



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Gandia

Estudio acústico y propuesta de mejora de estudio de
grabación en Xirivella, Valencia.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación, Sonido e
Imagen

AUTOR/A: Martí Beltrán, Salvador

Tutor/a: Alba Fernández, Jesús

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR DE GANDIA

GRAU EN ING. SIST. DE TELECOM., SO I IMATGE



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Estudio acústico y propuesta de mejora de estudio de grabación en Xirivella (Valencia)”

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor:
Salvador Martí Beltrán

Tutor:
Jesús Alba Fernández

GANDIA, 2023

Contenido

1. Introducción
 - 1.1 Descripción del proyecto
 - 1.2 Objetivos
2. Fundamentos teóricos y normativa
 - 2.1 Fundamentos teóricos
 - 2.1.1 Acondicionamiento acústico
 - 2.1.2 Modos propios, acústica ondulatoria
 - 2.1.3 Reverberación, acústica estadística.
 - 2.1.4 Absorción
 - 2.1.5 Difusión
 - 2.1.6 Parámetros de calidad acústicos
 - 2.2 Normativa
 - 2.2.1 ISO 3382-1:2009
3. Descripción de las salas
 - 3.1 Sala de control
 - 3.2 Sala de grabación
4. Medidas In-Situ
 - 4.1 Equipo empleado
 - 4.1.1 Equipamiento empleado para la obtención de la respuesta al impulso mediante barrido sinusoidal.
 - 4.1.2 Equipamiento empleado para la obtención del TR mediante el método de fuente ininterrumpida
 - 4.2 Metodología y procedimiento de medición
 - 4.2.1 Procedimiento sala de control
 - 4.2.2 Procedimiento sala de grabación
 - 4.3 Resultados
 - 4.3.1 Tiempo de reverberación sala de control
 - 4.3.2 Tiempo de reverberación sala de grabación
 - 4.3.3 Resto de parámetros obtenidos con el método de la respuesta al impulso en la sala de control
 - 4.3.4 Resto de parámetros obtenidos con el método de la respuesta al impulso en la sala de grabación
 - 4.4 Análisis de los resultados de las mediciones In Situ
 - 4.4.1 Sala de control
 - 4.4.2 Sala de grabación

5. Simulación acústica del modelo 3D

5.1 Introducción a CATT-Acoustic

5.2 Modelado 3D

5.3 Coeficientes de absorción, dispersión y ajuste de la normal de los planos.

5.4 Simulación en CATT-Acoustic

5.4.1 Resultados simulación sala de grabación, propuestas de mejora.

5.4.2 Resultados simulación sala de control, propuestas de mejora.

6. Conclusiones y futuras líneas

7 Referencias

Resumen.

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la situación acústica actual de un estudio de grabación, ubicado en Xirivella (Valencia) y proponer en caso necesario medidas correctoras o posibles mejoras para el mismo. Para ello se modelarán en CATT-Acoustic tanto la sala de control como la sala de grabación. Seguidamente se efectuarán mediciones In-Situ del tiempo de reverberación, así como de otros parámetros de interés. Las mediciones In-Situ, además de determinar la situación actual de las salas, permitirá validar los modelos generados para ambas salas y en consecuencia las predicciones acústicas obtenidas con CATT. En caso necesario se propondrán mejoras que podrán ser simuladas modificando los modelos y verificar y ajustar su idoneidad antes de instalarse.

Palabras clave.

Acústica de salas, Sala de control, Sala de Grabación, Estudio de grabación, Tiempo de reverberación, Parámetros acústicos, Simulación acústica, Acondicionamiento acústico

Abstract.

The aim of this work is to study the current acoustic situation of a recording studio, located in Xirivella (Valencia) and to propose, if necessary, corrective measures or possible improvements for it. To do this, both the control room and the recording room will be modeled in CATT Acoustic, followed by In-Situ measurements of the reverberation time as well as other parameters of interest. In-Situ measurements, in addition to determining the current situation of the rooms, will allow validating the models generated for both rooms and consequently the acoustic predictions obtained with CATT Acoustic. If necessary, improvements will be proposed that can be simulated by modifying the models and verifying and adjusting their suitability before being installed.

Key words.

Room Acoustics, Control Room, Recording Room, Recording Studio, Reverberation Time, Acoustic Parameters, Acoustic Simulation, Acoustic Conditioning.

1.INTRODUCCIÓN

En el siguiente Trabajo Final de Grado se estudian las características acústicas de un estudio de grabación, con la finalidad de determinar si son adecuadas para el uso de sus dos salas.

Su principal actividad es la de producción musical, grabándose en él diversidad de estilos musicales, empleándose tanto instrumentos amplificados como acústicos. En algunas ocasiones las grabaciones son en directo, con toda la banda interpretando al mismo tiempo, mientras que en otras la grabación es secuencial, grabándose en cada momento un instrumento determinado.

Consta de dos estancias, una sala de control donde se mezclan y masterizan los trabajos, y donde se encuentra la mesa de mezclas, los monitores, el *patch panel* de interconexión y el principal equipamiento *outboard* del estudio. La otra estancia es la sala de grabación, de mayor tamaño y donde se encuentra el *backline*, batería, teclados, amplificadores. En esta sala es donde los músicos interpretan y donde se sitúan los micrófonos de captación sonora.

El estudio se encuentra en la localidad de Xirivella, Valencia y está en funcionamiento en la actualidad.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El proyecto estudia las características acústicas actuales de la sala de control y de la sala de grabación del estudio.

Para ello se llevarán a cabo mediciones In-Situ empleándose las recomendaciones de la norma UNE EN-ISO 3282-1: 2010: *Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos*. [1]. Con estas mediciones se caracterizará el estado actual de las salas analizadas.

Paralelamente se crean modelos 3D de ambas salas en AutoCAD que se simulan en CATT-Acoustic. La simulación trata de ser lo más fiel posible a la situación de los espacios reales. Para ello se introduce en el software información de la absorción de los paramentos y elementos presentes.

Las mediciones In-Situ además de servir para conocer el estado acústico actual de los espacios, nos sirven para validar los modelos 3D creados y los resultados obtenidos con el software de simulación.

Una vez validados los modelos, se verificará con los resultados obtenidos de las mediciones In-Situ si es necesario aplicar en alguna de las salas alguna medida correctora, o alguna mejora. Para ello se analizará la idoneidad de dicha mejora en el software de simulación, optimizándose al máximo la misma.

1.2 OBJETIVOS

El principal objetivo es determinar la situación acústica actual de las salas mediante parámetros acústicos adecuados y poder estudiar la necesidad de llevar a cabo modificaciones o mejoras en las condiciones acústicas de las mismas.

Para ello se deben cumplir los siguientes objetivos.

- Modelado de las salas en 3D, para su simulación mediante el software acústico CATT-Acoustic.
- Mediciones In-situ de ambas salas que determinen la situación actual y que validen el modelo 3D y la simulación acústica obtenida mediante el software CATT-Acoustic.
- Análisis de los resultados obtenidos mediante las mediciones In-Situ, en busca de posibles mejoras, así como la subsanación de posibles defectos detectados en la acústica de las salas.
- En caso necesario, determinación y análisis de las mejoras a aplicar. Optimizando las mismas incluyéndolas en el modelo 3D y ajustando las mismas hasta obtener los resultados deseados.

Debido a que el estudio de grabación está ya construido y únicamente se pueden modificar elementos que afecten al acondicionamiento acústico del mismo, se excluyen del siguiente trabajo aspectos relacionados con el aislamiento acústico.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y NORMATIVA

2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1.1 ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO

El acondicionamiento acústico persigue mejorar la calidad acústica en el interior de un recinto y adaptar la misma al uso que esté destinado. Se va a estudiar el acondicionamiento acústico desde el punto de vista de la aplicación del mismo a estudios de grabación, tratándose los principales aspectos del mismo desde esta perspectiva.

Los estudios de grabación requieren de un alto grado de aislamiento acústico, este es un requerimiento imprescindible, un pobre aislamiento acústico puede incapacitar el correcto funcionamiento del mismo debido a la intromisión de ruido en los procesos de grabación, mezcla o masterización.

El principal inconveniente de construir una sala con un alto grado de aislamiento acústico es que también se construye una sala en que se produce un alto grado de concentración de energía que tienden a aproximarla a una cámara reverberante. Del mismo modo que se impide que la energía acceda desde el exterior, en el interior de la sala se produce un alto grado de concentración de energía, principalmente a bajas frecuencias.

Por tanto, la obtención de un alto grado de aislamiento acústico complica el trabajo de acondicionamiento acústico dentro de las salas [1].

2.1.2 MODOS PROPIOS, ACÚSTICA ONDULATORIA

Cuando una onda sonora es emitida en una sala, esta se expande hasta que encuentra una superficie reflectante, en principio si suponemos la sala vacía, hasta que encuentra uno de los cerramientos de la sala.

La onda se refleja al encontrar dicha superficie y sigue reflejándose al alcanzar otros cerramientos. Si los cerramientos no fueran absorbentes, la propagación de la onda ocurriría indefinidamente. En cierta medida los cerramientos son absorbentes, por tanto, la onda sonora va decreciendo en el tiempo debido a la absorción sufrida en cada colisión con los límites de la sala.

Cuando se produce una colisión con un cerramiento, la fase de la señal no cambia. Así que la fase de una señal puede determinarse fácilmente conociendo dos datos, la distancia de la fuente al cerramiento y la frecuencia de la onda. Del mismo modo se puede determinar la fase de una señal en cualquier punto, tras varias reflexiones, conociendo la distancia total recorrida. Cuando esa distancia corresponde a un número entero de ciclos, entonces ambas ondas estarían en fase.

Si suponemos el caso de dos cerramientos paralelos, una onda reflejaría en el primero y retornaría al paralelo y así repetidamente. Si la distancia entre los cerramientos es tal que contribuye con una distancia total en la propagación de la onda, igual a un número entero de longitudes de ondas, para esa frecuencia, entonces la onda reflejada estará en fase con la incidente, y ambas se sumarán y por tanto se reforzarán.

En este caso tenemos una resonancia de la sala.

Si imaginamos una fuente que emite un determinado ancho de banda durante un corto periodo de tiempo, únicamente los caminos recorridos en los que la onda se suma en fase para cada frecuencia, corresponderán con resonancias de la sala.

Dichos caminos resonantes, en conjunto, son los modos resonantes de la sala, o modos propios. Son aquellas frecuencias que resuenan, que la sala refuerza y perduran más en el tiempo, y dependen exclusivamente de la geometría de la misma.

Remarcar que la percepción de las resonancias o modos propios, no es uniforme en el espacio. De hecho es posible detectar zonas donde se produce refuerzo, suma en fase o en desfase, auditivamente.

En una sala se producen tres tipos de modos propios. Modos axiales que se generan entre dos paredes; modos tangenciales producidos entre cuatro paredes y modos oblicuos que requieren de todos los cerramientos, es decir las 6 paredes.

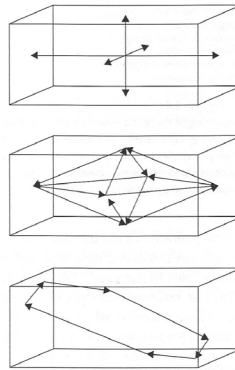


Figura 1 Modos axiales, tangenciales y oblicuos, [1]

La frecuencia de resonancia más baja de una sala siempre será un modo axial y se producirá entre las dos paredes paralelas más separadas de la sala.

La siguiente ecuación nos da las frecuencias de todos los posibles modos en una sala cuadrada.

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

Ecuación 1 Ecuación de Rayleigh para la obtención de modos propios

c_0 es la velocidad del sonido en el aire, l_x, l_y, l_z , son las dimensiones de la sala (largo, ancho y alto) y n_x, n_y, n_z , son valores enteros que determinan el orden del modo a calcular [14].

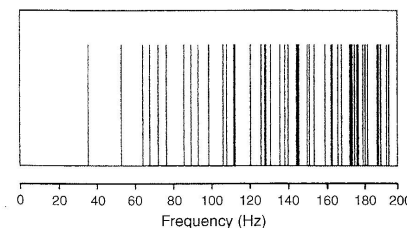


Figura 2 Distribución de los primeros 51 Modos propios, [1]

En la Figura 1 se observa la distribución de los 51 primeros modos propios de una sala de 4,7 m x 3,2m x 2,5m. El número de modos propios por ancho de banda aumenta considerablemente conforme aumenta la frecuencia. Esto implica que conforme aumenta la frecuencia los modos propios se juntan tanto que son difíciles de percibir individualmente, y se perciben como un aumento de potencia. Mientras que a baja frecuencia se encuentran muy espaciados y son fácilmente perceptibles, causando una respuesta en frecuencia no homogénea.

El problema generado por las resonancias es dependiente del tamaño de la sala. Salas más pequeñas generan la primera resonancia a mayor frecuencia, por tanto, en bajas frecuencias los modos están más espaciados que en salas mucho más grandes, que generan su primera resonancia a una frecuencia mucho menor y a bajas frecuencias ya cuentan con muchos modos, de manera que están próximos y no son perceptibles individualmente [15].

También destacar que la distribución espacial de modos propios en la sala depende por tanto de la posición de la fuente en la misma.

Para intentar reducir las resonancias axiales, que son las de mayor nivel. Las paredes de las salas de control y grabación de los estudios suelen ser no paralelas. Por otro lado, en ese tipo de salas el cálculo de los modos propios tiende a ser demasiado complejo y no se puede emplear la fórmula de Rayleigh.

Otra ventaja de emplear paredes no paralelas, es que se minimiza el efecto de eco flotante o *Flutter*, que es cuando una onda sonora queda atrapada entre dos paredes paralelas muy reflectantes, rebotando y produciendo un eco en medias y altas frecuencias.

2.1.3 REVERBERACIÓN, ACÚSTICA ESTADÍSTICA

Para el estudio de la reverberación de una sala, se asume el hipotético caso de que se ha generado un campo difuso en la misma. Esto significa que un determinado volumen en cualquier posición de la sala contiene la misma energía total.

El tiempo de reverberación de una sala es el tiempo que tarda en decaer la energía sonora en la misma y depende de la absorción de las superficies de la sala y de la distancia entre impactos con dichas superficies.

Existen infinidad de ecuaciones para determinar el tiempo de reverberación, siendo la más antigua y ampliamente utilizada en la actualidad la fórmula de Sabine, representada por la siguiente ecuación.

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

Ecuación 2 Ecuación de Sabine, [14]

Donde V es el volumen de la sala y A el área de absorción equivalente. El área de absorción equivalente se obtiene mediante la siguiente expresión.

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

Ecuación 3 Área de absorción equivalente

Que es la superficie equivalente de absorción total obtenida a partir de diferentes superficies con diferentes coeficientes de absorción.

Como se ha indicado anteriormente el TR , mide el tiempo que tarda en decaer la energía sonora. En concreto el tiempo que tarda en decaer 60 dB , por ello se determina como TR_{60} .

