcompass.com
- [12] Don Davis: *Sound System Engineering*, Focal Press [1987].
- [13] EBU Tech. 3276 – 2nd edition, Grand-Saconnex (Geneva) [May 1998].
- [14] Philip Newel: *Recording Studio Design*. Focal Press [2008].
- [15] Página web: portal.danosa.com/danosa/CMSServlet?node=730231
- [16] Página web: www.jonsh.net/blog/
- [17] Heinrich Kuttruff: *Room Acoustics*. Spoon Press [2009].

9 Anexos

9.1 Anexo 1

En las Figuras 9.1a y 9.1b se muestran vistas y medidas de los diferentes recintos.

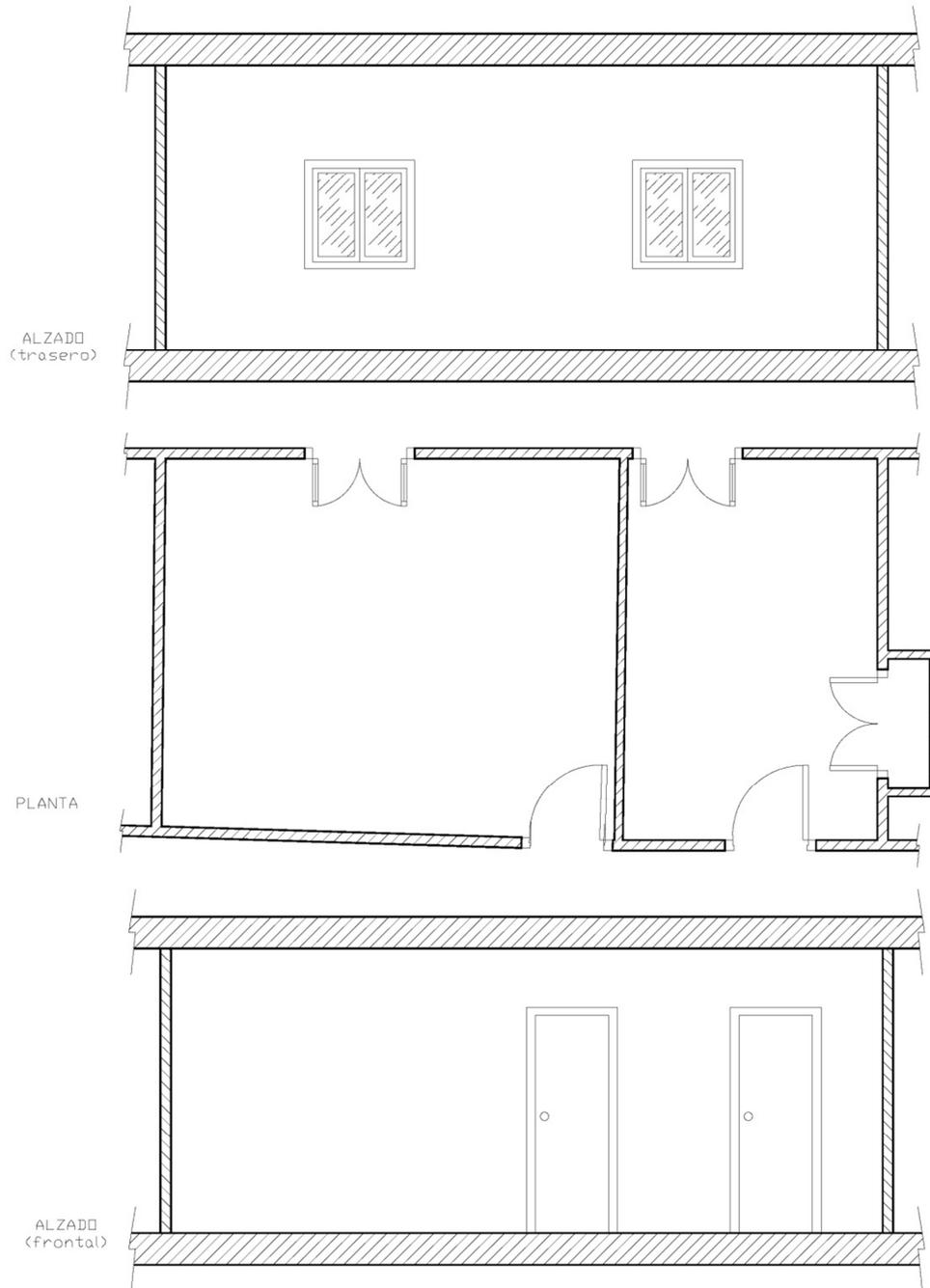


Figura 9.1a – Vistas de los diferentes recintos.

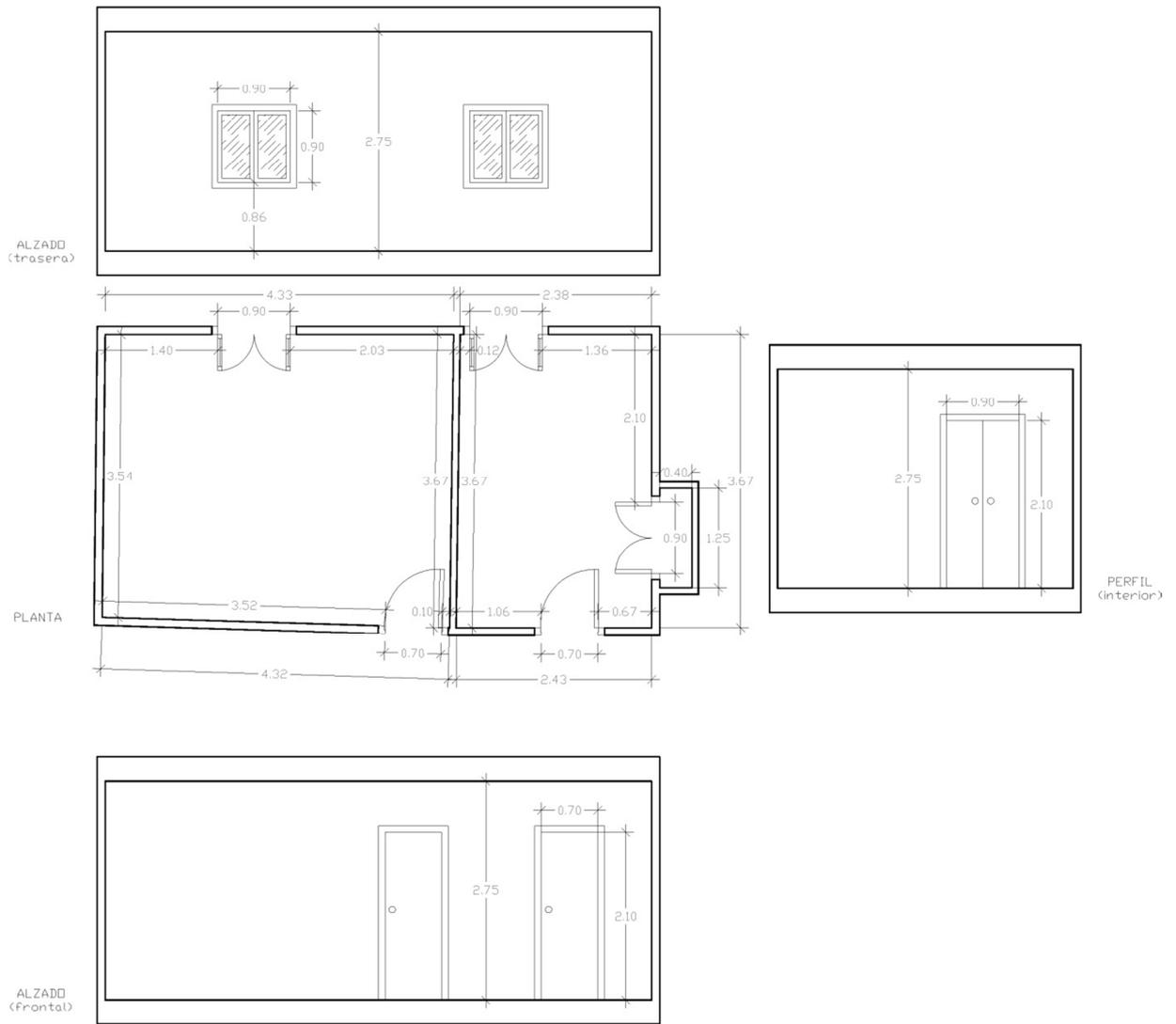


Figura 9.1b – Medidas de los diferentes recintos.

9.2 Anexo 2

Este anexo contiene los datos de los materiales, superficies y volúmenes de las salas necesarios para los cálculos teóricos iniciales. También se muestran los resultados del tiempo de reverberación de los tres métodos (Sabine, Eyring y Millington) en función de la frecuencia.

Constantes	Valor	Unidad
Volumen RR	43,02	m ³
Volumen CR	24,58	m ³

Tabla 9.2a – Tabla de las constantes.

Material	Coeficientes de absorción							
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz
Baldosa pulida	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Yeso de 25mm con cámara de aire	0,16	0,1	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Ventana de vidrio ordinaria	0,035	0,04	0,027	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
Pared de ladrillo enlucida con yeso	0,013	0,015	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
Madera	0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07	0,08	0,09

Tabla 9.2b – Tabla de los coeficientes de absorción de las superficies existentes en ambas salas.

		Área de absorción equivalente RR							
Nombre	Superficie	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz
1_RR suelo_RR	15,590	0,156	0,156	0,156	0,156	0,312	0,312	0,312	0,312
2_RR techo_RR	15,590	2,494	1,559	0,935	0,624	0,624	0,624	0,624	0,624
3_RR pared1_RR	9,735	0,127	0,146	0,195	0,292	0,389	0,487	0,584	0,681
4_RR pared2_RR	10,410	0,135	0,156	0,208	0,312	0,416	0,521	0,625	0,729
4_RR puerta1_RR	1,471	0,221	0,162	0,147	0,103	0,088	0,103	0,118	0,132
5_RR pared3_RR	10,090	0,131	0,151	0,202	0,303	0,404	0,505	0,605	0,706
6_RR pared4_RR	11,100	0,144	0,167	0,222	0,333	0,444	0,555	0,666	0,777
6_RR ventana1_RR	0,810	0,028	0,032	0,022	0,024	0,016	0,016	0,016	0,016
TOTAL	74,796	3,437	2,529	2,087	2,147	2,693	3,121	3,549	3,977

		Área de absorción equivalente CR							
Nombre	Superficie	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz
11_CR suelo_CR	8,826	0,088	0,088	0,088	0,088	0,177	0,177	0,177	0,177
12_CR techo_CR	8,826	1,412	0,883	0,530	0,353	0,353	0,353	0,353	0,353
13_CR pared1_CR	10,090	0,131	0,151	0,202	0,303	0,404	0,505	0,605	0,706
14_CR pared2_CR	5,213	0,068	0,078	0,104	0,156	0,209	0,261	0,313	0,365
14_CR puerta2_CR	1,471	0,221	0,162	0,147	0,103	0,088	0,103	0,118	0,132
15_CR pared3_CR	8,203	0,107	0,123	0,164	0,246	0,328	0,410	0,492	0,574
15_CR armario1_CR	1,890	0,284	0,208	0,189	0,132	0,113	0,132	0,151	0,170
16_CR pared4_CR	5,735	0,075	0,086	0,115	0,172	0,229	0,287	0,344	0,401
16_CR ventana2_CR	0,810	0,028	0,032	0,022	0,024	0,016	0,016	0,016	0,016
TOTAL	51,064	2,413	1,812	1,561	1,578	1,917	2,243	2,569	2,895

Tabla 9.2c – Tabla de todas las superficies de las salas con el área de absorción equivalente en función de la frecuencia.

$$t_R = \frac{0.162 \cdot 43.02}{0.156 + 0.624 + 0.292 + 0.312 + 0.103 + 0.303 + 0.333 + 0.024} = \frac{6.97}{2.147} = 3.25 \text{ s} \quad (\text{a})$$

$$t_R = \frac{0.162 \cdot 43.02}{-74.796 \cdot \ln(1 - 0.03375)} = \frac{6.97}{2.568} = 2.71 \text{ s} \quad (\text{b})$$

$$t_R = \frac{0.162 \cdot 43.02}{0.157 + 0.636 + 0.297 + 0.317 + 0.107 + 0.307 + 0.338 + 0.025} = \frac{6.97}{2.184} = 3.19 \text{ s} \quad (\text{c})$$

Figura 9.2a – Ejemplo de cálculo del tiempo de reverberación según Sabine (a), Eyring (b) y Millington (c).

