

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCOLA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

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



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Estudio del acondicionamiento acústico y propuestas de mejora del auditorio Antonio Cabeza de Paterna”

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor/a:

Joan Martínez Millet

Tutores:

Juan Antonio Martínez Mora

Miguel Ardid Ramírez

GANDIA, 2019

Resumen:

El objetivo principal de este trabajo de fin de grado es la caracterización y optimización acústica del auditorio de Paterna Antonio Cabeza. Este proyecto surge a partir de la mala percepción acústica de los usuarios del auditorio durante las actividades que este ofrece.

Para ello se pondrán en práctica los conocimientos adquiridos durante el grado, concretamente en las asignaturas de acústica para la edificación.

Para desarrollar este proyecto, primeramente se deberán realizar medidas in situ de los diferentes parámetros acústicos en el auditorio, así también como una simulación con la ayuda de un software aplicado a Acústica de salas, finalmente se estudiarán las posibles mejoras en el caso que se detecten deficiencias en la calidad acústica de la sala.

Palabras clave: Acústica de salas; Acústica Ondulatoria; Simulación del Acondicionamiento Acústico; Tiempo de Reverberación; Auditorio de Música.

Abstract:

The main objective of this final degree project is the characterization and acoustic optimization of the Antonio Cabeza auditorium in Paterna. This project arises from the poor acoustic perception of the users of the auditorium during the activities it offers.

For this, the knowledge acquired during the degree will be put into practice, specifically in the subject of room acoustics.

In order to develop this project, first, in situ measurements of different acoustic parameters must be carried out in the auditorium, as well as a simulation with the help of software applied to Room Acoustics, finally the possible improvements will be studied in the event that deficiencies are detected in the acoustic quality of the room.

Keywords: Room acoustics; Wave Acoustics; Acoustic Conditioning Simulation; Reverberation Time; Music Auditorium.

Agradecimientos:

Este Proyecto ha sido posible gracias a la ayuda de mis tutores Juan Martínez y Miquel Ardid, que en todo momento han estado a disposición de colaborar durante toda la realización del trabajo. Agradecer también al arquitecto Vicente Barres que hizo posible que pudiéramos realizar las medidas. Por último, quiero dar las gracias a mi familia y a mi pareja que me han animado en todo momento, especialmente a mi padre, por todo el gran apoyo que me ha prestado.

Contenido

1. Introducción	4
1.1 Objetivos	4
1.2 Estructura del TFG	5
2. Conceptos y normativa.....	5
2.1 Conceptos de acústica de salas.....	5
2.1.1 Introducción al campo sonoro en recintos cerrados	5
2.1.2 Teorías para el estudio del acondicionamiento acústico	9
2.1.3 Parámetros acústicos objetivos.....	13
2.2 Normativa utilizada	17
2.2.1 Equipo para las medidas.....	17
2.2.2 Metodología en las mediciones	17
2.2.3 Procedimientos de medida	18
3. Descripción detallada del proyecto	19
3.1 Emplazamiento del auditorio	19
3.2 Explicación de la acústica del auditorio actual	20
3.2.1 Características geométricas:.....	20
3.2.2 Características acústicas:.....	20
3.2.3 Consideraciones sobre Acústica Ondulatoria.....	21
4. Medidas in situ	23
4.1 Equipo utilizado	23
4.2 Metodología y procedimiento	23
4.2.1 Procedimiento previo	23
4.2.2 Toma de medidas	26
4.3 Volcado e interpretación de datos	32
4.3.1 Resultados con el sonómetro.....	32
4.3.2 Resultados con la respuesta al impulso	33
5. Simulación con software	34
5.1 Software Catt-Acoustic	34
5.1.1 Introducción a Catt-Acoustic	34
5.1.2 Funcionamiento.....	34
5.2 Creación del mapa del auditorio y simulación	35
5.2.1 Cálculo de cotas a partir de los datos del Ayuntamiento de Paterna.....	35
5.2.2 Creación plano acústico en Catt-Acoustic.....	36

5.3 Interpretación de resultados y comparativa con las medidas IN SITU	41
5.3.1 Comparación de los dos métodos.....	41
5.3.2 Interpretación de los resultados.....	42
6. Propuestas de mejora.....	44
6.1 Diseño y mejoras.....	44
6.2 Simulación.....	45
6.3 Interpretación de resultados	46
7. Conclusiones	48
8. Bibliografía	49

1. Introducción

El auditorio fue inaugurado en 2011, es utilizado principalmente para la realización de diferentes actos musicales. Desde su apertura, diferentes usuarios habituales, público, así como los músicos de la banda de Paterna, han comentado algunas deficiencias a nivel perceptivo, durante las actividades musicales que allí se ofrecen, “la acústica de la sala no es buena”. Por estos motivos la asociación musical contactó con la UPV y se pensó en la posibilidad de un estudio de las características acústicas de la sala con el acondicionamiento acústico actual y posteriormente proponer las mejoras acústicas pertinentes con el fin de mejorar la acústica del auditorio.

1.1 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es caracterizar y mejorar la acústica en el Auditorio Antonio Cabeza de Paterna. A partir de los conocimientos adquiridos durante el grado en la asignatura de acústica para la edificación. Se llevará a cabo un estudio del acondicionamiento acústico del teatro a través de medidas y simulaciones para obtener los valores de los parámetros acústicos de la sala en el estado actual. A partir del análisis de los resultados y con la ayuda de un programa de simulación, se conseguirá una aproximación a los parámetros teóricos ideales clásicos de una sala que está dedicada fundamentalmente a actuaciones de música sinfónica.

Como objetivos secundarios

Aprender a utilizar el equipamiento necesario para realizar las medidas de los parámetros que caracterizan la calidad acústica de un auditorio real. Aunque el tiempo de reverberación es uno de los más importantes también se debe considerar otros parámetros acústicos como son: la sonoridad, el brillo, la calidez, el tiempo de decaimiento temprano (EDT), etc.

Una parte importante del trabajo consistirá en llevar a cabo las mediciones “in situ” con la instrumentación y equipamiento del laboratorio de Acústica de la Escuela Politécnica Superior de Gandía.

Otro objetivo será profundizar en el uso de software de simulación del acondicionamiento acústico. Que es una herramienta fundamental a la hora de diseñar la geometría y los revestimientos de los cerramientos con el fin de optimizar la acústica de la sala en fase de construcción. En este caso al estar el auditorio ya construido la simulación (junto con las medidas) constituye una potente herramienta para verificar el estado actual de la acústica del recinto y proponer mejoras en el caso que se detecten deficiencias.

1.2 Estructura del TFG

En el primer capítulo se describen los objetivos del trabajo, a continuación, se explicarán en el segundo capítulo los conceptos y teorías acústicas necesarias para desarrollar la tarea, así como la normativa utilizada.

A continuación, se dará una explicación sobre el proyecto más detallada sobre el emplazamiento y estado actual del auditorio.

El siguiente paso es la descripción de cómo se obtuvieron las medidas en el auditorio y como se realizó la simulación con el software, así como la interpretación de dichos resultados para posteriormente proponer las soluciones, que una vez estudiadas se simularán con un software para confirmar y verificar la mejora.

Finalmente se expondrán las conclusiones alcanzadas en el trabajo.

2. Conceptos y normativa

2.1 Conceptos de acústica de salas

En este capítulo se explican algunos conceptos teóricos necesarios para realizar este proyecto, centrándose en las teorías y parámetros existentes para el estudio del acondicionamiento acústico en recintos cerrados. A continuación, se comentará la normativa utilizada en la toma de medidas.

2.1.1 Introducción al campo sonoro en recintos cerrados

La Acústica de salas (Room acoustic en inglés) abarca, entre otros, dos grandes ámbitos cuya aplicación a un problema concreto requiere que se aborden conjuntamente: en primer lugar el del **aislamiento acústico**, que estudia la protección contra los ruidos y vibraciones que se desean evitar en recintos habitables, de espectáculos, oficinas, tiendas, etc., y el del **acondicionamiento acústico** que aborda la problemática de adaptar una sala al uso al que está destinado, mejorando la calidad acústica en el interior suponiendo que ya está aislado del exterior [3].

La influencia en el campo acústico por la presencia de la sala se detecta por dos diferencias con respecto a la percepción del sonido en la situación de campo libre:

La primera es el refuerzo sonoro (pasivo, sin sistemas electroacústicos). En efecto, si se comparan los niveles percibidos en campo libre y en un recinto concreto, se aprecia un incremento de nivel sonoro debido al efecto de las reflexiones de la onda sonora en los cerramientos del local.

La segunda es la reverberación, o persistencia del sonido una vez que la fuente deja de emitir, que es un parámetro característico de cada recinto.

Ambos fenómenos tienen su origen en las reflexiones de la onda sonora en las superficies que conforman el local. Para caracterizar estas superficies, desde el punto de vista del balance energético que se produce en cada reflexión se utiliza el coeficiente de absorción definido en el siguiente punto.

2.1.1.1 Coeficiente de absorción acústica (α)

Es el cociente entre la energía acústica absorbida (E_a) y la energía incidente (E_i) sobre una superficie, es decir:

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i}$$

Sus valores estarán comprendidos entre 0 para un material completamente reflectante y 1 para un material totalmente absorbente.

El coeficiente de absorción de un material se determina mediante dos tipos de ensayos de laboratorio, el primero consiste en la medida de una muestra de material en un tubo de Kundt, y el segundo consiste en la medida de una muestra de material en una sala cámara reverberante siguiendo el procedimiento normativo (UNE-EN ISO 354:2004) a partir de la diferencia entre el $TR_{inicial}$ sin muestra y el nuevo TR_{final} al introducir la muestra de material absorbente (ref apuntes de clase APE).

A partir del coeficiente de absorción se define el área de absorción.

2.1.1.2 El área de absorción equivalente (A)

Dada una superficie S caracterizada con un coeficiente de absorción α , se define el área de absorción equivalente de la misma, y se denota por A , como $A = \alpha S$.

Su significado físico es el siguiente: es el área de una ventana abierta (cuyo coeficiente de absorción es la unidad) equivalente a la absorción total de la superficie en cuestión. Por ejemplo, una superficie de 10 m^2 con un coeficiente de absorción de 0.2, se comportará aproximadamente igual que una superficie completamente reflectante con una ventana abierta equivalente de 2 m^2 ($10 \text{ m}^2 \times 0.2$).

En el caso de un local con superficies heterogéneas, para su determinación, se suman los productos $\alpha_i S_i$ para cada uno de los distintos materiales del local por su correspondiente coeficiente de absorción acústica. Es decir A vendrá dada por la expresión,

$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \dots + \alpha_n S_n = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i$$

El coeficiente de absorción medio α_m de las superficies del local, puede obtenerse a partir de la expresión:

$$\alpha_m = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i}{S_T} = \frac{A}{S_T}$$

y el área de absorción del local como: $A = \alpha_m S_T$

En la figura siguiente se muestra la energía acústica que incide E_i sobre un cerramiento, parte de la energía se refleja E_r y el resto se absorbe E_a en el propio volumen del cerramiento E_d , o bien se transmite E_t . De manera que se cumple $E_a = E_r + E_t$. Si realizamos un balance energético en la interacción de la onda incidente con el cerramiento, la energía incidente se transforma en energía reflejada más energía absorbida, se tendrá

$$E_i = E_r + E_a \rightarrow 1 = \alpha_r + \alpha_a$$

donde se ha dividido ambos miembros por E_i y α_r es el coeficiente de reflexión

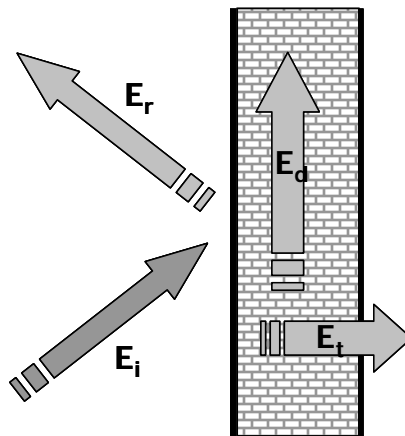


Fig 1. Se muestra la energía acústica que incide E_i sobre un cerramiento, parte de la energía se refleja E_r y el resto se absorbe E_a .

En la figura 2 se muestra un salón de actos con los coeficientes de absorción típicos de los materiales que contiene (butacas 0.4, pared recubierta de material absorbente 0.8, etc.)

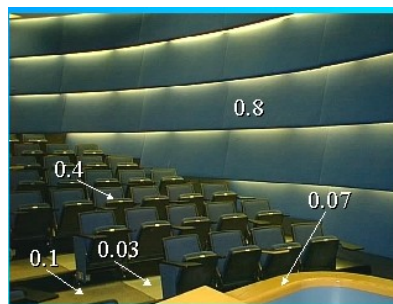


Fig 2. Elementos con diferentes coeficientes de absorción en una sala

Para obtener la absorción acústica total real de un recinto tenemos que incluir (además de la absorción de las diferentes superficies que la delimitan), también se ha de incluir la absorción del aire, sobre todo cuando el volumen es grande y para frecuencias altas. Otro término que se ha de incluir son las personas y butacas sobre todo en la zona de la audiencia. De manera que una fórmula más completa de la absorción acústica total sería [4] (ref. Avilés) :

$$A_T = A_{superficies} + A_{butacas} + A_{personas} + A_{aire}$$

A continuación se definen cada uno de los términos de esta expresión excluyendo el primer término ya definido anteriormente:

-Absorción del aire (A_{aire})

El aire existente en el recinto proporciona una absorción acústica sobre todo cuando el volumen es grande $V > 5000 \text{ m}^3$ (al aumentar el recorrido del rayo acústico hasta encontrar una superficie donde se refleja) y para frecuencias a partir de 2 kHz, se caracteriza con la expresión

$$A_{aire} = 4mV = 4 \cdot 1.89 \cdot 10^{-11} f^2 \cdot V$$

Donde: V = Volumen de la sala expresada en m^3 y m = coeficiente de atenuación del sonido en m^{-1} , es función de la frecuencia f

Se presenta un ejemplo de la absorción del aire en octavas para un volumen de 5000 m^3

f(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
$A_{aire}(\text{m}^2)$	0.001	0.0059	0.024	0.095	0.378	1.512

Tabla 1. Ejemplo del área de absorción del aire

Se observa que realmente este término es importante solo para frecuencias a partir de 2 kHz.

-Absorción del público y audiencia

En auditorios para música, teatro, etc. donde el público asistente consta de un gran número de personas N y su aportación $A_{público}$ a la absorción total del recinto será

$$A_{público} = N A_{persona}$$

Donde $A_{persona}$ representa la absorción acústica promedio de una persona que dependerá de la frecuencia y del tipo de ropa que lleven

Ejemplo de Kath and Kuhl's [5] de los coeficientes de absorción medidos en cámara reverberante

f(Hz)	$A_{persona}(m^2)$					
	125	250	500	1000	2000	4000
Persona de pie con abrigo	0.17	0.41	0.91	1.30	1.43	1.47
Músico sentado con instrumento	0.60	0.95	1.06	1.08	1.08	1.08

Tabla 2. Áreas de absorción de personas y músicos.

-Absorción de las butacas

Para la zona de audiencia se suponen butacas con un tanto por cien medio de superficie tapizada Según Beranek [6], vacías y ocupadas con lo que se tiene el efecto conjunto de las butacas y las personas.

f(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
vacía	0.56	0.64	0.70	0.72	0.68	0.62
ocupada	0.68	0.75	0.82	0.85	0.86	0.86

Tabla 3. Área de absorción de las butacas vacías y ocupadas

2.1.2 Teorías para el estudio del acondicionamiento acústico

A la hora de abordar el estudio del acondicionamiento acústico de una sala existen varias teorías acústicas disponibles con sus ventajas y limitaciones y es importante conocer en qué casos son aplicables para resolver los problemas que se presentan en el acondicionamiento de las salas.