Habitualmente, en situaciones donde encontramos ruido de fondo elevado, para facilitar la medición, se puede calcular el TR_{30} , o el TR_{20} , a partir de la caída de los 30 dB o de los 20 dB en cada caso y extrapolando a 60 dB.

El TR , se suele obtener en bandas de octava o de tercio de octava, si queremos obtener el TR_{med} , se suele obtener a partir de la media del tiempo de reverberación de las bandas de 500 Hz y 1kHz [5].

$$TR_{mid} = \frac{TR_{500} + TR_{1000}}{2} [s]$$

Ecuación 4 Tiempo de reverberación medio

La fórmula de Sabine es adecuada para salas con baja absorción, a medida que la absorción aumenta la fórmula se vuelve menos exacta, en concreto con absorciones α superiores a 0.3.

En las salas de control de los estudios de grabación la absorción es muy elevada, para estos casos el TR_{60} es entendido como el *tiempo de caída*, ya que en estos casos es imposible conseguir los supuestos de campo difuso, en ese entorno tan absorbente el decaimiento se produce tras una corta serie de reflexiones.

2.1.4 ABSORCIÓN

La absorción sonora constituye el principal factor de control en la acústica de salas.

El coeficiente de absorción sonora representa la proporción de energía acústica que no es reflejada cuando una onda acústica incide sobre un determinado material, o sistema constructivo.

Algunos materiales absorbentes actúan sobre la velocidad de la onda acústica, por ello deben estar espaciados de los límites rígidos de los cerramientos ya que ahí la velocidad es nula. Otros actúan sobre la componente de presión de la onda acústica, en este caso deben situarse justo en el cerramiento mismo, donde la presión es máxima y obtienen en este caso máxima eficiencia [2]. La absorción de los materiales es dependiente de la frecuencia, de modo que la misma se expresa en tablas en que se indica el coeficiente de absorción para cada banda de interés. El máximo de absorción es 1.

Existen diversos tipos de absorbentes, de tipo poroso, resonadores, de membrana, absorbentes activos.

- ABSORBENTES POROSOS.

Materiales blandos, así como fibrosos, son ejemplos de absorbentes porosos. Como por ejemplo alfombras, cortinas, placas de lana de roca, paneles de fibra de coco, o de fibras leñosas.

Funcionan por rozamiento, disipando la energía absorbida en forma de calor. Absorben mejor en media y alta frecuencia.

Son poco eficientes en baja frecuencia, ya que la velocidad de las partículas de aire en el interior del material debe ser alta. Como el material se sitúa sobre la superficie de un cerramiento, debe tener mucho espesor para capturar las partículas de aire con cierta velocidad ya que la velocidad justo en el cerramiento es nula.

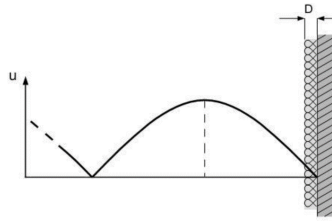


Figura 3 Velocidad de las partículas en relación a la posición de un material absorbente poroso, pegado al cerramiento [2]

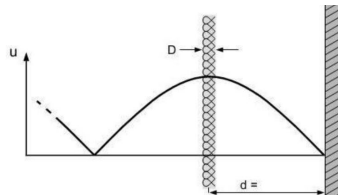


Figura 4 Velocidad de las partículas en relación a la posición de un material absorbente poroso, $d=\lambda/4$ [2]

Como puede comprobarse en la *Figura 4*, el material debe tener un espesor de al menos $\lambda/4$ la frecuencia de la onda que queremos absorber. En ese punto la velocidad de la onda es máxima y también la eficiencia del material.

Esto implica que en baja frecuencia se requiere de grandes espesores para conseguir una absorción efectiva.

También es posible mejorar el rendimiento separando los materiales de la pared.

- ABSORBENTES RESONADORES.

Los resonadores funcionan mucho mejor en el rango de la baja frecuencia, en concreto en el rango inferior a 500 HZ. Además, funcionan de forma muy eficiente en la frecuencia a la que se sintonizan.

Convierten la energía de la onda de presión en energía mecánica y energía térmica.

Los resonadores funcionan mejor cuando están situados en el propio cerramiento, junto a la superficie rígida, ya que actúan donde la presión es máxima y lo es en ese punto.

Los resonadores se dividen resonadores de membrana y de Helmholtz, ambos casos funcionan por el sistema masa-muelle.

Los resonadores de membrana cuentan con un panel o membrana oscilante que entra en resonancia a la frecuencia en que se sintoniza. La frecuencia de resonancia es también la frecuencia a que se consigue una mayor absorción sonora.

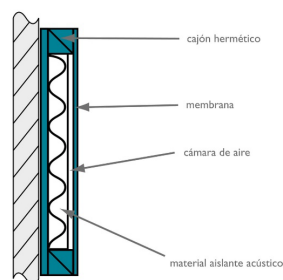


Figura 5 Resonador de membrana, [3]

Los resonadores tipo Helmholtz están formados por una cavidad de aire que conecta con la sala únicamente mediante un orificio estrecho. El aire del orificio actúa como masa y el de la cavidad como resorte. Estos resonadores también se sintonizan a una determinada frecuencia. Los resonadores de Helmholtz pueden ser de cavidad simple o múltiple, tipo panel perforado.

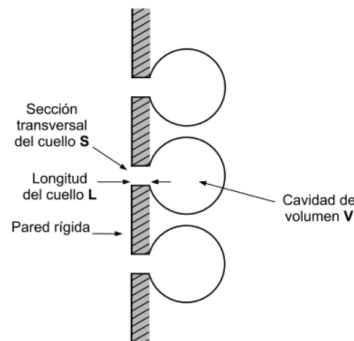


Figura 6 Resonador múltiple tipo Helmholtz, [2]

2.1.5 DIFUSIÓN

La difusión persigue el fin de evitar que el sonido se focalice en determinados puntos. Para ello, evitando las reflexiones especulares se pretende distribuir la onda incidente sobre un área mucho mayor.

Los difusores, para ser efectivos, deben tener una profundidad de en torno a $\lambda/4$. Siendo λ la longitud de onda sobre que actuar. Para evitar emplear difusores de tan gran tamaño, Schroeder y D'Antonio propusieron difusores de menor tamaño basados en secuencias matemáticas [16].

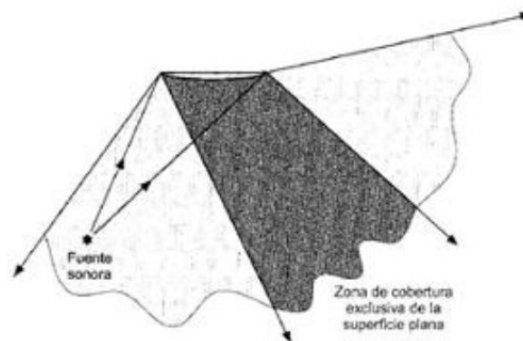


Figura 7 Zonas de cobertura de reflexión asociadas a una superficie plana y a un difusor convexo poli cilíndrico, [4]



Figura 8 Elemento difusor poli cilíndrico, [4]

En la figura 7, se muestra un difusor poli cilíndrico, siendo este de los de diseño más sencillo. Seguidamente se muestra un difusor basado en secuencia matemática, en concreto un difusor tipo QRD.



Figura 9 Elemento difusor poli cilíndrico, [3]

2.1.6 PARÁMETROS DE CALIDAD ACÚSTICOS

Para definir las características acústicas de un recinto y poder evaluar su idoneidad para un determinado uso, se han definido parámetros acústicos que miden y analizan diversos aspectos de la acústica de salas. El valor aconsejable para estos parámetros depende del uso a que se destine el recinto, música, palabra, uso polivalente, etc.

-TIEMPO DE REVERBERACIÓN T_{60} (T_{10}, T_{20}, T_{30})

Es el tiempo que transcurre desde que una fuente sonora genera un nivel estacionario y deja de sonar, hasta que el nivel de presión sonora decae 60 dB.

Este tiempo de reverberación, puede estimarse a partir de otras caídas como en el caso del T_{10}, T_{20} y T_{30} , en que se calcula el tiempo en que se produce la caída desde que cae 5 dB hasta que cae 15, 25 y 35 dB respectivamente, multiplicando ese tiempo por 6 para el T_{10} , por 3 para el T_{20} y por 2 para el T_{30} .

- BRILLO (Br)

Mide la riqueza de altas frecuencias de la sala. Para ello calcula la relación entre el Tiempo de Reverberación de las frecuencias altas (2 y 4 kHz) y el de las frecuencias medias (500 y 1 kHz).

$$Br = \frac{TR_{2000Hz} + TR_{4000Hz}}{TR_{500Hz} + TR_{1000Hz}}$$

Ecuación 5 Brillo [15].

-CALIDEZ ACÚSTICA (BR)

Mide la riqueza de las bajas frecuencias en una sala, para ello obtiene el cociente entre el TR de las bajas frecuencias (125 y 250 Hz) y el TR de las frecuencias centrales TR (500 y 1000 Hz).

$$BR = \frac{TR_{125Hz} + TR_{250Hz}}{TR_{500Hz} + TR_{1000Hz}}$$

Ecuación 6 Calidez Acústica [15].

- CLARIDAD (C_{80} , C_{50})

Analiza la cantidad de energía sonora inmediata que se produce en un tiempo inicial, respecto de la energía tardía que se produce después de ese tiempo inicial. Cuando el tiempo inicial es de 50ms se analiza la claridad de la voz, si el tiempo inicial es de 80ms, se analiza la claridad musical C_{80} . Cuando mayor es el valor de la claridad, mayor es la cantidad de energía producida en el instante inicial.

$$C_{80} = \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt}$$

Ecuación 7 Claridad C_{80} .

$$C_{50} = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t) dt}$$

Ecuación 8 Claridad C_{50} [15].

- EARLY DECAY TIME (EDT)

Es el tiempo que tarda la presión sonora de un recinto en caer 10 dB desde que la fuente sonora deja de emitir, multiplicado por 6.

Es un parámetro muy relacionado con TR, con la salvedad de que el EDT mide la reverberación percibida (subjetiva) y TR la reverberación real (objetiva). Por este motivo, para determinar el grado de viveza de una sala es más fiable guiarse por el valor de EDT. No obstante, las salas con una geometría regular y una distribución homogénea de los materiales absorbentes se caracterizarán por una difusión uniforme del sonido. En consecuencia, la curva de decaimiento energético presentará una única pendiente, que devolverá valores de EDT y TR coincidentes [1].

- FRACCIÓN LATERAL

$$LF = \frac{\int_5^{80ms} h^2(t) \cos^2 \theta dt}{\int_{0ms}^{80ms} h^2(t) dt}$$

Cuantifica la proporción de energía sonora que llega a los oyentes a través de reflexiones laterales en comparación con la energía directa proveniente de la fuente sonora principal.

La fracción lateral se calcula dividiendo la energía sonora que llega a los oyentes a través de las reflexiones laterales por la suma de la energía directa más la energía de las reflexiones laterales. Este cálculo proporciona una idea de cuánto del sonido percibido proviene de las reflexiones laterales en comparación con el sonido directo [11].

2.2 NORMATIVA

Seguidamente se efectúa una breve síntesis de las normativas que se han empleado para la obtención de las mediciones in-situ. Con estas mediciones se pretende determinar los parámetros acústicos que caractericen la sala y al mismo tiempo validar el modelo 3D de las salas en la simulación de CATT-Acoustic.

La norma seguida para la medición de parámetros acústicos en recintos es, la ISO 3382-1.

-ISO 3382-1:2010

La norma ISO 3382, establece un método para la obtención de los tiempos de reverberación y de otros parámetros acústicos a partir de respuestas impulsivas y mediante ruido interrumpido. También se presentan los conceptos y los detalles de los procedimientos de medición, así como de la instrumentación necesaria para la realización de las mediciones.

-Instrumentación necesaria:

- **Fuente acústica.** El altavoz ha de ser altamente omnidireccional y capaz de producir un nivel de presión sonora suficiente para que se generen las curvas de decrecimiento adecuadas para poder medir las caídas sin contaminación por ruido de fondo. Se requiere al menos de una fuente capaz de situarse al menos 45 dB por encima del nivel de ruido de fondo.
- **Micrófono.** Omnidireccional, de pequeño diafragma, cumpliendo la norma IEC 60651.
- **Filtros.** De octava o de tercio de octava, siguiendo la norma IEC 61260.
- **Sonómetro.** El sonómetro debe ser tipo1, siguiendo las especificaciones de la norma IEC 61672-1.

-Metodología de medición.

Entre las posiciones de medición deben dejarse en torno a 2 m, aproximadamente $\lambda/2$ para una frecuencia de 80Hz.

El micrófono debe situarse a más de 1 m del cerramiento más próximo, $\lambda/4$ para una frecuencia de 80Hz.

Se debe evitar tomar mediciones demasiado próximas a la fuente sonora omnidireccional, para evitar excesiva influencia del campo directo generado por la misma.

Es necesario utilizar al menos dos posiciones de fuente. La posición debe ser de 1,5m.

El micrófono de medición debe situarse a 1,2 m de altura, que es la altura de escucha aproximada de un oyente sentado.

En el informe de resultados, se debe hacer constancia del estado de ocupación del recinto, así como de las condiciones de humedad y temperatura ambiente.

Para la medición de los parámetros acústicos, la norma determina dos técnicas diferentes de medición. El método de ruido interrumpido y el método de respuesta impulsiva integrada.

La fuente empleada para la realización de las mediciones debe ser lo más omnidireccional posible y debe producir un nivel de presión acústica suficiente para generar curvas de decrecimiento con el rango dinámico mínimo requerido sin contaminación por ruido de fondo.

El micrófono del mismo modo debe ser omnidireccional.

- **Método de ruido interrumpido.**

Se utiliza una señal procedente de ruido eléctrico, de banda ancha aleatoria, o pseudoaleatoria tipo ruido rosa. Con una relación señal ruido que alcance los 35 dB en toda la banda frecuencial bajo análisis, para poder medir el T_{20} correctamente sin contaminación por parte del ruido de fondo. La fuente y el amplificador han de ser suficientemente potentes, como para poder excitar toda la sala, la duración antes de detener la fuente sonora ha de ser suficiente para que llegue el campo acústico a toda la sala. Por este motivo se ha de dejar en funcionamiento la fuente un tiempo no inferior al tiempo de reverberación.

Se debe realizar un promedio de todas las medidas realizadas, las medidas se efectúan con diferentes posiciones de micrófono y de fuente con el fin de obtener un promediado espacial representativo del recinto.

- **Método de la respuesta al impulso.**

La respuesta al impulso puede obtenerse utilizándose una fuente impulsiva con un espectro suficientemente amplio capaz de excitar todas las bandas de frecuencia bajo análisis. Como por ejemplo un disparo. También se pueden emplear señales acústicas especiales que permitan generar la respuesta impulsiva tras el procesamiento de la señal captada por el micrófono. Ejemplos de ello, son los barridos sinusoidales o los ruidos pseudo-aleatorios de longitud máxima MLS.