Método	Tiempo de reverberación RR (segundos)							
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz
Sabine Teórico	2,03	2,76	3,34	3,25	2,59	2,23	1,96	1,75
Eyring Teórico	1,78	2,28	2,64	2,71	2,44	2,08	1,82	1,61
Millington Teórico	1,89	2,65	3,27	3,19	2,54	2,18	1,91	1,70
Método	Tiempo de reverberación CR (segundos)							
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz
Sabine Teórico	1,65	2,20	2,55	2,52	2,08	1,78	1,55	1,38
Eyring Teórico	1,22	1,59	1,82	2,02	1,91	1,63	1,42	1,26
Millington Teórico	1,54	2,11	2,49	2,48	2,04	1,73	1,51	1,33

Tabla 9.2d – Tabla con los tiempos de reverberación de las dos salas.

9.3 Anexo 3

Anexo correspondiente a una primera simulación con CATT Acoustic para la obtención de los tiempos de reverberación de los recintos.

```

; Proyecto Final de Carrera
; Realizado por: Abel Soler Calatayud
; I.T. Telecomunicaciones en imagen y sonido esp. Acústica
; Fecha : 24-02-2013
; Definición de la geometría

; Declaración de constantes
; h_N_XX = altura
; w_N_XX = anchura
; d_N_XX = profundidad

;=====SALA DE GRABACIÓN=====
; Variables de la sala de grabación (RR)
GLOBAL h_1_RR = 2.75
GLOBAL w_1_RR = 4.33
GLOBAL w_2_RR = 4.32
GLOBAL d_1_RR = 3.54
GLOBAL d_2_RR = 3.67
; Elementos de la RR (ventana, puertas, etc.)
GLOBAL h_1_W1 = 0.90
GLOBAL w_1_W1 = 0.90
GLOBAL h_1_D1 = 2.10
GLOBAL w_1_D1 = 0.70

CORNERS
;=====SALA DE GRABACIÓN=====
; Puntos correspondientes al suelo de la RR
01 0 0 0
02 d_1_RR 0 0
03 d_2_RR w_2_RR 0
04 0 w_1_RR 0

; Puntos correspondientes a la ventana 1 de la RR
101 0 1.40 0.86
104 0 1.40+w_1_W1 0.86
111 0 1.40 0.86+h_1_W1
114 0 1.40+w_1_W1 0.86+h_1_W1

; Puntos correspondientes a la puerta 1 de la RR
102 d_1_RR+0.10592 3.52 0
103 d_1_RR+0.12699 3.52+w_1_D1 0
112 d_1_RR+0.10592 3.52 h_1_D1
113 d_1_RR+0.12699 3.52+w_1_D1 h_1_D1

; Puntos correspondientes al techo de la RR
11 0 0 h_1_RR
12 d_1_RR 0 h_1_RR
13 d_2_RR w_2_RR h_1_RR
14 0 w_1_RR h_1_RR

PLANES
;=====SALA DE GRABACIÓN=====
; Planos correspondientes a la RR
[1_RR suelo_RR / 01 02 03 04 / SUELO_BALDOSA]
[2_RR techo_RR \ 11 12 13 14 \ TECHO_YESO ]
[3_RR pared1_RR \ 01 02 12 11 \ PARED_YESO]
[4_RR \ 02 03 13 12 \

```

```

                (puerta1_RR / 102 103 113 112 / PUERTA_MADERA)
                (pared2_RR \ 02 03 13 12 \ PARED_YESO)
            ]
        [5_RR pared3_RR \ 03 04 14 13 \ PARED_YESO]
        [6_RR / 01 04 14 11 /
            (ventana1_RR / 101 104 114 111 / VENTANA_VIDRIO)
            (pared4_RR / 01 04 14 11 / PARED_YESO)
        ]

```

Figura 9.3a – Definición de los planos correspondientes a la sala de grabación (RR) (archivo MASTER.GEO).

```

; Proyecto Final de Carrera
; Realizado por: Abel Soler Calatayud
; I.T. Telecomunicaciones en imagen y sonido esp. Acústica
; Fecha : 24-02-2013
; Definición de la fuente

```

```

SOURCEDEFS
;=====SALA DE GRABACIÓN=====
; Definición de la fuente correspondiente a la RR
A1 2.42 3.13 0.25 OMNI aim(-135,-45)
Lp1m_a = Lp_pink 90 ;90db at 1kHz

```

Figura 9.3b – Definición de la fuente correspondiente a la sala de grabación (RR) (archivo src.loc).

```

; Proyecto Final de Carrera
; Realizado por: Abel Soler Calatayud
; I.T. Telecomunicaciones en imagen y sonido esp. Acústica
; Fecha : 24-02-2013
; Definición del receptor

```

```

RECEIVERS
;=====SALA DE GRABACIÓN=====
; Definición del receptor correspondiente a la RR
1 2.49 1.06 1.5 3.18 0.50 1.50

```

Figura 9.3c – Definición del receptor correspondiente a la sala de grabación (RR) (archivo rec.loc).

```

; Proyecto Final de Carrera
; Realizado por: Abel Soler Calatayud
; I.T. Telecomunicaciones en imagen y sonido esp. Acústica
; Fecha : 24-02-2013
; Definición de la geometría

```

```

; Declaración de constantes
; h_N_XX = altura
; w_N_XX = anchura
; d_N_XX = profundidad

```

```

;=====SALA DE CONTROL=====

```

```

; Variables de la sala de control (CR)

```

```

GLOBAL h_1_CR = 2.75
GLOBAL w_1_CR = 2.38
GLOBAL w_2_CR = 2.43
GLOBAL d_1_CR = 3.67
GLOBAL d_2_CR = 3.67
GLOBAL d_2_RR = 3.67
GLOBAL w_1_RR = 4.33
GLOBAL w_2_RR = 4.32

```

```

; Elementos de la CR (ventana, puertas, etc.)

```

```

GLOBAL h_1_D1 = 2.10
GLOBAL h_1_W2 = 0.90
GLOBAL w_1_W2 = 0.90
GLOBAL h_1_D2 = 2.10
GLOBAL w_1_D2 = 0.70

```

```

GLOBAL h_1_D3 = 2.10
GLOBAL w_2_D3 = 0.90
GLOBAL w_3_D3 = 2.10

CORNERS
;=====SALA DE CONTROL=====
;Puntos correspondientes al suelo de la RR
    03    d_2_RR  w_2_RR      0
    04    0      w_1_RR      0
    07    d_2_CR  w_2_RR+w_2_CR 0
    08    0      w_1_RR+w_1_CR 0

;Puntos correspondientes a la ventana 2 de la CR
    105   0      w_1_RR+0.12    0.86
    108   0      w_1_RR+0.12+w_1_W2 0.86
    115   0      w_1_RR+0.12    0.86+h_1_W2
    118   0      w_1_RR+0.12+w_1_W2 0.86+h_1_W2

; Puntos correspondientes a la puerta 2 de la CR
    106   d_1_CR  w_1_RR+1.06    0
    107   d_2_CR  w_1_RR+1.06+w_1_D2 0
    116   d_1_CR  w_1_RR+1.06    h_1_D1
    117   d_2_CR  w_1_RR+1.06+w_1_D2 h_1_D1

; Puntos correspondientes al techo de la CR
    13    d_2_RR  w_2_RR      h_1_CR
    14    0      w_1_RR      h_1_CR
    17    d_2_CR  w_2_RR+w_2_CR h_1_CR
    18    0      w_1_RR+w_1_CR h_1_CR

;=====SALA DE CONTROL - Armario=====
; Puntos correspondientes al armario
    201   w_3_D3      6.733      0
    202   w_3_D3+w_2_D3 6.742      0
    211   w_3_D3      6.733      h_1_D3
    212   w_3_D3+w_2_D3 6.742      h_1_D3

PLANES
;=====SALA DE CONTROL=====
; Planos correspondientes a la CR
    [11_CR suelo_CR / 04 03 07 08 / SUELO_BALDOSA ]
    [12_CR techo_CR \ 14 13 17 18 \ TECHO_YESO ]
    [13_CR pared1_CR \ 04 03 13 14 \ PARED_YESO]
    [14_CR \ 03 07 17 13 \
        (puerta2_CR \ 106 107 117 116 \ PUERTA_MADERA)
        (pared2_CR \ 03 07 17 13 \ PARED_YESO)
    ]
    [15_CR / 08 07 17 18 /
        (armario1_CR / 201 202 212 211 / PUERTA_MADERA)
        (pared3_CR / 08 07 17 18 / PARED_YESO)
    ]
    [16_CR / 04 08 18 14 /
        (ventana2_CR / 105 108 118 115 / VENTANA_VIDRIO)
        (pared4_CR / 04 08 18 14 / PARED_YESO)
    ]

```

Figura 9.3d – Definición de los planos correspondientes a la sala de control (CR) (archivo MASTER.GEO).

```

; Proyecto Final de Carrera
; Realizado por: Abel Soler Calatayud
; I.T. Telecomunicaciones en imagen y sonido esp. Acústica
; Fecha : 24-02-2013
; Definición de la fuente

SOURCEDEFS
;=====SALA DE GRABACIÓN=====
; Definición de la fuente correspondiente a la RR
A1 0.38 4.88 1.2 OMNI aim(60,0)
Lp1m_a = Lp_pink 90 ;90db at 1kHz
    
```

Figura 9.3e – Definición de la fuente correspondiente a la sala de control (CR) (archivo src.loc).

```

; Proyecto Final de Carrera
; Realizado por: Abel Soler Calatayud
; I.T. Telecomunicaciones en imagen y sonido esp. Acústica
; Fecha : 24-02-2013
; Definición del receptor

RECEIVERS
;=====SALA DE GRABACIÓN=====
; Definición del receptor correspondiente a la RR
1 1.32 5.64 1.5 0.54 4.83 1.50
    
```

Figura 9.3f – Definición del receptor correspondiente a la sala de control (CR) (archivo rec.loc).

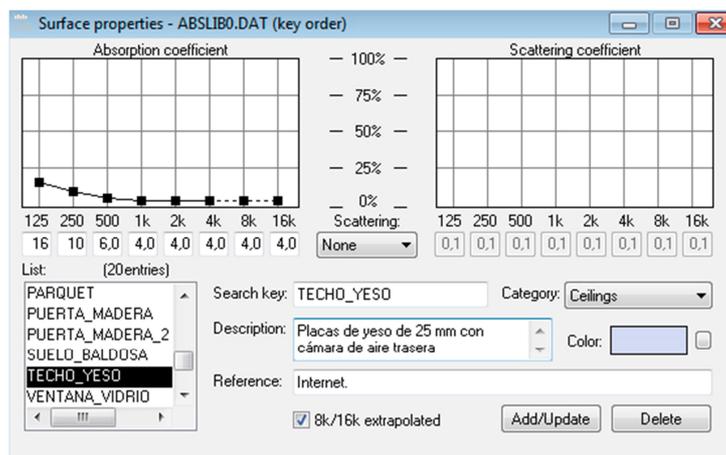


Figura 9.3g – Ejemplo de la definición de un material.