El campo acústico que genera una fuente puntual es esférico hasta que llega a los cerramientos de un recinto en donde sufre reflexiones lo que da lugar a la superposición de las diferentes ondas (directa más reflejadas) que crean el campo acústico en cada momento. Si para cada onda que se propaga representamos su dirección de avance con una recta normal al frente de ondas. A estas direcciones de propagación las llamaremos rayos acústicos, por analogía con la Óptica geométrica en las que se denominan rayos ópticos [3].

La parte de la Acústica que estudia el campo acústico a partir del trazado de rayos se denomina **Acústica Geométrica**. Se supone que la fuente emite un número finito de rayos sonoros y este estudio es necesario en el diseño del acondicionamiento de un recinto. Una primera aplicación de esta teoría será estudiar la posibilidad de ecos y de focalizaciones.

Los rayos acústicos que son emitidos por la fuente encuentran en su propagación las diferentes paredes laterales, techo, suelo y aparecen las primeras reflexiones. A continuación van apareciendo de forma sucesiva más reflexiones de segundo, tercer, ...n-orden, de forma que en cualquier punto de la sala llegan rayos acústicos de "casi" cualquier dirección volviéndose el campo acústico más reverberante. A partir de ese instante ya no es posible un estudio geométrico.

Durante este proceso se va perdiendo energía acústica, alcanzándose un régimen estacionario en el recinto, cuando los cerramientos y los diferentes objetos existentes en la sala absorben la misma energía por unidad de tiempo que la potencia acústica emitida por la fuente. En este momento se alcanza una energía media constante en la sala. Al dejar de emitir la fuente, la energía presente en la sala no desaparece de inmediato sino que pasa cierto tiempo hasta que la energía acústica se absorba por completo y el sonido deje de ser audible. En estas condiciones no es conveniente seguir el recorrido de cada rayo, sino que se tendrá que abordar de forma estadística la energía acústica en su conjunto con la denominada **Acústica Estadística**.

Con las dos teorías anteriormente mencionadas no se ha tenido en cuenta el comportamiento físico real de la evolución de las ondas. Se deberá introducir **la Acústica Ondulatoria** que permite

resolver la ecuación diferencial de las ondas acústicas en su propagación en la sala. La resolución de las ecuaciones diferenciales que se plantean en salas de geometría compleja resulta muy complicado o imposible y se tiene que recurrir a métodos numéricos que proporcionan soluciones aproximadas. Además si el volumen de la sala es grande, resolver por métodos numéricos e incluso con un tamaño de rejilla grande ya supondría unos tiempos de cálculos muy grandes. Siendo imposible resolverlo en la práctica a medida que aumentamos la frecuencia.

2.1.2.1 Campo sonoro en el interior de un recinto

Introduzcamos ahora dos conceptos importantes en el estudio del campo sonoro en un recinto como son el campo directo y el campo reverberante (también llamado difuso)

- Campo directo

Es el campo acústico que se tiene en la propagación de la onda emitida por la fuente y que llega al receptor directamente, es decir sin alcanzar ningún cerramiento. Este campo es el mismo que se tendría en la propagación de la onda en campo libre, por ejemplo en el exterior y que su nivel de presión sonora L_{PD} vendría dada por la expresión

$$L_{PD} = L_W - 20 \log r - 11 + 10 \log Q$$

Donde: L_W es el nivel de potencia acústica emitida por la fuente, r la distancia fuente-receptor y Q el factor de directividad de la fuente

- Campo reverberado (proporcionado por la sala)

Es el campo que existe en la sala una vez que la energía acústica llega de casi todas las direcciones al receptor (campo reverberante o difuso) su nivel de presión sonora L_{PR} viene dado por

$$L_{PR} = L_W - 10 \log A + 6 \text{ dB}$$

Donde: L_W es el nivel de potencia acústica emitida por la fuente A es el área de absorción del recinto. Se observa que no depende de la distancia a la fuente.

El nivel sonoro total vendrá dado por la superposición del campo directo y el reverberante

$$L_{PT} = L_{PD} \oplus L_{PR}$$

El nivel de presión L_p en dB en un punto del local se obtendrá a partir de la expresión (ref. apuntes APE):

$$L_p = L_W + 10 \log \left(\frac{4}{R} + \frac{Q}{4\pi r^2} \right)$$

donde:

Q : es el factor de directividad de la fuente (ejemplo una fuente omnidireccional $Q=1$), A : es el área de absorción del local ($A = \alpha_m S_T$), r es la distancia fuente-receptor, R es la constante característica del recinto y que es un factor que modifica el área de absorción A mediante la expresión, $R = \frac{A}{1-\alpha_a}$ siendo α_a el coeficiente de absorción media de la sala.

En un recinto se pueden distinguir tres zonas: la zona de predominio de campo directo, donde domina la emisión de la fuente, la zona de predominio de campo reverberante y una zona intermedia (ver figura x).

La distancia a la que el campo directo y el reverberante son iguales se denomina radio crítico y viene dado por la expresión:

$$\text{Radio crítico} = \sqrt{\frac{QR}{16\pi}}$$

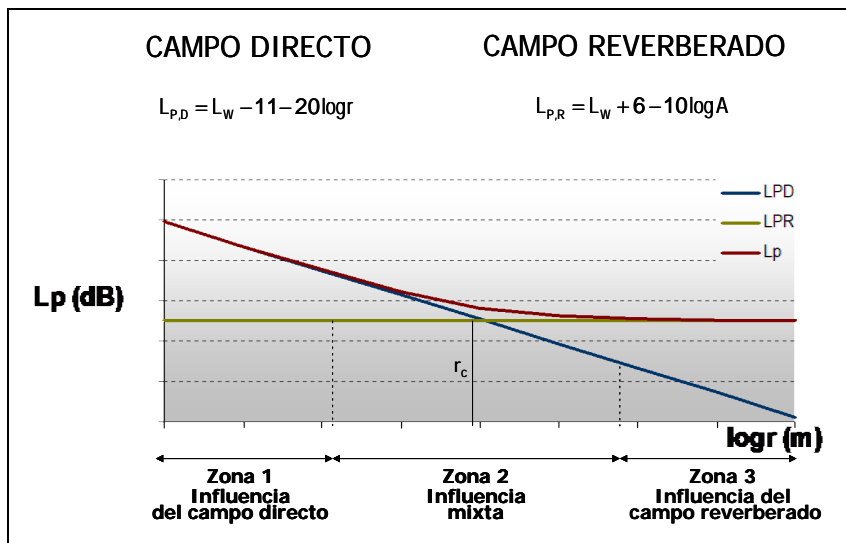


Fig 3. Se muestra la representación de los campos directo $L_{p,D}$, reverberado $L_{p,R}$ y la superposición de ambos L_p (fuente apuntes clase)

-Ruido de fondo. Curvas NC

Se considera ruido de fondo todo aquel ruido presente en una sala cuando en la misma no se realiza ninguna actividad. Dicho ruido puede ser debido al sistema de climatización, a las demás instalaciones eléctricas y/o hidráulicas, e incluso puede provenir del exterior del recinto provocado por el ruido de tráfico.

La evaluación objetiva del grado de molestia que un determinado ruido ambiental provoca en un oyente se lleva a cabo mediante la comparación de los niveles de ruido existentes en un recinto, en cada banda de octava comprendida entre 63 Hz y 8 kHz, con un conjunto de curvas de referencia (ver figura 4) denominadas NC (del inglés Noise Criteria) [2].

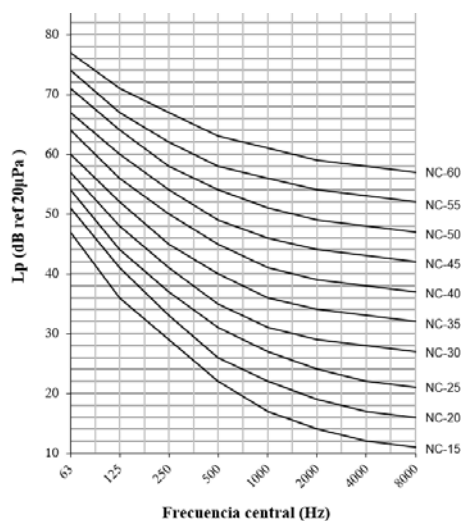


Fig 4. Curvas de referencia NC

Se utilizan para establecer los niveles máximos recomendados para diferentes tipos de recintos en función del uso al que están destinados, en la tabla 4 se muestran algunos ejemplos

Tipo de recinto	NC recomendada
<i>Estudio de radio</i>	15
<i>Sala de conciertos/teatros</i>	15-25
<i>Sala de conferencias/aula</i>	20-30
<i>Biblioteca</i>	30-35
<i>Restaurante</i>	35-40
<i>Cafetería</i>	40-45
<i>Polideportivo</i>	40-50
<i>Talleres (maquinaria pesada)</i>	50-65

Tabla 4. Curvas NC recomendadas según el tipo de recinto

2.1.2.2 Óptica geométrica para el diseño del acondicionamiento de salas

A continuación se resumen los procedimientos seguidos por la óptica geométrica que nos ayudan en el diseño del acondicionamiento de la acústica de salas.

-Método de las fuentes imagen

Se seguirá este método de las imágenes para el trazado de rayos que permite controlar las primeras reflexiones (que tienen una gran influencia en la percepción subjetiva de la música que estemos escuchando). Dadas las posiciones de la fuente y del receptor se busca para cada plano la posición de la fuente imagen, el procedimiento consiste en:

1. Para un plano, se busca la recta que pase por la imagen F y sea perpendicular a la superficie del plano (o bien a su prolongación). Sobre esta recta se busca un punto F' situado al otro lado de la superficie y simétrico a F respecto al plano de reflexión (que diste de la superficie igual que F).
2. Se traza un rayo que una F' con el receptor R y encontramos un punto C donde esta recta cruza con la superficie reflectante.
3. Ahora ya es fácil ver la trayectoria real que seguiría la reflexión desde la fuente F al receptor R. Trazamos la recta que une F con C (ver figura 5) y a continuación seguimos la dirección de la recta que va desde F' a R desde el punto C hasta R. En general se tendrá una fuente imagen para cada cerramiento de la sala.

La figura 6 nos ayuda a entender de forma más fácil este procedimiento en el ejemplo se han considerado solo las paredes laterales.

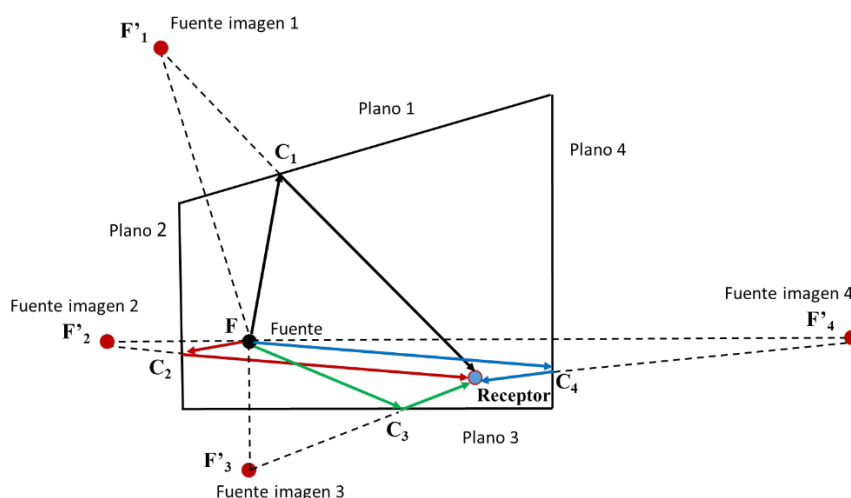


Fig. 5 se muestran las 4 fuentes imágenes y las cuatro trayectorias de las reflexiones con las paredes laterales (no se ha considerado el suelo y el techo)

En resumen puede decirse que para el estudio de la distribución de la energía en las primeras reflexiones y del sonido directo, es fundamental la óptica geométrica.

-Ecograma

El ecograma representa la representación gráfica de la llegada temporal de los rayos sonoros junto con su nivel energético de las diferentes reflexiones al receptor. En la figura 6 podemos ver el nivel de presión sonora de cada uno de los rayos sonoros emitidos (directo y reflejados) por la fuente y que alcanzan a un receptor. Notemos que el ecograma variará para cada posición del receptor.

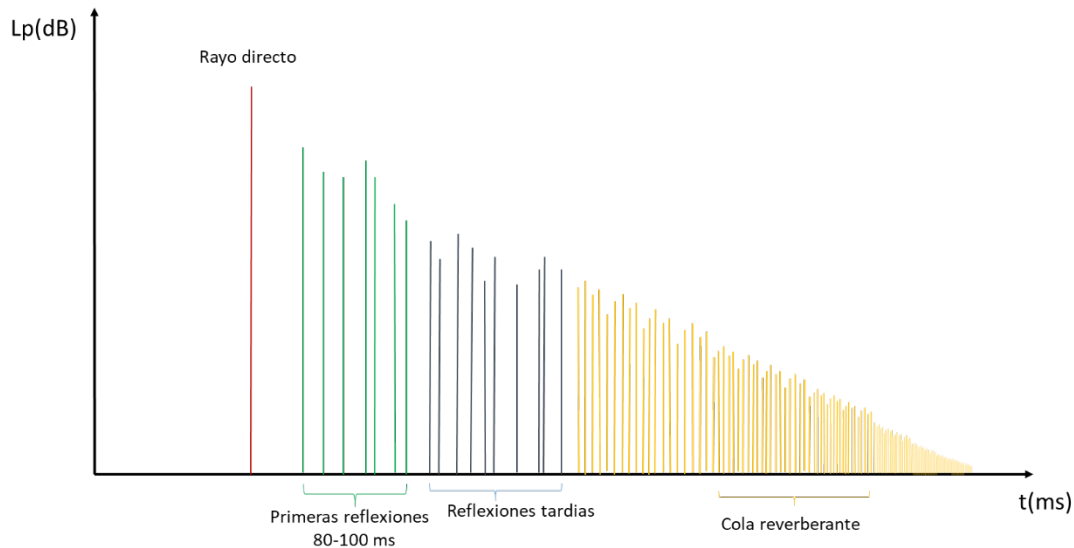


Fig. 6. Ecograma típico con indicación del sonido directo, las primeras reflexiones, reflexiones tardías y la cola reverberante. Elaboración propia.

2.1.3 Parámetros acústicos objetivos

El diseño de salas cuyo uso está destinado a la interpretación musical es el más complejo dentro de la acústica de recintos. No existen fórmulas magistrales que permitan garantizar la calidad acústica del recinto y además va a depender del tipo de música que se va interpretar, clásica, barraca, ópera, etc. [2]

Otra dificultad es el que no existe un lenguaje común entre los diferentes colectivos involucrados: ingenieros acústicos, músicos, críticos musicales,..etc.

Diferentes autores (Beranek Barron, Arau,..) han llevado a cabo números esfuerzos para relacionar las valoraciones subjetivas de la calidad de una sala con una serie de parámetros objetivos que sean fácilmente medibles. A día de hoy no se haya conseguido una correspondencia perfecta entre la percepción y lo objetivo aunque se van produciendo avances notorios [2].

