

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  
ESCOLA POLITÈCNICA 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 DEL  
"AUDITORI NOU D'ALQUÀS"”**

**TRABAJO FINAL DE GRADO**

Autor/a:  
**Neus García Monzón**

Tutor/a:  
**Juan Antonio Martínez Mora  
Rubén Picó Vila**

**GANDIA, 2021**

## **Resumen**

El trabajo se centra en el estudio del acondicionamiento acústico del "Auditori Nou d' Alaquàs". La sala está destinada a conciertos de música, teatro, conferencias, en general se tratará de verificar que los parámetros acústicos del recinto se ajustan adecuadamente a los correspondientes para una sala de usos múltiples.

Se lleva a cabo un estudio inicial de los principales parámetros que caracterizan esta sala. En función de los resultados obtenidos del estudio acústico y con la ayuda del software de diseño acústico Catt-Acoustic, se proponen soluciones que optimicen el acondicionamiento, así como el uso de la concha acústica que se ajusta en función del uso concreto de la sala.

Palabras clave: Acústica de salas; Acondicionamiento acústico; Tiempo de reverberación; Sala para usos múltiples; Concha acústica

## **Abstract**

The work is focused on the study of the acoustic conditioning of the "Auditori Nou d' Alaquàs". The room is used to music concerts, theater, conferences, in general it will be tried to verify that the parameters are adjusted for a multipurpose room.

A preliminary study of the main parameters that characterize this hall will be carried out. Based on the results obtained from the acoustic study and with the help of the CattAcoustic acoustic design software, solutions will be proposed in order to optimize the conditioning as well as the use of the acoustic shell that will be adjusted according to the specific use of the room.

Keywords: Room acoustics; Acoustic conditioning; Reverberation Time; Multipurpose Room, Acoustic shell

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>5</b>
1.1 Objetivos.....	5
1.2 Estructura TFG .....	5
<b>2. CONCEPTOS Y NORMATIVA</b> .....	<b>6</b>
<b>2.1 Conceptos</b> .....	<b>6</b>
2.1.1 Acústica de salas.....	6
2.1.2 Teorías acústicas.....	8
2.1.3 Parámetros acústicos .....	11
2.1.3 Curvas Noise Criteria.....	15
<b>2.2 Normativa utilizada</b> .....	<b>16</b>
2.2.1 Instrumentación .....	16
2.2.2 Posiciones de medición .....	17
2.2.3 Procedimiento de medición.....	17
<b>3. SITUACIÓN Y ENTORNO</b> .....	<b>18</b>
3.1 Emplazamiento del “Auditori Nou” .....	18
3.2 Dimensionamiento y materiales .....	20
3.3 Objetivos de calidad acústica .....	22
<b>4. MEDIDAS “IN SITU”</b> .....	<b>23</b>
4.1 Equipo utilizado.....	23
4.2 Procedimiento .....	24
4.2.1 Preparación previa.....	24
4.2.2 Calibración de la tarjeta de audio.....	25
4.2.3 Calibración del micrófono.....	26
4.2.4 Toma de medidas .....	27
<b>5. Resultados</b> .....	<b>30</b>
<b>5.1 Exposición de resultados</b> .....	<b>30</b>
5.1.2 Respuesta al impulso.....	32
<b>5.2 Análisis de resultados</b> .....	<b>33</b>
5.2.1 Comparación de los métodos.....	33
5.2.2 Comparación de las configuraciones .....	35
5.2.3 Curvas NC.....	36
5.2.4 Análisis de los parámetros acústicos .....	36
<b>6. SIMULACIÓN CATT-ACOUSTIC</b> .....	<b>37</b>
<b>6.1 CATT-Acoustic</b> .....	<b>37</b>
6.1.1 Historia CATT-Acoustic.....	37
6.1.2 Ficheros principales .....	37
<b>6.2 Diseño del “Auditori Nou” en CATT-Acoustic</b> .....	<b>39</b>
6.2.1 Adquisición de medidas .....	39

6.2.2 Creación del modelo en CATT-Acoustic .....	39
6.2.3 Definición de audiencia .....	40
6.2.4 Modelo final .....	41
<b>6.3 Resultados de la simulación .....</b>	<b>43</b>
6.3.1 Sin concha acústica .....	44
6.3.2 Con concha acústica.....	45
<b>7. PROPUESTAS DE MEJORA .....</b>	<b>46</b>
<b>8. CONCLUSIONES .....</b>	<b>48</b>
<b>9. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>49</b>

# 1. INTRODUCCIÓN

El “Auditori Nou” se ubica en Alaquàs, ciudad que pertenece a la comarca de l’Horta Oest de la provincia de València. El auditorio tiene la peculiaridad de contar con una concha acústica desmontable y monitorizada para adaptar el auditorio a los diferentes tipos de actos que acoge. Sin embargo, no se ha estudiado la posición de la concha acústica óptima para cada tipo de acto. Se plantea la necesidad de un estudio centrado en las características acústicas de la sala diferenciando entre una configuración del auditorio para actos destinados a la palabra y una configuración para actos destinados a la música contando con la máxima eficiencia de la concha acústica.

## 1.1 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado reside en caracterizar y posteriormente mejorar la acústica del “Auditori Nou” de Alaquàs realizando un estudio del acondicionamiento acústico actual mediante la toma de medidas “*in situ*” de dos métodos diferentes y mediante la simulación del recinto. Seguidamente, se realiza un análisis de los resultados para obtener los valores de los parámetros acústicos de la sala y, posteriormente, se comparan con los recomendados para el uso de la sala. Por último, en función de los resultados, se propone una solución para mejorar la acústica del “Auditori Nou” con la ayuda de la simulación y valorar la posición de la concha acústica óptima para destinar la sala a música de cámara.

Como objetivos secundarios se considera el acercamiento al uso del equipamiento necesario para realizar las medidas y el uso del software de simulación para crear el modelo válido que es la parte más costosa del trabajo.

## 1.2 Estructura TFG

La estructura de este Trabajo de Fin de Grado después de exponer la introducción y los objetivos se compone de un segundo apartado que describe los conceptos necesarios para aproximar al lector al desarrollo del estudio teniendo en cuenta tanto conceptos sobre acústica de salas como la normativa vigente necesaria para la toma de medidas.

En el tercer apartado se expone la situación y el entorno del “Auditori Nou” donde se explica su uso, dimensiones y materiales y los parámetros acústicos objetivos de la sala.

En el cuarto apartado, se detalla la realización de la toma de medidas.

En el quinto apartado se exponen los resultados obtenidos y se realiza un análisis.

En el sexto apartado se describe el funcionamiento del software CATT-Acoustic para la realización del modelo de simulación, así como que se expone el resultado final del modelo y los resultados de los parámetros acústicos.

Por último, se realiza en el séptimo apartado una propuesta de mejoras, seguidas por las conclusiones en el octavo apartado y en el noveno la bibliografía consultada.

## **2. CONCEPTOS Y NORMATIVA**

### **2.1 Conceptos**

En el siguiente apartado se realiza una presentación de algunos conceptos generales sobre acústica, particularizando en el ámbito de la acústica de salas. Se tratan las diferentes teorías para el análisis de salas, así como los parámetros acústicos más importantes que caracterizan a una sala. Este apartado tiene el objetivo de exponer los conocimientos necesarios para la comprensión del proyecto.

#### **2.1.1 Acústica de salas**

##### *2.1.1.1 Conceptos básicos*

#### **-Definición de sonido**

Existen diferentes formas para definir el sonido, sin embargo, Antoni Carrión [3], propone las siguientes:

- Vibración mecánica que se propaga a través de un medio material elástico y denso, que es capaz de producir una sensación auditiva.
- Sensación auditiva producida por una vibración de carácter mecánico que se propaga a través de un medio elástico y denso.

El sonido es un concepto objetivo mientras que el ruido es un concepto subjetivo ya que dependerá de lo que considere molesto o perjudicial para el receptor.

#### **-Atenuación**

La atenuación es la pérdida de energía de la onda sonora en su propagación por el medio, depende de la distancia recorrida y del número de reflexiones.

#### **-Reflexión**

Cuando la onda sonora incide sobre una superficie, se produce el fenómeno de la reflexión. En el caso de que la superficie sea lisa, se produce una reflexión especular, es decir, es reflejada con el mismo ángulo de incidencia respecto a la normal. Sin embargo, si la superficie es rugosa o irregular la reflexión se produce en múltiples direcciones dando lugar al fenómeno de la reflexión difusa.

#### **-Absorción**

Parte de la energía de la onda sonora incidente sobre un cerramiento se absorbe y no se refleja. El grado de absorción dependerá del coeficiente de absorción de cada superficie.

##### *2.1.1.2 Propagación del sonido en recintos cerrados*

En un recinto cerrado el sonido puede llegar de dos formas diferentes a un punto de la sala. Este puede ser el sonido directo o el sonido indirecto. El sonido directo es aquel que una vez es emitido por la fuente, alcanza al receptor de igual manera que si se ubicara en espacio libre. Por otra parte, el sonido indirecto o reflejado, es aquel que alcanza al receptor a causa de las reflexiones que sufre la onda sonora en el recinto cerrado.

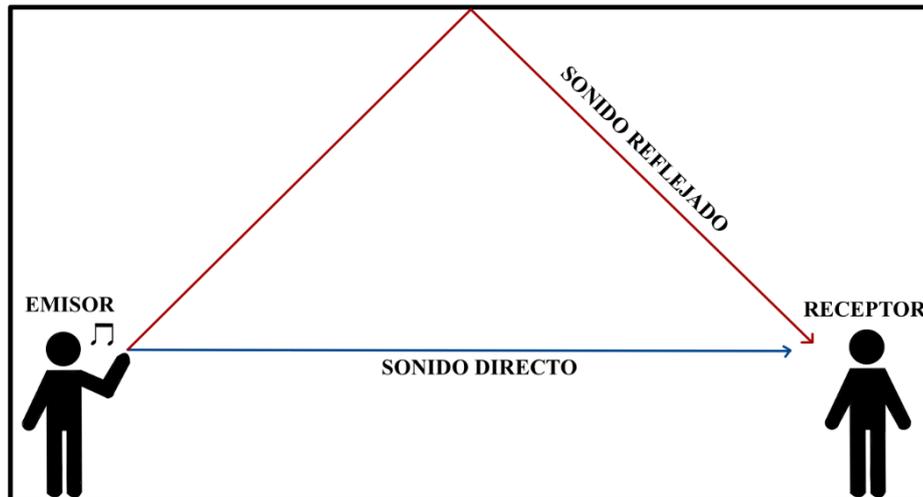


Figura 1: Sonido directo y sonido reflejado

En el sonido reflejado se pueden diferenciar dos tipos de reflexiones, las primeras reflexiones que son aquellas que alcanzan el punto receptor de manera inmediata, normalmente en los primeros 100 ms, y las reflexiones tardías que son las que llegan al receptor después, éstas forman la cola reverberante. Las primeras reflexiones y las reflexiones tardías se pueden estudiar mediante un ecograma, que representa la llegada de las reflexiones caracterizadas por el nivel energético correspondiente. Se puede observar un ejemplo de ecograma en la Figura 2.

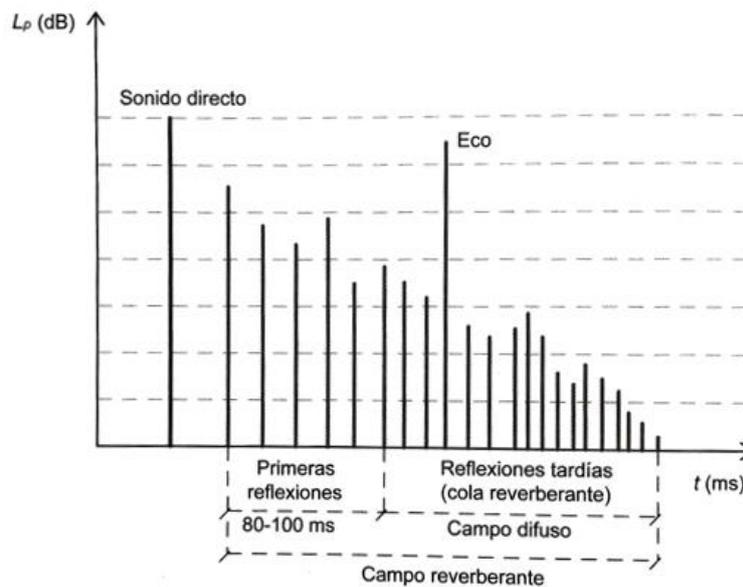


Figura 2: Ejemplo de ecograma; Fuente: Manual de acústica ambiental y arquitectónica [1]

### 2.1.1.3 Coeficiente de absorción acústica

El coeficiente de absorción acústica es una magnitud adimensional que relaciona la energía absorbida con la energía incidente.

$$\alpha = \frac{\text{Energía absorbida}}{\text{Energía incidente}} \quad (1)$$

Se determina un coeficiente de absorción acústica para cada banda de frecuencia ya que el comportamiento del material depende de la frecuencia. Se determinan mediante ensayos acústicos como, por ejemplo, ensayos en cámara reverberante.

Los valores del coeficiente de absorción acústica tienen un rango de variación de 0 a 1, siendo 0 totalmente reflectante mientras que 1 totalmente absorbente.

#### 2.1.1.4 Área de absorción equivalente

El área de absorción equivalente es un concepto que surge al valorar la contribución de una superficie con las propiedades absorbentes del sonido propias de un material concreto. Se puede calcular para una banda de frecuencias determinada como:

$$A_{superficies} = \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i \cdot S_i \quad (2)$$

Donde:

- $\alpha_i$ : Coeficiente de absorción acústica de la superficie i.
- $S_i$ : Dimensiones de la superficie en m<sup>2</sup>.

En un recinto se debe de considerar distintos tipos de absorción para determinar la absorción total, como la absorción del aire, elementos, superficies o personas.

$$A_T = A_{superficies} + A_{elementos} + A_{personas} + A_{aire} \quad (3)$$

- **Atenuación de las personas ( $A_{personas}$ )**

Es la atenuación debida a la presencia de personas, se puede calcular multiplicando el número de personas por la absorción acústica de una persona.

$$A_{personas} = N_{per} \cdot A_{per} \quad (4)$$

La absorción de una persona depende de la vestimenta y de la posición en la que se encuentre: de pie o sentado. Se han realizado múltiples ensayos y se ha determinado según las características anteriores los coeficientes de absorción según la frecuencia.