9.4 Anexo 4

Anexo correspondiente al cálculo de modos propios de la sala utilizando para ello la ecuación de Raleigh (Figura 9.4a) [10] y la función de Matlab. (Figura 9.4b) [10]

$$f_{1,0,0} = \frac{343}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{3.605}\right)^2 + \left(\frac{0}{4.325}\right)^2 + \left(\frac{0}{2.75}\right)^2} = 48 \text{ Hz}$$

$$f_{0,1,0} = \frac{343}{2} \sqrt{\left(\frac{0}{3.605}\right)^2 + \left(\frac{1}{4.325}\right)^2 + \left(\frac{0}{2.75}\right)^2} = 40 \text{ Hz}$$

...

$$f_{5,5,5} = \frac{343}{2} \sqrt{\left(\frac{5}{3.605}\right)^2 + \left(\frac{5}{4.325}\right)^2 + \left(\frac{5}{2.75}\right)^2} = 440 \text{ Hz}$$

Figura 9.4a – Ejemplo de cálculo de modos propios de un recinto.

X	Y	Z	f (Hz)	X	Y	Z	f (Hz)	X	Y	Z	f (Hz)	X	Y	Z	f (Hz)	X	Y	Z	f (Hz)				
0	1	0	40	0	4	1	170	2	4	2	223	5	3	0	266	2	4	4	311	5	2	4	354
1	0	0	48	0	3	2	172	3	3	2	224	1	2	4	266	3	3	4	311	5	5	3	362
1	1	0	62	3	2	1	175	2	2	3	224	4	0	3	267	0	0	5	312	2	4	5	363
0	0	1	62	2	2	2	176	4	3	0	224	2	0	4	267	5	4	2	312	3	3	5	363
0	1	1	74	1	4	1	177	1	3	3	227	5	0	2	269	5	2	3	313	5	3	4	365
1	0	1	78	1	3	2	179	4	0	2	228	4	1	3	270	4	0	4	314	4	0	5	365
0	2	0	79	2	4	0	185	2	5	1	229	2	1	4	270	0	1	5	314	4	1	5	367
1	1	1	88	3	3	0	186	4	1	2	231	5	1	2	271	1	0	5	315	0	5	5	370
1	2	0	92	0	0	3	187	4	3	1	233	0	5	3	273	5	5	1	316	4	5	4	371
2	0	0	95	3	0	2	190	0	5	2	234	5	3	1	273	4	1	4	316	1	5	5	373
0	2	1	101	4	0	0	190	3	0	3	235	3	5	2	274	1	1	5	318	4	2	5	374
2	1	0	103	0	1	3	191	5	0	0	238	4	5	0	275	0	5	4	319	3	4	5	378
1	2	1	112	1	0	3	193	3	1	3	239	0	3	4	276	0	2	5	322	5	4	4	379
2	0	1	114	3	1	2	194	1	5	2	239	1	5	3	277	1	5	4	322	2	5	5	382
0	3	0	119	4	1	0	194	4	2	2	241	4	4	2	277	4	2	4	324	4	3	5	384
2	1	1	120	2	4	1	195	5	1	0	241	4	2	3	278	5	3	3	325	5	0	5	392
2	2	0	124	3	3	1	196	2	3	3	241	2	2	4	279	1	2	5	325	5	1	5	394
0	0	2	125	2	3	2	197	3	5	0	244	5	2	2	280	2	0	5	326	3	5	5	396
1	3	0	128	1	1	3	197	0	4	3	245	1	3	4	280	3	4	4	328	5	5	4	398
0	1	2	131	0	5	0	198	5	0	1	246	4	5	1	282	2	1	5	328	4	4	5	398
1	0	2	133	4	0	1	200	3	4	2	247	3	4	3	284	4	5	3	332	5	2	5	400
0	3	1	134	0	4	2	202	4	4	0	248	5	4	0	286	2	5	4	333	5	3	5	410
2	2	1	139	0	2	3	203	3	2	3	248	3	0	4	287	0	3	5	334	4	5	5	416
1	1	2	139	1	5	0	204	5	1	1	249	2	5	3	289	5	5	2	334	5	4	5	423
1	3	1	142	4	1	1	204	0	0	4	249	3	1	4	290	2	2	5	336	2	5	5	439
3	0	0	143	3	2	2	205	1	4	3	250	4	3	3	292	4	3	4	336	4	3	4	336
0	2	2	148	4	2	0	206	5	2	0	251	2	3	4	292	1	3	5	337	5	4	3	342
3	1	0	148	1	4	2	207	3	5	1	252	5	4	1	293	5	4	3	342	3	0	5	343
2	3	0	152	0	5	1	208	0	1	4	253	5	3	2	294	3	0	5	343	5	0	4	345
1	2	2	155	1	2	3	209	2	5	2	253	0	4	4	296	0	4	4	345	3	1	5	345
3	0	1	156	2	0	3	210	1	0	4	254	3	2	4	298	3	2	4	345	5	1	4	347
2	0	2	157	1	5	1	213	4	4	1	255	1	4	4	299	1	4	4	347	2	3	5	347
0	4	0	159	3	4	0	213	4	3	2	257	4	5	2	302	4	5	2	347	3	5	4	349
3	1	1	161	2	1	3	214	1	1	4	257	5	0	3	303	5	0	3	303	0	4	5	350
2	1	2	162	4	2	1	215	5	2	1	258	5	1	3	305	5	1	3	305	4	4	4	352
3	2	0	163	2	5	0	220	0	2	4	262	3	5	3	308	3	5	3	308	4	4	4	352
2	3	1	165	0	3	3	222	2	4	3	263	5	5	0	310	5	5	0	310	3	2	5	352
1	4	0	166	3	4	1	222	3	3	3	264	4	4	3	310	4	4	3	310	1	4	5	353

Tabla 9.4a – Tabla con todos los modos en la sala de grabación.

X	Y	Z	f (Hz)	X	Y	Z	f (Hz)	X	Y	Z	f (Hz)	X	Y	Z	f (Hz)	X	Y	Z	f (Hz)	X	Y	Z	f (Hz)
1	0	0	47	1	1	3	205	2	0	4	266	1	0	5	315	5	3	3	363	0	4	5	415
0	0	1	62	0	3	0	205	5	2	0	271	3	2	4	317	4	0	5	364	4	3	5	418
0	1	0	68	3	2	1	206	3	2	3	271	5	3	1	317	0	5	2	364	1	4	5	418
1	0	1	78	2	2	2	207	4	1	3	273	4	1	4	319	5	4	1	365	5	5	1	419
1	1	0	83	4	1	1	209	5	1	2	274	0	1	5	319	1	5	2	367	0	5	4	424
0	1	1	93	2	0	3	209	0	4	0	274	1	1	5	323	5	2	4	368	2	4	5	425
2	0	0	93	1	3	0	211	2	1	4	275	0	3	4	323	3	2	5	368	1	5	4	426
1	1	1	104	0	3	1	215	4	3	0	278	2	0	5	326	3	5	0	370	4	5	3	433
2	0	1	112	1	3	1	220	1	4	0	278	1	3	4	326	4	1	5	370	5	5	2	433
2	1	0	116	2	1	3	220	0	3	3	278	5	2	3	329	0	4	4	370	2	5	4	434
0	0	2	125	4	0	2	225	5	2	1	278	4	4	0	332	4	3	4	373	5	4	4	438
2	1	1	132	2	3	0	226	3	3	2	278	0	4	3	332	1	4	4	373	3	4	5	438
1	0	2	133	4	2	0	232	0	4	1	281	3	4	2	332	0	3	5	373	5	3	5	440
0	2	0	137	0	2	3	232	1	3	3	282	2	1	5	333	3	5	1	375	3	5	4	446
3	0	0	140	3	2	2	232	0	2	4	285	4	3	3	335	2	5	2	376	5	5	3	455
0	1	2	142	5	0	0	234	4	3	1	285	1	4	3	335	1	3	5	376	4	4	5	455
1	2	0	145	3	0	3	234	1	4	1	285	5	3	2	335	4	4	3	381	4	5	4	463
1	1	2	150	2	3	1	234	3	0	4	286	2	3	4	336	5	4	2	381	0	5	5	463
0	2	1	150	4	1	2	235	1	2	4	288	4	4	1	337	2	4	4	382	1	5	5	465
3	0	1	153	1	2	3	237	2	4	0	289	4	2	4	340	2	3	5	385	2	5	5	472
2	0	2	156	4	2	1	240	2	3	3	293	0	2	5	341	4	2	5	388	5	4	5	476
3	1	0	156	0	3	2	240	3	1	4	294	5	0	4	342	5	0	5	390	5	5	4	484
1	2	1	158	5	0	1	242	2	4	1	296	3	0	5	342	4	5	0	390	3	5	5	484
2	2	0	166	5	1	0	243	4	2	3	298	0	5	0	342	0	5	3	390	4	5	5	499
3	1	1	168	3	1	3	244	5	2	2	298	1	2	5	344	3	5	2	390	5	5	5	519
2	1	2	170	1	3	2	245	5	0	3	299	2	4	3	345	1	5	3	393				
2	2	1	177	3	3	0	249	2	2	4	300	1	5	0	345	4	5	1	395				
0	2	2	185	0	0	4	249	0	4	2	301	0	5	1	348	5	1	5	396				
4	0	0	187	2	2	3	250	4	3	2	304	5	1	4	349	3	4	4	396				
0	0	3	187	5	1	1	251	1	4	2	305	3	1	5	349	5	3	4	399				
3	0	2	188	1	0	4	254	5	1	3	307	1	5	1	351	3	3	5	399				
1	2	2	191	3	3	1	256	3	4	0	308	3	3	4	352	2	5	3	401				
1	0	3	193	2	3	2	258	5	3	0	311	2	2	5	353	5	4	3	406				
3	2	0	196	0	1	4	259	3	3	3	311	4	4	2	354	4	5	2	409				
4	0	1	197	1	1	4	263	4	0	4	312	2	5	0	355	5	2	5	413				
4	1	0	199	4	2	2	263	0	0	5	312	5	4	0	360	5	5	0	414				
0	1	3	199	4	0	3	264	3	4	1	314	3	4	3	360	3	5	3	415				
3	1	2	200	5	0	2	265	2	4	2	315	2	5	1	360	4	4	4	415				