A continuación se describirán los parámetros acústicos que se utilizan para describir las características acústicas de los auditorios de música TR, EDT, T20, T30, BR, Brillo, Tmid, C80,

..

-Tiempo de reverberación. Fórmula de Sabine (1868-1919)

Es el tiempo necesario para que el nivel de presión acústica disminuya 60 dB, una vez que la fuente sonora haya dejado de emitir a partir de un nivel estacionario.

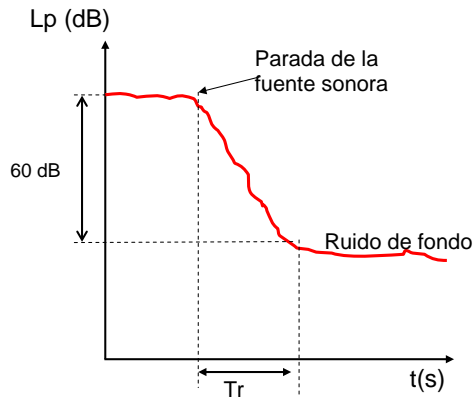


Fig 7. La figura muestra la curva de caída del L_p sonora en cuanto la fuente se apaga. A partir de ella se obtiene el tiempo de reverberación.

La fórmula de Sabine se emplea en las primeras fases del diseño y en salas con coeficientes de absorción bajo, es decir espacios reverberantes. Además es un parámetro que ofrece un valor único del TR independiente del punto/zona de la sala que estemos estudiando y se ha obtenido suponiendo condiciones especiales como homogeneidad e isotropía del campo sonoro, es decir que existe un campo completamente difuso (similar al que existe en una cámara reverberante) condiciones que en una sala real no se cumplen exactamente

$$TR = \frac{0,162 V}{A}$$

Siendo V el volumen de la sala o recinto y A el área de absorción equivalente.

TR Sabine incluyendo la absorción del aire

Para volúmenes grandes $V > 5000 \text{ m}^3$ y a frecuencias superiores de 2 kHz se debe incluir la absorción del aire como se ha visto en el apartado 2.1.1.2

$$TR = \frac{0,162 V}{\alpha_m S_T + 4mV}$$

TR Eyring

La fórmula de Sabine es errónea para recintos poco reverberantes con coeficientes de absorción medio de la sala mayores a $\alpha_m > 0.2$ y es mejor usar la fórmula de Eyring

$$TR = \frac{0,162 \cdot V}{-S_T \ln(1 - \alpha_m) + 4mV}$$

Cada variable de la fórmula representa

V = Volumen de la sala expresada en m^3

S_T = Superficie total de las superficies interiores de la sala (en m^2)

α_m = coeficiente de absorción medio de la sala (adimensional)

m = constante de atenuación del sonido en m^{-1} , es función de la frecuencia f y se calcula:

$$m = 1.89 \cdot 10^{-11} f^2$$

- *Early Decay Time (EDT)*

Tiempo de reverberación obtenido a partir de la caída de los primeros 10 dB contados a partir del nivel estacionario (0 dB) desde que cae -5 dB hasta -15 dB multiplicada por 6.

Otros parámetros temporales se muestran en la tabla 5

T_{20} (s)	Tiempo de reverberación obtenido a partir de la caída de los primeros 20 dB contados desde el nivel estacionario entre -5 dB y -25 dB multiplicada por 3
T_{30} (s)	Tiempo de reverberación obtenido a partir de la caída de los primeros 30 dB contados desde el nivel estacionario entre -5 dB y -35 dB multiplicada por 2
T_{mid} (s)	Tiempo de reverberación medio se define como promedio de los valores correspondientes a los TR de las bandas de 500 Hz y 1 kHz. Su expresión matemática: $T_{mid} = \frac{TR_{500Hz} + TR_{1000Hz}}{2}$

Tabla 5. Definición de los parámetros temporales T_{20} , T_{30} y T_{mid}

-Intimidad (ITDG)

Se relaciona con la sensación de proximidad de la fuente, y con las dimensiones aparentes de la sala. El **parámetro objetivo** que más se aproxima es el *ITDG* (Initial Time Delay Gap), que es el tiempo que pasa desde que llega el sonido directo hasta que llega la primera reflexión significativa. Un *ITDG* alto se asocia a una sala con poca intimidad. El *ITDG* pequeño significa que pasa poco tiempo desde que llega el sonido directo hasta que llega la primera reflexión.

Según Beraneck aconseja un límite superior de 20 ms para una posición central de la zona de butacas.

Actualmente considera un *ITDG* apropiado entre 12 y 25 ms.

-Sonoridad (G)

Hace referencia al refuerzo del sonido que produce la sala. De forma objetiva se evalúa la sonoridad como la diferencia entre el nivel de presión sonora en la sala y el que produciría la misma fuente (omnidireccional) en campo libre, a 10 metros de distancia.

$$G = Lp(Sala) - Lp(10 m) \text{ (dB)}$$

Un valor apropiado (según Beraneck) para G_{mid} (para las frecuencias medias) se encuentra entre 4 y 5,5 dB.

-La calidez acústica, Bass Ratio (BR)

Representa el refuerzo de los sonidos graves respecto a los medios, si la sala reproduce mal los graves, la música suena más frágil, sin fuerza. Se define como el cociente entre la suma de los tiempos de reverberación correspondientes a las bandas bajas de frecuencias de 125 Hz y 250 Hz y la suma de los TR correspondientes a las bandas de frecuencias medias de 500 Hz y 1 kHz:

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

Los valores recomendables se encuentran entre $1.1 < BR < 1.45$.

-El brillo (Br)

Se asocia con un sonido “metálico”. Indica el refuerzo relativo de las altas frecuencias respecto a las medias. Se define como el cociente entre la suma de los tiempos de reverberación correspondientes a las bandas de alta frecuencias de 2 kHz y 4 kHz y la suma de los TR correspondientes a las bandas de frecuencias medias de 500 Hz y 1 kHz:

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

-Claridad musical (C_{80})

Parámetro objetivo que nos indica el grado de separación entre los diferentes sonidos individuales que forman parte de una composición musical. De acuerdo con Cremer [7] se define como la relación entre el nivel de energía sonora registrada por el receptor en los primeros 80 ms y el nivel de energía que llega a partir de los 80 ms (se calcula en bandas de octava desde 125 Hz hasta 4 kHz)

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt}$$

Los valores recomendados [2] para una sala de audición musical son:

$$\text{Sala ocupada: } -2 < C_{80} < 2$$

$$\text{Sala vacía: } -4 < C_{80} < 0$$

2.2 Normativa utilizada

A continuación, se hará un breve resumen de la normativa y legislación utilizada en este proyecto en lo que corresponde a la toma de medidas in situ, así como también los detalles concretos necesarios para obtener los cálculos sobre los parámetros requeridos. Dicha información se explica en la Norma UNE-EN ISO 3382-1:2010 [14] Acústica medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos.

La norma UNE-EN ISO 3382-1 establece los métodos para la obtención del tiempo de reverberación (TR) y de otros parámetros acústicos en salas de espectáculos a partir de las respuestas impulsivas y del ruido interrumpido. Describe el procedimiento de medición, la instrumentación requerida y el método para evaluar los datos. Como objetivo es poder comparar las mediciones del TR con mayor precisión y consensuar el uso los nuevos métodos de nuevos de medición.

2.2.1 Equipo para las medidas

-Fuente acústica:

Se utilizará en las medidas una fuente tan omnidireccional como sea posible, en la tabla 6 se muestra la máxima desviación permitida de la directividad de la fuente. Se debe superar en al menos 45 dB el ruido de fondo (de lo contrario se usarán técnicas de promediado sincrónico con señales pseudoaleatorias).

f (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Desviación máxima (dB)	±1	±1	±1	±3	±5	±6

Tabla 6. desviación máxima permitida en la directividad de la fuente

- **Micrófonos:** omnidireccionales. Cumplirán la norma CEI 60651. Con diámetro máximo de 13 mm.

- **Filtros:** Cumplen la norma CEI 61260,

- **Sonómetros:** cumplirán la norma CEI 61672-1

2.2.2 Metodología en las mediciones

Se deberá medir temperatura y la humedad relativa del aire con precisiones $\pm 1^\circ$ y 5% respectivamente, así como describir el estado de ocupación de la sala (vacía, tipo estudio con músicos sin público, ocupación con un mínimo de 80% de público)

-Posiciones de medida:

- Dejar más de 2 m entre las posiciones de medida (aproximadamente $\lambda/2$)
- Situar el micrófono a más de 1 m a la pared más próxima ($\lambda/4$).
- Las medidas se realizarán a una altura de 1,2 m (oyente sentado)
- Evitar posiciones de medida muy cerca de la fuente para evitar una excesiva influencia del campo directo de la fuente.
- Posiciones de fuente en el escenario, mínimo 2 posiciones de fuente a 1,5 m sobre el suelo.

2.2.3 Procedimientos de medida

Se contemplan dos métodos de medida igualmente válidos

1. Método del ruido interrumpido

Para la excitación del recinto se debe utilizar un altavoz y la señal que recibe será un ruido de banda ancha aleatorio (rosa por ejemplo) o bien una señal pseudoaleatoria con un relación señal ruido de al menos 45 dB en todas las bandas de frecuencia para medir T_{30} .

La duración de la excitación del recinto debe ser suficiente para que el campo acústico llegue al estado estacionario antes de apagar la fuente. Es conveniente que dure varios segundos y no inferior a $TR/2$.

Es necesario promediar a partir del número de mediciones en cada posición de medida debido a la naturaleza aleatoria de la señal de la fuente, se puede hacer de dos formas diferentes:

Hallando los TR individuales para todas las curvas de decrecimiento y calculando su valor medio, o bien a partir de la media del conjunto de decrecimientos de presión acústica al cuadrado y después calcular TR de la curva resultante.

2. Método de la respuesta impulsiva integrada hacia atrás

La respuesta impulsiva desde una posición de fuente hacia una posición de receptor y se puede medir de múltiples maneras (disparos de pistola de foguero, chirridos, explosión globo, etc). También se pueden utilizar señales acústicas especiales como barridos secuenciales o secuencias pseudoaleatorias de longitud máxima MLS respetando los requisitos del espectro y las características direccionales de la fuente. Este segundo procedimiento es el que se seguirá en este trabajo.

Debido a la naturaleza del ruido aleatorio se realizarán al menos tres medidas de las curvas de caída y de la respuesta al impulso y se promediarán.

Seguidamente se describirán las características de las señales acústicas utilizadas en este método y en este proyecto

-Sine sweep exponencial:

Para generar la señal sine sweep [8] se debe definir a partir de una señal sinusoidal $g(t)$ con una fase $\varphi(t)$ dependiente del tiempo

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

Donde la fase viene dada por la siguiente expresión

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

Siendo f_1 y f_2 las frecuencias inicial y final del barrido en frecuencia.

Es importante en las medidas acústicas que la duración de la secuencia generada debe ser mayor que el TR.

-Señal MLS

Una señal pseudoaleatoria de longitud máxima (MLS) es una señal pulsada con valores casi aleatorios de 0 y 1. Puede analizarse como una secuencia de N ceros o N unos, con un periodo $N = 2^m - 1$.

Características

- La función de auto correlación es constante
- El valor de DC es igual a $1/N$

- El factor de cresta es 1 (0 dB)

Desventajas presentan problemas en sistemas con ligera no linealidad

3. Descripción detallada del proyecto

3.1 Emplazamiento del auditorio

El 21 de mayo de 2009 tiene lugar el acto oficial de la “Colocación de la Primera Piedra” del Centro Musical Paternense, que además contará con un auditorio anexo, con capacidad para 480 plazas.

El 8 de enero de 2011 se inaugura de la Escuela de Música y del Auditorio Antonio Cabeza por parte del Ilmo. Ayuntamiento de Paterna, con la realización de un concierto en el Auditorio Antonio Cabeza de la Banda Sinfónica.

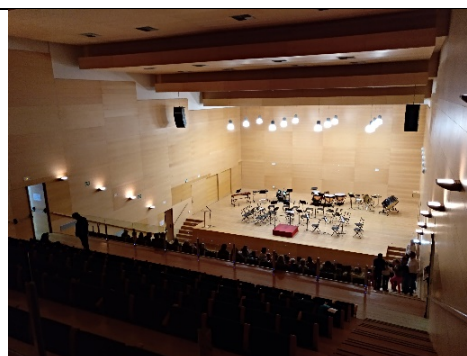
En la actualidad la Sociedad cuenta con 450 socios y con las siguientes secciones musicales: Banda Sinfónica, Banda Juvenil, Joven Orquesta, Coro, Banda de Iniciación y Grupo de Percusión. La escuela cuenta con más 200 alumnos matriculados, impartándose las siguientes especialidades: flauta, oboe, fagot, clarinete, saxofón, trompeta, trompa, trombón, bombardino, tuba, percusión, violín, viola, violonchelo, contrabajo, piano y guitarra, además de Lenguaje musical y Canto.

El auditorio está situado en la Avenida Vicent Montes Alfonso en la localidad de Paterna (ver imagen 1).





*Figura 9. Vista exterior del auditorio.
Fuente google maps*



*Figura 10. Vista interior del auditorio.
Fuente propia*

3.2 Explicación de la acústica del auditorio actual

Como se ha dicho en la introducción, el auditorio es utilizado principalmente para la realización de diferentes actos musicales. Los usuarios habituales, público así como los músicos, han comentado algunas deficiencias a nivel perceptivo, durante las actividades musicales, han comentado que “la acústica del auditorio no es buena”. Por estos motivos la asociación musical habló con los tutores de la posibilidad de llevar a cabo un estudio de las características acústicas de la sala y estudiar la posibilidad de proponer las mejoras acústicas en el auditorio.

En los siguientes puntos se explica detalladamente las diferentes características del recinto.

3.2.1 Características geométricas:

Dividiremos el auditorio en dos zonas, la primera el escenario y la segunda el resto de la sala.

El escenario: con su caja escénica con forma rectangular de dimensiones (ancho x largo x alto) 14,90 x 10,95 x 7,7 m y con un volumen de 1256,29 m³ y de superficie 158,68 m² donde se ha restado el área de las pequeñas escaleras laterales de acceso (4,48 m²).

El resto de la sala, en planta (sin contar el escenario) presenta una forma asimilable a “rectangular” de dimensiones (ancho x largo) 14,90 m x 27,45 m. La altura varía entre el valor máximo del foso 10,85 m y la mínima al final de la sala 4,25 m. Con un volumen aproximado de 4301 m³ y la superficie de la audiencia es aproximadamente de 231,6 m². Aunque en realidad el suelo y el techo ascienden de forma escalonada.

El suelo de la audiencia está inclinado, formando un ángulo de incidencia de 24,9° mayor que los 15 grados que es el valor recomendado para evitar el efecto llamado “seat deep”. Efecto que produce un aumento adicional de la absorción al propagarse el sonido de forma rasante sobre la audiencia (que presenta una gran absorción) para el caso que las filas consecutivas no estén elevadas entre ellas lo suficiente. Ocurre para ángulos de incidencia muy bajos, por ejemplo 5°. Afecta principalmente en el ancho de banda entre 100 a 300 Hz.

Además de tener una buena visión del escenario y evitar que desde cualquier punto de las gradas las filas situadas delante impidan la buena visión de la orquesta.

El aforo es de 440 personas (con 20 filas x 22 asientos)

3.2.2 Características acústicas:

El Auditorio Antonio Cabeza de Paterna ya está construido y no podemos intervenir en el diseño del mismo aunque sí que podemos comprobar si las características del mismo cumplen las recomendaciones generales para las salas de concierto.