- **Absorción del aire ( $A_{aire}$ )**

El aire produce absorción a altas frecuencias y es apreciable para salas grandes, se puede calcular como:

$$A_{aire} = 4 \cdot m \cdot V \quad (5)$$

donde m es el coeficiente de atenuación debido a la temperatura y la humedad relativa, en m<sup>-1</sup> y V es el volumen del recinto, en m<sup>3</sup>.

#### 2.1.2 Teorías acústicas

Para estudiar el comportamiento de una sala y determinar los parámetros que la caracterizan existen tres teorías acústicas: la teoría estadística, la ondulatoria o física y la geométrica. Cada una de ellas se basa en ciertas consideraciones que las hacen efectivas para diferentes situaciones y tipos de recinto. A continuación, se exponen los conceptos básicos de cada una de ellas.

### 2.1.2.1 Teoría estadística

La teoría estadística es efectiva para una primera aproximación a la acústica de un recinto, estudia cómo la energía sonora se mantiene en el recinto a causa de que existen reflexiones en el interior. Esta teoría no distingue entre las primeras reflexiones y las reflexiones tardías, es decir, se basa en asumir que todo el campo reverberante es difuso, lo que conlleva a que se considera que la energía reverberante se reparte por igual por todo el recinto y llega a todos los puntos receptores con las mismas características.

Para ello, se tiene que considerar que:

1. Las ondas reflejadas alcanzan a los receptores con la misma probabilidad y en todas las posibles direcciones.
2. En cualquier punto receptor del recinto la energía sonora es igual a la suma de las energías de las reflexiones.
3. La densidad de energía es igual en cada punto y en cada momento.

Se trata de la teoría acústica más sencilla, útil para determinar las propiedades acústicas del recinto de manera general. Además, asume que las cualidades acústicas son constantes independientemente de las posiciones del emisor y del receptor.

Este tipo de estudio acústico se usa para determinar las influencias físicas generales del recinto como son el volumen o la cantidad de superficie absorbente en el cálculo del tiempo de reverberación.

### 2.1.2.2 Teoría ondulatoria

La teoría ondulatoria tiene en cuenta el comportamiento del sonido como onda, esta teoría estudia el fenómeno de los modos propios que pueden influir en la reverberación y la difusión de la energía sonora. Los modos propios surgen con la combinación de las ondas incidentes y las reflejadas, cuando éstas se mezclan crean interferencias que pueden ser constructivas o destructivas. Cada modo propio está relacionado con una frecuencia y caracterizado por un nivel de presión sonora.

Esta teoría adquiere relevancia en espacios con dimensiones relativamente pequeños, ya que depende de la geometría y las dimensiones del espacio siendo generalmente complicada su determinación. Para espacios paralelepípedos con superficies reflectantes se puede determinar mediante la fórmula de Rayleigh.

$$f_{m,n,k} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{k}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2} \quad (6)$$

Donde:

- $c$  es la velocidad de propagación del sonido en el aire
- $L_x$ ,  $L_y$  y  $L_z$  son las dimensiones del recinto, expresadas en metros.
- $k$ ,  $m$ ,  $n$  pueden tomar cualquier número entero y cualquier combinación da lugar a los modos propios es decir las frecuencias que presentan resonancias en la sala, dicho de otro modo, frecuencias que colorean la sala.

### 2.1.2.3 Teoría geométrica

La teoría geométrica estudia la propagación de las primeras reflexiones y la relación de éstas con el sonido directo. Con este estudio se pueden evitar los ecos, focalizaciones y zonas de sombra en un recinto. Se basa en el uso de los rayos sonoros. Los rayos sonoros son líneas que representan la dirección de propagación del frente de onda y en la acústica geométrica se trata al rayo sonoro como al rayo de luz, es decir, se puede aplicar la ley de la reflexión.

Existen dos maneras de utilizar los rayos sonoros:

#### - **Trazado de rayos**

Se trazan los rayos sonoros, aplicando la ley de la reflexión, desde la fuente sonora contemplando varias direcciones y las reflexiones hasta que alcanza al punto receptor. Este método es el empleado por los softwares de simulación acústica para determinar las características de un recinto.

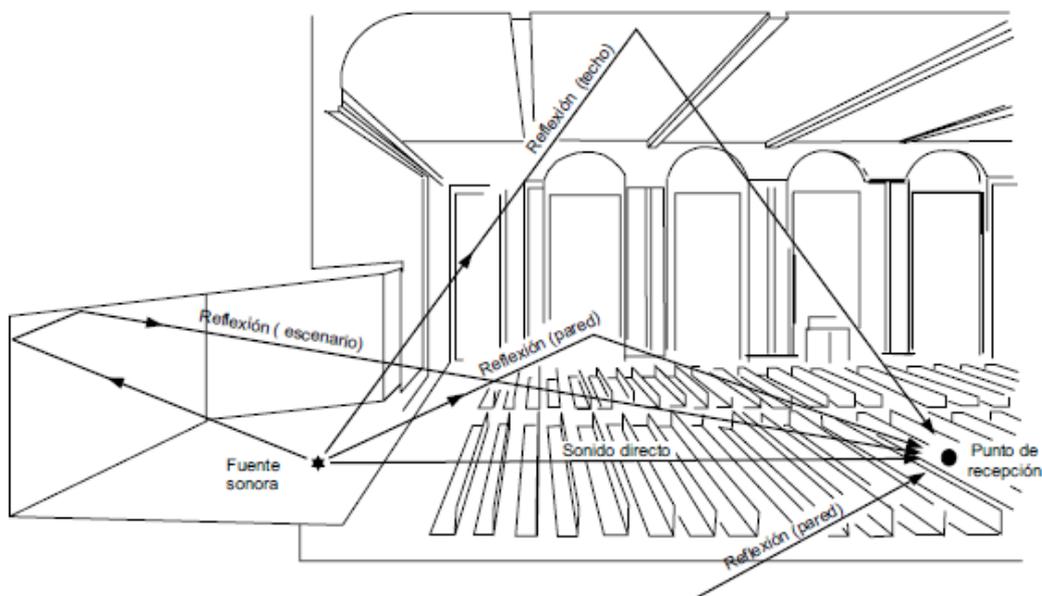


Figura 3:Trazado de rayos en un recinto; Fuente: Carrión [3]

#### - **Método de fuentes imagen**

Es útil para determinar en qué punto concreto se produce la reflexión que llega a un receptor teniendo en cuenta la posición de la fuente sonora. Se considera que cada rayo proviene de una fuente imaginaria que se encuentra posicionada simétricamente de la fuente real respecto a la superficie de incidencia.

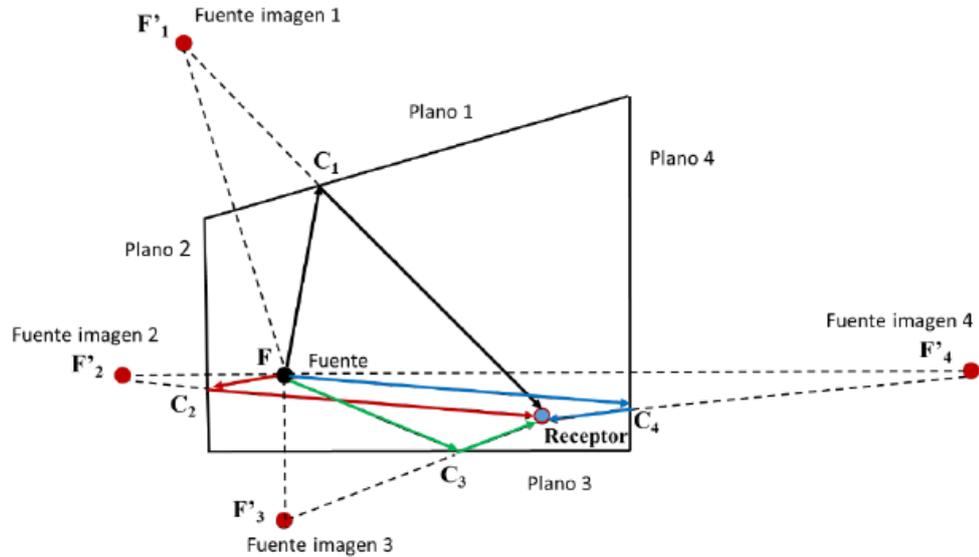


Figura 4: Ejemplo método de la fuente imagen; Fuente: Apuntes APE [5]

### 2.1.3 Parámetros acústicos

#### 2.1.3.1 Tiempo de Reverberación (TR)

El tiempo de reverberación abreviado TR, se define según [3], como el tiempo en segundos que pasa desde que una fuente en emisión se detiene hasta que la energía acústica del recinto disminuye un nivel de presión sonora de 60 dB.

En la Figura 5 se representa una gráfica con la curva de decaimiento desde que se desactiva una fuente hasta que disminuye al nivel del ruido de fondo.

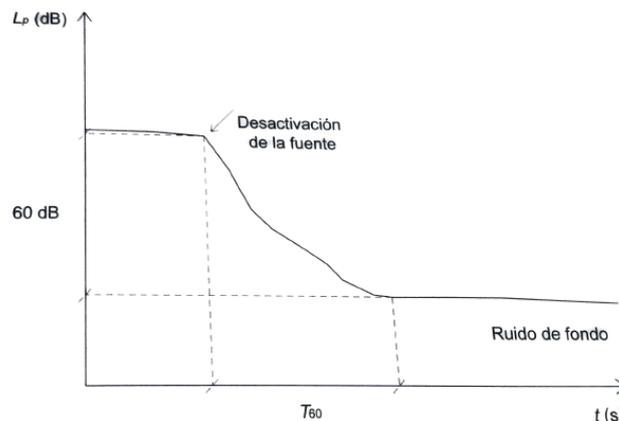


Figura 5: Obtención del tiempo de reverberación T en la curva de decaimiento; Fuente: Manual de acústica ambiental y arquitectónica [1]

En ocasiones, la fuente no es capaz de emitir un nivel de presión sonora suficiente o el ruido de fondo es demasiado elevado para poder evaluar un nivel de caída grande, por lo que se estudian caídas más pequeñas como de 30 dB, 20 dB o 10 dB con el parámetro conocido como EDT.

EL TR de un recinto depende del volumen y del área de absorción acústica total de la sala de modo que una sala compuesta por materiales con un coeficiente de absorción elevado, tendrán un TR menor que las salas compuestas por materiales reflectantes, ya que las superficies reflectantes alargan el TR y las absorbentes lo acortan.

Por otra parte, una sala con un mayor volumen tiene un mayor tiempo de reverberación que una sala con un volumen menor, debido a que la rapidez en la que la energía sonora llega a las superficies antes de ser reflejada afecta al decaimiento del nivel de energía sonora.

Las salas con un tiempo de reverberación bajo, se denominan salas “muertas”. Estas salas, generalmente, están destinadas a la palabra, sin embargo, las salas con un tiempo de reverberación alto se denominan salas “vivas” y están destinadas a la música.

El tiempo de reverberación es un parámetro acústico objetivo y a lo largo del tiempo se han desarrollado dos fórmulas matemáticas importantes para calcularlo, la fórmula de Sabine es de las más empleadas.

$$TR = \frac{0,161 \cdot V}{A_{tot}} \quad (7)$$

Donde:

- V = volumen del recinto (m<sup>3</sup>)
- A<sub>tot</sub> = absorción total del recinto (m<sup>2</sup>), siendo:

$$A_{tot} = \alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 \dots + \alpha_n S_n \quad (8)$$

Y siendo:

- $\alpha_n$  = coeficiente de absorción de la superficie S<sub>n</sub>
- S<sub>n</sub> = Superficie del cerramiento n (m<sup>2</sup>)

A partir del tiempo de reverberación se puede calcular el Tiempo de reverberación medio, T<sub>mid</sub>, realizando el promedio de las frecuencias de 500 Hz y de 1000 Hz.

$$TR_{mid} = \frac{TR_{500 \text{ Hz}} + TR_{1000 \text{ Hz}}}{2} \quad (9)$$

### 2.1.3.2 T<sub>30</sub>

El T<sub>30</sub> se refiere al tiempo de reverberación de la caída de los primeros 30 dB incluidos en el margen de -5 dB a -35 dB y posteriormente multiplicado por dos, expresado en segundos.

### 2.1.3.3 Calidez Acústica (BR)

La calidez acústica (BR) es un parámetro acústico que se relaciona con la cantidad de sonidos graves. Este parámetro se utiliza para caracterizar salas destinadas a la música, donde la presencia adecuada de graves es esencial para sentir la calidez de la música.

Se relaciona las frecuencias bajas con las frecuencias medias, se puede obtener su valor según la siguiente expresión:

$$BR = \frac{TR_{125\text{ Hz}} + TR_{250\text{ Hz}}}{TR_{500\text{ Hz}} + TR_{1000\text{ Hz}}} \quad (10)$$

Se recomienda un valor de:

$$\text{Para } TR_{\text{mid}}=2,2\text{s:} \quad 1,10 \leq BR \leq 1,25$$

$$\text{Para } TR_{\text{mid}}= 1,8\text{s:} \quad 1,10 \leq BR \leq 1,45$$

#### 2.1.3.4 Brillo (*Br*)

El brillo (*Br*) indica la riqueza en sonidos agudos, de la misma manera que la calidez acústica es exclusivamente utilizada para las salas destinadas a la música. Un valor elevado del brillo puede llegar a dar la sensación de un sonido artificial, metálico.

Se relaciona las frecuencias medias con las frecuencias altas, para obtener su valor se aplica la siguiente expresión:

$$Br = \frac{TR_{2000\text{ Hz}} + TR_{4000\text{ Hz}}}{TR_{500\text{ Hz}} + TR_{1000\text{ Hz}}} \quad (11)$$

Se recomienda un valor de:

$$Br \geq 0,87$$

#### 2.1.3.5 ITDG

El “*Initial-Time-Delay Gap*” o ITDG ( $t_I$ ) es un parámetro acústico que se relaciona con la impresión subjetiva de la intimidad acústica. En [3], el autor expone distintas relaciones a lo que es la intimidad acústica.