En el caso del barrido sinusoidal exponencial, las ecuaciones que definen esta señal son las siguientes, donde $g(t)$ es una señal sinusoidal con fase $\phi(t)$, que es variable con el tiempo con la siguiente ecuación.

$$g(t) = \sin(2\pi\phi(t))$$

Ecuación 9 Barrido sinusoidal

La fase cuenta con la siguiente expresión.

$$\phi(t) = \frac{f_1 T}{\ln\left(\frac{f_2}{f_1}\right)} * \left[e^{\frac{t}{T} * \ln\left(\frac{f_2}{f_1}\right)} - 1 \right]$$

Ecuación 10 Fase del barrido sinusoidal

Donde f_1 y f_2 son la frecuencia inicial y final del barrido sinusoidal.

3 DESCRIPCIÓN DE LAS SALAS

El estudio de grabación que se analiza se encuentra en el municipio de Xirivella, Valencia. En concreto en un polígono industrial a las afueras de la población. El estudio es parte de una nave industrial, compartiendo la misma con locales de ensayo. El estudio únicamente colinda con un local de ensayo, encontrándose el resto a distancia.



Figura 10 Imagen exterior de la nave donde se sitúa el estudio de grabación.

Los niveles de inmisión producidos por los locales de ensayo en el interior del estudio son mínimos e imperceptibles. Sus cerramientos se diseñaron con un alto índice de aislamiento acústico, con el fin de evitar que el ruido producido por los mismos pudiera afectar a la del estudio.

El estudio se divide en dos estancias, una sala de control y una sala de grabación. Se accede al mismo por la sala de control, la sala de control está comunicada con la de grabación a través de una puerta, también se encuentran comunicadas por una ventana con doble cristal y cámara de aire.



Figura 11 Sala de control, donde se aprecia la ventana que la comunica con la sala de grabación y la puerta que permite el acceso.

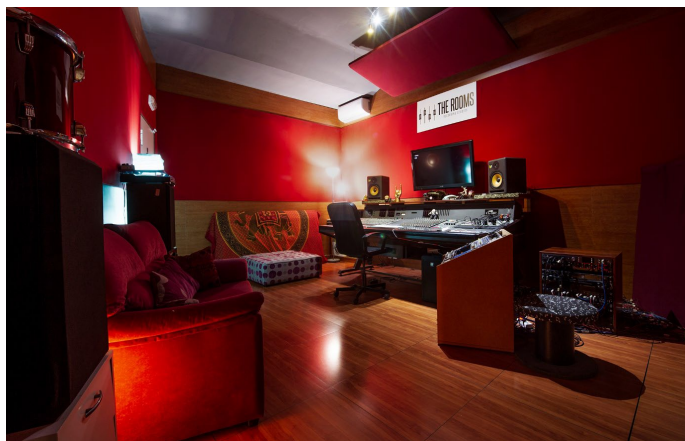


Figura 12 Imagen desde el ángulo inverso, tomada desde la puerta que comunica ambas salas.

Seguidamente se muestra la sala de grabación.

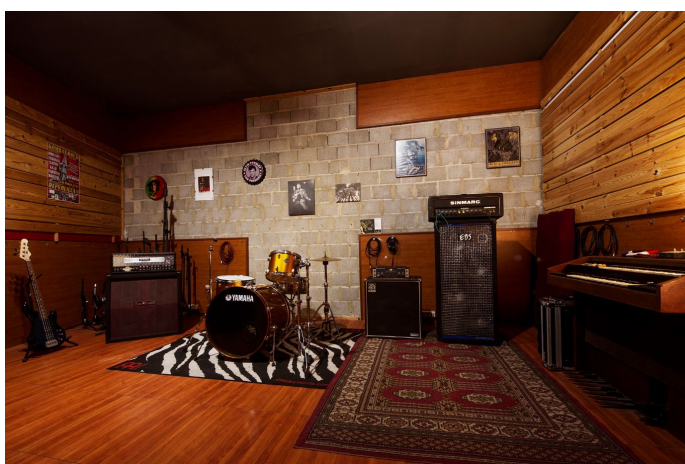


Figura 13 Imagen de la sala de grabación



Figura 14 Imagen de la sala de grabación, en que se aprecia la puerta de acceso a la misma.



Figura 15 Imagen de la sala de grabación, en que se aprecia la puerta de acceso a la misma y la ventana que comunica con control.



Figura 16 Imagen de la sala de grabación, en que se aprecia la puerta de acceso, la ventana y el pilar.

A continuación, se muestran modelos básicos 3D de la sala de control y de grabación.

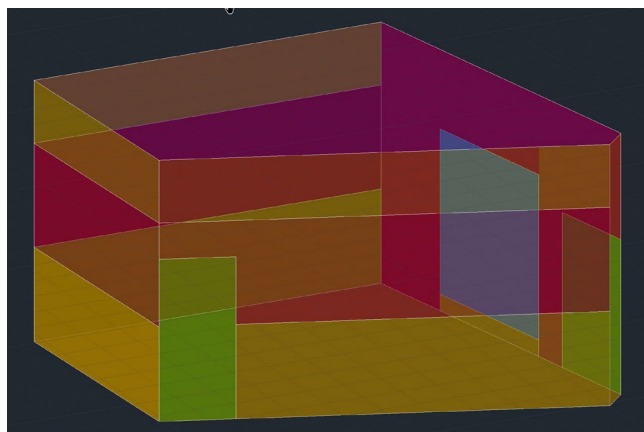


Figura 17 Imagen del modelo 3D de la sala de control, en que se aprecia la puerta (verde) de acceso a la misma y la puerta (verde) y ventana (azul) que comunica con la sala de grabación.

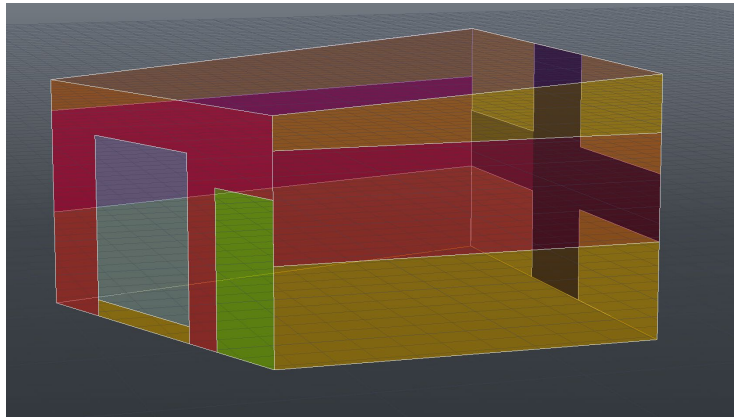


Figura 18 Imagen del modelo 3D de la sala de grabación, en que se aprecia la puerta de acceso a la misma (verde) y la ventana (azul) que comunica con control.

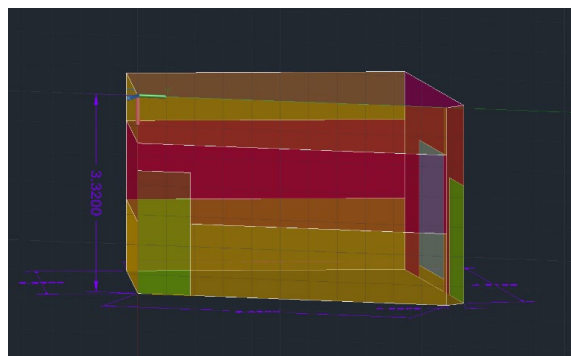
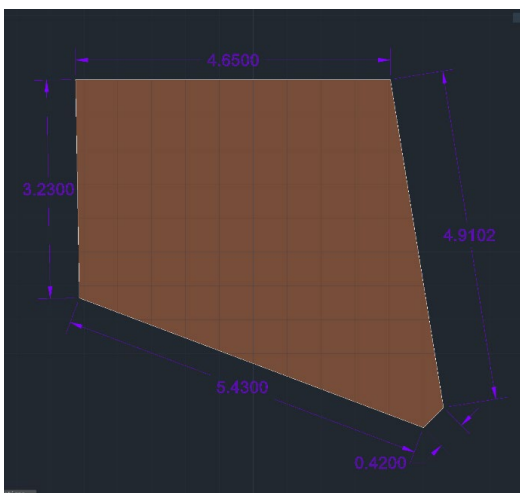


Figura 19 Planos de planta y perspectiva con cotas, sala control.

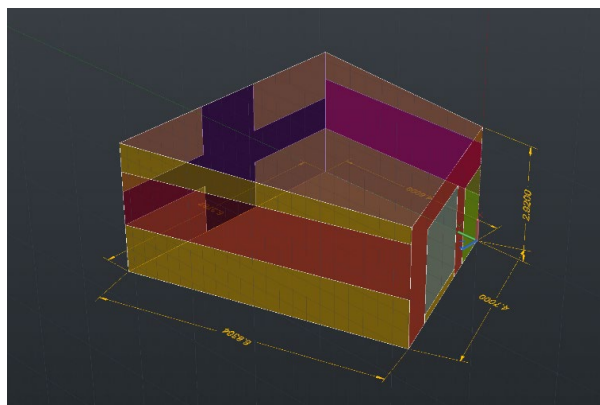
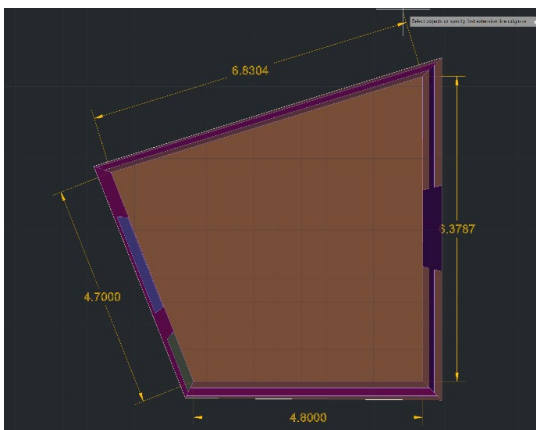


Figura 20 Planos de planta y perspectiva con cotas, sala de grabación.

Las zonas coloreadas de amarillo están acabadas con recubrimiento de madera vista, las zonas negras, son bloques de hormigón vistos sin lucir, las zonas rojas corresponden a zonas con lana de roca recubierta por un velo de tela.

El suelo en ambas salas es un suelo técnico desmontable de madera. Con una cámara de aire de unos 45 cm.

El techo, en ambas salas, está terminado con placas de pladur vistas.

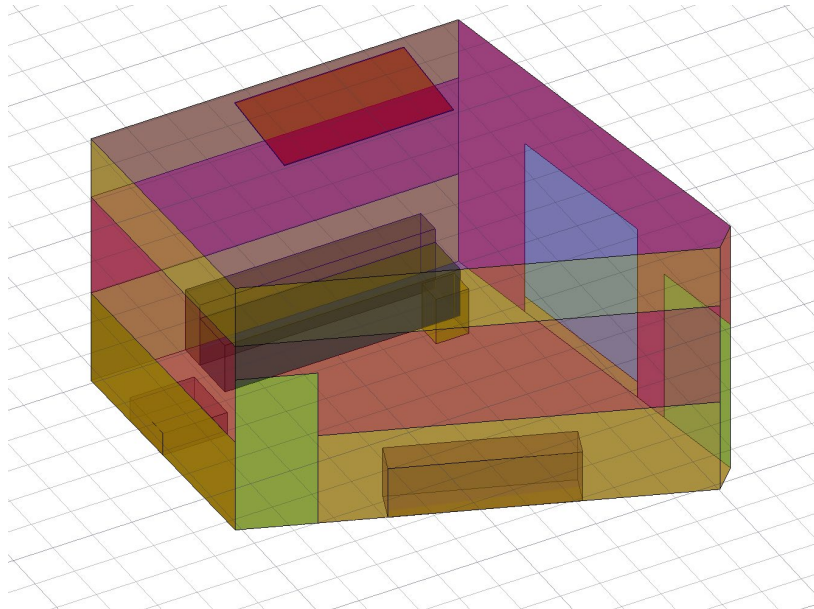


Figura 21 Modelo de la sala de control con mobiliario.

En la sala de control, en la pared opuesta a la mesa de sonido hay un sofá de dos plazas y en la pared lateral pegada a la entrada un módulo de sofá sin respaldo. Justo sobre la mesa de sonido, colgando del techo e inclinado, hay un bastidor de madera con lana de roca en toda su superficie forrado con un velo de tela. Véanse las fotos para ampliar información.

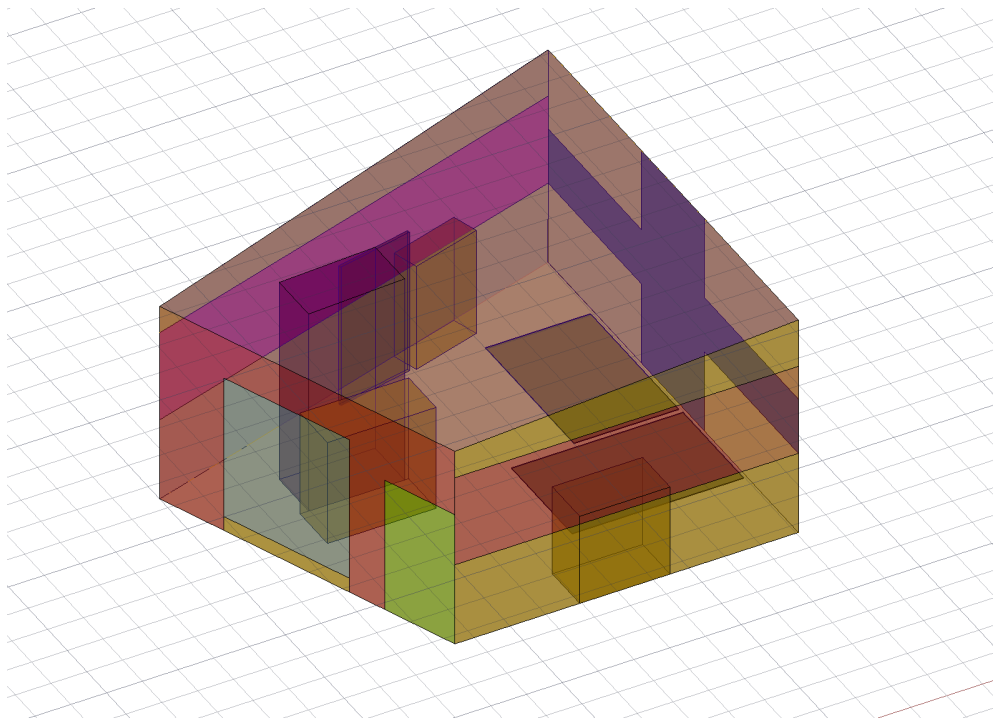


Figura 22 Modelo de la sala de grabación con mobiliario.

En la sala de grabación, hay dos alfombras tupidas recubriendo parte del suelo. El pilar está recubierto por espuma de poliuretano vista. Pegado al pilar y junto a la ventana entre la sala de grabación y la de control hay un piano de pared de madera. En la pared lateral junto a la puerta de entrada hay un órgano de madera. En la pared opuesta a la del órgano, hay una estantería repleta de cajas y justo al lado un bastidor de madera recubierto por espuma fono-absorbente. Véanse las fotos de la sala de grabación para más información.