Prácticamente todas las superficies del auditorio, paredes, el techo, las escaleras están recubiertas de tableros de madera de haya de gran densidad y pegada al suelo o paredes sin cámara de aire, excepto la zona de audiencia que está cubierta por las butacas. Señalar también que existen tres barandillas de cristal, una en la parte baja del foso y otras dos situadas en los pasillos que dividen las zonas de butacas.

Resumamos a continuación los parámetros ideales y sus valores recomendados para nuestra sala según (según Carrión) en la tabla 7

Curvas NC	<i>Entre 20 y 30</i>
Sonoridad G(dB)	$4 < G_{mid} < 5,5$
T_{mid}	$1.8 < T_{mid} < 2 (s)$
EDT (s)	$0,9 T_{mid} < EDT_{mid} \leq T_{mid}$
Calidez (BR(s))	$1,1 \leq BR \leq 1,3$
Brillo (Br(s))	$Br \geq 0,87$
Intimidad ITDG	$ITDG \leq 20 ms$
Claridad musical C₈₀ (sala ocupada)	$-2 < C_{80} < 4 dB$

Tabla 7. Parámetros recomendados para salas para música sinfónica

3.2.3 Consideraciones sobre Acústica Ondulatoria

A continuación aplicaremos la acústica ondulatoria para comprobar que la sala no presenta problemas de modos propios.

Con la siguiente suposición simplificada al considerar el recinto “asimilable” a un paralelepípedo de dimensiones $L_x=15,90$ m, $L_y=35,85$ m, $L_z=7,5$ m. Las frecuencias de los modos propios de una sala paralelepípeda vendrán dada por la siguiente expresión [13] y si sustituimos las dimensiones del auditorio

$$f_{m,n,l} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{p}{L_z}\right)^2} = \frac{345}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{15,90}\right)^2 + \left(\frac{n}{35,85}\right)^2 + \left(\frac{p}{7,5}\right)^2}$$

Se obtienen los diferentes modos, los modos axiales serán los de frecuencia más baja al ser la sala de grandes dimensiones y no van a existir problemas de modos propios ya que el primer modo propio es de 4,8 Hz y el mayor 23 Hz. Además las paredes opuestas no son paralelas salvo las laterales

$$f_{1,0,0} = \frac{345}{2 \cdot 15,9} \approx 10,8 \text{ Hz}; \quad f_{0,1,0} = \frac{345}{2 \cdot 35,85} \approx 4,8 \text{ Hz}; \quad f_{0,0,1} = \frac{345}{2 \cdot 7,5} \approx 23,0 \text{ Hz}$$

Respecto a los primeros modos oblicuos y tangenciales más bajos sus frecuencias seguirán siendo bajas, por ejemplo

$$f_{1,1,0} \approx 11,9 \text{ Hz}; \quad f_{1,0,1} \approx 25,4 \text{ Hz}; \quad f_{0,1,1} \approx 23,5 \text{ Hz}; \quad f_{1,1,1} \approx 25,9 \text{ Hz}; \quad f_{2,2,2} \approx 51,8 \text{ Hz};$$

Y no van a representar un problema ya que la energía del campo acústico se concentra fundamentalmente en los modos bajos y en mayor proporción en los axiales.

-Frecuencia de Schroeder es la frecuencia a partir de la cual la densidad de modos propios es tan grande y no van a presentarse problemas de modos propios

$$f_{corte} = \sqrt{\frac{c^3 T_{mid}}{8,8 V}} = \sqrt{\frac{345^2 \cdot 1,8}{8,8 \cdot 4302}} = 44,2 \text{ Hz}$$

Por tanto se podrá aplicar la acústica geométrica sin problemas en la simulación para el estudio de la sala a partir de 125 Hz.

-Otras características:

Se procederán a medir las condiciones ambientales humedad relativa y Temperatura del auditorio. En las medidas in situ los valores medidos fueron:

Humedad relativa: 41 %

Temperatura: 24 °C

4. Medidas in situ

4.1 Equipo utilizado

El material utilizado en la campaña de medidas aparece en la tabla siguiente. Se va a explicar con detalle algunos de los elementos utilizados y sus características.

Sonómetro	Sonómetro Integrador tipo 1 modelo 2270 (Brüel & Kjaer) con n° de serie: 2354798
Micrófono	Micrófono ½ pulgada (1,27 cm) Tipo 4189 omnidireccional con rango dinámico con ponderación A de 16,6 dB a 140 dB y rango de frecuencias lineal de 4,2 a 22,4
Calibrador Sonoro	Calibrador Sonoro tipo 1 modelo 4231 (Brüel& Kjaer) con n° de serie: 2343089
Termohigrómetro	Termohigrómetro Testo 635 para medir la temperatura, la humedad relativa con n° de serie 01437787/710
Fuente	Fuente dodecaédrica Omnipower 4292-L (Brüel& Kjaer) con n° de serie 2498653
Amplificador	Amplificador de potencia B&K tipo 2716 con n° de serie 2551039
Tarjeta de sonido	Tarjeta de sonido Fast Track Pro M-AUDIO
Software	ARTA V1.9.2 (Ivo Mateljan, abril 2017)

Tabla 8. Equipo utilizado para la toma de medidas

4.2 Metodología y procedimiento

4.2.1 Procedimiento previo

Previamente a las medidas con el sonómetro, se deberá cargar el módulo del tiempo de reverberación, así como realizar la debida calibración del instrumento.

Para poder obtener la respuesta al impulso de la sala, teniendo en cuenta que se trabajará con la tarjeta de sonido M-AUDIO y el programa ARTA es necesario instalar el software en el ordenador. Instalaremos los drivers de la tarjeta M-AUDIO, ya sea por medio de CD o descargándolos de la página oficial del fabricante además de instalar el programa ARTA en el ordenador.

4.2.1.1 Calibración tarjeta de audio

Para calibrar la tarjeta de audio, en primer lugar se emitirá una señal de referencia por la tarjeta para que podamos ajustar la sensibilidad de la entrada, a continuación se describe como se realiza el ajuste de los parámetros de ARTA:

- Inicio ARTA:

Tras iniciar el programa ARTA, se selecciona el modo de medida Fr1 (Respuesta en frecuencia de canal simple) y se deben configurar los parámetros de medición de la siguiente manera:


Tipo de generador	PN pink (Rosa)
Fs(Hz)	48000
FFT	32768
Compensación	Ninguno
Nivel de generador	0 dB ()

Tabla 9. Parámetros de medición del programa ARTA

-Selección Driver:

Ahora es necesario indicar al programa ARTA que drivers de audio se deben utilizar, en la pestaña **Audio Devices Setup** se seleccionan los drivers de la tarjeta FAST AUDIO PRO.

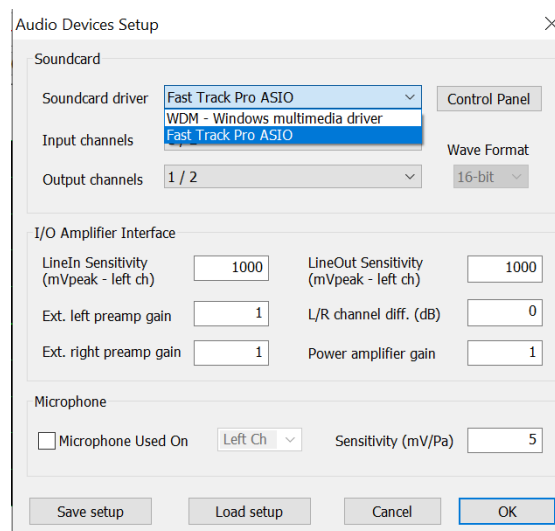


Fig. 11. Selección de los Drivers de audio en el ARTA.

- Conectar la tarjeta en modo bucle:

Se necesita un cable RCA-TRS para conectar la salida RCA (Canal izquierdo) con la entrada TRS de la tarjeta Fast Track Pro. Se deberá activar la opción de entrada de línea y colocar el potenciómetro Mix en la posición PB.

- Calibración:

Después de ejecutar correctamente los pasos anteriores, se mostrará en el display del programa ARTA la señal seleccionada previamente y se ajustará a 0 dB con el potenciómetro de la ganancia del canal. La versión de USB 3.0 da problemas de ruido, se recomienda usar la versión 2.0.

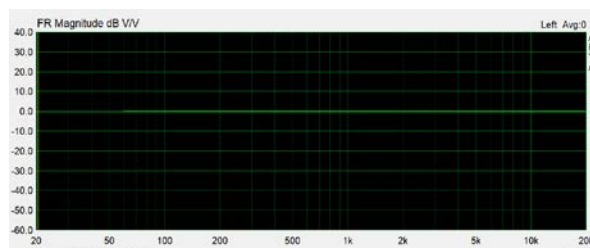


Fig 12. Ajuste de la ganancia a 0 dB.

4.2.1.2 Calibrar micrófono del sonómetro

Después de tener preparada la tarjeta de audio se debe calibrar el transductor B&K que se utilizará como receptor. Para esto se debe tener en cuenta que el transductor que usamos tiene la sensibilidad dada por el fabricante es de 47.2 mV/Pa.

A continuación se deberá introducir el micrófono en el calibrador y encenderlo, para que empiece a emitir un pulso de 1 kHz. Seguidamente conectar el micrófono a la entrada 1 de la tarjeta de audio. Después de esto, abrimos el ARTA y estando en la pestaña de Fr1, abrimos la pestaña de *setup/calibration devices*.

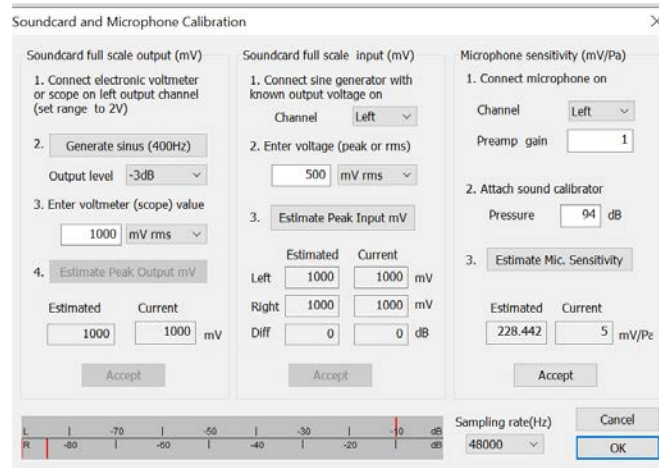


Fig 13. Ventana de dispositivos de calibración.

Pulsar el botón *Estimated Mic sensitivity* y regular con el potenciómetro de ganancia del canal 1 de la tarjeta hasta obtener -10 dB en el display canal izquierdo de ARTA. A continuación se debe ajustar el potenciómetro *Preamp Gain* de la tarjeta hasta que aparezca en el visor de sensibilidad estimada del ARTA, que se aproxime a la sensibilidad del micro 47.2 mV/Pa.

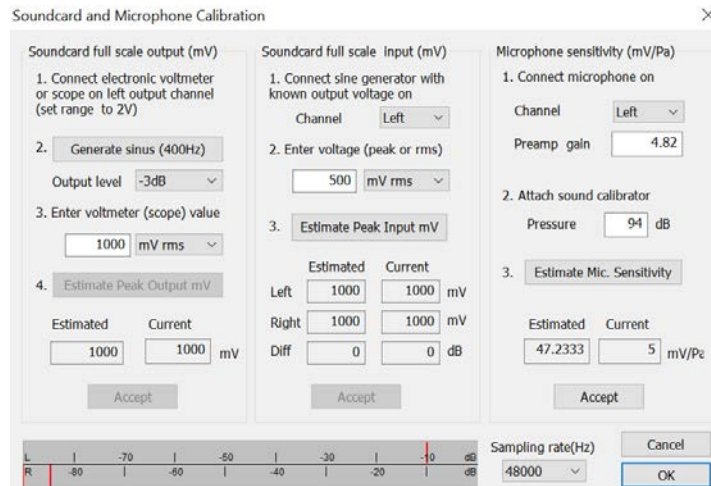


Fig 14. Ajuste de la sensibilidad del micrófono.

Cuando el valor coincida aproximadamente (47.2333) habrá que pulsar *Accept* y después *OK*.

4.2.1.3 Elección de las posiciones de fuente y receptor en el recinto

Se tendrá en cuenta la normativa correspondiente vista en el apartado 2.2, que en este caso es UNE-EN ISO 3382-1 (2010), para la elección de las posiciones de la fuente y el receptor.

- Posiciones de la fuente.

Según la normativa, se requieren como mínimo dos posiciones de fuente, que deberá estar encima del escenario. Teniendo en cuenta los demás requerimientos de la norma las posiciones serán:

Posición 1 de fuente (P1): Centrada y a 5 m del borde del escenario.

Posición 2 de fuente (P2): a 4,20 m de la pared derecha del escenario y a 5 m del borde del escenario.

Para el caso del receptor la normativa exige como mínimo 4 posiciones de receptor para cada posición de la fuente. En este caso se ha decidido ubicar 8 posiciones del receptor para 2 posiciones de fuente, que se muestran en la figura a continuación:

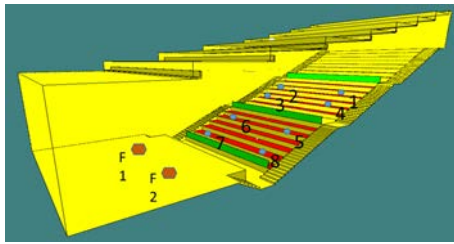


Fig. 15. Posiciones de las fuentes y los receptores en la toma de medidas

4.2.2 Toma de medidas

En este apartado, se describirá detalladamente como se realizaron las medidas

4.2.2.1 Medición de la respuesta al impulso en una sala.

El objetivo es encontrar un procedimiento de medida de la respuesta al impulso de una sala a partir de la instrumentación disponible en el laboratorio de acústica. En primer lugar se calibra y configura (tal como se ha descrito en el punto 4.2.1.1) el programa ARTA para obtener la respuesta al impulso con la ayuda de la tarjeta de sonido M-AUDIO que actúa como generador enviando a la fuente omnidireccional señales tipo sine sweep logaritmo y secuencias pseudoaleatorias MLS. A partir de la respuesta al impulso en diferentes puntos de la sala ya se pueden obtener los parámetros acústicos fundamentales que se usan para el acondicionamiento acústico del recinto y comprobar si la acústica de la sala es buena o mala y proponer acciones de mejora. Al presentarse la dificultad que en el auditorio de Paterna se encontraba en obras se buscó una segunda sala donde se ha podido llevar a cabo un protocolo completo (medidas-procesado-parámetros acústicos –valoración de la sala- propuestas de mejora) para ponerla en práctica en cuanto fue posible (finales de agosto) en nuestro auditorio.

Se explicarán los pasos seguidos para realizar la medida de la respuesta al impulso del recinto.

Montaje y configuración del equipo

El equipo se conectará con la siguiente configuración:

- PC con el software ARTA, al que se conectara la tarjeta de audio mediante USB 2.0
- Se conecta al altavoz omnidireccional a la salida RCA de la tarjeta de audio mediante un cable adaptador de RCA a Speakon
- Conectamos el micrófono B&K con un cable BNC a la entrada del módulo de alimentación phantom, cuya salida se conecta la entrada de la tarjeta de audio, mediante un cable BNC con adaptador TRS.
- Encender la phantom.