Tabla 9.4b – Tabla con todos los modos en la sala de control.

```
function [ volum, super, AXIAL, TANGE, OBLIC, SUMAM, MODES] = mod_Propis( x_dimen,
y_dimen, z_dimen)
%Funció que calcula la distribució de modes propis
%d'una sala paral·lelepípeda.
%Les variables d'entrada son el tamany de la sala.
%
%   x_dimen = ample (m)
%   y_dimen = longitud (m)
%   z_dimen = alçada (m)
%Les variables de contorn son:
%
%   v_prop = velocitat de propagació del so (m/s)
%Les variables d'eixida son:
%
%   volum = volum (m3)
%   super = superfície (m2)
%   Per a les matrius d'eixida dels modes, l'estructura es:
%
%       [ Mode_X, Mode_Y, Mode_Z, Freq, Diferència entre modes ]
%       axial = modes axials (Hz)
%       tange = modes tangencials (Hz)
%       oblic = modes oblics (Hz)
%       sumam = tots els modes de la sala (axial + oblic + tang)
%       modes = únicament els modes a tractar
```

```

clc;

%Definició de variables
v_prop = 343;
AXIAL = zeros (15,5);
AXIAL_F = 0:1:14; %Funció auxiliar per a poder representar els modes en la gràfica.
[mA nA]= size(AXIAL);
TANGE = zeros (75,5);
TANGE_F = 0:1:74; %Funció auxiliar per a poder representar els modes en la gràfica.
[mT nT]= size(TANGE);
OBLIC = zeros (125,5);
OBLIC_F = 0:1:124; %Funció auxiliar per a poder representar els modes en la
gràfica.
[mO nO]= size(OBLIC);
SUMAM = zeros (mA+mT+mO,5);
SUMAM_F = 0:1:((mA+mT+mO)-1); %Funció auxiliar per a poder representar tots els
modes en la gràfica.
[mS nS]= size(SUMAM);
MODES = zeros (1,5); %Array que tindrà sols els modes propis a tractar
MODES(1,:)=[]; %Buidar l'array
Af_inferior = 0; %Variables utilitzades per a obtenir els modes propis
Af_superior = 0;
Af_percentatge = 0;

%Càlcul del volum i la superfície de la sala
volum = x_dimen*y_dimen*z_dimen;
fprintf('Volum de la sala: %.2f m3\n',volum);
super = 2*((x_dimen*y_dimen)+(x_dimen*z_dimen)+(y_dimen*z_dimen));
fprintf('Superfície de la sala: %.2f m2\n',super);

%Càlcul de modes axials
for i=1:5
    AXIAL(i,3)=i;

AXIAL(i,4)=(v_prop/2)*((((0/x_dimen)^2)+((0/y_dimen)^2)+((i/z_dimen)^2))^(1/2));
    AXIAL_F(i)=AXIAL(i,4);
    AXIAL(i+5,2)=i;

AXIAL(i+5,4)=(v_prop/2)*((((0/x_dimen)^2)+((i/y_dimen)^2)+((0/z_dimen)^2))^(1/2));
    AXIAL_F(i+5)=AXIAL(i+5,4);
    AXIAL(i+10,1)=i;

AXIAL(i+10,4)=(v_prop/2)*((((i/x_dimen)^2)+((0/y_dimen)^2)+((0/z_dimen)^2))^(1/2));
    AXIAL_F(i+10)=AXIAL(i+10,4);
end;
AXIAL=sortrows(AXIAL,4); %Ordenar el array en funció de la freqüència per a
calcular la diferència entre modes axials.
for i=1:mA
    if(i+1<=mA)
        AXIAL(i,5)=AXIAL(i+1,4)-AXIAL(i,4); %Càlcul de la diferència entre modes.
    end;
end;

%Càlcul de modes tangencials
for i=1:5
    for j=1:5
        k=j;
        while ((k<76)&&(TANGE(k,4)~=0))
            k=k+1;
        end;
        TANGE(k,1)=i;
        TANGE(k,2)=j;

TANGE(k,4)=(v_prop/2)*((((i/x_dimen)^2)+((j/y_dimen)^2)+((0/z_dimen)^2))^(1/2));
        TANGE_F(k)=TANGE(k,4);
    end;
end;

```

```

end;
for i=1:5
    for j=1:5
        k=j;
        while ((k<76)&&(TANGE(k,4)~=0))
            k=k+1;
        end;
        TANGE(k,2)=i;
        TANGE(k,3)=j;

TANGE(k,4)=(v_prop/2)*(((0/x_dimen)^2)+((i/y_dimen)^2)+((j/z_dimen)^2))^(1/2));
TANGE_F(k)=TANGE(k,4);
    end;
end;
for i=1:5
    for j=1:5
        k=j;
        while ((k<76)&&(TANGE(k,4)~=0))
            k=k+1;
        end;
        TANGE(k,3)=i;
        TANGE(k,1)=j;

TANGE(k,4)=(v_prop/2)*(((j/x_dimen)^2)+((0/y_dimen)^2)+((i/z_dimen)^2))^(1/2));
TANGE_F(k)=TANGE(k,4);
    end;
end;
TANGE=sortrows(TANGE,4); %Ordenar el array en funció de la freqüència per a
calcular la diferència entre modes tangencials.
for i=1:mT
    if(i+1<=mT)
        TANGE(i,5)=TANGE(i+1,4)-TANGE(i,4); %Càlcul de la diferència entre modes.
    end;
end;

%Càlcul de modes oblics
for i=1:5
    for j=1:5
        for k=1:5
            n=k;
            while ((n<126)&&(OBLIC(n,4)~=0))
                n=n+1;
            end;
            OBLIC(n,1)=i;
            OBLIC(n,2)=j;
            OBLIC(n,3)=k;

OBLIC(n,4)=(v_prop/2)*(((i/x_dimen)^2)+((j/y_dimen)^2)+((k/z_dimen)^2))^(1/2));
OBLIC_F(n)=OBLIC(n,4);
        end;
    end;
end;
OBLIC=sortrows(OBLIC,4); %Ordenar el array en funció de la freqüència per a
calcular la diferència entre modes oblics.
for i=1:mO
    if(i+1<=mO)
        OBLIC(i,5)=OBLIC(i+1,4)-OBLIC(i,4); %Càlcul de la diferència entre modes.
    end;
end;

%Array amb tots els modes junts
SUMAM = cat(1,AXIAL,TANGE,OBLIC);
SUMAM=sortrows(SUMAM,4); %Ordenar el array en funció de la freqüència per a
calcular la diferència entre modes oblics.
for i=1:mS
    Af_percentatge = SUMAM(i,4)*0.05; %Càlcul del Af mínim. Criteri de Bonello.
    if i == 1

```

```

        Af_inferior=0;
        Af_superior = SUMAM(i+1,4)-SUMAM(i,4); %Càlcul del Af superior.
    elseif i == mS
        Af_superior=0;
        Af_inferior = SUMAM(i,4)-SUMAM(i-1,4); %Càlcul del Af inferior.
    else
        Af_inferior = SUMAM(i,4)-SUMAM(i-1,4); %Càlcul del Af inferior.
        Af_superior = SUMAM(i+1,4)-SUMAM(i,4); %Càlcul del Af superior.
    end

    if(Af_inferior<Af_superior)
        if(Af_superior>Af_percentatge)
            MODES =
cat(1,MODES,[SUMAM(i,1),SUMAM(i,2),SUMAM(i,3),SUMAM(i,4),Af_superior]);
            end;
        else
            if(Af_inferior>Af_percentatge)
                MODES =
cat(1,MODES,[SUMAM(i,1),SUMAM(i,2),SUMAM(i,3),SUMAM(i,4),Af_inferior]);
            end
        end;
    if(i+1<=mS)
        SUMAM(i,5)=SUMAM(i+1,4)-SUMAM(i,4); %Càlcul de la diferència entre modes.
    end;
end;

MODES_F=0:1:length(MODES)-1; %Funció auxiliar per a poder representar tots els
modes en la gràfica
MODES_F=MODES_F';
for i=1:length(MODES_F)
    MODES_F(i)=MODES(i,4);
end
fprintf('\nVariable que conté tota la informació de tots els modes calculats:\n');
SUMAM
fprintf('Variable que conté tota la informació de tots els modes que han de
tractar-se:\n');
MODES

figure('Name','Representació de tots els modes propis','NumberTitle','off');
hold on;

VALOR_Y = ones(length(AXIAL_F));
VALOR_Y = VALOR_Y*3;
stem(AXIAL_F, VALOR_Y, 'ks', 'LineWidth', 2, 'MarkerFaceColor', [0 0 0]);

VALOR_Y = ones(length(TANGE_F));
VALOR_Y = VALOR_Y*2;
stem(TANGE_F, VALOR_Y, 'rs', 'LineWidth', 2, 'MarkerFaceColor', [0 0 0]);

VALOR_Y = ones(length(OBLIC_F));
VALOR_Y = VALOR_Y*1;
stem(OBLIC_F, VALOR_Y, 'bs', 'LineWidth', 2, 'MarkerFaceColor', [0 0 0]);

hold off;

figure('Name','Representació dels modes que han de tractar-
se','NumberTitle','off');
VALOR_Y = ones(length(MODES_F));
VALOR_Y = VALOR_Y*6;
stem(MODES_F, VALOR_Y, 'rs', 'LineWidth', 2, 'MarkerFaceColor', [1 0 0]);

end

```

Figura 9.4b – Definició de la funció Matlab (archivo mod_Propis.m).

9.5 Anexo 5

En este Anexo se incluyen toda la información utilizada para el desarrollo del punto 5.3 “Diseño de salas”.

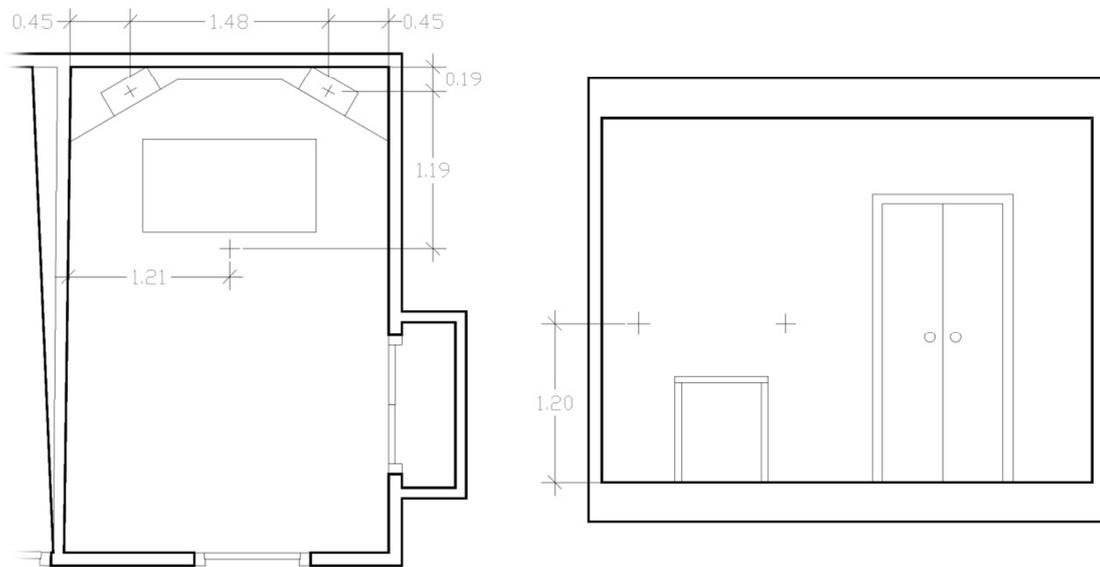


Figura 9.5a – Medidas de las posiciones de los altavoces y técnico en la sala de control.

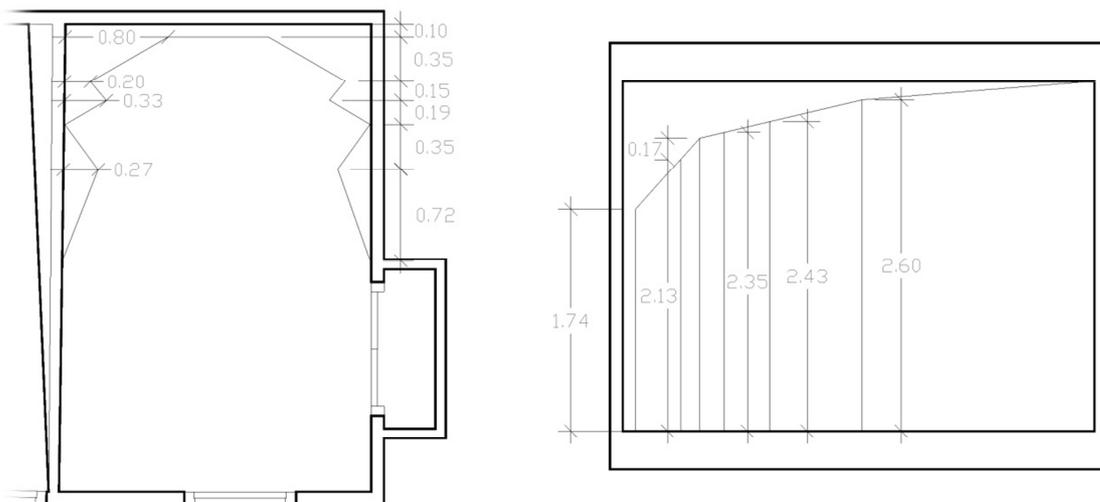


Figura 9.5b – Medidas de la estructura diseñada en la sala de control.