4. MEDIDAS IN SITU

Para poder determinar el estado actual de la sala de grabación y la sala de control se llevaron a cabo mediciones In Situ de varios parámetros acústicos. Estas mediciones además de caracterizar las salas nos permiten validar los modelos 3D y comprobar si las simulaciones obtenidas con el software CATT-Acoustic son válidas y representativas.

Las mediciones en ambas salas se efectuaron empleando dos métodos distintos. Ambos basados en la norma UNE EN-ISO 3382-1:2010.

En primer lugar, mediante la obtención de la respuesta al impulso empleando el software ARTA que genera un barrido sinusoidal dentro del rango frecuencial bajo análisis. En segundo término, mediante el método de fuente interrumpida, empleando un sonómetro para medir la caída del nivel de presión sonora y obtener de este modo el T20 y a partir de este el tiempo de reverberación.

En ambos casos las mediciones pueden tener desviaciones respecto a la norma. Estas desviaciones se han tomado con la finalidad de poder caracterizar la sala en la disposición exacta de trabajo y con el equipo que se utiliza en la misma. Sobre todo, en el caso de la sala de control, donde se efectúa el trabajo de mezcla y masterización.

En las mediciones de la sala de control se han empleado los propios monitores de estudio que se utilizan para mezclar y masterizar, situados en su emplazamiento habitual. Estos altavoces no son omnidireccionales y además se han conectado los dos, en su configuración estéreo habitual.

Las mediciones también se han llevado a cabo en torno al punto de escucha de trabajo, despreciándose posibles mediciones en otros puntos de la sala de control. En concreto se han concentrado 12 puntos de medición en torno al punto de escucha "idóneo" o punto de trabajo (*sweet spot*).

Las mediciones, se plantean pretendiendo caracterizar las salas de la forma más útil para el presente estudio, siguiendo, en la medida de lo posible, la norma UNE EN-ISO 3382-1:2010, aunque con desviaciones. Por tanto, las mediciones no pretenden ser un certificado de ningún parámetro acústico de la sala.

4.1 EQUIPO EMPLEADO

Seguidamente se detalla el equipamiento empleado en cada tipo de medición.

4.1.1 EQUIPAMIENTO EMPLEADO PARA LA OBTENCIÓN DE LA RESPUESTA AL IMPULSO MEDIANTE BARRIDO SINUSOIDAL

- Software de medición ARTA. Encargado de generar a través de la salida de la tarjeta de sonido el barrido sinusoidal, también de registrar la medición y procesar los datos obtenidos para obtener la respuesta al impulso del recinto. A partir de la cual es posible obtener la respuesta en frecuencia del mismo, así como múltiples parámetros acústicos.
- Micrófono omnidireccional de campo libre, *Type 4189, Brüel & Kjær*, de pequeño diafragma. Siguiendo la norma IEC 60651.
- Fuente de alimentación para el micrófono modelo *Delta Tron WB 1372, Brüel & Kjær*, encargada de suministrar la alimentación *Phantom Power* necesaria.
- Tarjeta de sonido M audio, modelo *Fast Track* pro. La tarjeta se conecta vía usb al ordenador. Digitaliza la señal capturada por el micrófono y al mismo tiempo emite por una de sus salidas el barrido sinusoidal generado por el software ARTA.
- Para las mediciones en la sala de control se han empleado los monitores de estudio con que cuenta el estudio, marca KRK, modelo V8 S1. Para las mediciones en la sala

de grabación se ha empleado la fuente de sonido omnidireccional dodecaédrica marca *Brüel & Kjær*, modelo *Omnipower 4292-L*.

4.1.2 EQUIPAMIENTO EMPLEADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TR, MEDIANTE EL MÉTODO DE FUENTE INTERRUPTIDA

- Sonómetro marca *Brüel & Kjær*, modelo 2270, con software BZ7227 Version 4.7.6.
- Micrófono omnidireccional de campo libre, Type 4189, *Brüel & Kjær*, de pequeño diafragma. Siguiendo la norma IEC 60651.
- Fuente de sonido omnidireccional dodecaédrica marca *Brüel & Kjær*, modelo *Omnipower 4292-L*.
- Amplificador modelo 2716C de 110W por canal, marca *Brüel & Kjær*.

La mayor parte del material empleado para las mediciones son del tipo de material requerido por la norma UNE EN-ISO 3382-1:2010 a excepción de los altavoces KRK V8 S1 empleados en las mediciones efectuadas en la sala de control con este método.



Figura 23 Especificaciones técnicas del monitor de estudio empleado para las mediciones en la sala de control, KRK V8 S1[4].

4.2. METODOLOGIA Y PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN

Como se ha comentado en el anterior apartado, las mediciones se efectúan siguiendo dos métodos contemplados en la norma UNE EN-ISO 3382-1:2010.

Por una parte, mediante el método de obtención de la respuesta al impulso, a través de barrido sinusoidal, en este caso empleando el Software ARTA, tarjeta de sonido y micrófono.

El otro método es el de fuente interrumpida, en el que se emplea un sonómetro para generar la señal que excitará las salas, registrar y procesar la medición para obtener los resultados.

El primer paso, consiste en determinar en cada caso las posiciones donde se efectuarán las mediciones, para ello se debe tener en cuenta las dimensiones de la sala, su geometría y el uso destinado a cada una de las salas.

4.2.1 PROCEDIMIENTO SALA DE CONTROL

Las mediciones se llevaron a cabo el 21 de marzo de 2023.

Se mide empleando los dos métodos, el de obtención de respuesta al impulso y el de fuente interrumpida.

En ambos casos, se emplean como fuentes sonoras, los monitores de estudio con que se mezcla y masteriza en el estudio, en concreto unos altavoces KRK V8 S1.

En la siguiente imagen se muestra cual es el punto de escucha idóneo o “*The Sweet spot*” en un sistema de monitorización estéreo. Como puede comprobarse, la posición del escuchante debe situarse en el vértice del triángulo equilátero formado entre los monitores y dicho punto.

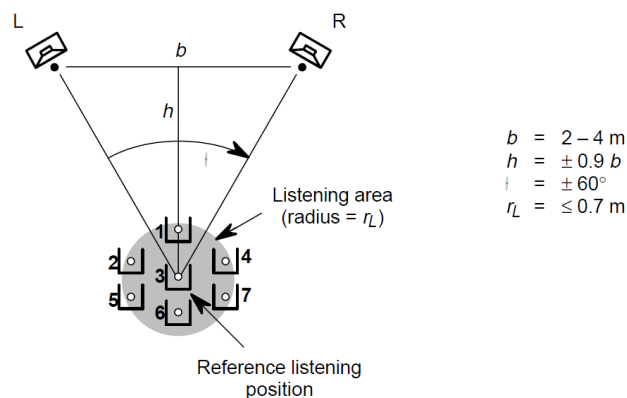


Figura 24 Punto de escucha idóneo, geometría adecuada entre los monitores y el escuchante [5].

Por tanto, se marcaron doce puntos de medición en torno a este punto ideal de escucha, ya que es en torno a esta zona donde se ubicará la posición del escuchante y donde nos interesa determinar los parámetros acústicos de la sala.

El resto de puntos o zonas de la sala se excluyen de la zona de interés contemplada en el estudio.



Figura 25 Muestreo de los puntos de medición en la sala de control, situados todos en torno al “sweet spot”.

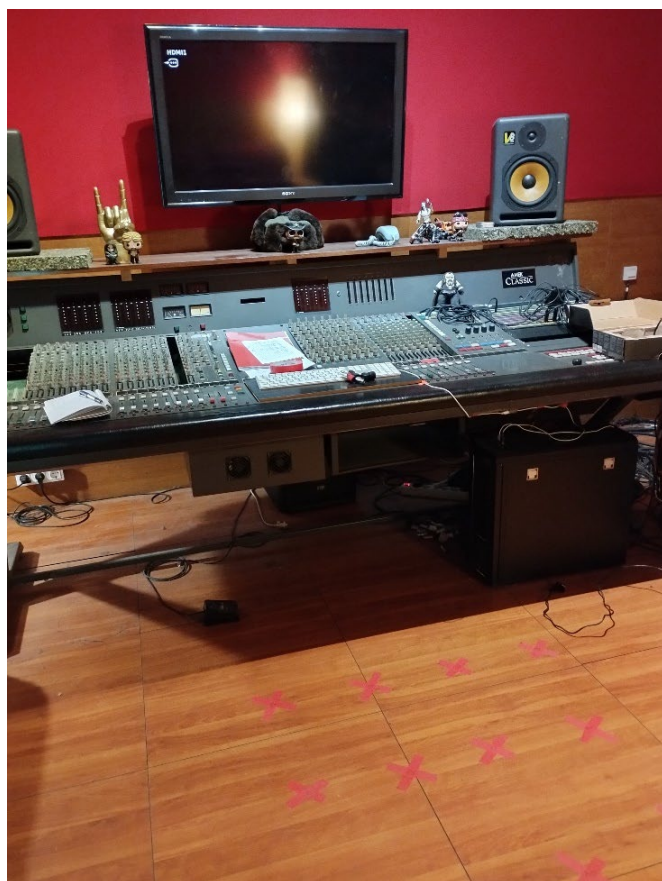


Figura 26 Puntos de medición en torno al “sweet spot”, respecto de la ubicación de los monitores de estudio.

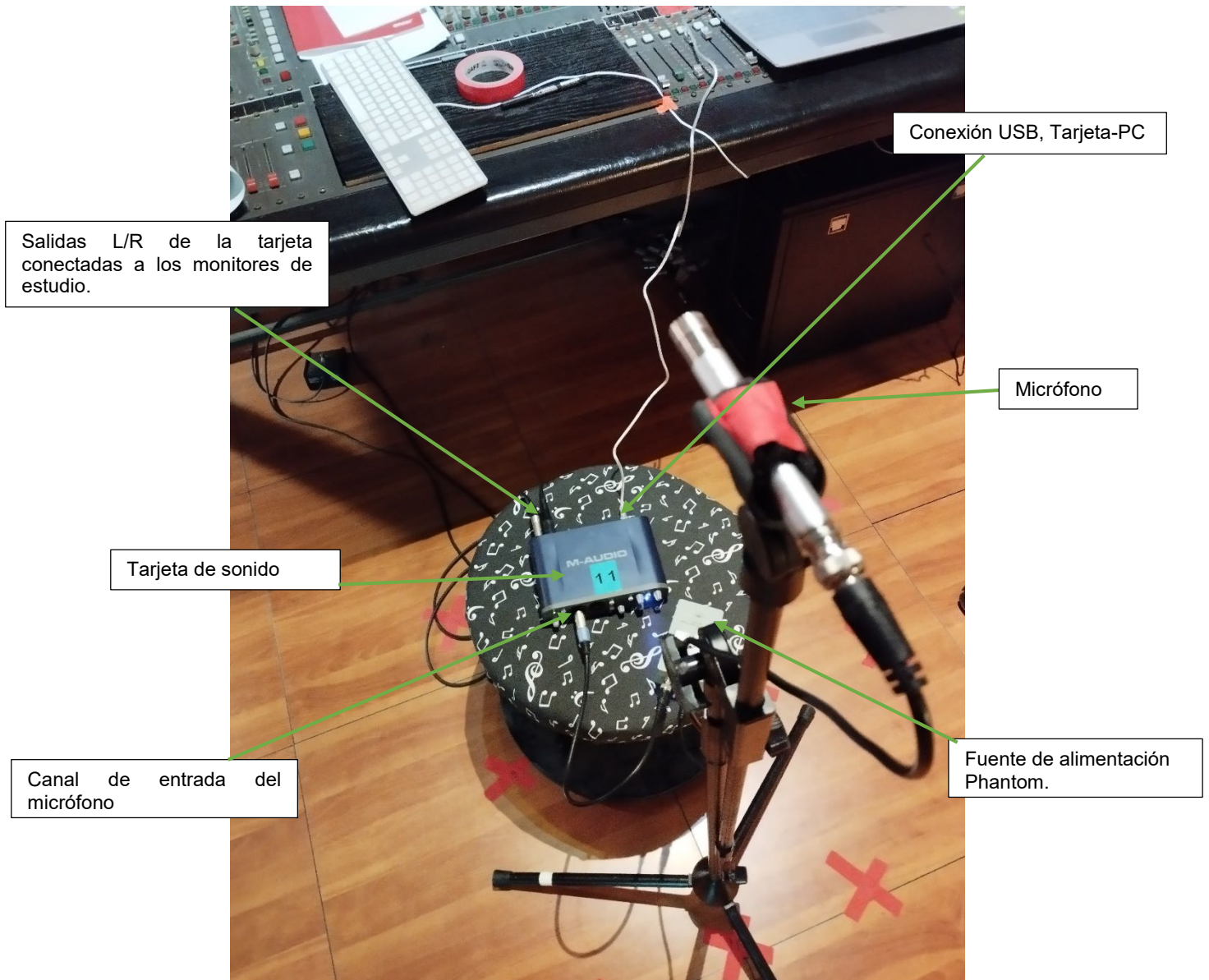


Figura 27 Esquema de conexionado para el método de medición mediante la obtención de la respuesta al impulso.

En la anterior imagen se muestra el conexionado empleado para las mediciones mediante el método de la respuesta al impulso.

El micrófono se conecta a la fuente alimentación que le suministra la alimentación continua necesaria (*phantom power*). De ahí se conecta a una de las entradas de la tarjeta. Las salidas “L” y “R” de la tarjeta se conectan al altavoz izquierdo y derecho respectivamente. A través de estas salidas se alimenta a los altavoces con el barrido senoidal generado desde el pc mediante ARTA. La tarjeta se conecta al PC a través del cable USB, a través de esta conexión fluye la señal captada por el micrófono hacia el PC y en sentido inverso la señal generada por el PC hacia las salidas de la tarjeta y de ahí hacia los monitores.

El micrófono se situó a una altura de 1.5m, a la altura aproximada de escucha de una persona sentada.

En cada uno de los 12 puntos de efectuó un único registro.

Por tanto, se obtienen 12 registros de la repuesta al impulso y 12 registros mediante medición con sonómetro (método de fuente interrumpida)

En el caso de la medición de fuente interrumpida con sonómetro, se emplea un *Brüel & Kjær*, modelo 2270. Se configura para la medición del T20.

Se emplea el software ARTA para generar el ruido rosa a través de la tarjeta de sonido. Empleándose el mismo conexionado que el empleado en el método anterior.

Con la única salvedad de que en este caso el sonómetro se encarga de registrar y procesar las mediciones, quedando el micrófono conectado al mismo tal y como se ve en la siguiente imagen.



Figura 28 Imagen del sonómetro .Brüel & Kjær, 2270, con el micrófono incorporado en el mismo [6].

La siguiente tabla muestra algunos de los parámetros de configuración de interés del sonómetro.