Realización de medidas

Una vez realizada la configuración anterior, se procede a realizar las medidas, se explican los pasos a continuación:

-Test de emisión con ARTA PN pink

Utilizando el programa ARTA desde el PC, seleccionar la pestaña de respuesta al impulso “IMP” y seleccionar como longitud de secuencia de 128k (hay que tener en cuenta que el cociente entre la longitud FFT de la secuencia y la frecuencia de muestreo que es la constante de tiempo sea mayor que el TR estimado en la sala) y 44800 de frecuencia de muestreo.

$$\text{Constante de tiempo} = \frac{\text{longitud FFT}}{F_s} = \frac{128000}{44800} \approx 2,857 \text{ s}$$

Promediamos 3 veces. En la figura 16 vemos como configurar dicha señal

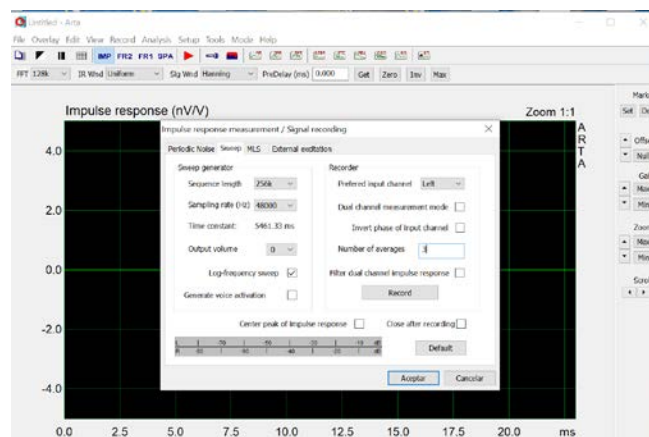


Fig. 16. Configuración para emitir una señal sine sweep exponencial

Se emite primero una MLS y después una señal sine sweep exponencial. Finalmente al pulsar Record, se obtiene la captura de la respuesta al impulso (ver figura 17) que ya se puede exportar como un fichero wav PCM.

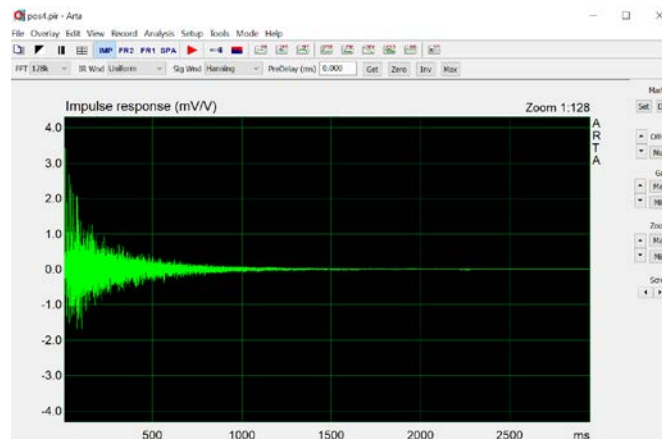


Fig. 17. Captura de la respuesta al impulso cuando excitamos con una señal sine sweep exponencial

Como se ha comentado anteriormente la fuente sonora dodecaédrica OMNIPOWER de B&K que se usará en la sala bajo estudio.

El conexionado de la fuente se hará de la forma siguiente: la salida de la tarjeta se utilizará un cable Jack macho-RCA/ o bien un adaptador Canon XLR macho - RCA y se conecta a la entrada del Amplificador de B&K y su salida un cable Speakon-Speakon a la fuente OMNIPOWER. Encendemos el amplificador (-20 dB a ajustar) y emitimos una señal sine sweep logarítmica e idéntico procedimiento con la señal MLS (en la figura vemos la configuración)

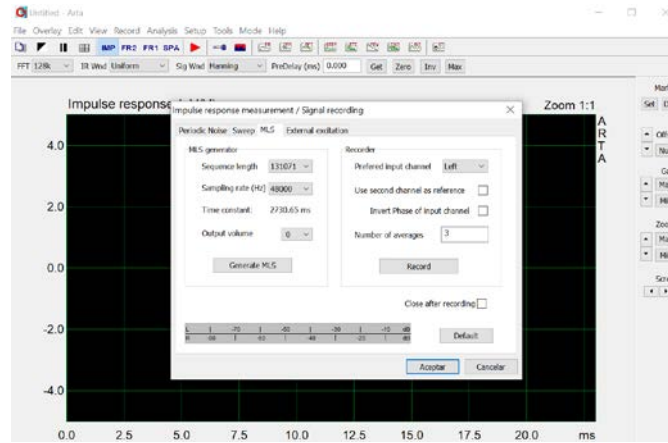


Fig 18. Medición de respuesta al impulso con señal MLS.

En la figura 19 se muestra una fotografía con el conexionado de los equipos en la toma de medidas

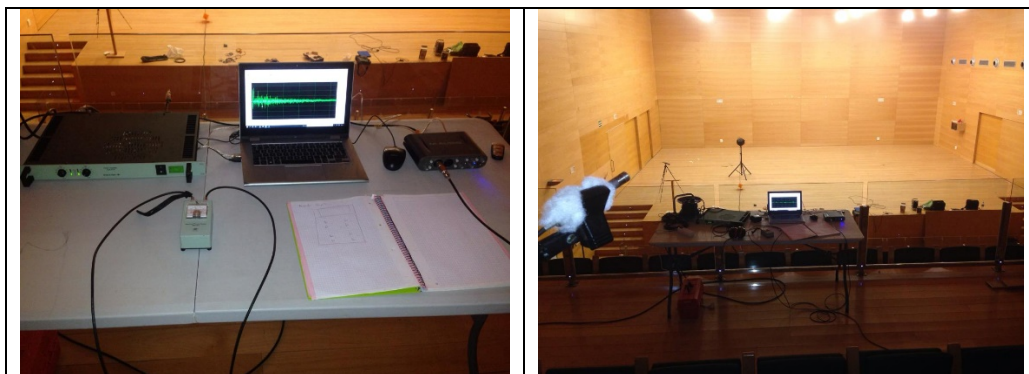


Figura 19 Dispositivo experimental y conexionado para la toma de medidas

En la figura 20 se ve el procedimiento para exportar la medida de las diversas señales capturadas de la respuesta al impulso a un fichero en formato WAV file (16 bit PCM)

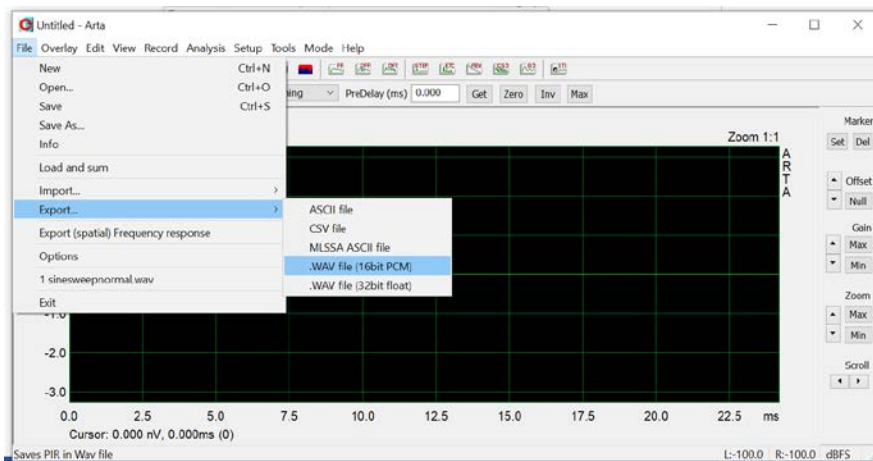


Fig. 20. Exportación de la medida de la respuesta al impulso en formato .wav

los ficheros guardados en formato .wav se pueden analizar de la siguiente forma:

Pulsar la pestaña *Analysis*, a continuación se selecciona *ISO3382-acoustical parameters* y en la nueva ventana que se abre, elegimos *Table presentation for 1/1 octave bands*

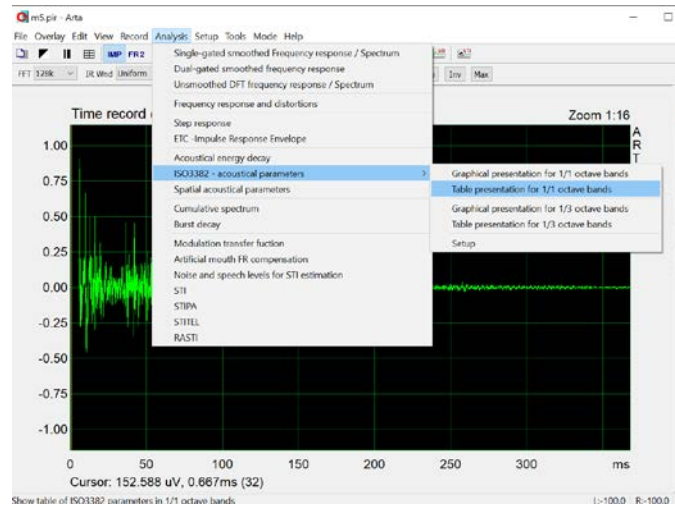


Fig 21. Análisis de parámetros acústicos del ARTA

y obtenemos los valores de los parámetros acústicos de la norma ISO 3382 en el rango de 125 a 4000 Hz

F (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T30 (s)	0.790	1.184	0.859	0.929	0.912	0.986	0.903	0.724
rT30	-0.994	-0.994	-0.996	-0.999	-1.000	-0.999	-1.000	-1.000
T20 (s)	0.819	1.100	0.897	0.947	0.897	0.993	0.899	0.738
rT20	-0.991	-0.988	-0.988	-0.997	-0.999	-0.999	-0.999	-0.999
T10 (s)	0.863	0.883	0.652	0.935	0.881	0.990	0.964	0.745
rT10	-0.967	-0.984	-0.980	-0.991	-0.996	-0.998	-0.998	-0.988
EDT (s)	0.937	0.820	0.604	0.572	0.665	0.690	0.683	0.376
C80 (dB)	7.29	5.45	11.39	8.27	7.90	7.25	8.11	11.40
C50 (dB)	5.63	1.57	6.90	4.89	5.59	4.82	6.22	8.75
D50 (%)	78.52	58.95	83.04	75.51	78.35	75.23	80.74	88.24
Ts (ms)	58.446	55.532	25.194	42.720	37.692	46.920	39.220	26.712
BR	1.083							

Fig. 22. Tabla con los valores de los parámetros acústicos

4.2.2.2 Medición del Tiempo de Reverberación con sonómetro.

Para la medida del TR se usa el sonómetro B&K 2250 [12] y se elige la configuración del TR por el método del ruido interrumpido y se registran los tiempos de reverberación, se utiliza una fuente omnidireccional OMNIPOWER B&K. En estas mediciones también se debe medir el ruido de fondo.

- 1) Selección del módulo *Tiempo de Reverberación* (en la parte superior de la pantalla) del sonómetro
- 2) Pulsar en el menú principal y seleccionar la opción Setup. Ajustar el parámetro de ancho de banda (bandwidth) y la frecuencia mínima y máxima.
- 3) Desactivar la opción de medición de mapas en el control de mediciones.
- 4) Desactivar la opción de almacenamiento automático para verificar los resultados antes de guardar de forma manual.
- 5) El analizador detecta automáticamente el tiempo de decaimiento y detiene la medición con nivel bajos de ruido de fondo. Pero si hay valores elevados del ruido de fondo el analizador no lo puede detectar y la medición puede llegar a durar hasta 20 s. Para minimizar este tiempo de medición se debe ajustar el parámetro del tiempo de decaimiento máximo por ejemplo a 3 s en la mayoría de salas, y un poco mayor para salas de reverberación de gran tamaño.
- 6) Seleccionar ruido interrumpido
- 7) Ajustar el número de decaimientos, 3 en nuestro caso.
- 8) Seleccionar generador interno y el tipo de ruido, por ejemplo rosa.
- 9) Ajustar el nivel de salida del generador interno de forma que coincida con la entrada del amplificador de potencia que se utilice, se ajusta con la opción Level (ref 1V)
- 10) Ajustar el tiempo de escape
- 11) Ajustar el tiempo de acumulación de forma que el ruido alcance un nivel estable antes de la medición (tomar este tiempo mayor que el TR/2).
- 12) Seleccionar la fuente sonora para optimizar la respuesta en frecuencia de la salida del generador interno para obtener una respuesta de potencia plana.

Seguidamente se presenta de forma resumida la selección de la configuración utilizada en la medida del TR en el auditorio:

CONFIGURACION COMPLETA		
ENTRADA	comprobar que el micrófono es el que se indica	
ANCHO DE BANDA	Selección frecuencias de medida por ejemplo 1/1 octava 125 Hz a 4 kHz	
CONTROL DE MEDIDA		
MAPA	No	
AUTO-GUARDADO	No	
MEAS TIME	3 s (*)	
RUIDO	Interrumpido	
Nº CAIDAS	3	
SEÑAL DISPARO	Nada	
GRABACION SONORA	No	
GENERADOR	Interno	
	Tipo de ruido	Rosa
	Nivel [Ref 1V]	- 3.0 dB
	Tiempo escape	5 s
	Tiempo subida	2 s
	Fuente sonora	OMNIPOWER
POST-PROCESADO	Promedio temporal	SI
	Banda Superior e Inferior	elección frecuencias de registro por ejemplo (1/1 octava 125 Hz -4 kHz)

Tabla 10. Configuración del sonómetro para las medidas.

Comprobamos que al finalizar la medida del TR no aparece ningún indicador de calidad (emoticono rojo 🚫), que indicaría que en esa banda de frecuencia no se ha podido medir bien el TR.

La figura muestra un ciclo de medición RT típico realizado automáticamente por el analizador y a continuación describimos los pasos seguidos [12]:

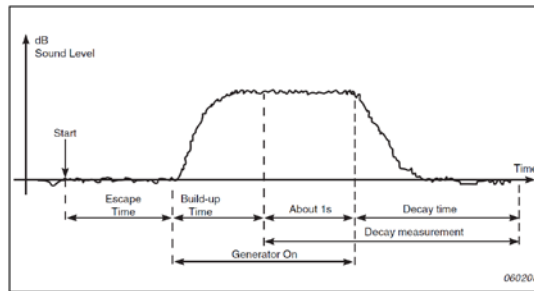


Fig 23. Ciclo completo de medida por el sonómetro en método interrumpido. Fuente B&K

- 1) Tras el inicio *Start* transcurre un tiempo de escape (que se utiliza para abandonar el lugar de medición)
- 2) A continuación se enciende el generador de ruido que espera un tiempo de acumulación (*build-up time*) que se necesita para alcanzar un nivel estable (se recomienda al menos que sea mayor que $TR/2$)
- 3) Se inicia la medida del decaimiento. El nivel registrado durante el primer segundo se utiliza como nivel de referencia de 0 dB para identificar el nivel acústico de la excitación.
- 4) El generador de ruido se apaga, y se inicia el tiempo de decaimiento (*Decay time*).
- 5) La medición del decaimiento finaliza cuando se llega al ruido de fondo (detectado automáticamente por el sonómetro).
- 6) Los pasos del 2 al 5 se repiten automáticamente al número de promedios que se haya establecido y los decaimientos medidos se promedian para reducir la incertidumbre de la medición.
- 7) Los espectros del tiempo de reverberación EDT, T20 y T30 se calculan y muestran en el display. Se pueden visualizar también las curvas de caída.

4.3 Volcado e interpretación de datos

Una vez hechas todas las mediciones necesarias, se realiza un volcado de los datos del sonómetro al ordenador utilizando el software correspondiente de Brüel&Kjaer BZ-5503 que permite gestionar la transferencia de datos entre el sonómetro y un ordenador.