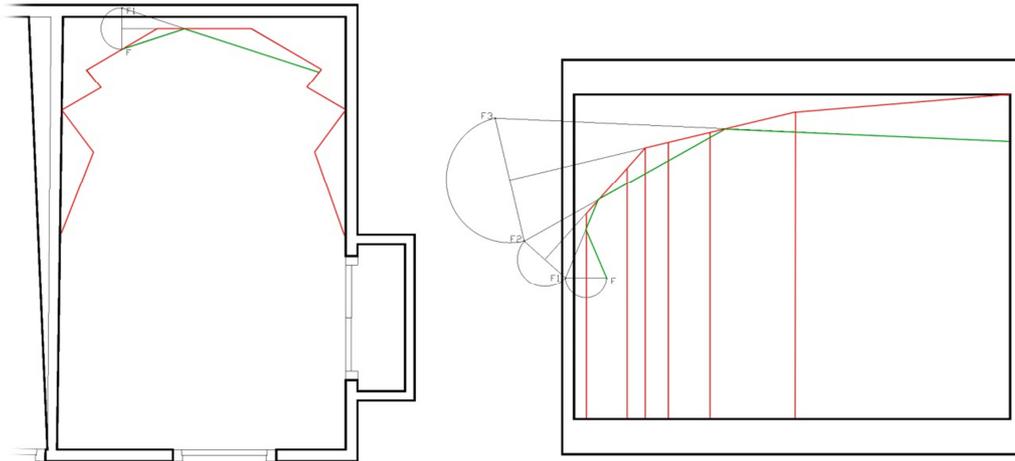


Figura 9.5c – Ejemplo de trazado de rayo para una primera reflexión.

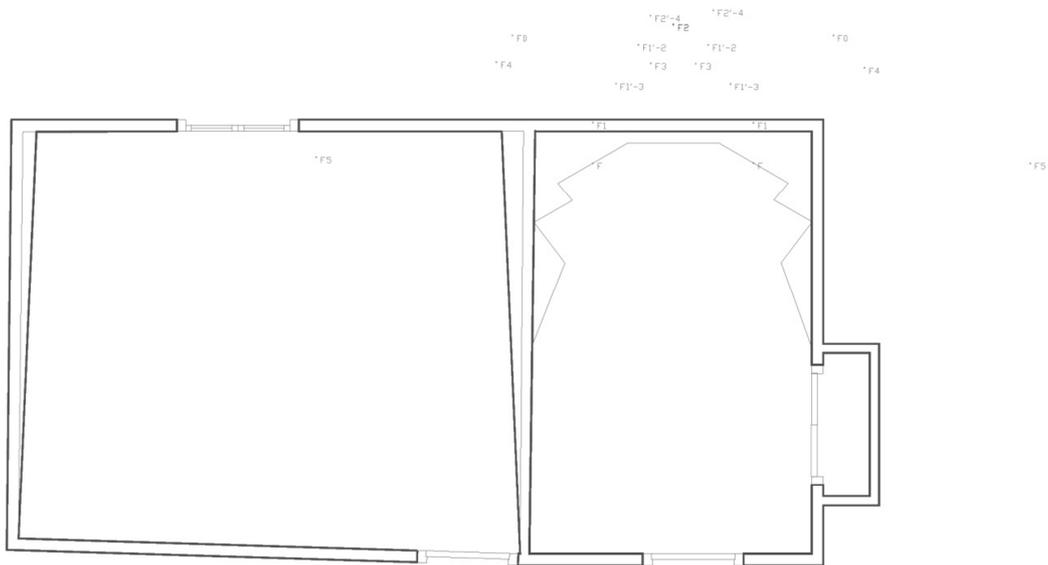


Figura 9.5d – Vista de todos los focos utilizados para el trazado de rayos horizontal.

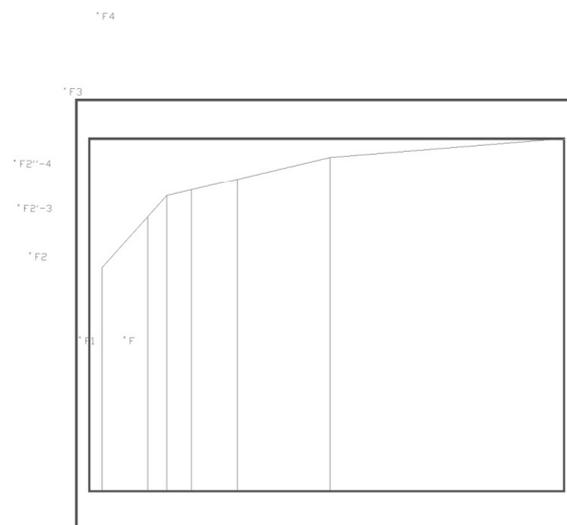


Figura 9.5e – Vista de todos los focos utilizados para el trazado de rayos vertical.

9.6 Anexo 6

Este anexo contiene los datos de los materiales, superficies y volúmenes de las salas necesarios para los cálculos teóricos iniciales. También se muestran los resultados del tiempo de reverberación de los tres métodos (Sabine, Eyring y Millington) en función de la frecuencia.

Constantes	Valor	Unidad
Volumen RR	41,63	m ³
Volumen CR	20	m ³

Tabla 9.6a – Tabla de las constantes.

Material	Coeficientes de absorción							
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz
Baldosa pulida	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Yeso de 25 mm con cámara de aire	0,16	0,1	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Ventana de vidrio ordinaria	0,035	0,04	0,027	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
Pared de ladrillo enlucida con yeso	0,013	0,015	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
Madera	0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07	0,08	0,09
Confortpan 208 de 40 mm (Danosa)	0,15	0,4	0,6	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

Tabla 9.6b – Tabla de los coeficientes de absorción de las superficies existentes en ambas salas.

		Área de absorción equivalente RR							
Nombre	Superficie	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz
1_RR suelo_RR	15,050	0,151	0,151	0,151	0,151	0,301	0,301	0,301	0,301
2_RR techo_RR	15,050	2,408	1,505	0,903	0,602	0,602	0,602	0,602	0,602
3_RR pared1_RR	9,740	0,127	0,146	0,195	0,292	0,390	0,487	0,584	0,682
4_RR pared2_RR	10,410	0,135	0,156	0,208	0,312	0,416	0,521	0,625	0,729
4_RR puerta1_RR	1,471	0,221	0,162	0,147	0,103	0,088	0,103	0,118	0,132
5_RR pared3_RR	10,100	0,131	0,152	0,202	0,303	0,404	0,505	0,606	0,707
6_RR pared4_RR	10,280	0,134	0,154	0,206	0,308	0,411	0,514	0,617	0,720
6_RR ventana1_RR	0,810	0,028	0,032	0,022	0,024	0,016	0,016	0,016	0,016
TOTAL	72,911	3,334	2,458	2,033	2,096	2,629	3,049	3,469	3,889
		Área de absorción equivalente CR							
Nombre	Superficie	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz
11_CR suelo_CR	7,726	0,077	0,077	0,077	0,077	0,155	0,155	0,155	0,155
13_CR pared2_CR	5,213	0,068	0,078	0,104	0,156	0,209	0,261	0,313	0,365
13_CR puerta2_CR	1,470	0,221	0,162	0,147	0,103	0,088	0,103	0,118	0,132
15_CR armario1_CR	1,890	0,284	0,208	0,189	0,132	0,113	0,132	0,151	0,170
41_CR planoL1	1,343	0,201	0,148	0,134	0,094	0,081	0,094	0,107	0,121
42_CR planoL2	0,436	0,065	0,174	0,262	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392
43_CR planoL3	0,881	0,132	0,097	0,088	0,062	0,053	0,062	0,070	0,079
44_CR planoL4	1,067	0,160	0,427	0,640	0,960	0,960	0,960	0,960	0,960
45_CR planoL5	1,928	0,289	0,212	0,193	0,135	0,116	0,135	0,154	0,174
51_CR planoR1	1,347	0,202	0,148	0,135	0,094	0,081	0,094	0,108	0,121
52_CR planoR2	0,430	0,065	0,172	0,258	0,387	0,387	0,387	0,387	0,387
53_CR planoR3	0,826	0,124	0,091	0,083	0,058	0,050	0,058	0,066	0,074
54_CR planoR4	1,017	0,153	0,407	0,610	0,915	0,915	0,915	0,915	0,915
55_CR planoR5	1,920	0,288	0,211	0,192	0,134	0,115	0,134	0,154	0,173
71_CR planoC1	1,359	0,204	0,149	0,136	0,095	0,082	0,095	0,109	0,122
72_CR planoC2	0,721	0,108	0,079	0,072	0,050	0,043	0,050	0,058	0,065
73_CR planoC3	0,422	0,063	0,046	0,042	0,030	0,025	0,030	0,034	0,038
74_CR planoC4	0,399	0,060	0,044	0,040	0,028	0,024	0,028	0,032	0,036
75_CR planoC5	0,773	0,116	0,085	0,077	0,054	0,046	0,054	0,062	0,070
76_CR planoC6	1,568	0,235	0,172	0,157	0,110	0,094	0,110	0,125	0,141
77_CR planoC7	4,385	0,658	0,482	0,439	0,307	0,263	0,307	0,351	0,395
TOTAL	37,121	3,772	3,671	4,075	4,375	4,292	4,557	4,821	5,085

Tabla 9.6c – Tabla de todas las superficies de las salas con el área de absorción equivalente en función de la frecuencia.

Método	Tiempo de reverberación RR (segundos)							
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz
Sabine Teórico	2,02	2,74	3,32	3,22	2,57	2,21	1,94	1,73
Sabine CATT_1	2,02	2,67	3,13	2,95	2,23	1,6	0,89	0,38
Sabine CATT_2	1,99	2,68	3,23	3,13	2,49	2,14	1,88	1,67
Eyring Teórico	1,77	2,27	2,62	2,69	2,42	2,07	1,80	1,60
Eyring CATT_1	1,98	2,63	3,09	2,91	2,19	1,58	0,88	0,37
Eyring CATT_2	2,49	2,9	3,21	3,15	2,47	2,14	1,88	1,67
Millington Teórico	1,89	2,64	3,24	3,16	2,52	2,16	1,89	1,68
Método	Tiempo de reverberación CR (segundos)							
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	16000 Hz
Sabine Teórico	0,86	0,88	0,80	0,74	0,75	0,71	0,67	0,64
Sabine CATT_1	0,59	0,65	0,62	0,58	0,55	0,48	0,37	0,23
Sabine CATT_2	0,82	0,91	0,87	0,89	0,86	0,79	0,73	0,69
Eyring Teórico	0,59	0,51	0,42	0,35	0,36	0,34	0,33	0,32
Eyring CATT_1	0,56	0,63	0,6	0,56	0,53	0,46	0,36	0,23
Eyring CATT_2	0,92	0,89	0,91	0,9	0,86	0,78	0,73	0,7
Millington Teórico	0,79	0,78	0,63	0,38	0,38	0,37	0,36	0,35

Tabla 9.6d – Tabla con los tiempos de reverberación obtenidos de las dos salas.