[Input] Sound Field Correction	<i>Diffuse-field</i>
[Measurement Control] Excitation	<i>Interrupted Noise</i>
[Measurement Control] Measurement Mode	<i>Parallel</i>
[Generator] Generator Type	<i>External</i>
[Generator] Generator Type	<i>Pink</i>
[Post-processing] Wide Band RT Bottom	<i>100 Hz</i>
[Post-processing] Wide Band RT Top	<i>3.15 kHz</i>
[Spectrum] Bandwidth	<i>1/3</i>

Tabla 1 Algunos de los parámetros de configuración del sonómetro de interés.

Cuando ha transcurrido un tiempo suficientemente largo para aproximar el estado de excitación de la sala al campo difuso y con un nivel de energía estable y suficiente en los puntos de medición, se detiene el nivel de ruido y comienza la medición de la pendiente de caída del nivel de presión sonora.

4.2.2 PROCEDIMIENTO SALA DE GRABACIÓN

Para las mediciones en la sala de grabación se decide emplear dos posiciones de fuente y tres posiciones de micrófono por cada posición de fuente.

La altura de la fuente es de 1.5 m en ambas posiciones.

La altura del micrófono se estableció tal como indica la norma en 1,2 m.

Por tanto, se establecen seis puntos de medición. En cada punto de medición se mide empleando el método de fuente interrumpida y el método de obtención de la respuesta al impulso con barrido senoidal.

En este caso, para generar el campo sonoro se emplea una fuente dodecaédrica (véanse las siguientes imágenes).



Figura 29 Fuente situada en una de las dos posiciones (PF1) y las tres posiciones de micro para esa posición de fuente. Las posiciones de receptor están marcadas con cruces rojas en el suelo.



Figura 30 Fuente situada en la segunda posición de fuente (PF2).



Figura 31 Fuente dodecaédrica. omnidireccional situada en la posición de fuente 1. En el rack plateado puede verse el amplificador de audio empleado.



Figura 32 Detalle del amplificador de audio empleado modelo 2716C marca Brüel & Kjær.

Las posiciones de fuente y las posiciones de micro se eligieron siguiendo las recomendaciones descritas en la norma UNE EN-ISO 3382-1:2010, en lo referente de la ubicación de las mismas respecto de los cerramientos del recinto, o su distribución en el recinto a analizar. También en lo referente a la distancia mínima entre fuente y receptor.

El procedimiento de medición y conexionado es el mismo que el que se llevó a cabo para las mediciones en la sala de control. La única diferencia es que como fuente sonora se emplea una fuente dodecaédrica en vez de los monitores de estudio y que se buscan emplazamientos para las posiciones de fuente y receptores siguiendo las indicaciones de la norma UNE EN-ISO 3382-1:2010.

Para ambos tipos de medición y en ambas salas, se lleva a cabo un proceso de calibración del sistema de medición completo.

Las condiciones atmosféricas en la sala de control eran de 19.4°C y 58,5% de humedad.

En la sala de grabación, 19.9°C y 60% de humedad.

La ocupación de las salas en ambos casos es de tres personas.

4.3 RESULTADO DE LAS MEDICIONES

4.3.1 TIEMPO DE REVERBERACIÓN SALA DE CONTROL.

Resultado del tiempo de reverberación en la sala de control.

Se ha medido el T20 por dos métodos, el de fuente interrumpida y el de obtención de la respuesta al impulso.

En este caso se han empleado los monitores de estudio como fuente de ruido y las 12 posiciones de micrófono se han establecido en torno al punto de escucha óptimo o “sweet point”.

El T_{mid} , se obtiene como la media del tiempo de reverberación en las bandas 500Hz i 1kHz.

Para la medición con método de fuente interrumpida es:

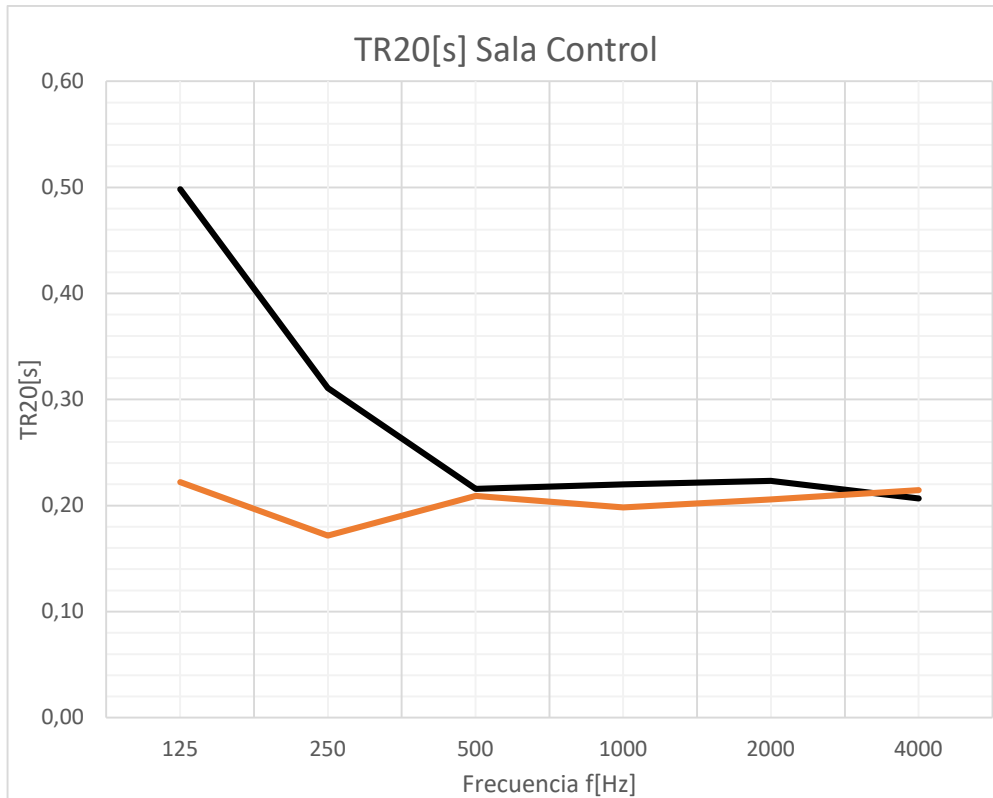
$$T_{mid} = \frac{0,22 + 0,22}{2} = 0,2s$$

Frecuencia f[Hz]	TR20 Banda de octava [s]
125	0.50
250	0.31
500	0.22
1000	0.22
2000	0.22
4000	0.21

Para la medición del T20 a través de la de la respuesta al impulso de la sala, mediante barrido senoidal el T_{mid} obtenido es el siguiente:

$$T_{mid} = \frac{0,21 + 0,20}{2} = 0,2s$$

Frecuencia f[Hz]	TR20 Banda de octava [s]
125	0.22
250	0.17
500	0.21
1000	0.20
2000	0.21
4000	0.21



Gráfica 1 Resultados del T20, por bandas de tercio de octava. En negro medición método fuente interrumpida, en naranja mediante la obtención de la respuesta al impulso.

El resultado para el T_{mid} es prácticamente el mismo independientemente del procedimiento de medición.

Respecto al resultado por bandas de tercio de octava, se produce una ligera desviación en las bandas de 125 y 250 (Hz). En un principio atribuible a la diferencia de procesado y al procedimiento o método empleado.

Por conocimiento de la sala y experiencia trabajando en la misma creemos que la curva naranja se aproxima más a las características propias de la sala.

4.3.2 TIEMPO DE REVERBERACIÓN SALA DE GRABACIÓN.

Resultado del tiempo de reverberación en la sala de grabación.

Se ha medido el T20 por dos métodos, el de fuente interrumpida y el de obtención de la respuesta al impulso.

Para la sala de grabación se han empleado dos posiciones de fuente y tres posiciones de micrófono por cada posición de fuente. La fuente empleada ha sido una fuente omnidireccional dodecaédrica.

El T_{mid} , se obtiene como la media del tiempo de reverberación en las bandas 500Hz i 1kHz.

Para la medición con método de fuente interrumpida es:

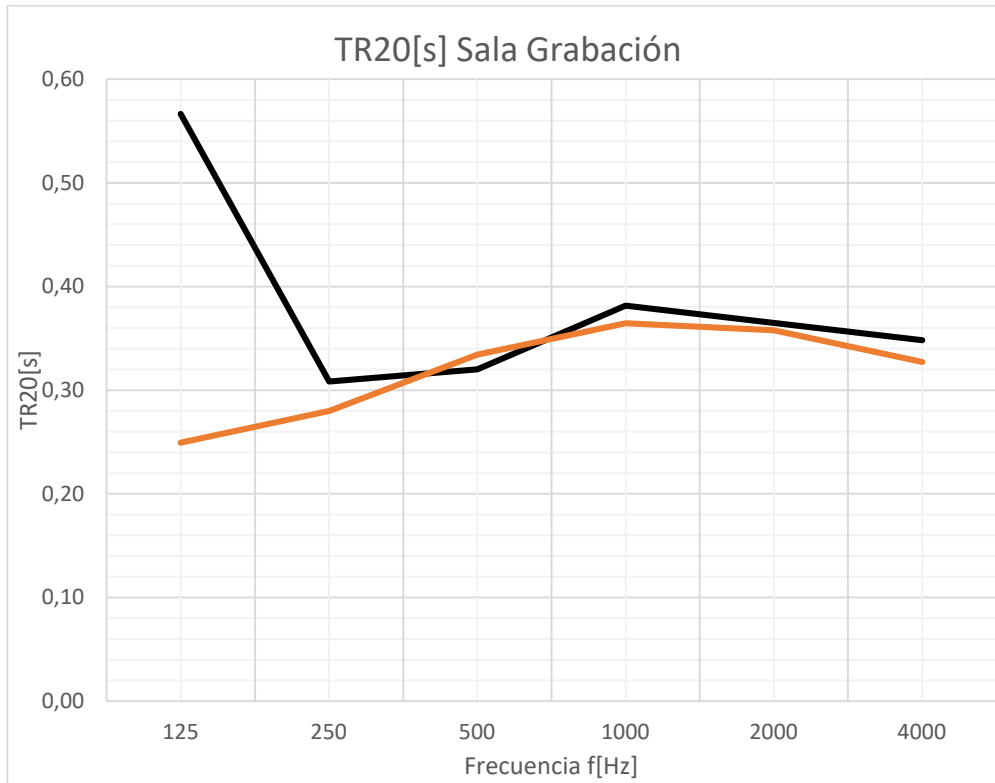
$$T_{mid} = \frac{0.32 + 0.38}{2} = 0,4s$$

Frecuencia f[Hz]	TR20 Banda de octava [s]
125	0.57
250	0.31
500	0.32
1000	0.38
2000	0.37
4000	0.35

Para la medición del T20 a través de la de la respuesta al impulso de la sala, mediante barrido senoidal el T_{mid} obtenido es el siguiente:

$$T_{mid} = \frac{0.33 + 0.36}{2} = 0,4s$$

Frecuencia f[Hz]	TR20 Banda de octava [s]
125	0.25
250	0.28
500	0.33
1000	0.36
2000	0.36
4000	0.33



Gráfica 2 Resultados del T20, por bandas de tercio de octava. En negro medición método fuente interrumpida, en naranja mediante la obtención de la respuesta al impulso.

El resultado para el T_{mid} es prácticamente el mismo independientemente del procedimiento de medición.

Respecto al resultado por bandas de tercio de octava, de forma parecida a los resultados obtenidos en la sala de control, se produce una ligera desviación en la banda de 125 (Hz). En un principio atribuible a la diferencia de procesado y al procedimiento o método de medición empleado.

Por conocimiento de la sala y experiencia trabajando en la misma creemos que la curva naranja se aproxima mejor a las características propias de la sala.

4.3.3 RESTO DE PARAMETROS OBTENIDOS CON EL MÉTODO DE LA RESPUESTA AL IMPULSO EN LA SALA DE CONTROL.

F (Hz)	EDT (s)	C80 (dB)	C50 (dB)	D50 (%)	Ts (ms)
125	0,1	22,2	15,4	97,1	33,0
250	0,1	27,1	19,6	98,0	19,1
500	0,2	24,9	16,4	97,4	17,9
1000	0,2	29,3	20,4	99,0	8,6
2000	0,2	27,9	19,1	98,6	7,4
4000	0,2	26,2	17,9	98,3	7,7

Tabla 2 Resultados sala de control.

Seguidamente obtenemos los valores para $C50_{med}$ y $C80_{med}$ para la sala de control.

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

$$C50_{med} = 18.7\text{dB}$$

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

$$C80_{med} = 27.2dB$$

4.3.4 RESTO DE PARAMETROS OBTENIDOS CON EL MÉTODO DE LA RESPUESTA AL IMPULSO EN LA SALA DE GRABACIÓN.

F (Hz)	EDT (s)	C80 (dB)	C50 (dB)	D50 (%)	Ts (ms)
125	0,2	15,2	9,3	84,2	43,3
250	0,2	18,7	12,7	93,0	28,0
500	0,3	17,2	10,4	90,6	23,8
1000	0,4	13,6	7,8	84,8	27,1
2000	0,4	12,8	7,3	84,2	28,1
4000	0,3	15,7	9,3	89,3	22,5

Tabla 3 Resultados sala de grabación.

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

$$C50_{med} = 13.5 dB$$

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

$$C80_{med} = 15.5dB$$

4.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS MEDICIONES IN SITU.

4.4.1 SALA DE CONTROL

El tiempo de reverberación promedio T_m , se obtiene como promedio de las bandas comprendidas entre 250 Hz y 4kHz [5].

$$T_m = \frac{0.31 + 0.22 + 0.22 + 0.22 + 0.21}{5}$$

$$T_m = 0.24s$$

El documento EBU Tech 327, establece que T_m debe encontrarse en el rango de $0.2 < T_m < 0.4$ segundos, en el caso de salas de control. En nuestro caso se cumple el criterio.

Del mismo modo la norma establece que el tiempo de reverberación medido en bandas de tercio de octava debe cumplir la siguiente tolerancia.

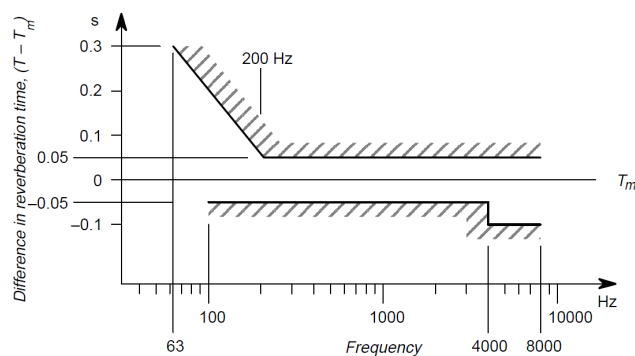


Figura 33 Límites para la tolerancia del tiempo de reverberación.

Los límites de tolerancia se cumplen para la sala de control. Esto garantiza un tiempo de reverberación estable en la frecuencia.

Destacar que el tiempo de reverberación obtenido es corto. Esto permite tener un sonido muy definido y mucha claridad en la escucha. También que es necesario que no sea inferior al resultado obtenido, ya que en ese caso la sala estaría demasiado muerta, la escucha sería demasiado irreal e incómoda. Los 0.2s obtenidos son adecuados.