Primero, Beranek la relaciona a la sensación que recibe una persona cuando escucha música en un espacio de tamaño más pequeño que el tamaño real de la sala, mientras que Barron lo relaciona con el grado de conexión entre la persona y los intérpretes.

Sin embargo, el  $t_I$  se refiere al intervalo de tiempo, en milisegundos, entre el sonido directo y la primera reflexión en un mismo punto de la sala. Éste debe de ser menor a 20 ms para conseguir una buena calidad acústica, según Beranek.

$$t_I < 20\text{ ms}$$

#### 2.1.3.6 Claridad musical ( $C_{80}$ )

La claridad acústica  $C_{80}$  se relaciona con el grado de separación entre cada uno de los sonidos individuales que integran la composición musical, es un parámetro acústico relacionado exclusivamente con las salas dedicadas a la música.

Se relaciona entre la energía sonora que recibe el oyente en los primeros 80 ms a partir del instante en que se recibe el sonido directo y la que recibe después de los primeros 80 ms.

El  $C_{80}$  se expresa en dB y se calcula de la siguiente manera:

$$C_{80} = \frac{\text{Energía hasta 80 ms}}{\text{Energía a partir de 80 ms}} \quad (12)$$

Beranek, establece los valores recomendados según el promedio de las frecuencias centrales, denominándolo “*musical average*”.

$$C_{80} = \frac{C_{80}(500 \text{ Hz}) + C_{80}(1 \text{ kHz}) + C_{80}(2 \text{ kHz})}{3} \quad (13)$$

Se recomienda un valor dependiendo si sala esté vacía/ocupada de:

$$\text{Para salas vacías: } -4 \leq C_{80} \leq 0 \text{ dB}$$

$$\text{Para salas ocupadas: } -2 \leq C_{80} \leq +2 \text{ dB}$$

### 2.1.3.7 Claridad vocal ( $C_{50}$ )

La claridad vocal es un parámetro acústico relacionado exclusivamente en las salas dedicadas a la palabra. De manera similar al apartado anterior, claridad musical, se define la claridad vocal. Sin embargo, se toma en consideración los primeros 50 ms.

$$C_{50} = \frac{\text{Energía hasta 50 ms}}{\text{Energía a partir de 50 ms}} \quad (14)$$

L.G Marshall, para obtener el valor representativo de  $C_{50}$  propone una media aritmética ponderada según la banda de frecuencia. Se denomina “*speech average*”.

$$C_{50} = 0,15 \cdot C_{50}(500 \text{ Hz}) + 0,25 \cdot C_{50}(1 \text{ kHz}) + 0,35 \cdot C_{50}(2 \text{ kHz}) + 0,25 \cdot C_{50}(4 \text{ kHz}) \quad (15)$$

Se recomienda un valor de:

$$C_{50} > 2 \text{ dB}$$

### 2.1.3.8 Definición ( $D_{50}$ )

En [3], se describe la definición ( $D_{50}$ ) según Thiele, como la relación que hay entre la energía que recibe el oyente en los primeros 50 ms a partir a partir del instante en que se recibe el sonido directo y la energía total recibida. Se trata de un parámetro acústico exclusivamente definido para salas destinadas a la palabra.

$$D_{50} = \frac{\text{Energía hasta 50 ms}}{\text{Energía total}} \quad (16)$$

Además, este parámetro se puede calcular a partir del valor de la claridad verbal.

$$D_{50} = \frac{1}{1 + 10^{-\frac{C_{50}}{10}}} \quad (17)$$

Se recomienda un valor de:

$$D_{50} > 0,50 \text{ dB}$$

### 2.1.3 Curvas Noise Criteria

En un recinto es importante controlar el ruido de fondo ya que puede derivar a molestar a los oyentes interfiriendo en la actividad principal. El ruido de fondo puede incrementarse con los aparatos de climatización, la instalación eléctrica e incluso por un mal aislamiento del recinto haciendo que se llegue a escuchar el tráfico de vehículos dentro de la sala.

Es por ello por lo que es necesario evaluar el ruido de fondo en una sala. Para evaluar el ruido de fondo de un recinto se utilizan las curvas *noise criteria* o abreviadamente NC.

Estas curvas permiten la evaluación del grado de molestia que un ruido provoca en un oyente, por bandas de frecuencia de octavas entre 63 Hz y 8 kHz, teniendo en cuenta la evolución de la sensibilidad del oído humano.

Para cada tipo de recinto se recomienda una curva NC y se cumple con la normativa cuando los niveles de ruido de fondo medidos no superan en ningún momento la curva NC correspondiente.

Las curvas NC y la tabla de recomendación de la curva según el tipo de recinto se muestra a continuación.

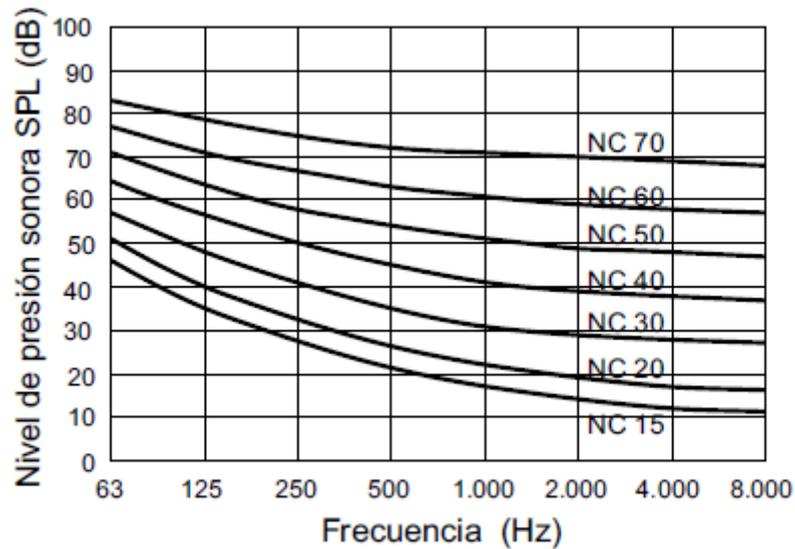


Figura 6:Curvas NC; Fuente: Carrión [3]

TIPOS DE RECINTOS	CURVA NC RECOMENDADA	EQUIVALENCIA EN dBA
Estudios de grabación	15	28
Salas de conciertos y teatros	15-25	28-38
Hoteles (habitaciones individuales)	20-30	33-42
Salas de conferencias / Aulas	20-30	33-42
Despachos de oficinas / Bibliotecas	30-35	42-46
Hoteles (vestibulos y pasillos)	35-40	46-50
Restaurantes	35-40	46-50
Salas de ordenadores	35-45	46-55
Cafeterías	40-45	50-55
Polideportivos	40-50	50-60
Talleres (maquinaria ligera)	45-55	55-65
Talleres (maquinaria pesada)	50-65	60-75

Tabla 1: Recomendación de curvas NC según el tipo de recinto y niveles de ruido de fondo equivalentes (en dBA)

Para salas de conciertos y teatros se establece como valor recomendado de las curvas NC-15 a la NC-25.

## 2.2 Normativa utilizada

Para la realización de este proyecto se sigue la normativa vigente con referencia UNE-EN ISO 3382-1:2010 Acústica Medición de parámetros acústicos en recintos Parte 1: Sala de espectáculos [11] Se consulta la legislación para realizar las medidas “*in situ*” del proyecto y para la obtención de los resultados de parámetros acústicos.

La norma UNE-EN ISO 3382-1:2010 describe un método para calcular el tiempo de reverberación y otros parámetros acústicos de una sala de espectáculos a partir de la respuesta al impulso y del método del ruido interrumpido.

Seguidamente se realiza un resumen de los aspectos más importantes de la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010.

### 2.2.1 Instrumentación

#### 2.2.1.1 Toma de la temperatura y de la humedad relativa

En el momento de la medición se debe de medir la temperatura y la humedad relativa del aire, asegurando que el equipo usado cuenta con una precisión de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  en cuanto a la temperatura y  $\pm 5\%$  en cuanto a la humedad relativa.

#### 2.2.1.2 Fuente acústica

La fuente acústica debe de ser lo más omnidireccional posible. En la Tabla 2 se muestra la desviación máxima permitida de la directividad de la fuente.

<b>Frecuencia, hercios</b>	125	250	500	1000	2000	4000
<b>Desviación máxima, decibelios</b>	±1	±1	±1	±3	±5	±6

Tabla 2: Desviación máxima de directividad de la fuente, en decibelios, medida en campo libre para una excitación por ruido rosa en bandas de octava; Fuente: UNE-EN ISO 3382-1:2010 [11]

Además, la fuente acústica debe de ser capaz de emitir un nivel de presión acústica suficiente para generar curvas de decrecimiento con el rango dinámico mínimo requerido sin que llegue a mezclarse con el ruido de fondo, requiere un nivel de al menos 45 dB por encima del nivel de ruido de fondo.

En caso de no poder adquirir el nivel suficiente, las mediciones requerirán técnicas con promediado sincrónico y con señales pseudoaleatorias.

### 2.2.1.3 Micrófono y equipos de análisis y grabación

Para el registro de la grabación, el equipo tiene que cumplir las prestaciones de un sonómetro de tipo I que se describen en la Norma IEC 61672-1. También, los filtros de octava o de tercio de octava tienen que cumplir con la Norma IEC 61260.

Los micrófonos tienen que ser omnidireccionales, siendo lo más pequeño posible y con un máximo de diámetro de diafragma de 13 mm.

### 2.2.1.4 Sobresaturación

En todo el proceso de medida no se debe de admitir ningún tipo de sobresaturación.

## 2.2.2 Posiciones de medición

### 2.2.2.1 Fuente acústica

Se deben de usar al menos dos posiciones de fuente situadas en la posición de las fuentes sonoras naturales a una altura de 1.5 m por encima del suelo.

### 2.2.2.2 Micrófono

Situadas en posiciones representativas de las posiciones de los oyentes, a su vez, deben de estar alejadas de cualquier superficie reflectante en al menos  $\lambda/4$  y entre cada posición de micrófono a  $\lambda/2$ . Se deben de evitar posiciones demasiado cerca de la fuente sonora para evitar demasiada influencia del sonido directo.

Para las salas de conferencias y conciertos se recomienda una altura de 1.2 m del suelo.

## 2.2.3 Procedimiento de medición

### 2.2.3.1 Método del ruido interrumpido

El método de ruido interrumpido consiste en la obtención de las curvas de decrecimiento a través de la excitación de la sala con ruido de banda ancha o con ruido limitado en frecuencia y seguidamente registrando el decrecimiento del nivel de presión sonora. Para excitar el recinto es necesario utilizar una fuente acústica donde la señal que reciba proceda de un ruido eléctrico de banda ancha aleatorio o pseudoaleatorio. También, es necesario que sea capaz de emitir un nivel, en cada banda de frecuencias, de al menos 45 dB por encima del ruido de fondo para evaluar el  $T_{30}$ .

Se recomienda que la duración de excitación sea de al menos unos segundos y no inferior a  $TR/2$  ya que la excitación debe de ser suficiente para que el campo acústico alcance un estado

estacionario antes de que la fuente se pare. Debido a la aleatoriedad de la fuente, es necesario realizar el promedio, en cada posición, a partir del número de mediciones. Se puede realizar tanto calculando los TR individuales para cada curva de decrecimiento y seguidamente calculando el valor medio, o realizando la media de todos los decrecimientos de presión acústica al cuadrado y calculando el TR del resultado de la curva de decrecimiento obtenida.

### 2.2.3.2 Método de la respuesta impulsiva integrada

El método de la respuesta impulsiva se usa para la obtención de las curvas de decrecimiento usando la integración inversa de las respuestas impulsivas al cuadrado. Donde se refiere a respuesta impulsiva como la evolución temporal de la presión acústica desde un punto de la sala en consecuencia de la emisión de un impulso en otro punto de la sala. Este método se puede medir de diferentes maneras como: con disparos de pistola, salvas de ruido o chirridos. Además, también es posible el uso de señales especiales como barridos secuenciales como la *sine sweep* exponencial. La señal *sine sweep* exponencial es una señal que realiza un barrido frecuencial con la característica de que excita solo una frecuencia en el mismo momento. Se define según la siguiente expresión matemática:

$$x(t) = \sin \left[ \frac{w_1 \cdot T}{\ln \left( \frac{w_2}{w_1} \right)} \cdot \left( e^{\frac{t}{T} \cdot \ln \left( \frac{w_2}{w_1} \right)} - 1 \right) \right] \quad (18)$$

Donde  $w_1$  y  $w_2$  se refieren a las frecuencias inicial y final del barrido, recordando que:

$$w = 2\pi \cdot f \quad (19)$$

## 3. SITUACIÓN Y ENTORNO

En este apartado se describe dónde se encuentra el auditorio, las características principales tanto de la geometría y materiales de la sala como las actividades que acoge y los parámetros acústicos recomendados para la sala.

### 3.1 Emplazamiento del “Auditori Nou”

El municipio de Alaquàs se encuentra en la comarca de l’Horta Oest en la provincia de València [17]. Según [15], cuenta con una población de 29.711 habitantes.

En la Figura 7 se muestra la localización de Alaquàs y en la Figura 8 la del auditorio.