9.7 Anexo 7

Medidas y situación de las membranas diseñadas de 125 y 250 Hz en la sala de control y la sala de grabación.

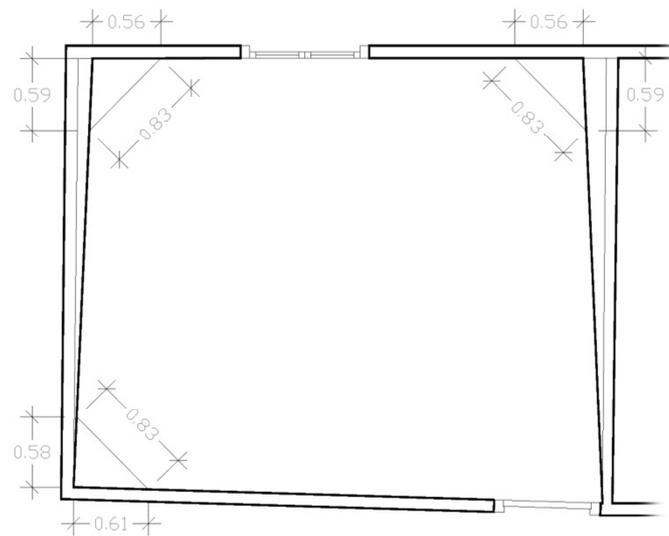


Figura 9.7a – Medidas de la sala de grabación.

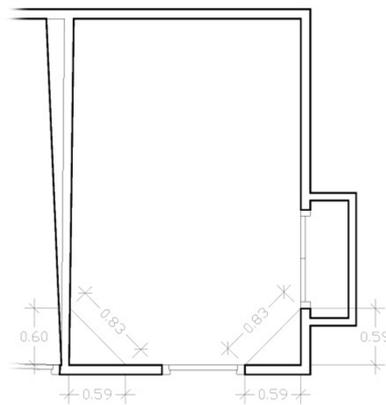


Figura 9.7b – Medidas de la sala de control.

9.8 Anexo 8

En este anexo se especifican el resto de medidas de los dos difusores.

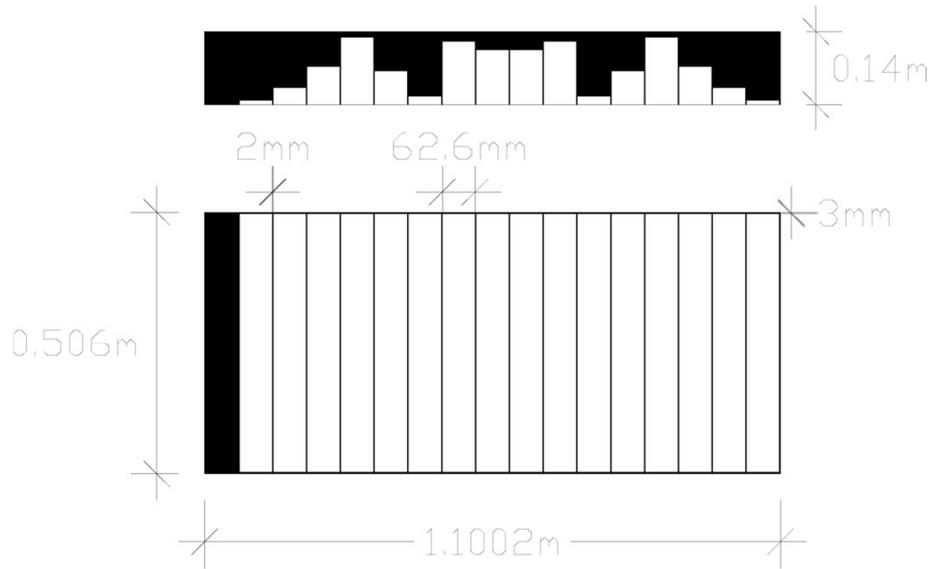


Figura 9.8a – Medidas del difusor QRD con $f_0 = 1250$ Hz.

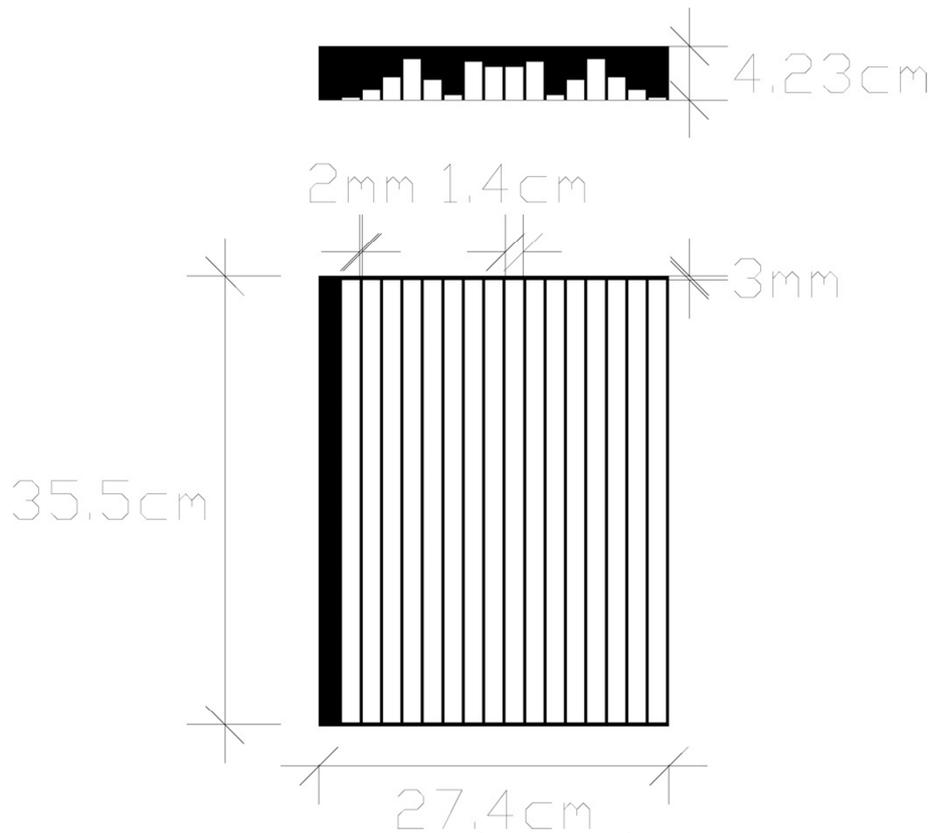


Figura 9.8b – Medidas del difusor QRD con $f_0 = 5000$ Hz.

9.9 Anexo 9

En este anexo se todas las capturas de pantalla del CATT Acoustic para los dos recintos del estudio en el que se puede ver tanto el tiempo de reverberación como el nivel de presión sonora (SPL).

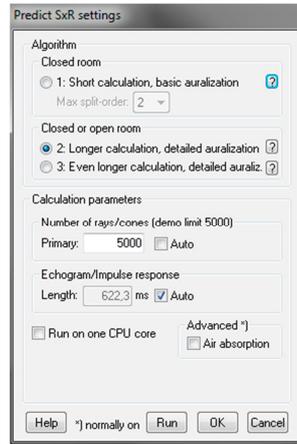


Figura 9.9a – Parámetros de configuración del módulo TUCT de CATT Acoustic.

- Gráficas correspondientes a la sala de grabación:

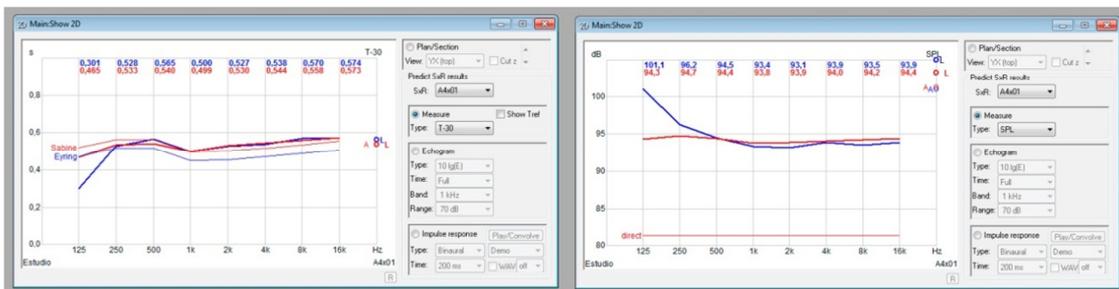


Figura 9.9b – Tiempos de reverberación y SPL de la fuente A4 y receptor 01.

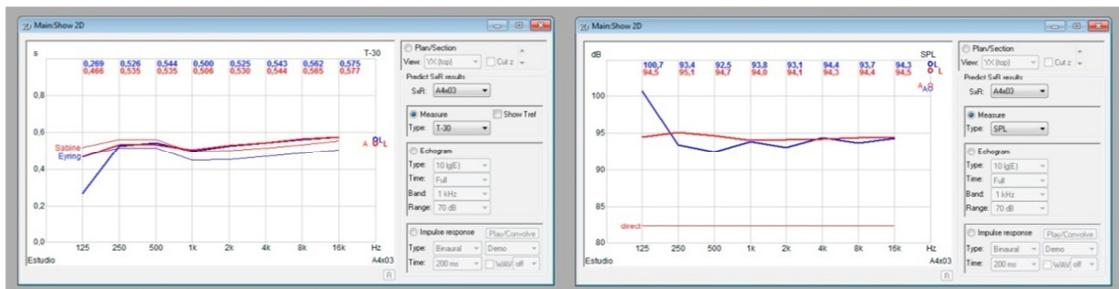


Figura 9.9c – Tiempos de reverberación y SPL de la fuente A4 y receptor 03.

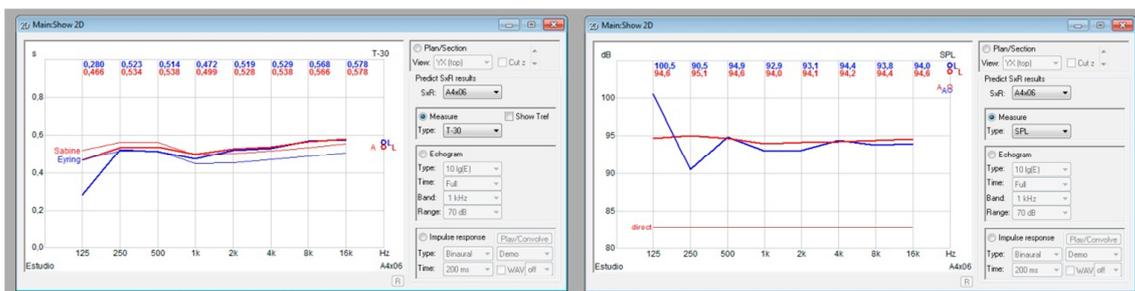


Figura 9.9d – Tiempos de reverberación y SPL de la fuente A4 y receptor 06.

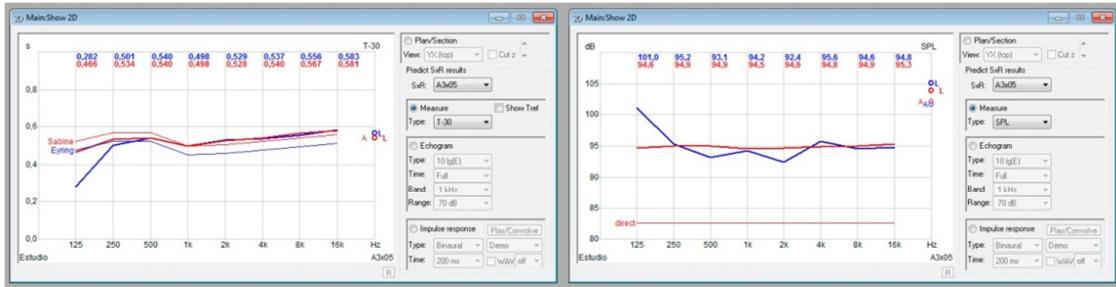


Figura 9.9f – Tiempos de reverberación y SPL de la fuente A3 y receptor 05.