Por otro lado, el *Early Decay Time* EDT, o tiempo de caída temprana que es el tiempo de reverberación tomando la caída de los primeros 10dB y realizando una proyección hasta los 60dB, nos ofrece una mayor información subjetiva de la viveza del recinto.

En casos en que el EDT es mucho menor que el tiempo de reverberación, la sensación será de sala muerta. Cuando el EDT tiene un valor aproximado al tiempo de reverberación la sensación es de sala viva.

Para conseguir valores de EDT altos, pero no mayores que el tiempo de reverberación, es necesario que el recinto tenga un buen grado de difusión en sus superficies. Es decir, paredes irregulares.

Al parámetro EDT también se le asigna la sensación de espacialidad, de manera que dos recintos con idénticos tiempos de reverberación, pero uno con mayor valor de la EDT nos trasladará la sensación de tener más volumen que el otro.

En el caso de la sala de control, para un T_{med} de 0.2s, tenemos un EDT un poco superior a la mitad del T_{med} .

F (Hz)	EDT (s)
125	0.14
250	0.14
500	0.17
1000	0.15
2000	0.18
4000	0.19

Nos encontramos en el caso de un EDT inferior al tiempo de reverberación. Por tanto, la sala podría parecer algo muerta y sería necesario añadir elementos difusores para aumentar el EDT y acercarlo al tiempo de reverberación. Con ello ganaríamos en espacialidad y en sensación de mayor volumen.

En la práctica la sala suena seca, pero no muerta. La sensación de estero es muy definida y se percibe cierta viveza, no se estima imprescindible añadir más elementos difusores, aunque podría tomarse en consideración.

Respecto a $C50_{med}$, que evalúa la claridad de la palabra, es adecuado para salas de uso de la misma, cuando se encuentra por encima de 2dB [11].

En nuestro caso es ampliamente superado:

$$C50_{med} = 18.7 \text{ dB}$$

Esto vuelve a reafirmarnos en que estamos frente a una sala seca, pero buena para la grabación de voces, siempre que se requiera una sala neutra o que no aporte cuanto apenas viveza o reverberación a lo grabación. Suele ser la situación en la mayoría de los casos que se registran voces en el estudio, donde la reverberación, *delay* y demás efectos se añaden siempre en post producción.

En lo referente al $C80_{med}$ que analiza la claridad musical de una sala, según L.Beranek, *Concert Hall Acoustics–2008* [11] debe situarse entre -0.4 y 0 dB.

En nuestro caso el resultado obtenido es:

$$C80_{med} = 27.2 \text{ dB}$$

Beranek al establecer estos límites, considera salas adecuadas para música clásica, opera etc. En este caso estas salas cuentan con un tiempo de reverberación mucho mayor. Por tanto, un valor para la claridad mucho menor al obtenido en nuestro caso.

De nuevo los resultados obtenidos para este parámetro vuelven a enfatizar el bajo tiempo de reverberación de la sala, por otro lado, adecuado para su fin como sala de control, escucha, mezcla y mastering.

4.4.2 SALA DE GRABACIÓN.

En el caso de la sala de grabación el tiempo de reverberación promedio T_m , (promedio de las bandas comprendidas entre 250 Hz y 4kHz), debe seleccionarse en función del tipo de música e instrumentos que se van a grabar. Dependiendo de esto, la sala debe ser más o menos viva.

Estilos que empleen instrumentos acústicos como música clásica, música folk, jazz, opera etc. necesitan o admiten un tiempo de reverberación mayor que facilite el empaste de los instrumentos entre sí y proporcione colas y resonancias que ayuden a sonar con mayor viveza los instrumentos acústicos.

En caso de estilos próximos al *rock*, *hard rock*, *punk*, metal, *pop*, *rap*, música electrónica etc., donde predominan los instrumentos amplificadas, se tiende a buscar salas menos vivas.

La finalidad es la de capturar toda la definición y claridad posible, así como los matices de los mismos. Posteriormente en post producción se puede generar espacios y planos mediante el empleo de reverberaciones y *delays* artificiales, vía *hardware* o vía *plugin*.

En el caso de grabaciones de baterías, puede ser muy interesante para determinadas producciones emplear salas con tiempo de reverberación alto, esto las hace sonar mucho más grandes y atrayentes.

En resumen, cualquier estudio de grabación que se precie debe contar con varias salas, con diferentes tiempos de reverberación. Esto otorga gran flexibilidad, permitiendo grabar instrumentos

en diferentes condiciones y también contar con la posibilidad de grabar diversos estilos musicales con distintos requerimientos en este sentido.

En nuestro caso, el resultado obtenido para la sala de grabación es:

$$T_m = \frac{0.31 + 0.32 + 0.38 + 0.37 + 0.35}{5}$$

$$T_m = 0.4s$$

F (Hz)	EDT (s)
125	0,22
250	0,23
500	0,31
1000	0,36
2000	0,38
4000	0,31

Es un tiempo de reverberación bajo, solución de compromiso cuando únicamente cuentas con una sala de grabación en el estudio. De esta forma mediante el empleo de reverberaciones en post producción es posible añadir más reverberación en los casos necesarios. También nos permite trabajar con aquellos estilos que requieren de un tiempo de reverberación corto.

De otro modo, si la sala fuera muy reverberante, no podríamos registrar o trabajar con determinados estilos que requieran poca reverberación.

Es interesante comprobar como el EDT es muy próximo al T20 obtenido, para cada banda de tercio de octava.

Cuando el EDT tiene un valor aproximado al tiempo de reverberación, como es el caso, la sensación es de sala viva. Esto en cierto modo nos indica que la sala cuenta con buena difusión.

El EDT también se vincula a la sensación de espacialidad [15], de manera que dos recintos con idénticos tiempos de reverberación, pero uno con mayor valor de la EDT nos trasladará la sensación de tener más volumen que el otro.

Lo cual es un resultado satisfactorio para la sala de grabación.

Ciertamente en el proceso de grabación de baterías, empleando micrófonos de sala además de los de campo cercano, el resultado obtenido es el de una sala viva y con impresión de un TR mayor al medido.

Los resultados obtenidos para $C50_{med}$ y $C80_{med}$:

$$C50_{med} = 13.5 \text{ dB}$$

$$C80_{med} = 15.5 \text{ dB}$$

Vuelven a ser muy elevados.

$C50_{med}$ vuelve a ser superior a 2 dB, lo cual indica que el tiempo de reverberación es corto y que la claridad para la palabra es muy elevada.

Respecto a $C80_{med}$ al igual que la sala de control, se obtiene un valor mucho más elevado que lo propuesto por L. Beranek [11]. De nuevo refleja el carácter poco reverberante de la sala, apropiado eso sí, para la grabación de algunos estilos musicales que cuentan con esta necesidad acústica.

5. SIMULACIÓN ACÚSTICA DEL MODELO 3D.

5.1 INTRODUCCIÓN A CATT ACOUSTIC

Para la simulación acústica se ha empleado el software CATT-Acoustic, versión 8. En esta versión es posible efectuar simulaciones por tres métodos distintos.

- Mapeo del área de audiencia:

Emplea trazado de rayos estándar, con un receptor esférico. Estima niveles tempranos de presión sonora, LF, etc.

- ISM detallado de la primera parte:

Emplea *Image Source Model*, añadiendo reflexiones difusas de primer orden. Este método es útil para un análisis cualitativo del patrón de reflexiones, aunque no calcula ningún parámetro de acústica de salas.

- Cálculo detallado completo (*Full detailed calculation*):

Emplea el método RTC (*Randomized Tail-corrected Cone-tracing*). Este método combina características de trazado de rayos estándar y del método ISM. El método RTC es un método general y robusto.

La simulación en nuestro caso se hará empleando el método RTC (*Full detailed calculation*).

Cuando se crea una sesión en CATT se generan estos cinco archivos [13]:

MASTER.GEO:

Es el archivo principal, se define la geometría mediante planos, así como los coeficientes de absorción de las superficies y opcionalmente de dispersión.

REC.LOC:

Se define el número de receptores y su situación en la sala.

SRC.LOC:

Se define el número de fuentes, su situación en la sala y las características de directividad, de nivel y espectro de emisión.

GEO.PRD:

Archivo que guarda la configuración general del proyecto.

PROJECT.TXT:

Es un archivo de texto opcional que permite tomar notas del proyecto.

En la versión 8 de CATT es complejo el modelado 3D, siempre que la geometría no sea muy básica. En ese caso es aconsejable hacer el diseño 3D en AutoCAD.

Optamos por hacer el modelado 3D de las dos salas en AutoCAD.

5.2 MODELADO 3D

Debemos hacer el modelo siguiendo algunas pautas que luego nos permitirán importarlo en CATT sin problemas.

El modelo debe ser lo más sencillo y representativo posible.

Para crear la geometría en AutoCAD, se debe emplear la herramienta **3DFACE** (3DCARA) [12]. Si empleamos otros tipos de elementos disponibles en AutoCAD, luego no se importarán a CATT. Una vez creados los modelos se deben exportar con el formato *.DXF. Con la herramienta **dx2geo**, convertimos nuestros modelos *.DXF en *.GEO. Este archivo *.GEO contendrá nuestra geometría.

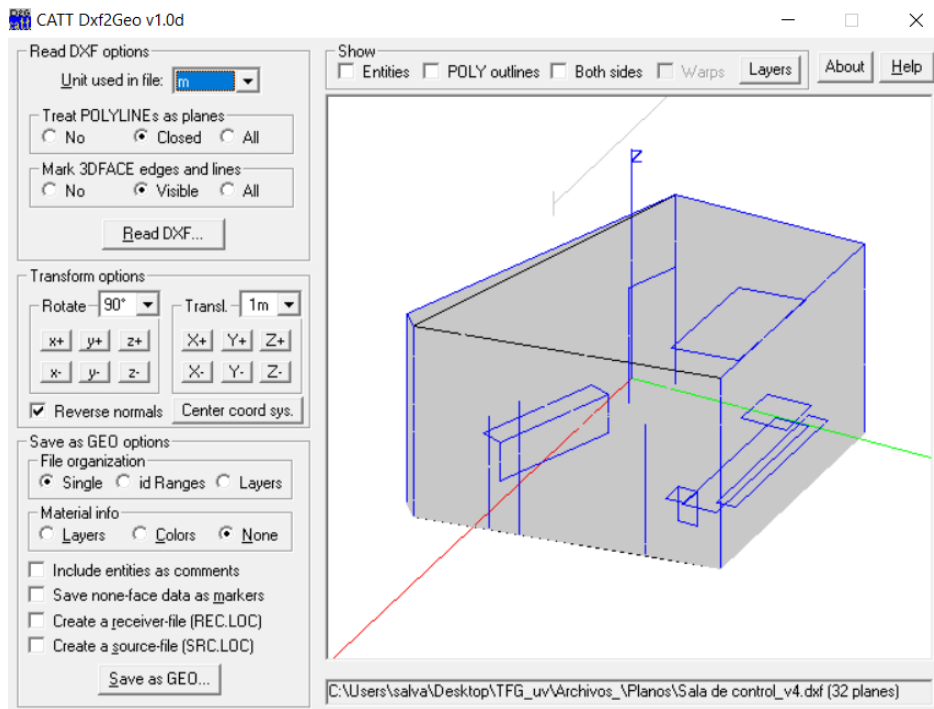


Figura 34 Ventana principal de dx2geo.

Al cargar el archivo *.DXF en **dx2geo**, podemos comprobar si todos los planos del modelo se reconocen y por tanto van a ser incluidos en el archivo *.GEO de salida.

Destacar las opciones **Center coord sys**, que nos sitúa el modelo en el centro del eje de coordenadas, ya que es fácil que el modelo en AutoCAD se encuentre desplazado respecto del mismo.

La opción **reverse normals**, cambia 180° la normal de todos los planos. Esto es útil ya que CATT toma la superficie en que se encuentra la normal como la superficie donde aplica la absorción y dispersión. Todos los planos deben tener la normal en la posición adecuada. Esto lo podemos comprobar en CATT al cargar el archivo *.GEO y ver el lado sombreado (lado con las propiedades de absorción y dispersión correctas) y el lado negro (lado que se comporta como un punto de fuga en nuestro modelo, como una ventana abierta). Por ejemplo, las paredes del recinto deben tener su parte sombreada hacia el interior y las negras hacia el exterior.

Reverse normals, cambia las normales de todos los planos, debemos buscar en que situación tenemos el mayor número de planos con la orientación correcta. Los que queden mal se pueden revertir modificando posteriormente en el archivo *.GEO

5.3 COEFICIENTES DE ABSORCIÓN, DISPERSIÓN Y AJUSTE DE LA NORMAL DE LOS PLANOS.

Una vez creado el proyecto en CATT, cargamos como Master.GEO, el archivo *.GEO obtenido a través de **dx2geo** que contiene nuestro modelo 3D.

Si comprobamos la geometría obtenemos varios archivos.

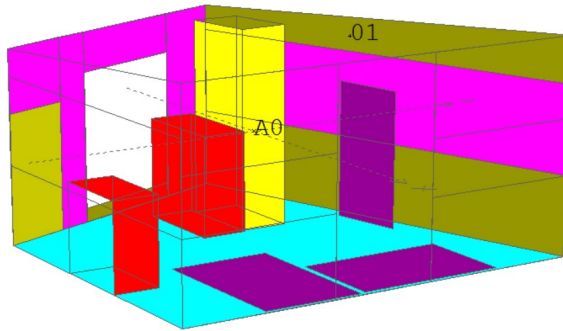


Figura 35 Vista coloreada de la simulación en CATT del modelo 3D.

El archivo COLORED.PLT muestra el modelo 3D, donde cada color representa un coeficiente de absorción. Superficies con igual color cuentan con el mismo coeficiente de absorción. Los coeficientes de absorción se añaden modificando el archivo MASTER.GEO, que se puede editar desde un editor de archivos tipo TXT.

```
FROMFRONT

ABS default = <10 10 10 10 10 10>
ABS cristal = <25 10 07 06 04 02> {255 255 255}
ABS suelo = <40 30 20 17 15 10> {0 255 255}
ABS madera = <40 25 4 4 4 4> {150 150 0}
ABS puerta = <15 10 6 8 10 5> {200 200 0}
ABS tela = <20 35 65 80 75 65> {255 0 255}
ABS pladur = <30 12 8 6 6 3> {0 150 150}
ABS sofa = <72 79 83 84 83 79> L <30 40 50 60 70 70> {0 255 0 }
ABS mesa = <40 20 12 7 5 5> {150 150 150}
ABS pilar = <05 10 20 35 50 65> {255 255 0}
ABS bloque = <30 45 30 25 40 25> {0 0 0}
ABS alfombra = <2 6 14 37 60 65> {150 0 150}
ABS piano = <11 7 3 1 1 2> {255 0 0}
```

Figura 36 Definición de los coeficientes de absorción (<>), dispersión (L<>) y el color empleado para ese material ({}) [13].