Figura 7:Localización de Alaquàs con referencia a València; Fuente:Google Earth [14]

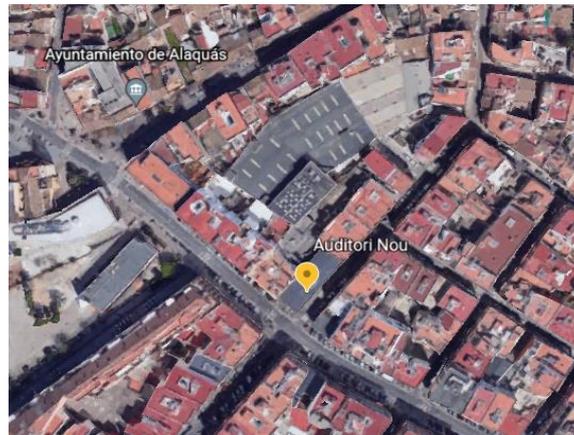


Figura 8:Localización del Auditori Nou d'Alaquàs; Fuente:Google Earth [14]

Desde 2003 [4], Alaquàs cuenta con un auditorio de usos múltiples denominado “Auditori Nou” construido por el arquitecto Rafael Gil i Ibor [19]. El auditorio está ubicado en la Calle de la Música 12 y tiene una superficie de parcela de 690 m<sup>2</sup> y 1728 m<sup>2</sup> de superficie sobre rasante, de los cuales aproximadamente 800 m<sup>2</sup> pertenecen al Auditori Nou [12]. El resto pertenece a las entidades musicales que comparten edificio como son la escuela privada de estudios elementales y medios de música y danza “Vicent Sanchis i Sanz” o la asociación municipal “Unió Musical d’Alaquàs” que cuenta con grupos de banda sinfónica, jove orquesta, coro, grupo de danza contemporánea y grupo de canto y danza tradicional valenciana [16].

El auditorio acoge diversas actividades de las entidades musicales y culturales de Alaquàs como conciertos de banda sinfónica, de música de cámara, música folclórica valenciana, representaciones teatrales, conferencias, proyecciones, presentaciones falleras, reuniones o charlas.



Figura 9: Fachada Auditori Nou d'Alaquàs; Fuente: Ajuntament d'Alaquàs [12]



Figura 10: Auditori Nou d'Alaquàs Sala vista desde el escenario y desde la cabina técnica

### 3.2 Dimensionamiento y materiales

El “Auditori Nou” cuenta con un aforo de 327 butacas y 3 plazas para personas con diversidad funcional.

En la sala se pueden diferenciar dos zonas: la caja escénica y el patio de butacas.

La forma del patio de butacas se asemeja a un rectángulo a pesar de tener irregularidades en la pared del fondo y en una vertiente que tiene cerca de la caja escénica. Cuenta con unas dimensiones de 15.52 m de ancho 17.60 m de largo y 14.45 m de alto.

El área de audiencia tiene una superficie de 268.93 m<sup>2</sup>. Se reparte de forma que se distinguen tres bloques de audiencia: izquierda, centro y derecha. Cuenta con quince filas de butacas que se distribuyen en diferentes alturas, es decir, es una sala inclinada con una diferencia de +5.6 m entre la primera y la última fila. En el centro de la sala hay una abertura para el acceso del público como se puede observar en la Figura 10.

La zona de la caja escénica tiene una superficie de 168.26 m<sup>2</sup>. Al ser una sala que acoge múltiples actividades cuenta con una cámara negra de teatro y con una concha acústica desmontable. La cámara negra está compuesta por cuatro patas a los hombros del escenario, dispuestas de forma paralela al telón y un telón de fondo posicionado a 7.70 m de la boca del escenario.



Figura 11:Escenario con cámara negra

La concha acústica está compuesta de cinco patas de madera a cada hombro del escenario y de tres secciones centrales de forma rectangular que se pueden mover de manera monitorizada.



Figura 12:Escenario con concha acústica

Tiene la particularidad de poder establecer la configuración óptima según la actividad que se vaya a realizar, ya que las patas de los laterales tienen una capacidad de giro de  $360^\circ$  en el eje  $\varphi$  y las secciones centrales de  $180^\circ$  en el eje  $\theta$ , siendo  $\varphi$  y  $\theta$  los ejes representados en la Figura 13.

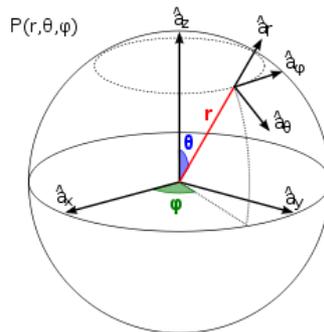


Figura 13:Coordenadas esféricas; Fuente: Wikipedia [18]

La concha acústica se suele utilizar para cualquier actividad de carácter musical, mientras que la cámara negra se reserva para actividades como representaciones teatrales.

El auditorio está formado con diferentes materiales, a continuación, se muestra una tabla resumen de los materiales que contiene.

<b>SUPERFICIE</b>	<b>MATERIAL</b>
Pavimento Audiencia	Moqueta
Paredes Laterales	Revestimiento de Madera
	Cartón -Yeso con cámara
	Cartón -Yeso sin cámara
Pared de fondo	Entramado de listones de madera
Techo	Paneles de revestimiento de madera
Pavimento de la caja escénica	Madera

Tabla 3: Materiales que componen el auditorio

La sala cuenta con refuerzo sonoro en cada lateral de la sala.

A continuación, se expone el resumen de las principales características de la sala.

**Volumen con caja escénica:** 5677 m<sup>3</sup>

**Aforo:** 327 butacas + 3 plazas para personas con diversidad funcional

**Área de audiencia:** 268.93 m<sup>2</sup>

**Área de caja escénica:** 168.26 m<sup>2</sup>

**Actividades:** Música, teatro, conferencias, actos municipales.

### 3.3 Objetivos de calidad acústica

Como se ha mencionado anteriormente, el “Audiori Nou” está destinado tanto a la palabra como a actos musicales. En caso de los actos musicales, por el tamaño del escenario el recinto está destinado a representaciones de música de cámara.

En las siguientes tablas, se resumen los parámetros acústicos recomendados en función de la actividad. Se muestra un guion en los valores recomendados de los parámetros que no tiene sentido estimar para la actividad de la sala, como estimar la claridad de la palabra en una sala destinada a música de cámara.

<b>MÚSICA DE CÁMARA</b>	
<b>PARÁMETRO ACÚSTICO</b>	<b>Valor recomendado</b>
<b>T<sub>mid</sub> (s)</b>	$1.3 \leq RT_{mid} \leq 1.7s$
<b>Br</b>	$Br \geq 0.87$
<b>BR</b>	$1.10 \leq BR \leq 1.45$
<b>C<sub>80</sub></b>	$-2 \leq C_{80} \leq +2$ dB
<b>C<sub>50</sub></b>	-
<b>D<sub>50</sub></b>	-
<b>ITDG</b>	$t_l \leq 20$ ms
<b>NC</b>	NC-15/NC-25

Tabla 4: Parámetros acústicos recomendados para una sala de música de cámara

TEATRO	
PARÁMETRO ACÚSTICO	Valor recomendado
Tmid (s)	$0.7 \leq RT_{mid} \leq 1.2$ s
Br	-
BR	-
C <sub>80</sub>	-
C <sub>50</sub>	C <sub>50</sub> > 2 dB
D <sub>50</sub>	D > 0.50
ITDG	-
NC	NC-15/NC-25

Tabla 5: Parámetros acústicos recomendados para una sala de teatro

## 4. MEDIDAS “IN SITU”

En este apartado se explica el equipamiento utilizado, el conexionado y el procedimiento que se lleva a cabo para poder realizar las medidas “*in situ*” en la sala. Posteriormente se validará el modelo de simulación acústica para sacar conclusiones del comportamiento acústico actual de la sala. Las medidas se realizan siguiendo las recomendaciones de la normativa en vigor, UNE-EN ISO 3382-1:2010, sobre mediciones de parámetros acústicos en recintos de salas de espectáculos. Se realizan las mediciones de la respuesta al impulso y del tiempo de reverberación de las dos configuraciones de la sala: sin la concha acústica o con la concha acústica.

### 4.1 Equipo utilizado

En la siguiente tabla se muestra una lista del material utilizado para la realización de las medidas “*in situ*”.

EQUIPO	CARACTERÍSTICAS
Sonómetro	Tipo I modelo 2270 de la marca Brüel & Kjaer con N° serie 2644673
Calibrador sonoro	Marca Brüel & Kjaer con modelo 4231 con N°Serie 2343089
Micrófono sonómetro	Micrófono de ½ pulgada tipo 4189 con patrón polar omnidireccional y ponderación A con N°Serie 2650608
Micrófono	Micrófono de ½ pulgada tipo 4189 con patrón polar omnidireccional y ponderación A con N°Serie 1836589
Previo	De la marca Brüel & Kjaer tipo 2671 con N°Serie 1833558
Fuente Omnidireccional	Fuente dodecaédrica de la marca Brüel & Kjaer OmniPower tipo 4296 N°Serie 2498653
Tarjeta de sonido	Modelo Fast track Pro-M-Audio
Software	ARTA V1.9.2 (Ivo Matejan, abril 2017)
Amplificador de potencia	Europower EP1500 de la marca Behringer
Amplificador	Power Supply WB 1372 de la marca Brüel & Kjaer
Anemómetro	Anemómetro de la marca Testo modelo 410-2 con N° de serie 01437787/710
Cables y adaptadores	Cable XLR-XLR Cable Speakon-Speakon 2x Cable BNC-BNC Cable USB-A-USB-A hembra Cable Jack-RCA Cable Lemo-XLR Adaptador XLR (M)-BNC (H) Adaptador XLR-Jack

Tabla 6: Equipo utilizado para las medidas “*in situ*”

En la Figura 14 se puede observar parte del material utilizado en las medidas “*in situ*”.



Figura 14: Centro de control en las medidas “*in situ*”

## 4.2 Procedimiento

En este apartado se describe las diferentes etapas que se emplean para la realización de la toma de medidas.

### 4.2.1 Preparación previa

Para poder proceder a la toma de medidas de la respuesta al impulso es esencial haber instalado anteriormente el software ARTA V1.9.2 disponible en la página web [8]. También, es necesario instalar los drivers correspondientes a la tarjeta de sonido M-AUDIO disponibles en su página web [10] o en el CD que se incluye en la caja de la tarjeta.

Con respecto a la toma de medidas para obtener el tiempo de reverberación con el sonómetro se debe configurar en el módulo correctamente, se describe más adelante.

#### 4.2.1.1 Posicionamiento de fuente y micrófono

Para establecer el posicionamiento de la fuente omnidireccional y las diferentes posiciones de micrófono, se consulta la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010 [11].

Según dicha norma, se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- El estado del auditorio se encuentra en las condiciones óptimas para realizar las mediciones de manera adecuada.
- Las posiciones de micrófono se encuentran alejadas de la fuente, lo suficiente para evitar una influencia excesiva del sonido directo.
- La altura de la posición de los micrófonos debe de ser de 1.2 m respecto del suelo.
- La altura de la posición de la fuente debe de ser de 1.5 m respecto del suelo.

Las posiciones de fuente y de los receptores se eligen según la norma y se muestran en la Figura 15.

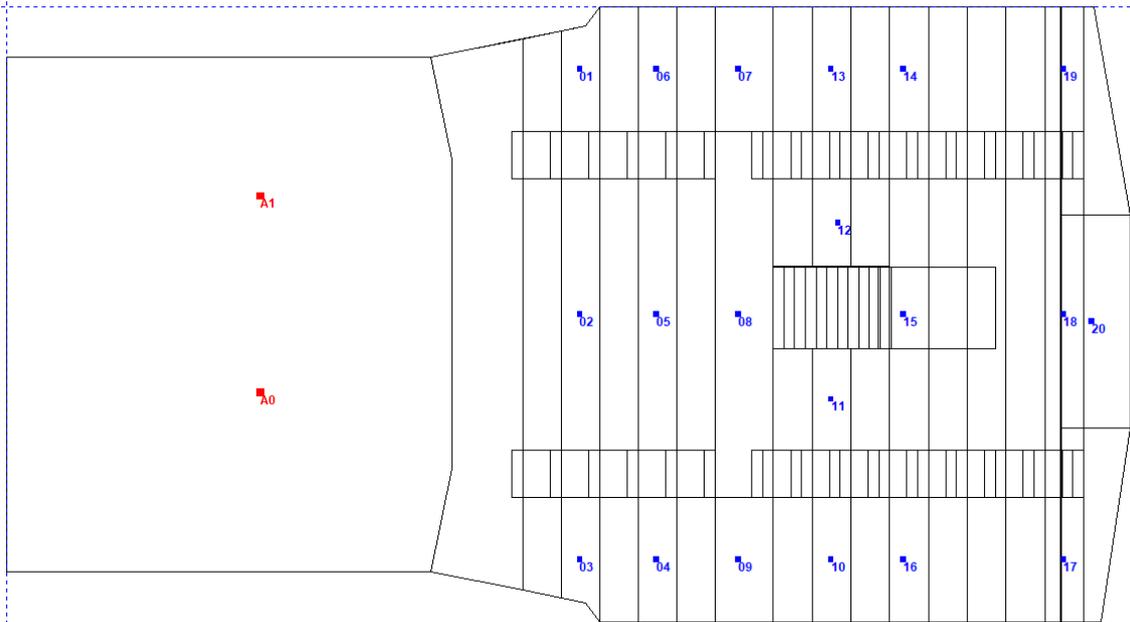


Figura 15: Posicionamiento de fuentes (color rojo) y receptores de medida (en azul)

#### 4.2.2 Calibración de la tarjeta de audio

La calibración de la tarjeta de audio es necesaria para la obtención de buenos resultados en la toma de medidas. La calibración consiste en ajustar los niveles de sensibilidad de entrada de medición a un nivel relativo de 0 dB mediante una señal de referencia.

Primero, se debe conectar la tarjeta mediante cable USB al PC. Después, inicializar el software ARTA y seleccionar en la pestaña de *Audio devices Setup* los drivers de la tarjeta de sonido, FAST TRACK PRO ASIO, para que el software utilice la tarjeta como dispositivo de entrada y de salida.

Es recomendable fijarse en los canales de salidas físicas seleccionados, en este caso 1 / 2, para después hacer uso de estos.