Una vez abierto el programa, el siguiente paso es descargar todas las grabaciones del sonómetro al ordenador y posteriormente se exportan a un documento Excel con el que más adelante se realizan los cálculos. En la interfaz del programa también se pueden ver las gráficas de los niveles de presión por frecuencias de cada medición.

Se dará especial atención a los valores comentados con anterioridad (ver tabla 7), que son los importantes en nuestro caso concreto, donde la mayor parte de la utilización del auditorio es para eventos de música.

4.3.1 Resultados con el sonómetro

A continuación se muestran las tablas con los valores promedios globales de la sala obtenidos con las medidas del sonómetro (EDT, T20 y T30) , en el anexo 1 se pueden ver los resultados

completos de las mediciones y que representan un promedio de todas las posiciones de la fuente (2) y de receptor (18) (ver anexo 1).

PROMEDIOS SONÓMETRO					
f(Hz)	T20	T30	EDT	BR	brillo
125	1,74	2,49	1,88	0,87	0,89
250	2,16	2,28	2,06		
500	2,54	2,69	2,42		
1000	2,73	2,81	2,62		
2k	2,49	2,61	2,30		
4k	2,21	2,31	2,04		

Tabla 11. Valores de los parámetros acústicos medidos con el sonómetro.

Se ha medido el ruido de fondo de la sala con el aire acondicionado en funcionamiento y de ahí obtenemos la curva NC de la sala

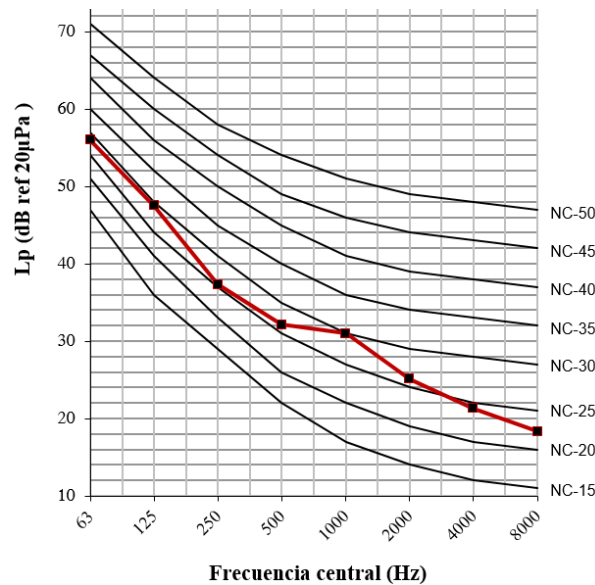


Fig. 24. Medida del ruido de fondo del auditorio, se cumple la NC-30

4.3.2 Resultados con la respuesta al impulso

Se han obtenido los parámetros acústicos a partir de los ficheros wav, abriéndolos con el programa ARTA siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 4.2.2.1, se obtienen los parámetros acústicos en los 8 puntos de la sala medidos. Comparando los dos métodos de medida el primero con secuencias MLS con el segundo que utiliza señales Sine Sweep exponencial. Comprobamos que las diferencias en los resultados son mínimos como se puede comprobar en el anexo 3 confirmando que ambos métodos son igualmente válidos a la hora de obtener la respuesta al impulso (IR). Por tanto solo trabajaremos con la señal Sine Sweep. La tabla global de la respuesta de la sala viene dada por

RESPUESTA AL IMPULSO SINE SWEEP						
f (Hz)	T30 (s)	T20 (s)	EDT (s)	C80 (dB)	Ts (ms)	BR
125	1,80	1,75	1,47	0,62	121,28	0,74
250	2,30	2,18	1,89	-1,23	145,16	
500	2,77	2,55	2,24	-2,80	171,14	
1000	2,82	2,73	2,58	-2,75	184,08	
2000	2,57	2,45	2,26	-2,12	163,24	
4000	2,23	2,14	1,96	-0,83	137,29	

Tabla 12. Resultados globales de los parámetros acústicos obtenidos a partir de la respuesta impulsiva de la sala

5. Simulación con software

5.1 Software Catt-Acoustic

Para llevar a cabo la simulación acústica del auditorio se ha elegido el programa Catt-Acoustic V9.1d, ya que se dispone de licencia UPV. Se basa en la acústica geométrica.

Otros programas de simulación acústica que existen disponibles en el mercado: Ease, RayNoise, Odeon, etc.

5.1.1 Introducción a Catt-Acoustic

Desarrollado por la empresa de software Caesoft, CATT-Acoustic es un programa de análisis/simulación acústica de salas [17].

Permite el estudio de espacios con mucho ruido (caso de entornos de trabajo con máquinas), espacios abiertos como estadios, o grandes infraestructuras.

Este proyecto se centra en el diseño de espacios con funcionalidades acústicas, en este caso un auditorio para programas musicales.

En general, la simulación permite calcular la inteligibilidad de la sala (fundamental en un teatro), o el tratamiento que debemos hacer para conseguir una sala multiuso, o bien lo que se pretende en este caso en concreto, la funcionalidad musical en un auditorio.

5.1.2 Funcionamiento

La predicción acústica de salas es, en general, el proceso en el que por medio de algoritmos de acústica geométrica se infieren ecogramas en bandas de octavas basados en el modelo CAD 3D de una sala. Las propiedades de material dependientes de la frecuencia (absorción, difusión) son asignadas a las superficies 3D geométricas de la sala, mientras que las directividades de las fuentes dependientes de la frecuencia se asignan a las fuentes sonoras.

A partir de estos ecogramas se pueden estimar un gran número de parámetros numéricos, como inteligibilidad del habla o el tiempo de reverberación.

Catt-Acoustic utiliza como tecnología principal algoritmos de trazado especular de conos y rayos, y el algoritmo de las fuentes imagen.

5.2 Creación del mapa del auditorio y simulación

5.2.1 Cálculo de cotas a partir de los datos del Ayuntamiento de Paterna

Primeramente es necesario obtener los planos del auditorio para poder extraer todas las medidas del recinto, para poder escribir el código posteriormente.

El ayuntamiento de Paterna no disponía de una versión del proyecto básico del auditorio en AUTOCAD para importar a CATT-Acoustic. Los datos proporcionados son a partir de las fotocopias de los planos del proyecto básico, a partir del cual se calcularon las cotas de las distancias de todos los vértices, tal como se muestra en el dibujo

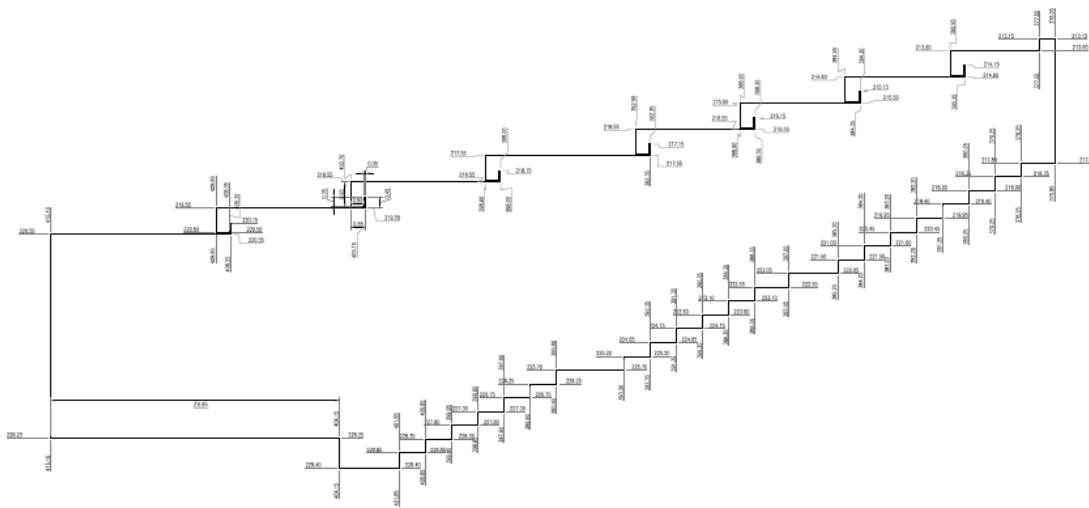


Figura 25. Vista de perfil del auditorio

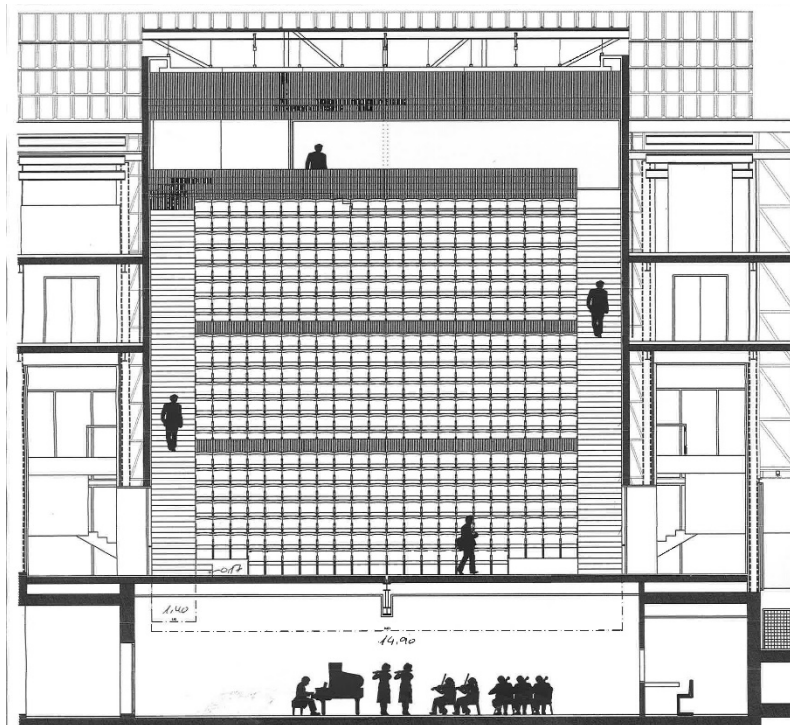


Fig. 26. Vista frontal de la audiencia desde el escenario

5.2.2 Creación plano acústico en Catt-Acoustic

Una vez conocidas todas las coordenadas de los vértices del auditorio, se procede a escribir los códigos en sus correspondientes ficheros de Catt-Acoustic.

Los archivos iniciales para empezar con el diseño de la sala son tres:

- 1. MASTER.GEO:** La geometría de la sala está incluida en el archivo MASTER.GEO, en donde una parte se describen en coordenadas cartesianas de los vértices y en otra las superficies planas de los cerramientos y demás elementos de la sala. También se asocian a cada superficie los coeficientes de absorción y de difusión de los materiales que lo forman.
- 2. SRC.LOC:** Se definen las características de las fuentes y su ubicación.
- 3. REC.LOC:** En este archivo se incluirán los receptores y su ubicación.

5.2.2.1 Diseño de la geometría de la sala en MASTER.GEO

Como hemos dicho la geometría de la sala está incluida en este archivo, el código se describen en coordenadas cartesianas los vértices, las superficies planas de los cerramientos y los coeficientes de absorción y de difusión de los materiales.

En primer lugar se empieza escribiendo el código correspondiente en el archivo MASTER.GEO, donde se especifica la geometría del recinto. El código se escribe de la siguiente forma:

Es necesario numerar todos los vértices asignando a cada uno sus coordenadas cartesianas x, y, z.

Se parte del vértice 1 que será nuestro origen de coordenadas, $x = 0$, $y = 0$, $z = 0$.

Quedando así:

Nº vértice	X	Y	Z
1	0	0	0

Ha sido necesario establecer mediante comentarios un orden para ubicar todos los vértices, agrupándolos en las diferentes partes del recinto, y así encontrar rápidamente el fallo en caso de error.

Una vez estén detallados todos los puntos, el siguiente paso es escribir la parte del código donde se diseñan las superficies, es decir paredes/techos/suelos de la sala. Escribiremos cada plano entre corchetes, se deben nombrar y numerar [nº nombre / vértices ordenados/ material].

Los vértices que forman dicho plano se anotan entre estas barras /vértices numerados /. Es importante para el adecuado funcionamiento del software que se ordenen correctamente los vértices, para que el programa pueda orientar la superficie reflectante de la pared hacia el interior del recinto. Los vértices se deben ordenar de forma antihoraria, al mirarlos desde el interior del local. También existe la opción de numerarlos de forma horaria pero en este caso deben ir dentro de contra barras \vértices numerados horaria \.

Después de escribir los vértices definimos el tipo de material para cada plano, ya sea madera, audiencia, vidrio, etc. Quedando así:

[1 escenario / 2 6 7 8 9 10 11 83/ wood]

A partir del plano de cotas se numeran los vértices y se construye en el fichero master.geo partiendo de un modelo simplificado al que se le añaden posteriormente los detalles más minuciosos así como el techo escalonado con sus resonadores, las gradas escalonadas, las escaleras derecha e izquierda laterales y las tres barandillas de vidrio.

A medida que el modelo virtual 3D se hace más complejo aparecen errores al ejecutar el programa. Para su depuración se seleccionó en geometry view/check la pestaña **Create file** (ver figura) que crea un fichero texto debug.txt

En el fichero aparecen detallados los errores cometidos en el diseño: planos duplicados, vértices duplicados, planos curvados, planos coincidentes o que se cortan, en definitiva que provocan que el recinto no esté bien cerrado y aparecen fugas de los rayos acústicos que hacen que el programa no funcione. A continuación se muestra una parte del fichero debug.txt

CATT-Acoustic v9.1d debug : Paterna

```
-----  
DUPLICATE PLANE ID's : no !  
PLANES MODELLED TWICE : no !  
DUPLICATE CORNER ID's : no !  
DUPLICATE CORNERS :  
Corner 301 nearly same as 520  
Corner 288 nearly same as 518  
Corner 701 nearly same as 420  
Corner 688 nearly same as 418  
Corner 492 nearly same as 150  
Corner 926 nearly same as 84  
SINGLE-CONNECTED CORNERS : no !  
INACCURATE PLANE CORNERS : no !  
COINCIDING PLANES : no !  
EDGES CUTTING/TOUCHING :  
Edge from corners 178 to 78 in plane 2 touches plane 357  
Edge from corners 178 to 78 in plane 2 touches plane 358  
Edge from corners 166 to 66 in plane 8 touches plane 378  
.....  
.....  
POSSIBLY REVERSED PLANES : no !  
-----
```

Finalmente después de depurar el código y corregir los errores el fichero se obtiene un fichero master.geo que contiene:

-808 vértices.

-431 planos, de los cuales 20 son de audiencia.