Posteriormente a cada uno de los planos se le asigna un coeficiente de absorción.

```
PLANES

[ 1 lateral ventana / 3 8 31 12 / tela ]
[ 2 superior ventana / 15 16 32 31 / tela ]
[ 3 lateral ventana 2 / 7 6 33 32 / tela ]
[ 4 superior puerta / 17 18 22 33 / tela ]
[ 5 ventana / 13 14 16 15 / cristal ]
[ 6 inferior ventana / 8 7 14 13 / madera]
[ 7 puerta / 6 0 18 17 / puerta ]
[ 8 frontal superior / 9 11 12 10 / madera ]
[ 9 frontal inferior / 27 4 3 34 / madera ]
[ 10 frontal central / 27 34 11 9 / tela ]
[ 11 lateral vertical / 2 5 35 28 / bloque ]
[ 12 lateral central / 26 27 37 36 / bloque]
[ 13 lateral central 2 / 20 25 39 38 / bloque]
[ 14 lateral cuadrante 1 / 38 39 28 24 / tela ]
[ 15 lateral cuadrante 2 / 36 37 30 35 / tela ]
[ 16 lateral cuadrante 3 / 5 29 27 26 / tela ]
[ 17 lateral cuadrante 4 / 1 2 25 20 / tela ]
[ 18 trasera superior / 21 23 24 22 / madera]
[ 19 trasera inferior / 0 1 20 19 / madera ]
[ 20 trasera central \ 20 19 21 23 \ tela ]
[ 21 suelo flotante técnico / 3 4 1 0 / suelo]
```

Figura 37 Numero de plano, descripción del plano, esquinas y coeficiente de absorción empleado.

Para identificar cada plano y añadir una descripción adecuada, se emplea el fichero PLINFO.PLT, que cuenta con 1 *frame* por cada plano

```
Plane 1 -o : lateral ventana, S= 2,97m2
TELA <20 35 65 80 75 65 : 55 45> L <10 10 10 10 10 10 : 10 10>
```

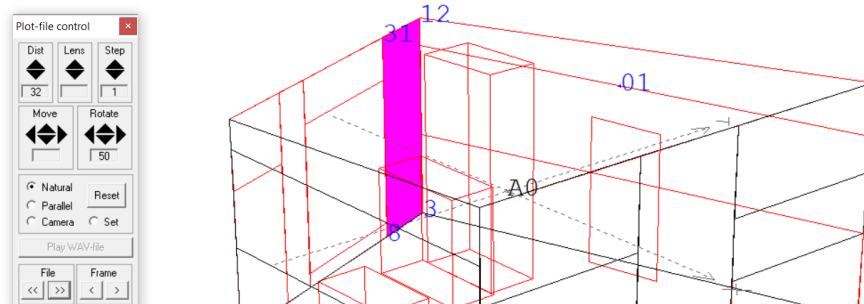
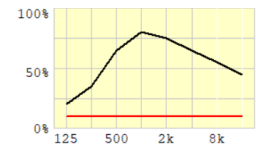


Figura 38 Frame del plano 1, al que ya se ha indicado una descripción y una absorción.

En la figura anterior puede verse como al plano 1 ya se le ha indicado una descripción, “*lateral ventana*” y un coeficiente de absorción “*tela*”, correspondiendo el color morado esta absorción. Como se desconoce el coeficiente de dispersión para este material, CATT le asigna uno por defecto, en este caso de 10 para todas las frecuencias (L<10 10 10 10 10 10 : 10 10>).

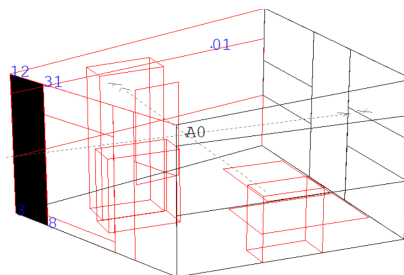


Figura 39 Frame del plano 1, mostrando su parte posterior.

Si observamos la parte posterior del plano 1 en la *Figura 38*, se ve de color negro. Esa es la parte trasera, la parte que se comporta como una ventana abierta en la sala. Si los colores estuvieran invertidos, deberíamos revertir el plano para que la cara absorbente quede en el interior del recinto. Para revertir un plano se deben invertir las barras entre las que se definen las esquinas. Véase en la figura 36, el plano 20. Este plano se tuvo que invertir y cuenta con las barras invertidas respecto a los que no lo están.

Si no se invierten los planos que lo requieren, al simular se producen pérdidas por los mismos, se comportan como ventanas o puertas abiertas por donde escapan los rayos. Al simular se recibe un informe de pérdidas y si estas son elevadas los resultados son totalmente inapropiados.

La siguiente tabla muestra los coeficientes de absorción, expresados en tanto por cien, empleados en la simulación acústica:

Frecuencia Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Cristal	25	10	7	6	4	2
Suelo	50	40	35	17	15	10
Madera	50	45	24	4	4	4
Puerta	15	10	6	8	10	5
Tela	30	40	85	90	75	75
Pladur	30	12	8	6	6	3
Sofá	72	79	83	90	95	95
Mesa sonido	40	20	12	7	5	5
Pilar proyectado poliuretano	5	10	20	35	50	65
Bloque hormigón	30	45	30	25	40	25
Alfombra	2	6	14	37	60	85
Piano	11	7	3	1	1	2

Tabla 4 Coeficientes de absorción de los materiales empleados

Los coeficientes de absorción se han obtenido de la propia librería incluida en CATT, carpeta */abslibs*, que contiene algunos archivos con coeficientes de varios autores, como [7] [8] [9], también con tablas de referencia de otros autores [10].

5.4 SIMULACIÓN EN CATT Acoustic.

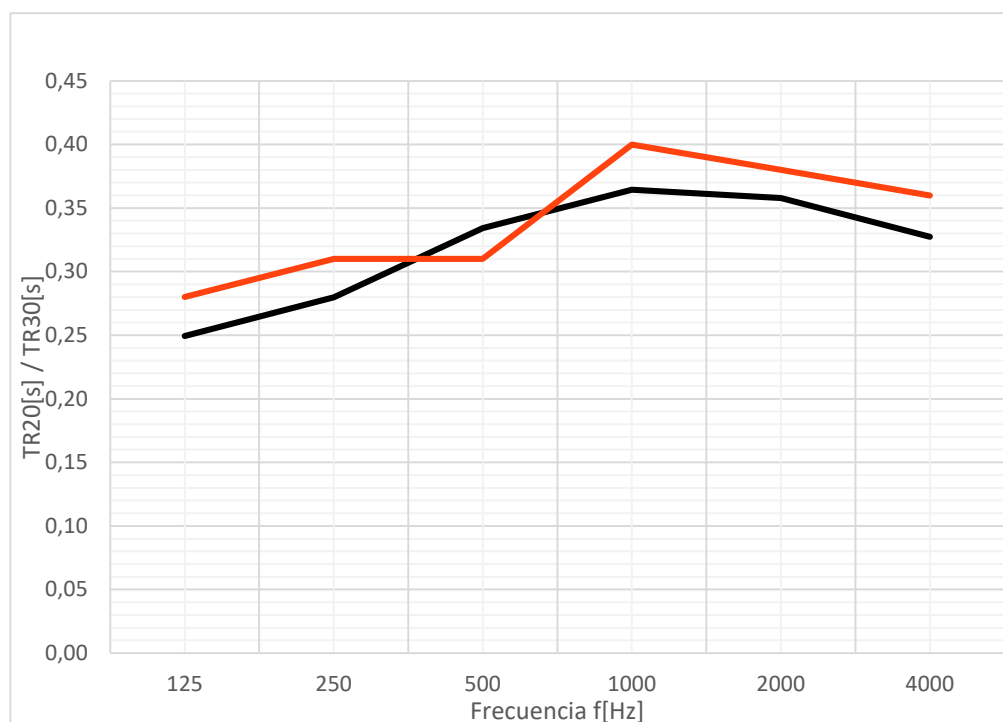
Para la simulación utilizamos *Full detailed calculation* que emplea el método de cálculo RTC [13]. Con esta simulación obtendremos el Tiempo de Reverberación, EDT, Claridad, entre otros. Se emplean 10000 rayos, estimándose como suficientes dadas las dimensiones de la sala. El número de rayos debe ser suficientemente alto para abarcar toda la sala con un nivel de densidad suficiente. Por tanto, cuanto mayor sea la sala, mayor ha de ser el número de rayos a emplear. El parámetro *Ray Truncation Time*, está relacionado con la duración del ecograma y la respuesta al impulso. Debe ser como mínimo el tiempo de reverberación esperado. En nuestro caso se toma de 1000 ms.

5.4.1 RESULTADOS SIMULACIÓN SALA DE GRABACIÓN, PROPUESTAS DE MEJORA.

Seguidamente se muestran los resultados obtenidos para el Tiempo de Reverberación de la sala de grabación, mediante medición in situ y mediante simulación. Para la simulación se ha definido una fuente de ruido **OMNI**, que emite ruido rosa. La ubicación de la fuente y del receptor corresponde con las posiciones empleadas en las mediciones In Situ.

Frecuencia f[Hz]	TR20[s] Medición ARTA	TR30[s] Simulación CATT
125	0,25	0,28
250	0,28	0,31
500	0,33	0,31
1000	0,36	0,40
2000	0,36	0,38
4000	0,33	0,36

Tabla 6 Resultados del TR obtenidos mediante medición In Situ y mediante simulación acústica.



Gráfica 3 Resultados del T20, por bandas de tercio de octava, obtenido mediante medición In Situ (negro) frente a los resultados obtenidos mediante simulación (rojo).

El resultado obtenido para el tiempo de reverberación mediante CATT es similar al obtenido mediante mediciones In Situ. La mayor de las desviaciones es de 4 ms en la banda de 1 kHz, siendo esta pequeña. Se debe tener en cuenta que los coeficientes de absorción de los materiales que se han empleado en CATT son estimados y pueden distar de los reales, además de otras desviaciones posibles en lo referente a mobiliario, instrumentos musicales como baterías, amplificadores etc. que no se han incluido en la simulación ya que resulta muy difícil establecer coeficientes de absorción para los mismos.

En definitiva, la simulación contempla una sala prácticamente vacía y la realidad es que hay mucho equipamiento.

Concluimos que los resultados obtenidos para el TR en bandas de octava validan el modelo 3D de la sala de grabación.

F (Hz)	EDT (s)
125	0,28
250	0,3
500	0,31
1000	0,37
2000	0,37
4000	0,34

Respecto del EDT obtenido mediante la simulación se vuelve a obtener un resultado similar al obtenido con la medición In Situ.

En ambos casos, medición in situ y simulación, el EDT es similar al TR, lo cual vuelve a validar el modelo 3D, del mismo modo nos vuelve a indicar que el nivel de difusión en la sala es elevado.

Esto es importante ya que dos recintos con idénticos tiempos de reverberación, pero uno con mayor valor de la EDT nos trasladará la sensación de tener más volumen y viveza que el otro, cualidad importante cuando se diseña la sala de grabación con TR bajo, pero se quiere capturar en las grabaciones sensación de espacialidad.

Esto es especialmente importante para la grabación de baterías en salas con un TR bajo. De este modo los micros de sala, es decir los micros que no se sitúan cerca del instrumento y tratan de capturar la acústica de la sala captan una sensación de espacialidad mayor (sensación estéreo) y una percepción de sala con mayor volumen del real y más viva.

Realmente es así, la experiencia de trabajo en la misma lo demuestra, ya que cuando se emplean pares estéreo, en configuración ORTF, par coincidente o MS, la sensación de espacialidad y viveza (percepción de tamaño) es más que satisfactoria.

Lo único que a mi juicio interesaría mejorar en la sala de grabación es tener la capacidad/posibilidad de tener un TR superior, en algunas situaciones.

Pero para ello, necesitaríamos contar con una sala con un volumen mucho mayor y eso no es posible. Otra opción sería retirar absorbente, tratando de hacer la sala más viva y subiendo algo el TR.

Si hacemos esto subirá el TR, aunque no demasiado y la influencia de las reflexiones será mucho mayor y el sonido obtenido tendería a estar mucho más coloreado y menos definido.

Probamos a eliminar todas las zonas más absorbentes de la sala. Todas aquellas que corresponden a un velo de tela que cubre unos 10cm de lana de roca, son substituidos por láminas de 2cm de madera sobre listones, con capacidad de vibrar y lana de roca tras ella dentro del hueco para evitar resonancias.

Frecuencia f[Hz]	TR20[s] Medición ARTA	TR30[s] Simulación CATT	TR30[s] Simulación CATT Absorción modificada.
125	0,25	0,28	0,34
250	0,28	0,31	0,36
500	0,33	0,31	0,46
1000	0,36	0,40	0,98
2000	0,36	0,38	0,81
4000	0,33	0,36	0,79

Tabla 7 Resultados del TR obtenidos mediante medición In Situ, mediante simulación del estado original y con las modificaciones de materiales para aumentar el TR.

La tercera columna muestra los resultados de la simulación.

Se consigue un incremento del TR sobre todo a partir de las bandas de 1KHz. El aumento no es muy elevado, se necesitaría un TR todavía mayor para conseguir el tipo de sala deseada.

Además, el incremento de la reverberación a partir de 1KHz, provoca un desequilibrio respecto a las bandas de 125, 250 y 500, que crecen una proporción mucho menor. Esto provocaría que la sala fuera muy brillante, por tanto, menos definida y mucho más coloreada.

En conclusión, modificar el TR al alza, sin posibilidad de aumentar el volumen de la sala y con la única opción de eliminar zonas absorbentes, da como resultado un TR no lo suficientemente elevado y con unas características tonales descompensadas. Hay mucha disparidad entre las bandas de baja frecuencia y las de medias y altas.

Se considera que el TR y el EDT de la sala de grabación son adecuados para la mayoría de las producciones musicales que se llevan a cabo en el estudio. En caso de necesidad de mayores TR se recurre a reverberaciones digitales y analógicas que son admisibles en la mayoría de las producciones.

5.4.2 RESULTADOS SIMULACIÓN SALA CONTROL, PROPUESTAS DE MEJORA.

Para la simulación de la sala de control, se definen dos fuentes sonoras B0 y B1. Estas fuentes representan los monitores de estudio. Se sitúan en la misma posición y con la misma orientación que los reales.

En la versión V8 de CATT, no es posible emplear archivos *.CLF. Estos archivos contienen las características de electroacústicas y de directividad de alguno de los modelos de altavoces de P.A: y monitores de estudio del mercado. Al utilizar archivos *.CLF la fuente empleada en simulación es una réplica bastante ajustada del altavoz real.

Por otro lado, los monitores de estudio de la sala de control, KRK V8 S1 no cuentan con archivo CLF para simulación. El fabricante no lo facilita.

Ante la imposibilidad de conseguir un modelo de fuente más cercano al real, se ha decidido que B0 y B1 sean fuentes electroacústicas, con un patrón de directividad cardiode ya que se ajustarán bastante al comportamiento de los monitores.