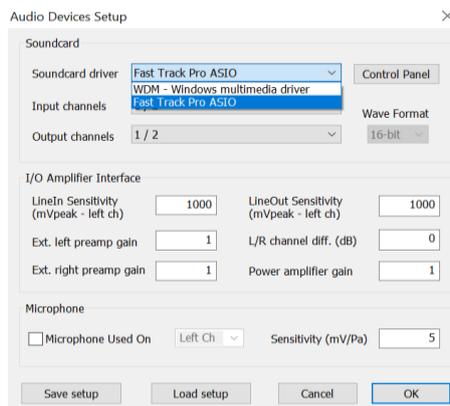


Figura 16: Menú Audio Devices Setup

En segundo lugar, se configura el tipo de generador de la señal de referencia en el modo de medida  $F_{R1}$  y se configuran los siguientes parámetros en la barra de herramientas del ARTA.



Figura 17: Barra de herramientas ARTA

Respecto al conexionado, se efectúa un bucle entre la entrada y la salida de línea (Line) de la tarjeta del mismo canal, (canal Left en este caso), con un cable con conectores JACK-RCA como se muestra en la Figura 18.

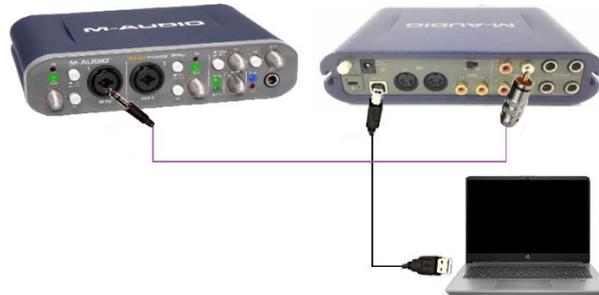


Figura 18: Conexión para calibrar tarjeta de sonido

Para una correcta calibración de la tarjeta de M-AUDIO el potenciómetro MIX debe de estar en la posición PB para que solo salga la señal que provenga del ARTA. Además, el botón PAD debe de estar desactivado, “hacia fuera”, para que no se produzca una atenuación de 20 dB en el nivel de la señal de entrada.

Por último, se activa el generador y se manipulan los potenciómetros de GAIN de la entrada 1 y el de OUTPUT para posicionar la línea en 0 dB.

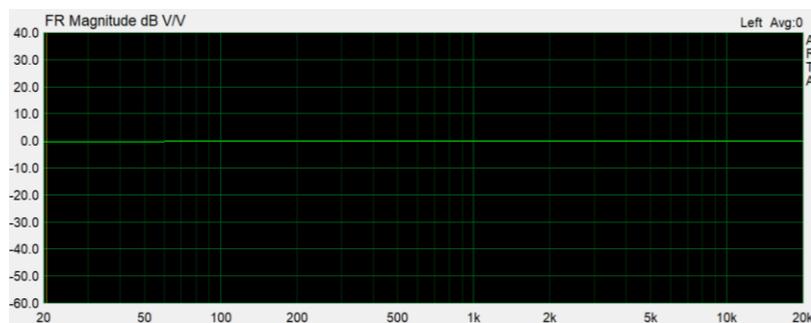


Figura 19: Calibración tarjeta 0dB

#### 4.2.3 Calibración del micrófono

En primer lugar, se debe de calibrar el micrófono con el calibrador tipo I de Brüel & Kjaer, que emite un pulso de 1 kHz con una presión de 94 dB SPL, para ello se introduce la cápsula del micrófono en el calibrador y se enciende. En segundo lugar, se tiene que calibrar el micrófono en el software ARTA. En consecuencia, es necesario conectar el micrófono mediante un cable BNC (M)-BNC(M) y adaptador BNC(H)-XLR(M) al canal de entrada de línea 1 (Left) de la tarjeta de audio. Asimismo, hay que tener en cuenta las características del micrófono.

El micrófono que se va a utilizar tiene las siguientes características:

- **Modelo:** Tipo 4189 de la marca Brüel & Kjaer ½’’
- **Número de serie:** 1836589
- **Sensibilidad:** 47.2 mV/Pa

En ARTA, se abre el modo de medida  $F_{R1}$  y se selecciona la pestaña de *SETUP*, seguidamente se pincha en *CALIBRATE DEVICES*. En la nueva ventana, al pulsar el botón *Estimated Mic sensitivity* y usando el potenciómetro de ganancia del canal correspondiente (GAIN) se ajusta el nivel a -10 dB. Por otra parte, se tiene que ajustar con el botón *Pream Gain* para que la sensibilidad del micrófono en el ARTA coincida o se aproxime con la que proporciona el fabricante, 47.2 mV/Pa.

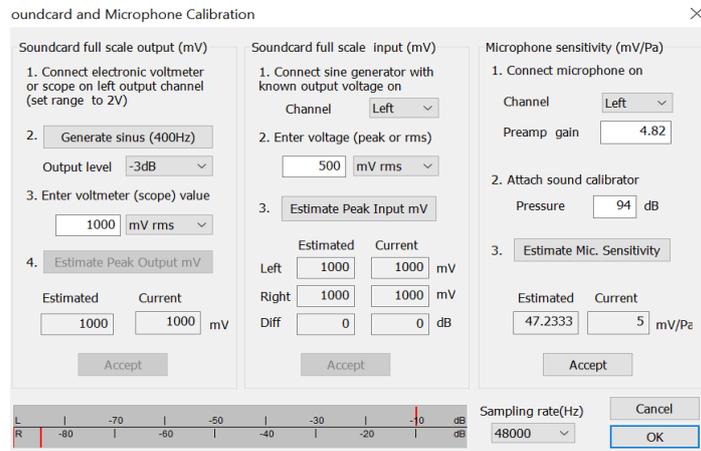


Figura 20:Calibración micrófono

#### 4.2.4 Toma de medidas

En este apartado se especifica sobre el procedimiento de la toma de medidas, diferenciando entre la medición de la respuesta al impulso con el software ARTA y entre la medición del tiempo de reverberación con el sonómetro.

Antes de la toma de medidas, se mide la temperatura y la humedad relativa en la sala, para posteriormente incluirlas en el software de simulación.

<b>Temperatura (°C)</b>	21.4
<b>Humedad relativa (%)</b>	77.9

Tabla 7: Temperatura y humedad relativa medidas

##### 4.2.4.1 Medición de la respuesta al impulso

Para realizar las medidas de la respuesta al impulso se va a utilizar el software ARTA. Primero de todo se debe seguir la explicación del punto 4.2.2 y 4.2.3 para calibrar la tarjeta de sonido y el micrófono.

Para determinar la respuesta al impulso de sala, la tarjeta de audio tiene la función de generador de las señales, configuradas en el software ARTA, y que se emiten por la fuente de audio omnidireccional. Estas señales son las denominadas tipo *sine sweep*.

Una vez calibrado, se realiza el conexionado para la medición como se muestra en Figura 21.



Figura 21: Conexión para la medición de la respuesta al impulso

En cuanto a la configuración del ARTA para emitir las señales de respuesta al impulso, se abre el modo de medida IMP. Seguidamente, se tiene que entrar en la pestaña de *Record* del menú de herramientas y a continuación pulsar sobre *Impulse Response/ Time Record*. En la nueva pestaña se puede configurar la señal de *sine sweep*. Para la *sine sweep* exponencial se selecciona una longitud de FFT de 128k y una frecuencia de muestreo de 48000 Hz y se marca la opción de *Log-frequency sweep*. Las medidas se realizan 5 veces y se promedian.

Se debe tener en consideración que la constante de tiempo, el cociente entre la longitud de FFT de la secuencia y la frecuencia de muestreo, sea superior al TR estimado de la sala. En este proyecto se estima alrededor de 1.5 s, por lo que se selecciona 128k.

$$\text{Constante de tiempo} = \frac{\text{longitudFFT}}{F_s} = \frac{128000}{48000} = 2.66 \text{ s}$$

Por último, al seleccionar el botón de *Record* se obtiene la captura de la respuesta al impulso que se puede exportar como un fichero con extensión .WAV de 16 bit PCM.

Una vez realizadas las medidas, se pueden analizar los resultados en la pestaña *Analysis* de la barra de herramientas y se selecciona la norma *ISO 3382 - acustical parameteters* y pulsando sobre *Table presentation for 1/3 octave bands*.

De esta forma, se obtienen una tabla de parámetros acústicos según la norma ISO 3382.

#### 4.2.4.2 Medición del tiempo de reverberación con sonómetro

Uno de los parámetros acústicos más importantes es el tiempo de reverberación. Se va a medir con el sonómetro Brüel & Kjaer, modelo 2270 con número de serie 2644673.

Para comenzar, se debe de configurar correctamente el sonómetro, a continuación, se muestra una tabla con la configuración seleccionada en el módulo de Tiempo de Reverberación del sonómetro.

MÓDULO	Tiempo de Reverberación	
<b>ENTRADA</b>	Entrada	Conector superior
	Transductor	4189(2650608)
	Correc. Campo sonoro	Campo difuso
	Autodetección Pantalla Anti viento	No
	Correc. Pantalla antiviento	Ninguna
<b>MARGEN DE FRECUENCIA</b>	Ancho de banda	1/3 octava
	Frecuencia Inferior	125 Hz
	Frecuencia Superior	6.3 kHz
<b>CONTROL DE MEDIDA</b>	Medidas basadas en Mapa	No
	Autoguardado	Off
	Max. Tiempo de caída	3 s
	Ruido	Interrumpido
	Numero de caídas	5
	Modo de medida	Paralelo
<b>GENERADOR</b>	Tipo de Generador	Interno
	Tipo de ruido	Rosa
	Nivel [re. 1 V]	-3 dB
	Tiempo de Escape	3s
	Tiempo de subida	2s
	Fuente Sonora	Tipo 4296
<b>POST PROCESADO</b>	Promedio Conjunto	Sí
	TR. De B.A Inferior	125 Hz
	TR. De B.A Superior	6.3 kHz

Tabla 8: Configuración del sonómetro

El conexionado para la medición del tiempo de reverberación con sonómetro es la que se muestra a continuación:



Figura 22: Conexión para la medición del tiempo de reverberación

## 5. Resultados

En el siguiente apartado se muestran los resultados obtenidos en las medidas “*in situ*” realizadas el 1 de junio de 2021.

Además, se realiza una comparación entre los dos métodos de medida y se analiza si los parámetros acústicos obtenidos son adecuados según los valores recomendados en [3] y expuestos en la Tabla 4 y la Tabla 5.

### 5.1 Exposición de resultados

#### 5.1.1 Sonómetro

Siguiendo el procedimiento mostrado en el apartado 4.2.4.2, los resultados globales obtenidos para las dos configuraciones de la sala, representados en tercios de octava, son los que se muestran en este apartado.

Los resultados del EDT, T20 y T30 de las nueve posiciones de medida se pueden consultar en el Anexo\_medidas sonómetro.

Se ha obtenido el valor de  $T_{mid}$  (Tiempo de reverberación medio), BR (calidez acústica) y del Br (brillo) a partir de las fórmulas matemáticas correspondientes expuestas en 2.1.3 Parámetros acústicos.

##### 5.1.1.1 Sin concha acústica

RESULTADOS GLOBALES SIN CONCHA																
F (Hz)	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k
T30 (s)	1,70	1,59	1,46	1,40	1,32	1,26	1,26	1,24	1,22	1,15	1,12	1,09	1,08	1,04	0,98	0,92
T20 (s)	1,72	1,59	1,52	1,37	1,32	1,26	1,24	1,22	1,24	1,13	1,07	1,04	1,03	0,97	0,93	0,88
EDT (s)	1,89	1,53	1,67	1,38	1,33	1,37	1,14	1,17	1,04	0,90	0,90	0,92	0,81	0,80	0,78	0,71
Tmid	1,20															

Tabla 9:Resultados globales sin concha acústica sonómetro

En la tabla anterior, se observan los valores globales del T30 para cada frecuencia. El valor máximo se da una frecuencia de 125 Hz con un valor de 1.7 s y el mínimo en 8 kHz con un valor de 0.66 s. Además, se obtiene un tiempo de reverberación medio de 1,20 s.

##### 5.1.1.2 Con concha acústica

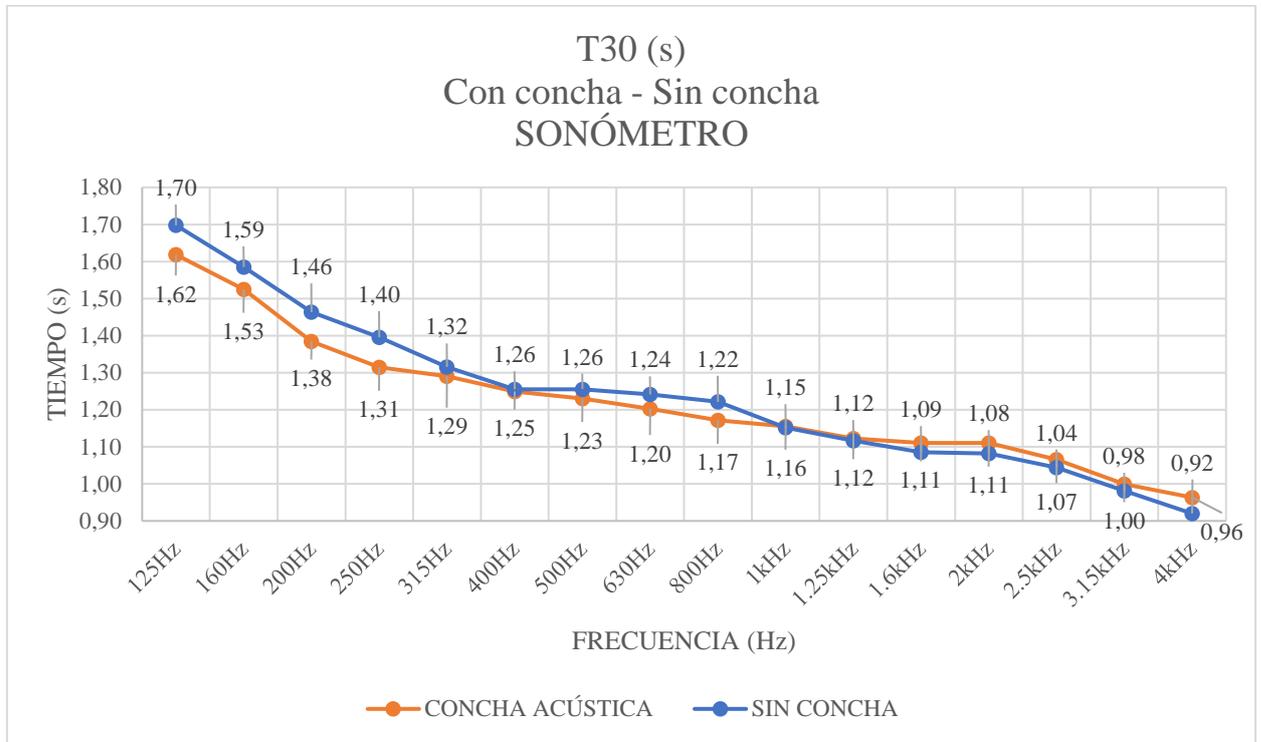
RESULTADOS GLOBALES CON CONCHA																
F (Hz)	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k
T30 (s)	1,62	1,53	1,38	1,31	1,29	1,25	1,23	1,20	1,17	1,16	1,12	1,11	1,11	1,07	1,00	0,96
T20 (s)	1,60	1,55	1,36	1,35	1,27	1,29	1,25	1,19	1,18	1,14	1,09	1,07	1,09	1,04	0,97	0,95
EDT (s)	2,06	1,68	1,26	1,21	1,23	1,19	1,19	1,09	1,06	0,94	0,97	0,88	0,92	0,84	0,81	0,71
BR	1,23															
Br	0,87															
Tmid	1,19															

Tabla 10:Resultados globales con concha acústica Sonómetro

De igual manera que en el caso sin concha acústica, el valor máximo se da una frecuencia de 125 Hz con un valor de 1.62 s y el mínimo en 8 kHz con un valor de 0.61 s. Se obtiene un tiempo de

reverberación medio muy similar, 1,19 s. Además, respecto al brillo y la calidez acústica se obtiene un valor de 0,87 y 1,23 respectivamente.