En la figura se muestra una imagen en 3D del diseño final del auditorio virtual listo para la simulación, donde en color rojo se muestra la zona de audiencia:

:

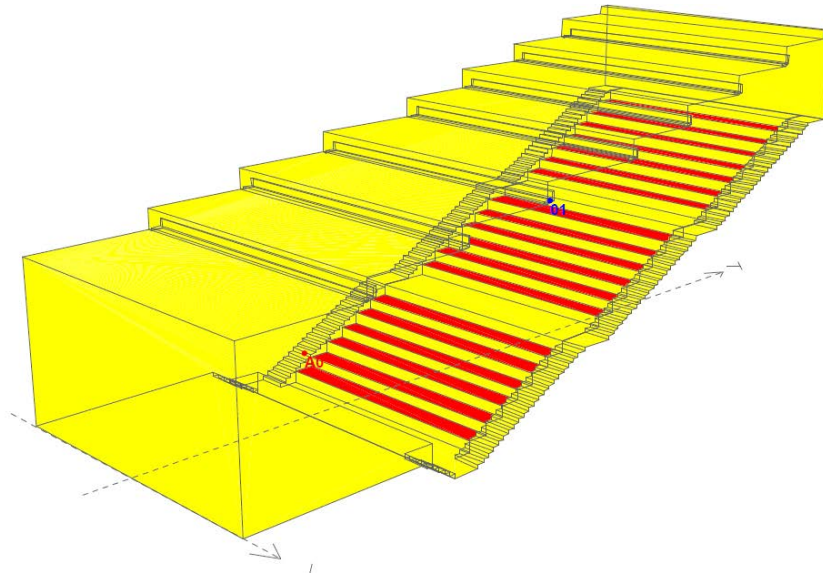


Fig 27. imagen en 3D del diseño final del auditorio virtual.

A continuación se adjunta una parte del fichero master.geo final (en el anexo 4 se puede ver completo):

```

Fichero MASTER.GEO
;CATT-Acoustic v9.1 Auditorio Paterna V.10
;MASTER.GEO

;absorption and scattering coefficients 125Hz to 4kHz. [%]. RGB-color
ABS audiencevoid = <56 64 70 72 68 62> L <20 30 40 50 60 70> { 255 0 0 }
ABS audiencefull = <68 75 82 85 86 86> L <30 40 50 60 70 80> { 255 0 0 }
ABS wood = <15 13 10 9 8 7> { 255 255 0 }
ABS vidrio = <18 6 4 3 2 2> { 0 255 0 }
CORNERS
;origen X Y Z
;1 0 0 0
; right wall botom, el punto 5 y 86 desaparecen debajo escalera punto 3 y 826 son el mismo
2 7.45 0 0
3 7.45 9.35 0
4 7.45 10.95 -1.15
....
....
904 -6,05 10,95 -1,15
905 -6,05 10,95 -0,958
906 -7,45 10,95 -0,958
PLANES
[1 escenario / 2 3 825 850 950 925 926 83/ wood]
[2 techo escenario / 81 82 178 78/ wood]
[3 techo vert escenario escalon/ 78 7801 7806 1786 1781 178 177 77/ wood]
[4 techo escalon1 dir down up / 77 177 174 74/ wood]
....
....
;tapar huecos escalera 68 segundo tramo
[4101 esc tram2 /689 692 693 696 697 700 701 419 418/ wood]

```

```
[4102 esc tram3 / 701 704 705 708 709 712 713 716 717 720 721 724 725 728 729 732 733
736 737 740 741 744 745 748 749 752 753 756 757 760 761 764 765 768 769 772 432 431
430 429 428 427 426 425 424 423 422 421 / wood]
[4103 esc tram4 /773 776 777 780 781 784 785 433/ wood]
[4104 esc tram5 /785 788 789 792 793 796 797 435/ wood]
```

Tabla 13. Código Master.geo

La mayoría de la superficie del recinto (suelo, techo y paredes del escenario, paredes laterales y del fondo, escaleras laterales son tableros de madera lacados de haya se han elegido estos coeficientes de absorción expresados en bandas de octava según

ABS material = < coeficientes de absorción en octavas en tanto por cien >

Por ejemplo para madera se tendrá: ABS wood = <15 13 10 9 8 7>

Para la audiencia suponemos butacas con un tanto por cien medio de superficie tapizada, ver referencia de Beraneck [6].

5.2.2.2 Código de SRC.LOC

En esta parte del código se especifican diferentes parámetros de la fuente sonora, así como:

- Numero de fuentes
- Posición
- Directividad
- Nivel de presión

Se adjunta a continuación el código correspondiente:

```
SRC.LOC
;CATT-Acoustic v9.1 Manual Shoebox Example

;SRC.LOC
LOCAL src_z = 1,5
LOCAL mitadanchura_esc = 7,45

;fuente centrada en el escenario a 5 m del borde del escenario
SOURCE A0
DIRECTIVITY = "omni" ;pre-defined ideal natural omni-directional source
POS = 0 10,95-5 src_z ;position
AIMANGLES = 0 0 ;aiming angles (does no matter with an omni)
Lp1m_a = <90 90 90 90 90 90> ;SPL @ 1m on the axis of the source (pink)
END

; fuente a 3,25 m la derecha de A0 coordenadas 4,20-5,95-1,5
SOURCE A1
DIRECTIVITY = "omni"
POS = mitadanchura_esc-3,25 10,95-5 src_z
AIMANGLES = 0 0
Lp1m_a = <90 90 90 90 90 90>
END
```

Tabla 14. Código del fichero SRC.LOC

5.2.2.3 Código de REC.LOC

Aquí se especifican las características de los receptores:

- Numero de receptores.
- Posición.

Código:

- ;REC.LOC
- ;CATT-Acoustic v9.1 Auditorio de Paterna
-
- RECEIVERS
- ; correspondientes a los planos 28 30 32 34 36 38 42 44 46 48 50 52
- ;de momento activamos la fuente 1 y los planos 30 y 36
- ; estos planos estan desactivados como audiencia, sin butacas 56 58 60 62 64 66 68
-
- ; primer grupo de butacas se ha medido en las filas 2 y 5 (6 butaca izq y dcha)
- ;1 3,025 13,75 0,6
- ;2 -3,025 13,75 0,6
- 3 3,025 14,75 1,1
- 4 -3,025 14,75 1,1
- ;5 3,025 15,75 1,65
- ;6 -3,025 15,75 1,65
- ;7 3,025 16,725 2,15
- ;8 -3,025 16,725 2,15
- 9 3,025 17,70 2,7
- 10 -3,025 17,70 2,7
- ;11 3,025 18,7 3,2
- ;12 -3,025 18,7 3,2
- ; segundo grupo de butacas se ha medido en las filas 3 y 5 (6 butaca izq y dcha)
- ;13 3,025 22,275 4,25
- ;14 -3,025 22,275 4,25
- 15 3,025 23,25 4,8
- 16 -3,025 23,25 4,8
- ;17 3,025 24,25 5,3
- ;18 -3,025 24,25 5,3
- 19 3,025 25,25 5,85
- 20 -3,025 25,25 5,85
- ;21 3,025 26,25 6,35
- ;22 -3,025 26,25 6,35
- ;23 3,025 27,4 6,9
- ;24 -3,025 27,4 6,9
- ;25 3,025 30,4 7,95
- ;26 -3,025 30,4 7,95
- ; tercer grupo de butacas no se ha medido ya que no hay butacas
- ;27 3,025 31,4 8,45
- ;28 -3,025 31,4 8,45
- ;29 3,025 32,9 9

- ;30	-3,025	32,9	9
- ;31	3,025	33,375	9,5
- ;32	-3,025	33,375	9,5
- ;33	3,025	34,35	10,05
- ;34	-3,025	34,35	10,05
- ;35	3,025	35,35	10,55
- ;36	-3,025	35,35	10,55
- ;37	3,025	36,35	11,1
- ;38	-3,025	36,35	11,1
-			

Tabla 15. Código del fichero REC.LOC

5.3 Interpretación de resultados y comparativa con las medidas IN SITU

5.3.1 Comparación de los dos métodos

Después del proceso de medición y simulación se ha comprobado, que tanto en un método como en otro se han obtenido unos resultados para los parámetros acústicos muy similares.

Si se compara los resultados del sonómetro con la respuesta al impulso se obtiene un buen acuerdo con ambos métodos (ver tabla 16), las mayores diferencias se encuentran en la banda de 125 Hz.

f(Hz)	Med. sonómetro			A partir de la IR			Diferencias Sonom-Sine Sweep			
	T30(s)	EDT(s)	BR	T30(s)	EDT(s)	BR	T30 (s)	EDT (s)	BR	
125	2,49	1,88	0,87	1,80	1,47	0,74	0,69	0,41	0,13	
250	2,28	2,06		2,30	1,89		-0,02	0,17		
500	2,69	2,42		2,77	2,24		-0,08	0,18		
1000	2,81	2,62		2,82	2,58		-0,01	0,04		
2000	2,61	2,30		2,57	2,26		0,04	0,04		
4000	2,31	2,04		2,23	1,96			0,08		0,08

Tabla 16. Resultados de las medidas In Situ.

Ambos métodos confirman unos tiempos de reverberación (T30) y también el EDT excesivos en todas las bandas.

Se lleva a cabo una simulación en las mismas condiciones que se han realizado las medidas (faltan las 7 últimas filas de butacas) y a continuación se presenta en la tabla 17 los resultados del T30 comparando con los resultados obtenidos con las medidas experimentales del sonómetro y la obtención de la respuesta al impulso emitiendo señales Sine Sweep exponencial.

f(Hz)	T30 (s)	T30 (s)	T30 (s)
125	2,49	1,80	2,08
250	2,28	2,30	2,36
500	2,69	2,77	2,71
1000	2,81	2,82	2,79
2000	2,61	2,57	2,75
4000	2,31	2,23	2,12
	Medidas con el Sonómetro	Obtención de la IR Sineswp	Mapa medidas CATT-Acoustics

Tabla 17. Resultados del T30 obtenidos con sonómetro, los obtenidos a partir de la respuesta al impulso emitiendo señales Sine Sweep y con CATT-Acoustics.

Por tanto, se puede concluir que tanto las medidas experimentales como la simulación confirman que la sala presenta en su “estado actual” unos tiempos de reverberación excesivos.

Claro está que en el estado actual (faltan 7 filas de butacas lo que contribuye también a aumentar el TR) no es el estado ideal con toda las butacas de la audiencia completas. Ante la duda que si en el caso de que las medidas se hubieran realizado con todo el mobiliario completo ¿los resultados serían correctos? La respuesta es que no. Se preguntó al Ayuntamiento si al finalizar las obras se había realizado algunas medidas acústicas y la respuesta es que sí.

Citar que al detectar deficiencias acústicas en el auditorio (con todo el mobiliario completo y su decoración interior totalmente acabada) se llevó a cabo un estudio acústico en el año 2010 por la empresa CGM Telecomunicaciones [15] cuya conclusión fue la siguiente:

Así se midió con la sala vacía el 15 de diciembre de 2010 y los resultados de las mediciones indicaron que los tiempos de reverberación a las frecuencias medias (500 y 1000 Hz) eran de 2,25 y 2,27 s respectivamente. Por tanto también valores excesivos.

5.3.2 Interpretación de los resultados

Teniendo en cuenta el uso al que se le da al auditorio, los valores de algunos parámetros fundamentales no son óptimos como se ha comprobado en el apartado anterior en una sala destinada para el uso de realización de actos musicales, para que la acústica sea de calidad.

Recordar que parámetros son los más relevantes para la acústica musical en la sala:

- Tiempo de reverberación (RT)
- Calidez acústica (BR) y brillo (Br)
- Early Decay Time (EDT), T20 y T30
- Sonoridad (G)
- Initial-Time-Delay Gap ITDG (t_i)
- Claridad musical (C_{80})

Existen otros parámetros importantes que están relacionados con la espacialidad del sonido como son la ASW (amplitud aparente de la fuente). La eficiencia lateral y la IACC (correlación cruzada interaural) permiten cuantificar el ASW. No van a estudiarse en este TFG ya que solo se dispuso de una mañana (con permiso del arquitecto) para realizar las medidas.

Se recomienda para estos parámetros relevantes que los valores deben estar comprendidos entre estos rangos (columna 2) de la tabla 18. En la columna 3 se muestran los resultados de los valores anteriores que han sido obtenidos después de realizar las medidas en el auditorio.

Parámetro	Valor recomendado	Valor medido	Cumple
TR_{mid} (s)	1.8-2.0	2,75	NO
Intimidad ITDG	$ITDG \leq 20 \text{ ms}$	$< 20 \text{ ms}$	SI
EDT(s)	$0,9 T_{mid} < EDT_{mid} \leq T_{mid}$	2,52	NO (excesivos)
BR	$1,1 \leq BR \leq 1,3$	0,87	NO
Br	$Br \geq 0,87$	0,89	NO
C_{80} (sala vacía)	$-2 < C_{80} < 0 \text{ dB}$	0,9	NO
Sonoridad G	$4 < G_{mid} < 5,5$	7,5	NO

Tabla 18. Se muestran los valores medidos y los valores recomendados.

Se puede observar que el tiempo de reverberación es demasiado elevado en todas las bandas de frecuencia. Además todos los parámetros salvo el ITDG no cumplen las recomendaciones.

Otro aspecto importante conclusión es que el software de simulación CATT-Acoustics ha sido validado (al menos en el modelo con el que se ha trabajado en el auditorio) ya que los resultados de las medidas coinciden prácticamente con los resultados de la simulación y será una buena herramienta para proponer las acciones de mejora.

Se simula de nuevo el auditorio ahora con las filas de butacas completas, ver modelo con todas las filas de butacas en color rojo, las 3 barandillas en color verde. Se ve la posición de la fuente A0 y las posiciones de los 8 receptores

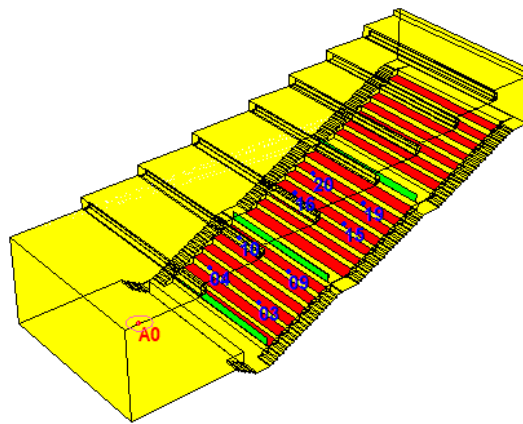


Figura 28. Modelo virtual para el auditorio con las filas de butacas completas y las 3 barandillas

y los resultados en la tabla 19 muestran (ver anexo 5 para consultar detalles) unos tiempos de reverberación sobre 2,5 s y EDT sobre 2,2 s en las frecuencias medias que son elevados todavía.

f(Hz)	T30	Tmid	EDT	C80	G
125	1,97		1,74	0,07	8,21
250	2,17		1,94	-0,43	8,69
500	2,45	2,50	2,18	-0,97	9,37
1000	2,54		2,24	-1,14	9,47
2000	2,37		2,19	-1,06	9,43
4000	1,85		1,76	0,11	8,38

Tabla. 19. Resultados de la simulación

Un efecto negativo que producen las barandillas de cristal es que actúan como pantallas acústicas y crean tres zonas en la audiencia (una primera en las 6 primeras filas de butacas que están detrás de la primera barandilla, una segunda zona en las siguientes 7 filas y finalmente la tercera detrás de la tercera barandilla) en que los parámetros cambian apreciablemente de una zona a otra, vemos este efecto en los parámetros G, SPL directo y en el SPL. Los valores más altos corresponden a la primera zona y los más bajos a la tercera.