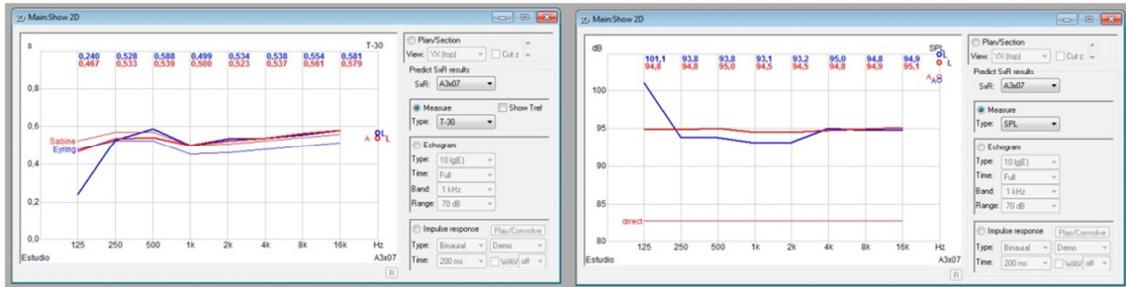


Figura 9.9e – Tiempos de reverberación y SPL de la fuente A3 y receptor 07.

- Gráficas correspondientes a la sala de control:

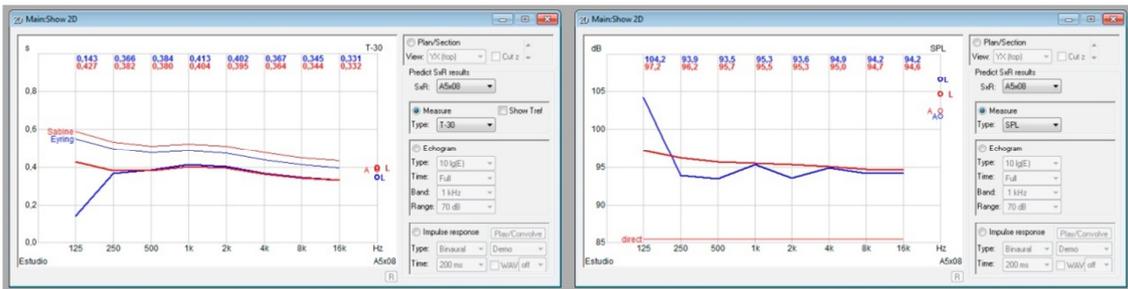


Figura 9.9g – Tiempos de reverberación y SPL de la fuente A5 y receptor 08.

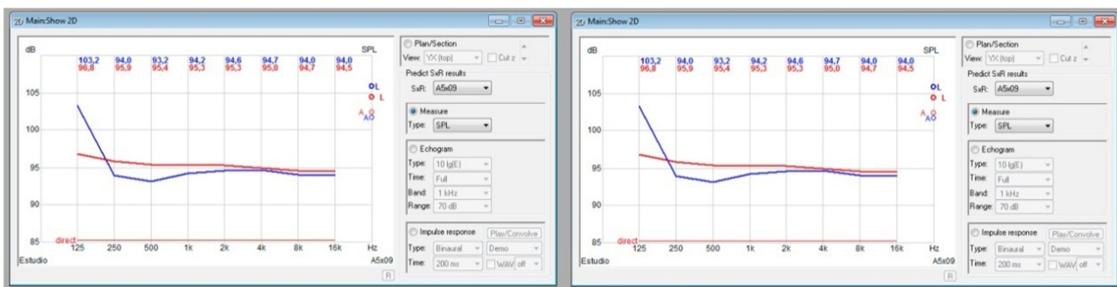


Figura 9.9h – Tiempos de reverberación y SPL de la fuente A5 y receptor 09.

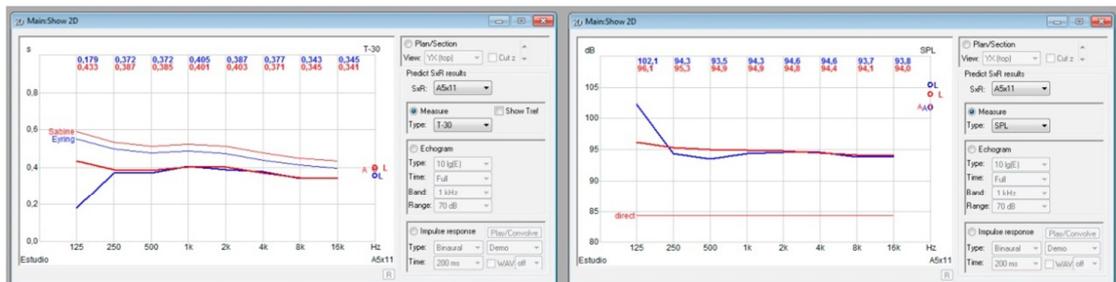


Figura 9.9i – Tiempos de reverberación y SPL de la fuente A5 y receptor 11.

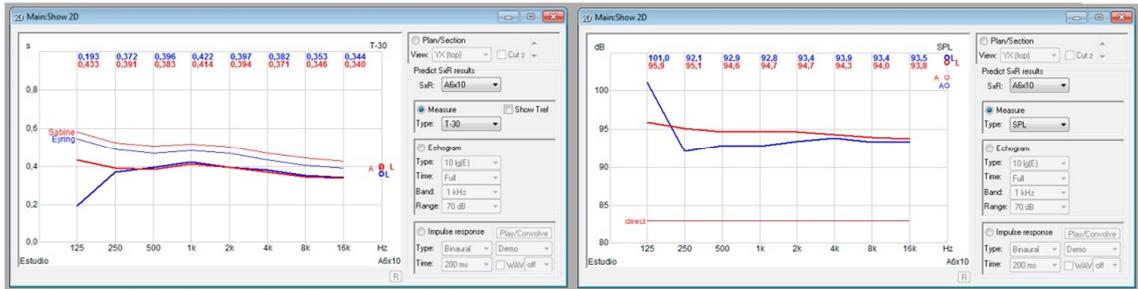


Figura 9.9j – Tiempos de reverberación y SPL de la fuente A6 y receptor 10.

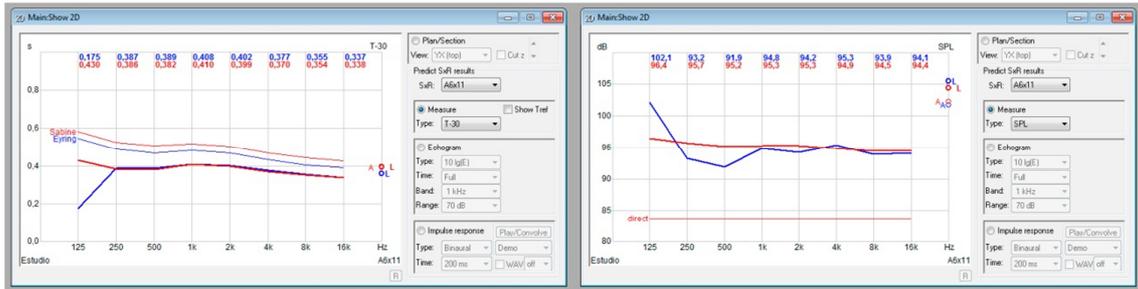


Figura 9.9k – Tiempos de reverberación y SPL de la fuente A6 y receptor 11.

9.10 Anexo 10

En este anexo se adjuntan los archivos correspondientes a la geometría, fuentes y receptores utilizados en CATT Acoustic para este proyecto.

```

; Proyecto Final de Carrera
; Realizado por: Abel Soler Calatayud
; I.T. Telecomunicaciones en imagen y sonido esp. Acústica
; Fecha : 24-02-2013
; Definición de la geometría

;Declaración de constantes
; h_N_XX = altura
; w_N_XX = anchura
; d_N_XX = profundidad

;=====SALA DE GRABACIÓN=====
;Variables de la sala de grabación (RR)
GLOBAL h_1_RR = 2.75
GLOBAL w_1_RR = 4.33
GLOBAL w_2_RR = 4.32
GLOBAL d_1_RR = 3.54
GLOBAL d_2_RR = 3.67
;Elementos de la RR (ventana, puertas, etc.)
GLOBAL h_1_W1 = 0.90
GLOBAL w_1_W1 = 0.90
GLOBAL h_1_D1 = 2.10
GLOBAL w_1_D1 = 0.70

;=====SALA DE CONTROL=====
;Variables de la sala de control (CR)
GLOBAL h_1_CR = 2.75
GLOBAL w_1_CR = 2.38
GLOBAL w_2_CR = 2.43
GLOBAL d_1_CR = 3.67
GLOBAL d_2_CR = 3.67
;Elementos de la CR (ventana, puertas, etc.)
GLOBAL h_1_W2 = 0.90
GLOBAL w_1_W2 = 0.90
GLOBAL h_1_D2 = 2.10
GLOBAL w_1_D2 = 0.70
GLOBAL h_1_D3 = 2.10
GLOBAL w_2_D3 = 0.90
GLOBAL w_3_D3 = 2.10

CORNERS
;=====SALA DE GRABACIÓN=====
;Puntos correspondientes al suelo de la RR
01 0 0.1169 0
02 d_1_RR 0 0
03 d_2_RR w_2_RR 0
04 0 w_1_RR-0.1803 0

;Puntos correspondientes a la ventana 1 de la RR
101 0 1.40 0.86
104 0 1.40+w_1_W1 0.86
111 0 1.40 0.86+h_1_W1
114 0 1.40+w_1_W1 0.86+h_1_W1

;Puntos correspondientes a la puerta 1 de la RR
102 d_1_RR+0.10592 3.52 0
103 d_1_RR+0.12699 3.52+w_1_D1 0

```

112	d_1_RR+0.10592	3.52	h_1_D1
113	d_1_RR+0.12699	3.52+w_1_D1	h_1_D1
;Puntos correspondientes al techo de la RR			
11	0	0.1169	h_1_RR
12	d_1_RR	0	h_1_RR
13	d_2_RR	w_2_RR	h_1_RR
14	0	w_1_RR-0.1803	h_1_RR
;==SALA DE GRABACIÓN - Elementos acústicos==			
;Puntos correspondientes a la alfombra 1			
21	0.5111	0.3552	0
22	1.5195	0.3552	0
23	1.5195	2.2337	0
24	0.5111	2.2337	0
;Puntos correspondientes a la alfombra 2			
25	2.2168	0.6376	0
26	3.3289	0.6376	0
27	3.3289	w_2_RR-0.9881	0
28	2.2168	w_2_RR-0.9881	0
;Puntos correspondientes a la alfombra 3			
29	0.3226	w_2_RR-1.8535	0
30	2.0189	w_2_RR-1.8535	0
31	2.0189	w_2_RR-0.4750	0
32	0.3226	w_2_RR-0.4750	0
;Puntos correspondientes a la membrana 1 (128 Hz)			
901	0.5897	0.0975	0
911	0	0.6763	0
921	0.5897	0.0975	2.75
931	0	0.6763	2.75
;Puntos correspondientes a la membrana 2 (128 Hz)			
902	2.9593	0	0
912	3.554	0.6139	0
922	2.9593	0	2.75
932	3.554	0.6139	2.75
;Puntos correspondientes a la membrana 3 (128 Hz)			
904	0	3.5642	0
914	0.5941	4.1548	0
924	0	3.5642	2.75
934	0.5941	4.1548	2.75
;Puntos correspondientes a 2.5m2 de Kerakustik F25			
811	1.18	1.5	2.75
812	2.78	1.5	2.75
813	2.78	3.8	2.75
814	1.18	3.8	2.75
;=====SALA DE CONTROL=====			
;Puntos correspondientes al suelo de la RR			
05	0	w_1_RR	0
06	d_1_CR	w_2_RR	0
07	d_2_CR	w_2_RR+w_2_CR	0
08	0	w_1_RR+w_1_CR	0
;Puntos correspondientes a la puerta 2 de la CR			
106	d_1_CR	w_1_RR+1.06	0
107	d_2_CR	w_1_RR+1.06+w_1_D2	0
116	d_1_CR	w_1_RR+1.06	h_1_D2