A continuación, se muestra una gráfica que representa el T30 en función de cada frecuencia, diferenciando entre las medidas tomadas sin concha acústica y con concha acústica.



Gráfica 1: T30(s) Con concha acústica y Sin concha acústica con Sonómetro

En la Gráfica 1 se muestra como la diferencia entre las dos configuraciones de la sala se refleja en las bajas frecuencias, donde la concha acústica tiene valores menores que sin concha acústica. En el resto de las frecuencias se obtienen valores muy similares.

### 5.1.1.3 Ruido de fondo

Para posteriormente calcular la curva NC de la sala, se ha medido el ruido de fondo en seis posiciones, seguidamente se ha calculado el promedio global y por último se ha calculado el valor por octavas realizando la suma de las bandas centrales. Por ejemplo, para sacar el valor de 1000 Hz, se realiza la suma con la banda de 800 Hz, 1000 Hz y 1250 Hz.

El ruido de fondo de la sala ha sido medido con el equipo de iluminación y el sistema de climatización de la sala en funcionamiento.

En la siguiente tabla se exponen los resultados en bandas de octava.

RUIDO DE FONDO GLOBAL POR OCTAVAS									
F(Hz)		63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Ruido de fondo (dB)	Sin concha	32,15	35,33	32,26	30,95	24,32	18,18	17,45	11,85
	Con concha	35,15	39,38	47,35	43,14	37,30	29,05	22,20	12,93

Tabla 11: Ruido de fondo global por octavas

En la Tabla 11 se pueden observar niveles elevados para tratarse de ruido de fondo de la sala.

### 5.1.2 Respuesta al impulso

Siguiendo el procedimiento mostrado en el apartado 4.2.4.1, los resultados globales obtenidos para las dos configuraciones de la sala se muestran en este apartado.

Se puede consultar los resultados de cada posición en el Anexo\_Medidas ARTA.

Se muestra a modo de ejemplo la respuesta al impulso correspondiente a la posición 5 medida sin concha acústica en las medidas realizadas “*in situ*”.

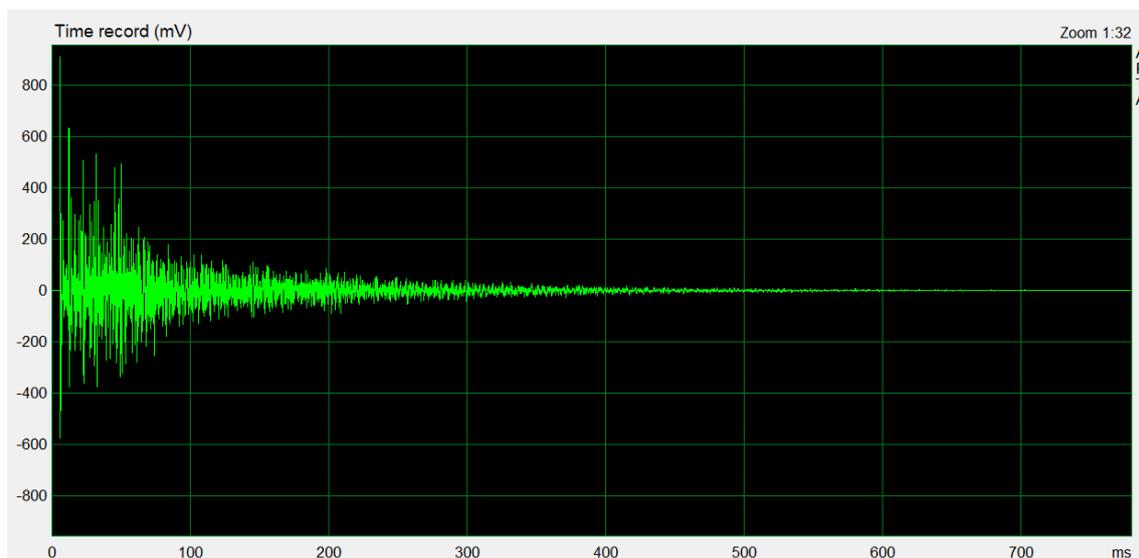


Figura 23: Ejemplo Respuesta al impulso medida

#### 5.1.2.1 Sin concha acústica

RESULTADOS GLOBALES SIN CONCHA ARTA																
F (Hz)	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k
T30 (s)	1,55	1,42	1,33	1,26	1,19	1,18	1,14	1,11	1,09	1,04	1,01	1,00	0,99	0,95	0,90	0,85
T20 (s)	1,56	1,42	1,33	1,26	1,19	1,19	1,15	1,10	1,08	1,01	0,97	0,95	0,93	0,88	0,85	0,79
T10 (s)	1,57	1,55	1,33	1,29	1,25	1,20	1,15	1,10	1,00	0,98	0,90	0,91	0,90	0,85	0,82	0,78
EDT (s)	1,52	1,43	1,26	1,13	1,12	1,04	0,99	0,89	0,84	0,81	0,75	0,77	0,71	0,71	0,68	0,64
C50 (dB)	-2,64	-2,34	-0,83	2,60	1,52	2,47	2,95	3,91	4,12	4,59	4,53	4,63	5,01	4,57	4,67	5,05
D50 (%)	36,58	38,61	45,60	63,03	58,08	63,09	65,89	70,60	71,41	73,70	73,48	73,51	74,84	73,47	73,81	75,60
Ts (ms)	128,26	113,42	94,74	70,95	73,09	63,27	59,43	53,07	49,99	45,66	44,61	45,53	43,57	43,85	42,91	39,30
Tmid	1,09															
C50 (Speech Average) (dB)	4,61															
D50	0,70															

Tabla 12: Resultados globales Sin concha ARTA

Se calcula el valor de  $C_{50}$  ‘*speech average*’, mediante la fórmula matemática, solo en el caso de sin concha acústica debido a que el parámetro acústico  $C_{50}$  se relaciona con salas utilizadas para el habla.

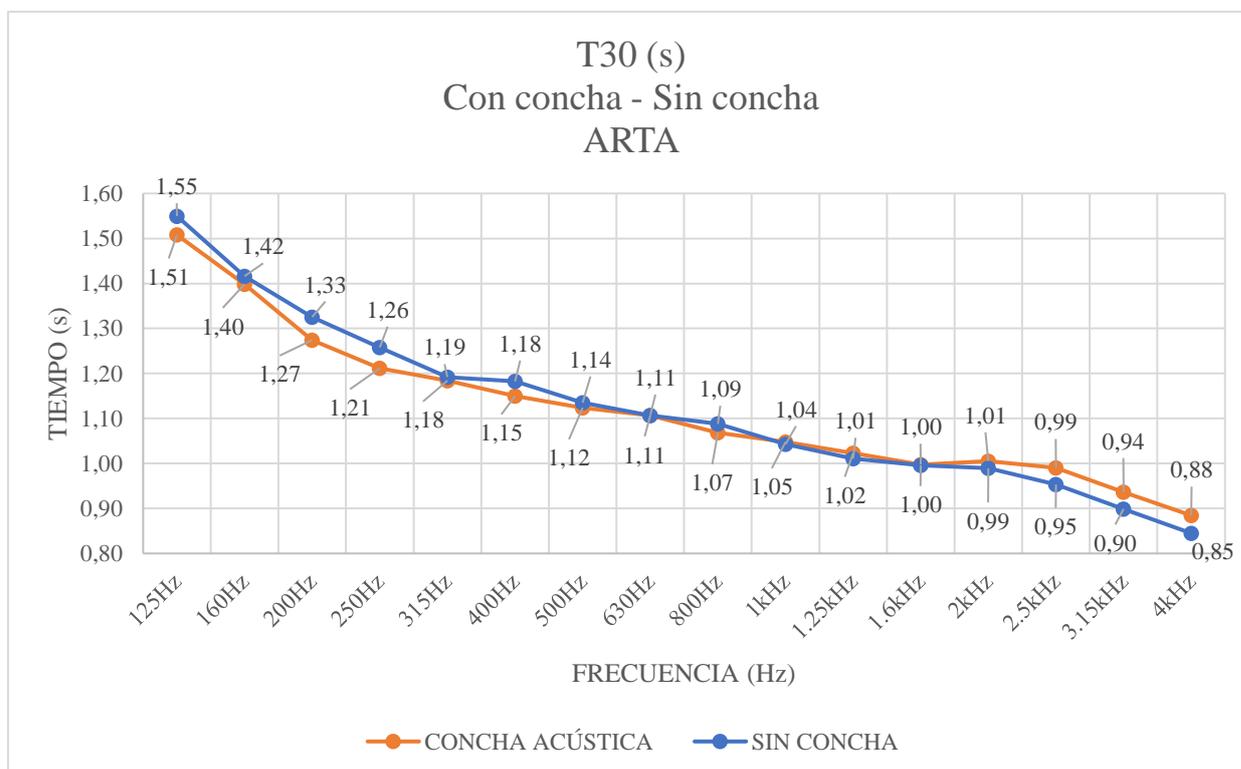
Se observan los valores globales del T30 para cada frecuencia donde el valor máximo se da una frecuencia de 125 Hz con un valor de 1.55s y el mínimo en 8 kHz con un valor de 0.63s. Por otra parte, se obtiene un valor de  $C_{50}$  de 4,61 dB y una definición del habla de 0,70.

### 5.1.2.2 Con concha acústica

RESULTADOS GLOBALES CONCHA ACÚSTICA ARTA																
F (Hz)	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k
T30 (s)	1,51	1,40	1,27	1,21	1,18	1,15	1,12	1,11	1,07	1,05	1,02	1,00	1,01	0,99	0,94	0,88
T20 (s)	1,50	1,43	1,24	1,23	1,23	1,19	1,12	1,11	1,05	1,03	0,99	0,96	0,97	0,95	0,91	0,87
T10 (s)	1,57	1,43	1,30	1,20	1,23	1,21	1,16	1,07	1,02	1,03	1,01	0,98	1,00	0,99	0,95	0,90
EDT (s)	1,49	1,24	1,11	0,89	0,97	0,94	0,93	0,89	0,87	0,86	0,83	0,77	0,78	0,79	0,76	0,68
C <sub>80</sub> (dB)	1,25	3,50	3,93	6,11	5,28	5,38	4,76	5,92	5,92	6,17	6,39	7,03	7,02	6,92	6,76	7,65
Ts (ms)	121,61	98,84	82,16	66,10	68,41	66,35	65,93	56,52	56,68	54,07	51,46	48,34	48,95	49,65	48,98	44,55
BR	1,21															
Br	0,87															
Tmid	1,09															
C <sub>80</sub> (Music Average) (dB)	5,98															

Tabla 13: Resultados globales Con concha acústica ARTA

En la tabla anterior se observan los valores globales del T30 para cada frecuencia con un valor máximo en 125 Hz de 1.51 s y un valor mínimo en 8 kHz de 0.67 s. Se obtiene un tiempo de reverberación medio de 1,09 s, además, respecto al brillo y la calidez acústica se obtienen unos valores de 0,87 y 1,21 respectivamente. El valor de la claridad musical se obtiene mediante la expresión matemática, y se obtiene un valor de 5,98 dB.



Gráfica 2: T30(s) Con concha acústica y Sin concha acústica con ARTA

En la Gráfica 2 se observa que la concha acústica produce valores menores que sin concha acústica en las bajas frecuencias, mientras que en las medias y las altas los valores son similares.

## 5.2 Análisis de resultados

### 5.2.1 Comparación de los métodos

Para realizar una comparación entre los métodos se calcula la diferencia de los valores y se realiza la siguiente tabla en el caso de sin la concha acústica.