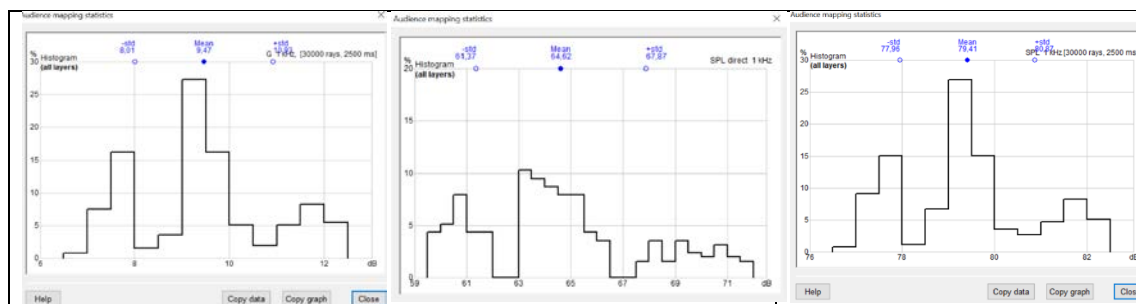


Figura 29: Muestra la división en tres zonas de los valores de G, SPL directo y SPL medido en la sala

En resumen por todo lo comentado en este apartado en el siguiente capítulo se propondrán cambios en el acondicionamiento del recinto para reducir los tiempos de reverberación y otras mejoras en la acústica de la sala.

6. Propuestas de mejora

Dado que los resultados del tiempo de reverberación en las medidas y en la simulación han sido elevados se pensarán unas posibles mejoras para intentar aumentar la absorción en la sala y conseguir reducir el TR hasta los niveles adecuados.

6.1 Diseño y mejoras

Para poder mejorar la calidad acústica se han pensado las siguientes mejoras a realizar:

-Paneles multiresonadores

Estos paneles tienen orificios, cuyo tamaño depende de las frecuencias que se deseen absorber, detrás del panel de madera hay una pequeña cámara de aire para atenuar las ondas sonoras y además se suelen rellenar por dentro con algún material absorbente tipo lana de roca.

Así que se van instalar paneles multiresonadores con cámara absorbentes cubriendo una gran parte de las paredes laterales y en la pared final de la sala. Los coeficientes de absorción en bandas de octava se muestran en la tabla 20

f(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
α	0.25	0.40	0.65	0.85	0.85	0.75

Tabla 20. Coeficiente de absorción de los paneles multiresonadores con un porcentaje de perforación del 10% y material absorbente de 50 mm de espesor.

-Cortinas absorbentes

Fabricadas con materiales con un elevado coeficiente de absorción, se ha pensado en ponerlas en la pared del fondo del auditorio tapando una gran ventana.

f(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
α	0,05	0,12	0,35	0,48	0,38	0,36

Tabla 21. Coeficiente de absorción de una cortina de tejido espeso

-Eliminación o sustitución de elementos reflectantes

Sustitución de las barandillas de vidrio por una barandilla de madera y listones de madera de manera que dejen huecos y el área de absorción de esta barandilla disminuya considerablemente respecto a la vidrio. Aparte de que debemos dejar visibilidad entre el público y el escenario.

6.2 Simulación

Se ha simulado en CATT-Acoustics V.9d usando el programa TUC2 con la siguiente configuración:

"Prim.rays"	25000			
"Diffract."	"off"			
"IR length"	2500	" ms"		
"Air abs."	"on"			
"Ang. dep."	"off"			
room considered closed (fraction lost rays 0,14%):				
" mfp"	7,36	" m"		
" volume"	4437,92	"m ³ "	" (calculated from mfp)"	
Air				
rel. humidity	: 41	%		
temperature	: 24,0	°C		
sound speed	: 345,7	m/s		
density	: 1,200	kg/m ³		
cha. impedance	: 414,8	kg/m ² s		
absorption	: 1,214E-04 3,544E-04 7,332E-04 1,260E-03 2,662E-03 7,935E-03 2,798E-02 9,556E-02	1/m (125-16k Hz)		
Map				
height	: 1,2 m;	step	: 1,0 m;	points
				: 275; area
				: 247,328 m ²
Source A0 (0,000 5,950 1,500) OMNI.SD0 (-0,000 6,950 1,500) 0,0°				
				1,000
Lp1m_a	: 90,0 90,0 90,0 90,0 90,0 90,0 90,0 90,0	dB (125-16k Hz)		
Incoherent source				
RECEIVERS (pos m) (aimpos m) [aimvector m] individual_noise:				
03	(3,025 14,750 1,100)	(0,000 5,950 1,500)	[-0,325 -0,945 0,043]	
04	(-3,025 14,750 1,100)	(0,000 5,950 1,500)	[0,325 -0,945 0,043]	
09	(3,025 17,700 2,700)	(0,000 5,950 1,500)	[-0,248 -0,964 -0,098]	
10	(-3,025 17,700 2,700)	(0,000 5,950 1,500)	[0,248 -0,964 -0,098]	
15	(3,025 23,250 4,800)	(0,000 5,950 1,500)	[-0,169 -0,968 -0,185]	
16	(-3,025 23,250 4,800)	(0,000 5,950 1,500)	[0,169 -0,968 -0,185]	
19	(3,025 25,250 5,850)	(0,000 5,950 1,500)	[-0,151 -0,964 -0,217]	
20	(-3,025 25,250 5,850)	(0,000 5,950 1,500)	[0,151 -0,964 -0,217]	

Tabla 22. Configuración de la simulación.

En la siguiente tabla se muestran los resultados globales de la sala con multiresonadores considerando todas las fuentes y todos los receptores (8)

Promedios	125	250	500	1000	2000	4000	Global
T30 (s)	1,8	1,86	2,03	2,02	1,99	1,62	
EDT (s)	1,58	1,61	1,72	1,73	1,68	1,41	
Tmid (s)	2,025						
BR	0,85						
Br	0,89						
SPL (dB)	80,3	80,1	80,7	80,5	80,5	79,6	88,1
C₈₀	0,84	0,53	0,89	0,68	0,93	1,78	
G	8,8	8,8	9,3	9,1	9,2	8,5	
ITDG (ms)	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	

Tabla 23. Resultados globales con multiresonadores y sin barandillas.

6.3 Interpretación de resultados

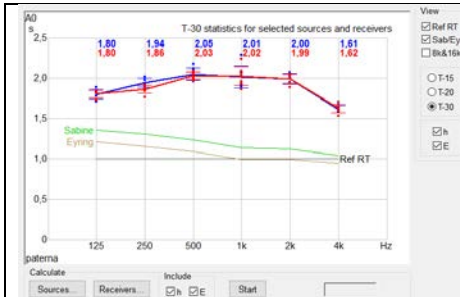
Presentamos en la tabla siguiente si los resultados obtenidos (mapa sonoro) con la simulación cumplen las recomendaciones para una buena acústica del auditorio

Sonoridad G(dB)	$4 < G_{mid} < 5,5$	9,2	NO
T_{mid}	$1.8 < T_{mid} < 2 (s)$	≈ 2	SI
EDT (s)	$0,9 T_{mid} < EDT_{mid} \leq T_{mid}$	1,72	SI
Calidez (BR(s))	$1,1 \leq BR \leq 1,3$	0,85	NO
Brillo (Br(s))	$Br \geq 0,87$	0,89	SI
Intimidad ITDG	$ITDG \leq 20 ms$	<20 ms	SI
Claridad musical C₈₀ (sala ocupada)	$-2 < C_{80} < 4 dB$	0,83	SI

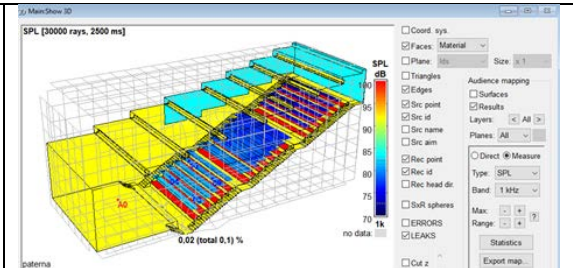
Tabla 24. Verificación de las recomendaciones

A la vista de los resultados obtenidos con el programa CATT-Acoustic que se ofrecen en la tabla 24 se comprueba que la mayoría de parámetros (Tmid, C80, ITDG, Br) están dentro de los valores recomendados salvo la sonoridad de la sala G que queda un poco alta y la calidez de la sala BR que queda un poco baja.

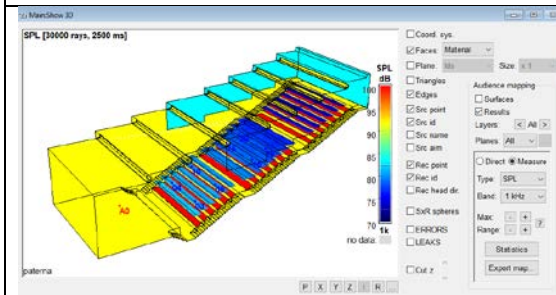
En el anexo 5 están disponibles todos los datos de la simulación completos, ahora se muestran algunas gráficas significativas en esta simulación.



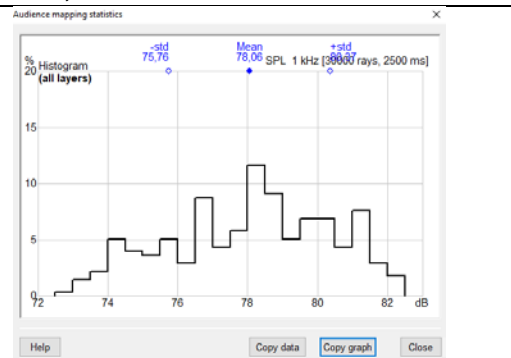
Resultados globales T30



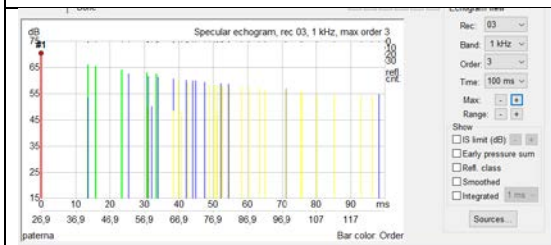
Gráfica que muestra la fuga de rayos en el modelo 0,1% del total



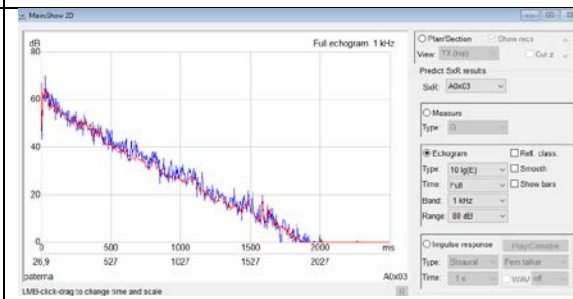
Mapa del SPL a 1 KHz



Distribución estadística del SPL a 1kHz



Ecograma para el receptor 3



Curva de caída en el receptor 03

7. Conclusiones

- Las medidas llevadas a cabo a finales de agosto en el auditorio (en el estado en que se encontraba con ausencia de 7 de las últimas filas de butacas de la audiencia) con el sonómetro y con la tarjeta de audio (ver las tablas 11 y 12) demuestran:

- i. que ambos métodos son igualmente válidos tal como se dice en la norma UNE-EN ISO 3382.
- ii. que los tiempos de reverberación promedios T30 y EDT cerca de 2,75 s en las frecuencias medias exceden a los tiempos recomendados para este tipo de salas dedicadas a la música sinfónica entre 1.8 y 2 s.

- En la simulación con el programa CATT-Acoustic del auditorio, en las mismas condiciones en que se realizaron las medidas sin 7 filas de butacas, se obtienen resultados similares en el TR, EDT a las medidas experimentales (ver tabla 19). De este modo se valida el modelo diseñado con el programa de simulación.

Con el software de diseño ya validado se simula la sala en el estado actual ya con las filas del auditorio completas y suponiendo estas ocupadas y los resultados obtenidos en el tiempo de reverberación es demasiado elevado en todas las bandas de frecuencia. Además todos los parámetros salvo el ITDG no cumplen las recomendaciones.

A la vista de los malos resultados y con el fin de obtener unas condiciones acústicas de la sala, óptimas para la audición de música sinfónica, se proponen las siguientes mejoras en el acondicionamiento acústico:

- a. Instalar paneles multiresonadores perforados con cámara absorbentes cubriendo una gran parte de las paredes laterales y en la pared final de la sala. El objetivo es aumentar el área de absorción de la sala y de ese modo disminuir el TR. El material elegido presenta una vista externa similar a la madera instalada y así no se rompe la estética de la sala.
- b. Instalar cortinas absorbentes en la pared del fondo de la sala cubriendo una gran ventana.
- c. Las tres barandillas de cristal que presentan diferentes problemas acústicos tal como se ha visto en el apartado 5.3.2. Se propone eliminarlas por un barandilla de madera (pasamanos en la parte superior) y listones estrechos separados entre sí, de manera que deje pasar la onda acústica y no sea un elemento reflejante. Claro está que hay que considerar otros aspectos como la seguridad al haber diferente altura entre el pasillo donde está la barandilla y la fila de butacas inferior.

- Estas mejoras han sido simuladas con el programa CATT-Acoustic y los resultados se ofrecen en la tabla 24 y se comprueba que la mayoría de parámetros (Tmid, C80, ITDG, Br) están dentro de los valores recomendados salvo la sonoridad de la sala G que queda un poco alta y la calidez de la sala BR que queda un poco baja.

Como resumen final; durante este trabajo de TFG han surgido dificultades (por ejemplo no teníamos el plano del auditorio en Autocad lo que complicó crear la geometría de la sala en el master.geo, además el auditorio estuvo en obras varios meses y no se pudo medir hasta finales de agosto después de insistir al arquitecto) que se han ido resolviendo hasta llegar a la simulación final en la que se ha conseguido resolver el problema de los altos tiempos de reverberación y para el resto de los parámetros se cumplen los valores recomendados en su mayoría. Queda por mejorar la calidez y reducir la sonoridad excesiva de la sala.

A continuación se presenta la bibliografía consultada en este TFG

8. Bibliografía

Libros y artículos

- [1] Arau H. *ABC de la acústica arquitectónica*. Ed CEAC. 1999.
- [2] Carrión A. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Ed. UPC, 1998, 2006.
- [3] Llinares. *Acústica Arquitectónica y Urbanística*. UPV. 1997.
- [4] Avilés R. *Manual de acústica ambiental y arquitectónica*. Ed. Paraninfo. 2017.
- [5] Kath and Kuhl's. *Acustica* 15, 127–131 (1965).
- [6] Beranek, L.L. "Audience and chair absorption in large halls: IP", *JASA* 45, 13-19. 1969.
- [7] Cremer L. y M. Helmut. *Principles and Applications of Room Acoustics*. Vol1, APS Pub. Ltd. Londres, 1982.
- [8] Farina A. Advancements in impulse response measurements by sine sweeps. Audio Engineering Society Convention Paper Presented at the 122nd Convention 2007 May 5–8 Vienna, Austria.

Manuales

- [8] Ivo Mateljan. ARTA user manual V. 1.9.2. (<http://www.artalabs.hr/>) abril 2019.
- [9] M-AUDIO Fast Track Pro User-Guide. 2010.
- [10] CATT-Acoustic v9.1 with TUCT v2 Introduction Manual. 2017
- [11] CATT-A v9.1 User's Manual CATT-Acoustic™ v9.1. 2016
- [12] Manual del Usuario del Analizador portátil 2250 con software para el tiempo de reverberación BZ-7272. B&K
- [13] Apuntes de clase de la asignatura Acústica para la Edificación. Curso 2018-19.

Normas y comunicaciones administrativas

- [14] UNE-EN ISO 3382-1:2010. Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos.
- [15] Copia del informe acústico realizado por la empresa CGM Telecomunicaciones facilitado por el Ayuntamiento de Paterna.

Páginas web

[16] <https://fsmcv.org/es/actualidad/noticias/auditorio-antonio-cabeza-paterna-4-marzo-concierto-de-nueva-york-a-paterna-centro-musical-paternense>

[17] http://www.caesoft.es/productos/CATT/index_catt.htm