117	d_2_CR	w_1_RR+1.06+w_1_D2	h_1_D2	
;Puntos correspondientes al techo de la CR				
15	0	w_1_RR	h_1_CR	
16	d_1_CR	w_2_RR	h_1_CR	
17	d_2_CR	w_2_RR+w_2_CR	h_1_CR	
18	0	w_1_RR+w_1_CR	h_1_CR	
;=====SALA DE CONTROL - Armario=====				
;Puntos correspondientes al armario				
201	w_3_D3	6.733	0	
202	w_3_D3+w_2_D3	6.742	0	
211	w_3_D3	6.733	h_1_D3	
212	w_3_D3+w_2_D3	6.742	h_1_D3	
;===SALA DE CONTROL - Elementos acústicos===				
;Puntos correspondientes a la membrana 1 (128 Hz)				
506	d_1_CR	w_2_RR+0.5942		0.76
516	d_1_CR	w_2_RR+0.5942		2.75
526	d_1_CR-0.5850	w_2_RR		2.75
536	d_1_CR-0.5850	w_2_RR		0.76
;Puntos correspondientes a la membrana 2 (128 Hz)				
507	d_2_CR-0.5942	w_2_RR+w_2_CR		0.76
517	d_2_CR-0.5942	w_2_RR+w_2_CR		2.75
527	d_2_CR	w_2_RR+w_2_CR-0.5850		2.75
537	d_2_CR	w_2_RR+w_2_CR-0.5850		0.76
;Puntos correspondientes al resonador de Helmholtz 1 (250 Hz)				
126	d_1_CR	w_2_RR		0.76
136	d_1_CR	w_2_RR+0.95		0
146	d_1_CR	w_2_RR+0.95		0.76
;Puntos correspondientes al resonador de Helmholtz 2 (250 Hz)				
127	d_2_CR	w_2_RR+w_2_CR		0.76
137	d_2_CR	w_2_RR+w_2_CR-0.57		0
147	d_2_CR	w_2_RR+w_2_CR-0.57		0.76
;=====SALA DE CONTROL - Estructura=====				
;Puntos correspondientes a los planos L				
;Estructura L_1				
41	0.1002	w_1_RR+0.8013	0	
42	0.4490	w_1_RR+0.2018	0	
52	0.4490	w_1_RR+0.2018	2.1320	
51	0.1002	w_1_RR+0.8013	1.7416	
;Estructura L_2				
43	0.6001	w_1_RR+0.3277	0	
53	0.6001	w_1_RR+0.3277	2.3012	
;Estructura L_3				
44	0.7909	w_1_RR	0	
54	0.7909	w_1_RR	2.3465	
;Estructura L_4				
45	1.1452	w_1_RR+0.2721	0	
55	1.1452	w_1_RR+0.2721	2.4308	
;Estructura L_5				
46	1.8614	w_1_RR	0	
56	1.8614	w_1_RR	2.6011	
;Puntos correspondientes a los planos R				
;Estructura R_1				
61	0.1002	w_1_RR+1.5817	0	
62	0.4458	w_1_RR+2.1850	0	
72	0.4458	w_1_RR+2.1850	2.1320	
71	0.1002	w_1_RR+1.5817	1.7416	

```

;Estructura R_2
    63    0.5969    w_1_RR+2.0632    0
    73    0.5969    w_1_RR+2.0632    2.3012
;Estructura R_3
    64    0.7845    w_1_RR+2.365    0
    74    0.7845    w_1_RR+2.365    2.3465
;Estructura R_4
    65    1.1420    w_1_RR+2.1337    0
    75    1.1420    w_1_RR+2.1337    2.4308
;Estructura R_5
    66    1.8581    w_1_RR+2.3979    0
    76    1.8581    w_1_RR+2.3979    2.6011

PLANES
;=====SALA DE GRABACIÓN=====
; Planos correspondientes a la RR
    [1_RR / 01 02 03 04 /
        (alfombra_1RR/ 21 22 23 24 / ALFOMBRA_1)
        (alfombra_2RR/ 25 26 27 28 / ALFOMBRA_1)
        (alfombra_3RR/ 29 30 31 32 / ALFOMBRA_1)
        (suelo_RR / 01 02 03 04 / PARQUET) ;Se cambia SUELO_BALDOSA por PARQUET
    ]
    [2_RR \ 11 12 13 14 \
        (hera1_RR \ 811 812 813 814\ HERAKUSTIK_F25)
        (techo_RR \ 11 12 13 14 \ YESO_1) ;Se cambia TECHO_YESO por YESO_1
    ]
    [3_RR \ 01 02 12 11 \
        (membrana_1RR/ 901 921 931 911 / MEMBRANA_250HZ)
        (membrana_2RR\ 902 922 932 912 \ MEMBRANA_125HZ)
        (pared1_RR \ 01 02 12 11 \ YESO_DOBLE) ;Se cambia PARED_YESO por YESO_DOBLE
    ]
    [4_RR \ 02 03 13 12 \
        (puerta1_RR / 102 103 113 112 / PUERTA_MADERA)
        (pared2_RR \ 02 03 13 12 \ LADRILLO_VISTO) ;Se cambia PARED_YESO por LADRILLO_VISTO
    ]
    [5_RR \ 03 04 14 13 \
        (membrana_3RR / 904 924 934 914 / MEMBRANA_250HZ)
        (pared3_RR \ 03 04 14 13 \ LAMBRIZ_1) ;Se cambia PARED_YESO por LAMBRIZ_1
    ]
    [6_RR / 01 04 14 11 /
        (ventana1_RR / 101 104 114 111 / VENTANA_VIDRIO)
        (pared4_RR / 01 04 14 11 / YESO_DOBLE) ;Se cambia PARED_YESO por YESO_DOBLE
    ]

;=====SALA DE CONTROL=====
; Planos correspondientes a la CR
    [11_CR suelo_CR / 05 06 07 08 / MOQUETA ] ;Se cambia SUELO_BALDOSA por MOQUETA
    [12_CR techo_CR \ 15 16 17 18 \ TECHO_YESO ]
    [13_CR pared1_CR \ 05 06 16 15 \ PARED_YESO]
    [14_CR \ 06 07 17 16 \
        (membrana_1CR/ 506 516 526 536 / MEMBRANA_128HZ)
        (membrana_2CR\ 507 537 527 517 \ MEMBRANA_128HZ)
        (helmholtz_1CR\ 06 126 146 136 \ HELMHOLTZ_250HZ)
        (helmholtz_2CR\ 137 147 127 07\ HELMHOLTZ_250HZ)
        (puerta2_CR \ 106 107 117 116 \ PUERTA_MADERA)
        (pared2_CR \ 06 07 17 16 \ PARED_YESO)
    ]
    [15_CR / 08 07 17 18 /
        (armario1_CR / 201 202 212 211 / PUERTA_MADERA)
        (pared3_CR / 08 07 17 18 / PARED_YESO)
    ]
    [16_CR pared4_CR / 05 08 18 15 / PARED_YESO ]

```

```

;Planos correspondientes a la estructura
; [41_CR planoL1 \ 41 42 52 51 \ MADERA_ESTRUCTU ]
; [42_CR planoL2 \ 42 43 53 52 \ MATERIAL_1_ABS ]
; [43_CR planoL3 \ 43 44 54 53 \ MADERA_ESTRUCTU ]
; [44_CR planoL4 \ 44 45 55 54 \ MATERIAL_1_ABS ]
; [45_CR planoL5 \ 45 46 56 55 \ MADERA_ESTRUCTU ]
; [51_CR planoR1 / 61 62 72 71 / MADERA_ESTRUCTU ]
; [52_CR planoR2 / 62 63 73 72 / MATERIAL_1_ABS ]
; [53_CR planoR3 / 63 64 74 73 / MADERA_ESTRUCTU ]
; [54_CR planoR4 / 64 65 75 74 / MATERIAL_1_ABS ]
; [55_CR planoR5 / 65 66 76 75 / MADERA_ESTRUCTU ]
;
;Planos correspondientes a la concha
; [71_CR planoC1 / 41 61 71 51 / MADERA_ESTRUCTU ]
; [72_CR planoC2 \ 51 52 72 71 \ MADERA_ESTRUCTU ]
; [73_CR planoC3 \ 52 53 73 72 \ MADERA_ESTRUCTU ]
; [74_CR planoC4 \ 53 54 74 73 \ MADERA_ESTRUCTU ]
; [75_CR planoC5 \ 54 55 75 74 \ MADERA_ESTRUCTU ]
; [76_CR planoC6 \ 55 56 76 75 \ LAMBRIZ_1 ] ;Se cambia PUERTA_MADERA por LAMBRIZ_1
; [77_CR planoC7 \ 56 16 17 76 \ LAMBRIZ_1 ] ;Se cambia PUERTA_MADERA por LAMBRIZ_1
    
```

Figura 9.10a – Definición de los planos correspondientes al estudio (archivo MASTER.GEO).

```

; Proyecto Final de Carrera
; Realizado por: Abel Soler Calatayud
; I.T. Telecomunicaciones en imagen y sonido esp. Acústica
; Fecha : 24-02-2013
; Definición de la fuente

SOURCEDEFS

    A3 0.6 3.9 0.25 OMNI aim(135,-45)
    Lp1m_a = Lp_pink 90 ;90db at 1kHz

    A4 2.42 3.13 0.25 OMNI aim(-135,-45)
    Lp1m_a = Lp_pink 90 ;90db at 1kHz

    A5 0.54 4.83 0.25 OMNI aim(45,-45)
    Lp1m_a = Lp_pink 90 ;90db at 1kHz

    A6 0.54 6.12 0.25 OMNI aim(135,-45)
    Lp1m_a = Lp_pink 90 ;90db at 1kHz
    
```

Figura 9.10b – Definición de las fuentes del estudio (archivo src.loc).

```

; Proyecto Final de Carrera
; Realizado por: Abel Soler Calatayud
; I.T. Telecomunicaciones en imagen y sonido esp. Acústica
; Fecha : 24-02-2013
; Definición del receptor

RECEIVERS

    1 1.23 1.07 1.5 0.33 0.25 1.50 ;1_1
    3 2.49 1.06 1.5 3.18 0.50 1.50 ;2_1
    5 2.47 3.25 1.5 0.41 4.11 1.50 ;3_1
    6 1.81 1.34 1.5 0.41 4.11 1.50 ;3_2
    7 1.68 2.29 1.5 2.42 3.13 1.50 ;4_1
    8 1.32 5.64 1.5 0.54 4.83 1.50 ;5_1
    9 1.57 5.42 1.5 0.34 6.12 1.50 ;6_1
    10 2.38 5.69 1.5 3.01 4.86 1.50 ;7_1
    11 1.95 5.25 1.5 3.37 6.17 1.50 ;8_1
    
```

Figura 9.10c – Definición de los receptores del estudio (archivo rec.loc).