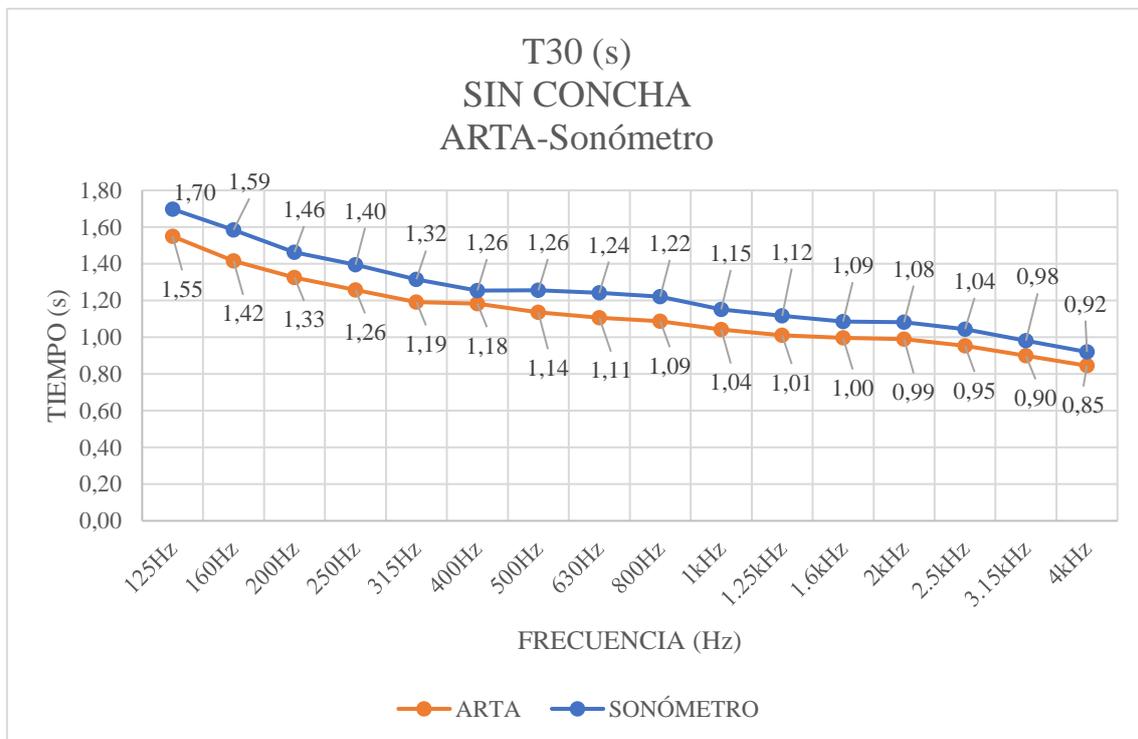
DIFERENCIA ARTA- Sonómetro SIN CONCHA ACÚSTICA																
F (Hz)	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k
T30 (s)	0,15	0,17	0,14	0,14	0,12	0,07	0,12	0,13	0,13	0,11	0,11	0,09	0,09	0,09	0,08	0,07
T20 (s)	0,15	0,17	0,19	0,11	0,13	0,07	0,09	0,12	0,16	0,12	0,10	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08
EDT (s)	0,37	0,11	0,41	0,25	0,20	0,33	0,15	0,28	0,20	0,09	0,14	0,15	0,10	0,09	0,11	0,07
BR	0,05															
Br	0,01															
Tmid	0,11															

Tabla 14: Diferencia ARTA-Sonómetro Sin concha acústica

Para los parámetros acústicos BR y Br las diferencias son mínimas.

Con respecto al T30, T20 y EDT las mayores diferencias se encuentran a bajas frecuencias, con un máximo de 0.41 en EDT a 200 Hz, mientras que a altas frecuencias la diferencia es despreciable.

A continuación, se muestra una gráfica representando el T30 global de los dos métodos. Se puede afirmar la validación de los resultados ya que son similares.



Gráfica 3: T30(s) Sin concha ARTA-Sonómetro

De la misma manera, se ha calculado la diferencia para la configuración con concha acústica.

DIFERENCIA ARTA-Sonómetro CON CONCHA ACÚSTICA																
F (Hz)	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k
T30 (s)	0,11	0,13	0,11	0,10	0,11	0,10	0,11	0,10	0,10	0,11	0,10	0,11	0,10	0,08	0,06	0,08
T20 (s)	0,10	0,12	0,12	0,12	0,04	0,10	0,13	0,08	0,12	0,11	0,10	0,11	0,12	0,09	0,06	0,09
EDT (s)	0,57	0,44	0,15	0,32	0,26	0,25	0,26	0,19	0,19	0,08	0,14	0,12	0,14	0,05	0,05	0,03
BR	0,02															
Br	0,00															
Tmid	0,11															

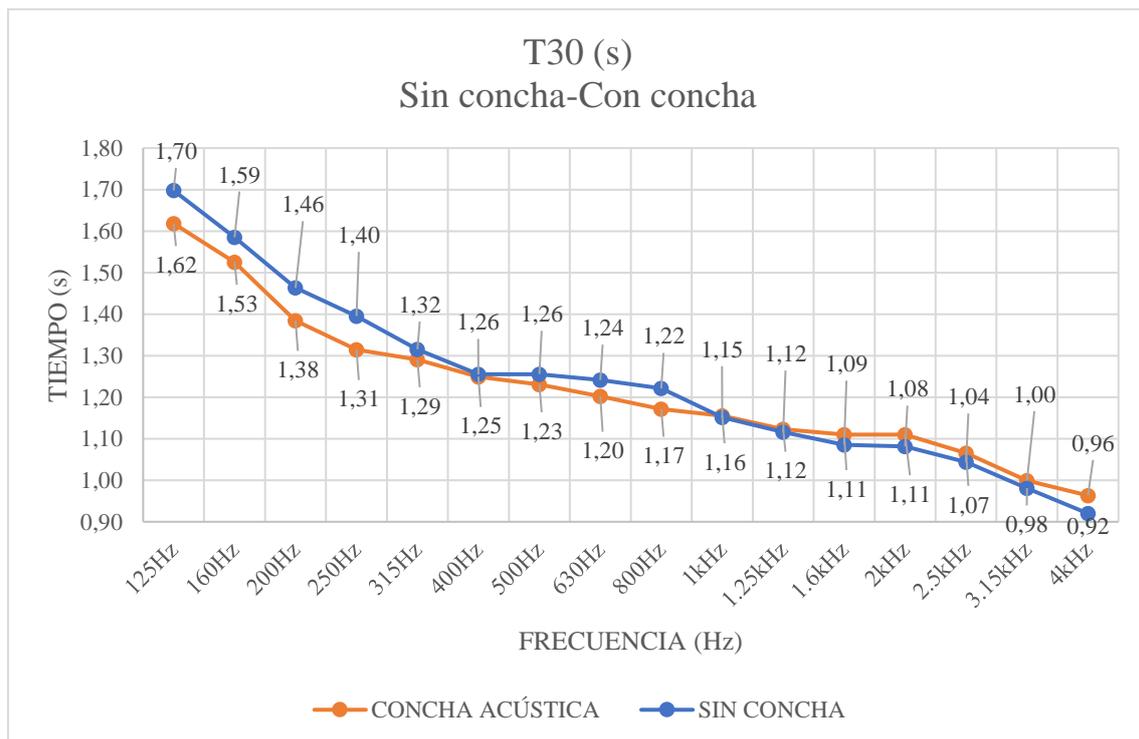
Tabla 15: Diferencia ARTA-Sonómetro Con concha acústica

Para los parámetros acústicos BR y Br las diferencias son mínimas o nulas.

Con respecto al T30, T20 y EDT las mayores diferencias se encuentran a bajas frecuencias, con un máximo de 0.57 en EDT a 125 Hz, mientras que a altas frecuencias la diferencia es despreciable.

### 5.2.2 Comparación de las configuraciones

Se muestran los resultados globales del T30 con y sin concha medidos con el método del ruido interrumpido, para comparar la influencia de la concha acústica.

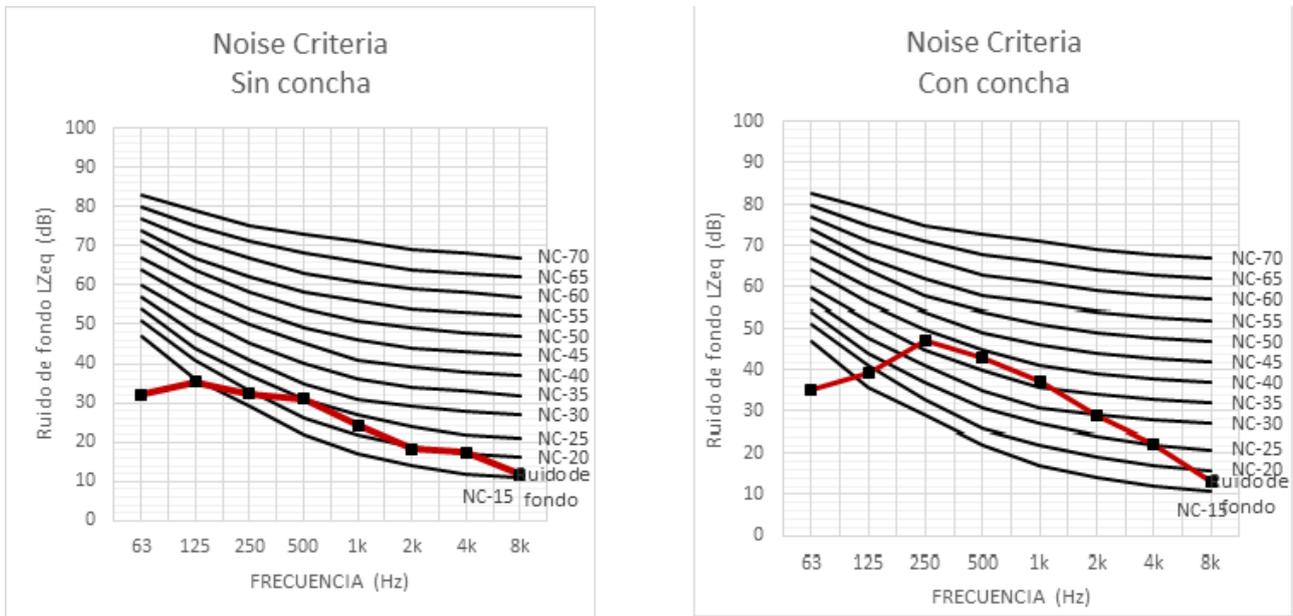


Gráfica 4: T30(s) Diferencia entre concha acústica y con concha acústica

Se concluye que, sin la concha acústica aumenta el T30 en las bajas frecuencias, mientras que las medias y altas no se encuentra gran apreciación. Esto puede ser debido a que la posición de la concha acústica en el momento de las mediciones no es la óptima.

### 5.2.3 Curvas NC

Con los valores obtenidos en la Tabla 11 se realiza las gráficas de la curva NC.



Gráfica 5: Curvas NC

En el caso de sin concha cumple NC-25, el nivel es mayor a bajas frecuencias. Sin embargo, en el caso de con concha cumple NC-40 con niveles excesivos en 250 Hz y 500 Hz.

### 5.2.4 Análisis de los parámetros acústicos

Una vez realizado en análisis de los resultados de las medidas “*in situ*”, se procede a comparar los valores de los parámetros acústicos obtenidos con los valores recomendados.

Los valores obtenidos con concha acústica se comparan con los valores recomendados para salas de música de cámara, mientras que los de sin concha acústica se comparan con los de teatro.

MÚSICA DE CÁMARA			
PARÁMETRO ACÚSTICO	Valor recomendado	Resultado medido	Cumplimiento
<b>Tmid (s)</b>	$1.3 \leq RT_{mid} \leq 1.7s$	1.19	<b>NO</b>
<b>Br</b>	$Br \geq 0.87$	0.87	<b>SI</b>
<b>BR</b>	$1.10 \leq BR \leq 1.45$	1.23	<b>SI</b>
<b>C<sub>80</sub></b>	$-2 \leq C_{80} \leq +2$ dB	5.98	<b>NO</b>
<b>C<sub>50</sub></b>	-	-	-
<b>D<sub>50</sub></b>	-	-	-
<b>ITDG</b>	$t_f \leq 20$ ms	< 20ms	<b>SI</b>
<b>NC</b>	NC-15/NC-25	NC-40	<b>NO</b>

Tabla 16: Análisis de valores recomendados música

Existe un excesivo nivel de C<sub>80</sub> como de ruido de fondo, por el contrario, el tiempo de reverberación medio menor que el valor recomendado.

<b>TEATRO</b>			
<b>PARÁMETRO ACÚSTICO</b>	<b>Valor recomendado</b>	<b>Resultado medido</b>	<b>Cumplimiento</b>
<b>Tmid (s)</b>	$0.7 \leq RT_{mid} \leq 1.2$ s	1.20	<b>SI</b>
<b>Br</b>	-	-	-
<b>BR</b>	-	-	-
<b>C<sub>80</sub></b>	-	-	-
<b>C<sub>50</sub></b>	$C_{50} > 2$ dB	4.61	<b>SI</b>
<b>D<sub>50</sub></b>	$D > 0.50$	0.7	<b>SI</b>
<b>ITDG</b>	-	-	-
<b>NC</b>	NC-15/NC-25	NC-20	<b>SI</b>

Tabla 17: Análisis de valores recomendados teatro

Se cumplen todos los parámetros acústicos para una sala de teatro.

## 6. SIMULACIÓN CATT-ACOUSTIC

En el siguiente apartado se describe tanto el funcionamiento del software de simulación acústica como el procedimiento que se ha seguido para realizar la simulación del “Auditori Nou”.

### 6.1 CATT-Acoustic

#### 6.1.1 Historia CATT-Acoustic

La versión utilizada es la V9.1f. Se dispone de licencia completa proporcionada por la Escuela Politécnica Superior de Gandía.

El CATT-Acoustic es un software creado por Bengt-Inge Dalenbäck [13]. Se trata de un software de simulación acústica basado en los principios de la acústica geométrica. Se compone de varios módulos para realizar predicciones acústicas de salas.

Se puede caracterizar la sala respecto a sus dimensiones en 3D y de las propiedades de los materiales que la componen, especificando su coeficiente de absorción y difusión en bandas frecuenciales y expresadas en tanto por ciento.

Mediante este software, se puede analizar los diferentes parámetros que caracterizan una sala como pueden ser: el tiempo de reverberación, el brillo, la claridad o la inteligibilidad. Se consigue mediante algoritmos de trazado especular de conos y rayos, además, del algoritmo de las fuentes imagen.

#### 6.1.2 Ficheros principales

En el siguiente apartado se detallan los ficheros principales que utiliza el CATT-Acoustic y la sintaxis estipulada para crear el modelo.