Se selecciona el modelo **Catt.SD0**. Que sigue el siguiente índice de directividad por bandas de octava.

Dir. Index (DI) [dB] : 0,1 2,6 4,5 8,0 9,6 6,4

El receptor (01) se sitúa en la posición de escucha y orientado hacia las fuentes sonoras.

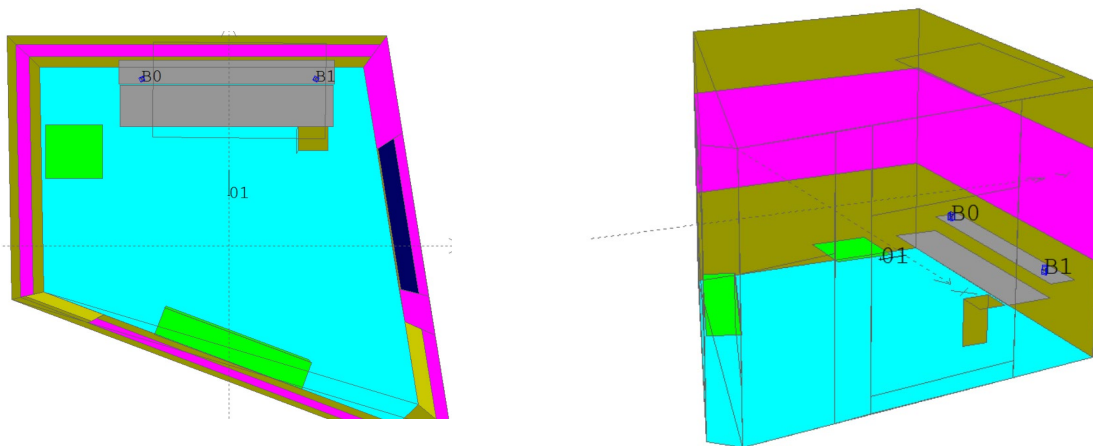
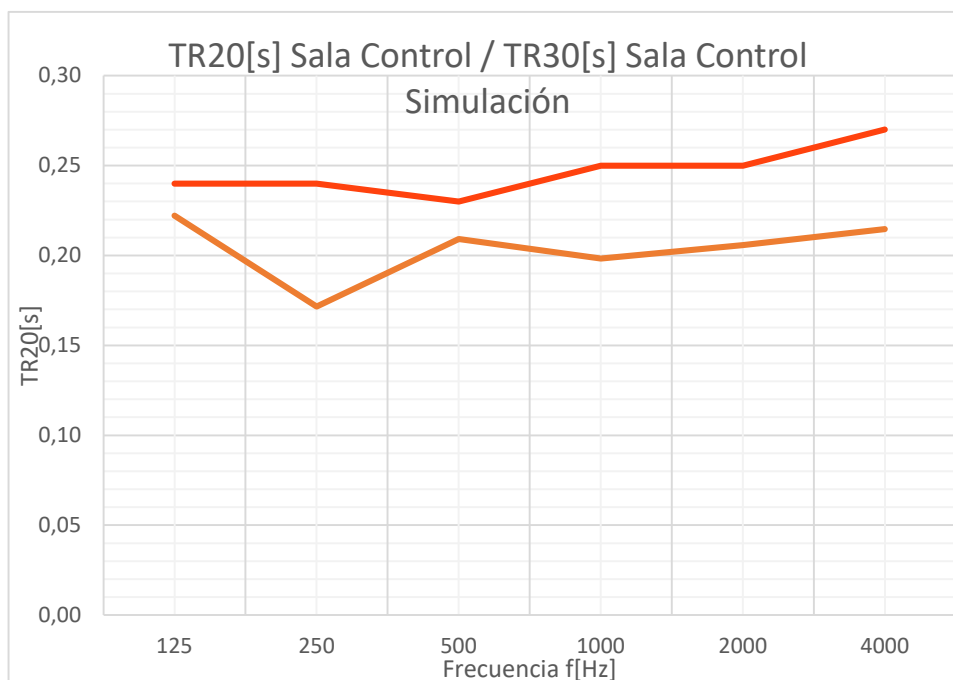


Figura 40 Ubicación de las fuentes (B0 y B1) y del receptor (01).

Seguidamente se muestra el resultado obtenido a través de la simulación para el tiempo de reverberación y se compara con el obtenido mediante las mediciones In Situ.

Frecuencia f[Hz]	TR20 Banda de octava [s]	TR30 Banda de octava [s] Simulación
125	0,22	0,24
250	0,17	0,24
500	0,21	0,23
1000	0,20	0,25
2000	0,21	0,25
4000	0,21	0,27

Tabla 8 Resultados del TR obtenidos mediante medición In Situ y mediante simulación acústica para la sala de control.



Gráfica 4 Resultados del T20, por bandas de tercio de octava, obtenido mediante medición In Situ (naranja) frente a los resultados T30 obtenidos mediante simulación (rojo)

Los resultados para el tiempo de reverberación son similares. La mayor desviación se produce a 4kHz donde la diferencia es de 10 ms.

Si comparamos el T_m obtenido mediante medición In Situ

$$T_{mMed} = \frac{0.31 + 0.22 + 0.22 + 0.22 + 0.21}{5}$$

$$T_{mMed} = 0.2s$$

con el T_m obtenido mediante simulación

$$T_{mSimula} = \frac{0.24 + 0.23 + 0.25 + 0.25 + 0.27}{5}$$

$$T_{mSimula} = 0.3s$$

La diferencia es de 1 ms, muy pequeña, debe tenerse en cuenta que los coeficientes de absorción de la simulación distarán de los reales ya que son una aproximación y que la sala de control está en uso y cuenta con mobiliario y equipamiento que se ha omitido en la simulación.

Con todo ello se considera que el modelo 3D es representativo de la sala de control y valido.

Destacar que el T_m se encuentra dentro de lo propuesto por el **EBU Tech 3276** para las condiciones de escucha. No se propone ninguna mejora en este sentido ya que es adecuado.

Otro resultado a tener en cuenta es el **EDT**.

F (Hz)	EDT (s)	EDT (s) SIM
125	0.14	0,24
250	0.14	0,27
500	0.17	0,28
1000	0.15	0,34
2000	0.18	0,33
4000	0.19	0,35

El **EDT** obtenido mediante simulación es bastante mayor que el obtenido mediante medición In Situ.

El motivo es que, en las características de los materiales introducidas para la simulación, se ha omitido el coeficiente de dispersión de la mayoría de los materiales ya que se desconocía. Al no hacer esto, CATT asigna un coeficiente de dispersión (*scattering*) genérico a todos los materiales. Por los resultados obtenidos, deducimos que este coeficiente genérico es mayor al real de los materiales en la sala. Al asignar un coeficiente de dispersión mayor, esto provoca una mayor difusión que se traduce en un **EDT** mayor al real.

Como se comenta en el apartado **4.4.1** aumentar el **EDT** en la sala de control podría ser interesante. Por otro lado, es difícil de simular un aumento de la dispersión ya que se desconoce el valor de la dispersión de los materiales originales y como vemos el valor estándar aplicado en la simulación ya sobrepasa el estado original. Deberíamos saber que dispersiones tienen los materiales instalados para introducirlos en la simulación no hay manera sencilla de hacerlo.

Puede proponerse como mejora la instalación de difusores tipo QRD bidireccionales o PRD, cubriendo parte de la pared posterior y del techo de pladur de la sala de control. Con ello, sin

aumentar en exceso el TR, ya que se eliminaría parte de zona de absorción, se conseguiría mayor difusión y un **EDT** mayor y cercano al TR obtenido por bandas de octava.

Un pequeño aumento del TR/T_m producido por la introducción de difusores podría ser admisible ya que la propuesta por **EBU Tech 3276** para el T_m es:

$$0.2 < T_m < 0.4$$

encontrándose el T_m de la sala en el extremo inferior y sería asumible.

Otro parámetro a tener en cuenta es **LF** (*Lateral Fraction*), proporciona una idea de cuánto del sonido percibido proviene de las reflexiones laterales en comparación con el sonido directo.

Un LF más alto puede contribuir a una sensación de amplitud y espacialidad en la audición, mientras que una fracción lateral más baja puede resultar en una percepción más focalizada o directa del sonido. El equilibrio entre el sonido directo y las reflexiones laterales es esencial para lograr una experiencia auditiva satisfactoria en espacios acústicos.

En alguna literatura [11] se cita dependiendo del uso de la sala, de un nivel de entre 10 y 20 % de **LF**. En este rango de nivel se percibiría de forma equilibrada el nivel de sonido recibido de forma directa y el recibido por reflexiones.

En nuestro caso, para determinar el **LF** se ha realizado una simulación conjunta (*multiple sources*) sumando ambas fuentes para determinar el **LF** percibido por el receptor.

PARAMETERS							
Parameter	125	250	500	1k	2k	4k	sum
Ts [ms]	12,8	13,0	11,7	10,7	11,3	15,4	12,0
D-50 [%]	96,1	95,5	96,8	96,0	95,2	93,3	95,8
C-80 [dB]	19,5	19,0	20,2	19,2	18,3	15,8	18,8
LF [%]	19,2	18,3	18,6	14,4	14,5	17,8	16,7
SPL [dB]	102,2	100,6	99,3	98,4	97,4	99,3	108,1 104,9 (A)

Tabla 9 Resultados obtenidos mediante simulación conjunta para la sala de control.

El resultado obtenido mediante la simulación para el **LF**, se encuentra en todas las bandas por debajo del 20%, dentro del rango que se considera como sonido equilibrado.

Podemos resumir que para la sala de control:

- Tanto de los resultados obtenidos mediante las mediciones In Situ, como de las simulaciones, se deduce que se encuentra dentro de los parámetros adecuados para **TR** y para **LF**.

- Es cierto que de las mediciones In Situ a través del **EDT** se deduce que la sala carece de difusión. O al menos que con mayor difusión se aumentaría el **EDT**, ofreciendo la sala una mayor percepción de espacialidad y volumen.

Este segundo término es complejo de simular ya que desconocemos los coeficientes de dispersión de los materiales originales del estudio y no es posible introducirlos en el software de simulación. Por tanto, no podemos ver como evolucionaría el EDT al introducir elementos con mayor dispersión.

Destacar que la sala está operativa desde años y no se ha apreciado a lo largo del tiempo, ningún defecto importante en la calidad de escucha. Al contrario, las mezclas en las mismas se trasladan muy bien a otros entornos o salas. También es cierto que al final el ingeniero acaba acostumbrándose a la sala, a como se escucha y a cómo debe trabajar en la misma para obtener resultados exitosos.

6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Es importante comentar que, al plantear este TFG, no tuve en cuenta que el estudio es un espacio de trabajo en uso, por tanto, cuenta con mucho material, equipamiento, instrumentos musicales, mobiliario... que afectan a la acústica de la sala y que son muy difíciles de contemplar por un software de simulación acústica. Digamos que un estudio de grabación se aproxima en su concepción más a un taller o laboratorio que a un auditorio, que es un espacio en cierto modo desordenado, o heterogéneo. Este “desorden” complica y compromete en parte los resultados obtenidos mediante simulación.

SALA DE GRABACIÓN.

Tanto los parámetros acústicos obtenidos por medición In Situ como los obtenidos por simulación en CATT, son similares. Este resultado valida el modelo 3D de la sala, lo que permite simular cambios en las características de la sala (absorción, geometría) para aproximar cual sería el nuevo escenario y sus cualidades acústicas. Por ejemplo, se intenta aumentar el TR modificando la absorción de materiales, sin aumentar el volumen de la sala (ya que esto no es posible). Esta última posibilidad se desestima tras simular y observar que el TR obtenido por bandas de octava es muy dispar. Produciéndose picos del TR en determinadas frecuencias, tendiendo a crear una sala que colorea demasiado. Tampoco se consigue un aumento sustancial del TR. Por todo esto se deshecha la idea.

En resumen, la sala cumple con las expectativas de una sala de tamaño mediano. El TR es bajo, constante en frecuencia y la sala carece de resonancias, respondiendo muy bien en frecuencias graves. Por tanto, no se plantean actuaciones futuras en la misma.

SALA DE CONTROL.

El modelo 3D de la sala de control también queda validado con las mediciones In situ, al ofrecer como la simulación para la mayoría de los parámetros resultados similares. El TR se encuentra dentro de lo propuesto en **EBU Tech 3276**.

Analizando el EDT con medición In Situ, es posible deducir que la sala podría mejorar en cuanto a sensación de volumen (parecer más grande), espacialidad y viveza, aumentando la difusión de la misma. Esto último es complicado de simular al carecer de los coeficientes de dispersión de los materiales instalados.

Por tanto, se establece una línea de investigación sobre cómo mejorar la difusión en la sala de control, de la forma más eficiente, económica y sin modificar en exceso el TR.

7. REFERENCIAS

- [1] P.Newell, Recording Studio Design, 2 de, Focal Press, 2003.
- [2] A. Carrión Isbert, diseño acústico de espacios arquitectónicos, Barcelona: Ediciones UPC,1998
- [3] Sitio Web, Thomann. "Medios técnicos para la mejora de la acústica de salas", [04/09/2023]
Disponible:
https://www.thomann.de/es/onlineexpert_page_acustica_de_estudio_medios_tecnicos_de_ayuda_para_la_mejora_de_la_acustica_de_sala_02_absorbentes.html
- [4] Sitio Web de la empresa KRK. [04/09/2023]
Disponible: <http://www.krkmusic.com>
- [5] EBU Tech. 3276. Listening conditions for the assessment of sound programme material: monophonic and two-channel stereophonic
- [6] Sitio web de Brüel & Kjær, [04/09/2023]
Disponible:
<https://www.bksv.com/es/instruments/handheld/sound-level-meters>
- [7]"Concert and Opera Halls - How They Sound"
Leo Beranek, Acoustical Society of America, 1996
ISBN: 1-56396-530-5
- [8]"Sound absorption in Enclosures"
David B. Bies, Colin. H. Hansen, Malcolm J. Crocker (Ed.), "Encyclopedia of Acoustics"
John Wiley & Sons, Inc.1997
;ISBN: 0-471-80465-7
- [9] "Akustik i rum och byggander", Lennart Karlen
Svensk Byggtjänst;1983
;ISBN: 91-7332-226-
- [10] T.J. Cox y P.D'Antonio, *Acoustics absorbers and diffusers*,
Londres: Spon Press, 2004.
- [11] Beranek, Leo. Concert Hall Acoustics—2008, J. Audio Eng. Soc., Vol. 56, No. 7/8, 2008
July/Augus.
- [12] Manual del usuario. Autodesk AutoCAD Architecture 2011
- [13] User's manual *CATT-Acoustic v8*, CATT 2002
- [14] J. Llinares, A. Llopis, J. Sancho. Acustica arquitectónica y urbanística. Universitat Politècnica de València. 1996.
- [15] Heinrich Kuttruff. Room Acoustics, Fourth Edition. Spoon Press, 2000.
- [16] Manuel Vazquez Rosado, Metodología de diseño de estudios de grabación y aplicación a caso práctico, Madrid: UPM, 2013.