El software CATT-Acoustic usa tres ficheros de formato texto con extensión .GEO y .LOC para definir la geometría de la sala o para definir las características de las fuentes o de los receptores, respectivamente.

A continuación, se explica las características de los ficheros principales.

#### **MASTER.GEO:**

Este fichero contiene la información que describe la geometría de la sala y las propiedades de absorción o dispersión de las superficies.

Se pueden distinguir claramente tres secciones en el fichero, cada una se separa con palabras reservadas.

En la primera sección se definen las variables del fichero, tanto las del propio fichero, *LOCAL*, como las compartidas en todos los ficheros, *GLOBAL*.

Ejemplo: LOCAL hSala=14.15

Se especifica con la palabra *INCLUDE* y seguido del nombre del archivo, si hay otro fichero que también defina la geometría, como puede ser para insertar paneles reflectantes.

Ejemplo: INCLUDE REFLECT.GEO

Además, se definen las propiedades de absorción y dispersión de los materiales, con la palabra reservada *ABS*, en bandas de frecuencias de 125 Hz a 4kHz expresado en tanto por ciento. Se puede asignar un color al material expresado en formato RGB.

Ejemplo: ABS audience = <68 75 82 85 86 86> L <30 40 50 60 70 80> {192 0 0}

La segunda sección del fichero MASTER.GEO es la definición de los puntos que componen la sala. Los puntos se definen mediante un número identificativo, el cual no puede ser repetido, y las coordenadas 'x', 'y', y 'z'. Esta sección va encabezada por la palabra reservada *CORNERS*.

Ejemplo: 1 1.34 0 1.06 (punto 1 con coordenadas x=1.34, y=0 y z=1.06)

Por último, en la tercera sección se definen los planos que forman la sala, especificando las propiedades de la superficie correspondiente.

La sección comienza con la palabra reservada *PLANES*. La sintaxis para definir un plano es [nº identificativo nombre /puntos ordenados en sentido antihorario/ material].

Ejemplo: [1 Suelo Escenario / 6 5 4 3 2 1 / wood]

Es importante para el correcto funcionamiento del programa que los puntos estén ordenados y que la parte reflectante de la superficie esté orientada a la parte interior de la sala. En caso de que la superficie esté orientada al exterior se puede cambiar de sentido cambiando la orientación de las barras entre las que se anotan los puntos.

Además, si un plano está compuesto por el mismo material en ambas partes, como puede ser un panel reflectante, se puede definir poniendo una *D* antes del número identificativo del plano, [D nº identificativo nombre /puntos ordenados en sentido antihorario/ material].

### **SRC.LOC:**

En este fichero se definen las características de las fuentes, como la ubicación, la directividad, inclinación y tipo de ruido de la fuente.

Las fuentes se definen en bloques de la siguiente manera:

```
SOURCE A0
DIRECTIVITY = "omni"; pre-defined ideal natural omni-directional source
POS = 12.18 Les-5 hesce+1.5; 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
```

## REC.LOC:

En el fichero REC.LOC se definen las ubicaciones de los receptores de la misma manera que en los otros ficheros, indicando las posiciones con un número identificativo y las correspondientes coordenadas 'x', 'y' y 'z'.

## 6.2 Diseño del “Auditori Nou” en CATT-Acoustic

En este apartado se describe el procedimiento seguido para la creación del modelo de simulación del Auditori Nou en el software CATT-Acoustic.

### 6.2.1 Adquisición de medidas

Como trabajo previo para realizar el modelo de simulación, se deben conocer las dimensiones de la sala, para ello se contactó con el ayuntamiento municipal de Alaquàs.

Los planos disponibles por parte del Ayuntamiento se pueden consultar en el Anexo\_ planos del Auditori Nou d'Alaquàs.

Los paneles reflectantes, la concha acústica y algunas reformas de la sala no están contempladas en los planos, por lo que se determinan las dimensiones correspondientes con la ayuda de un metro laser de la marca Bosch, modelo GLM 40.

Por último, con todas las medidas disponibles se procede a crear el modelo de la sala en el software CATT-Acoustic.

### 6.2.2 Creación del modelo en CATT-Acoustic

Para el desarrollo de este proyecto se ha creado un fichero MASTER.GEO que define la geometría de la sala “base”, es decir, sin los paneles reflectantes y la concha acústica.

Para simular las dos configuraciones de la sala, se ha creado un fichero CONCHA ACÚSTICA.GEO que añaden al modelo “base” las características correspondientes a la configuración.

Además, se ha creado un fichero REFELECT.GEO que define los paneles reflectantes suspendidos en el techo de la sala.

Estos ficheros se pueden añadir o quitar para la simulación de una manera rápida y sencilla con la palabra reservada *INCLUDE* en el fichero MASTER.GEO.

Se han seleccionado las siguientes propiedades acústicas de los materiales que componen la sala para realizar la simulación.

REFERENCIA	MATERIAL	UBICACIÓN	COEFICIENTE DE ABSORCIÓN (%)					
			Bandas frecuenciales (Hz)					
			125	250	500	1000	2000	4000
	Moqueta	Suelo de patio de butacas	0,02	0,36	0,24	0,37	0,60	0,65
	Revestimiento de madera	Paredes Laterales y paneles	0,20	0,21	0,10	0,08	0,08	0,11
	Cartón-Yeso	Paredes Laterales	0,28	0,22	0,10	0,17	0,13	0,09

	Hormigón	Techo	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04
	Entramado de listones de madera	Pared Fondo	0,20	0,20	0,50	0,80	0,80	0,80
	Madera	Escenario	0,15	0,13	0,10	0,09	0,08	0,07

Tabla 18: Características de los materiales de la sala

Por otra parte, se ha creado un fichero SRC.LOC que contiene la posición de dos fuentes omnidireccionales situadas en la posición de las medidas realizadas “*in situ*”.

Por último, el fichero REC.LOC contiene las veinte posiciones de los receptores de las medidas realizadas “*in situ*”.

El código completo de todos los ficheros se puede consultar en el Anexo\_Códigos CATT-Acoustic.

Una vez escritos los ficheros, se comprueba que no contengan errores para que la simulación sea correcta y no se produzcan fugas de los rayos acústicos.

CATT-Acoustic genera un fichero debug.txt que contiene la información de los errores posibles cometidos, como pueden ser: planos o puntos duplicados, números identificativos repetidos, planos que se cortan o que se tocan o huecos producidos entre planos.

### 6.2.3 Definición de audiencia

Para realizar la simulación, se tienen que definir los planos de audiencia.

Para definir la audiencia se ha optado por crearla en 3D, debido a que un volumen se asemeja más a lo que ocupa el público que a una superficie.

En la ubicación donde se encuentran las butacas se definen prismas rectangulares de una altura de +0.5 m de la fila de audiencia correspondiente, para simular el público sentado.

El material que se le asigna a todo el prisma rectangular es la absorción de la audiencia.

Según [1], el coeficiente de absorción para audiencia, en bandas de frecuencias y expresado en tanto por cien, es el que se muestra en la siguiente tabla.

REFERENCIA	MATERIAL	UBICACIÓN	COEFICIENTE DE ABSORCIÓN (%)					
			Bandas frecuenciales (Hz)					
			125	250	500	1000	2000	4000
	Audiencia	Suelo de patio de butacas	0,68	0,75	0,82	0,85	0,86	0,86

Tabla 19: Características Audiencia

Finalmente, para proceder a simular hay que especificar los planos que pertenecen a la audiencia. En el menú de TUCT, *Aud. area mapping* se introducen los números de los planos en posición horizontal de la audiencia.

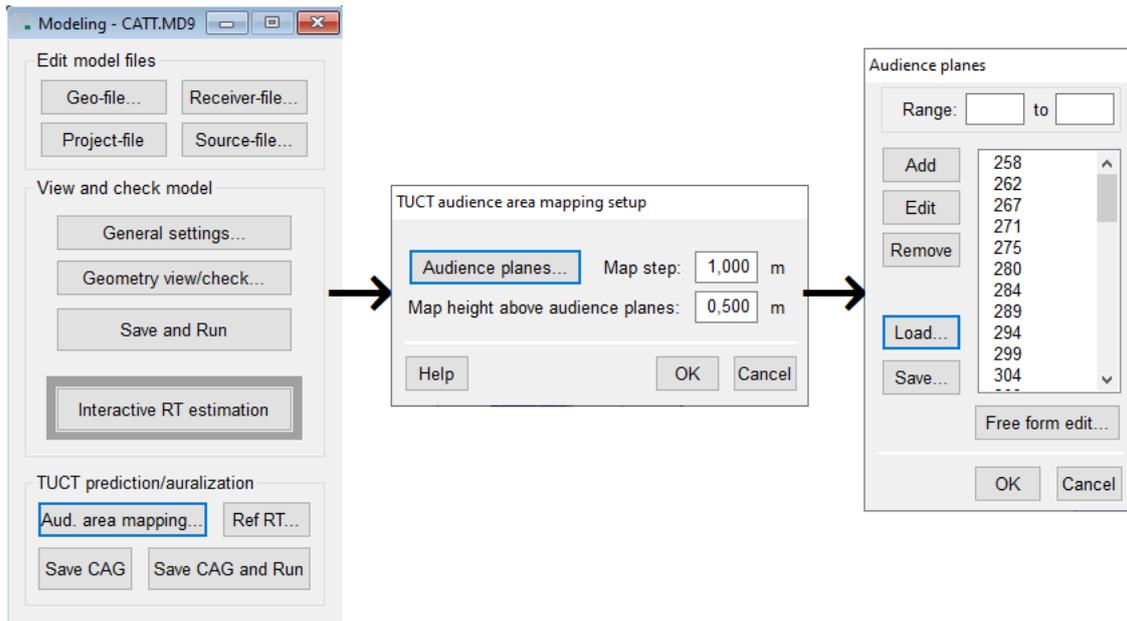


Figura 24:Asignación de zona de audiencia

#### 6.2.4 Modelo final

El resultado final de la simulación con audiencia y sin audiencia y diferenciado entre la configuración de la concha acústica se muestra en las siguientes imágenes.

La simulación se compone de:

- 257 planos pertenecientes a la geometría general
- 227 planos de audiencia
- 13 planos que incluyen la concha acústica
- 32 planos que incluyen los paneles reflectantes

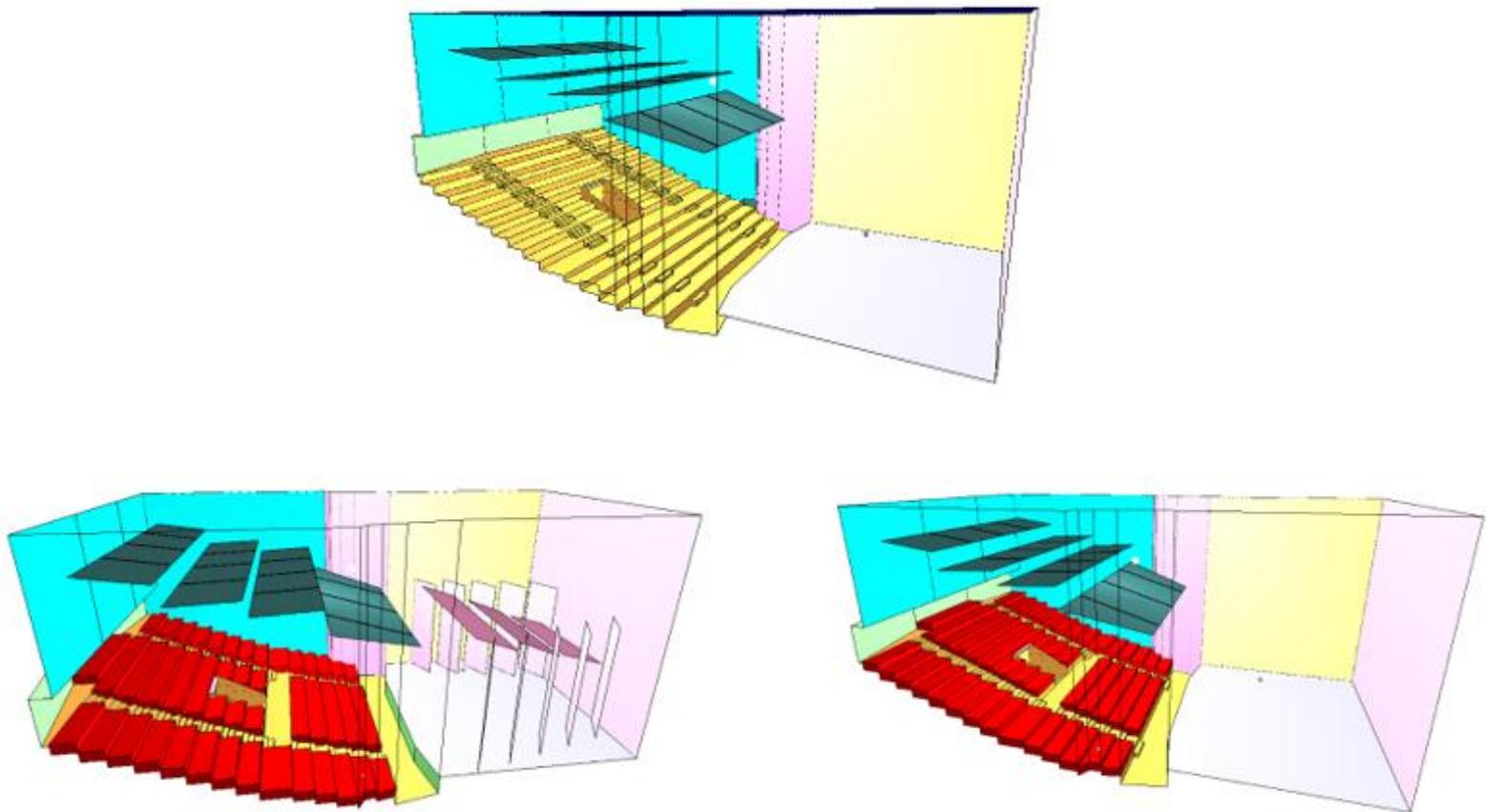


Figura 25: Simulación 3D del auditorio sin audiencia, el auditorio con audiencia y concha acústica y sin concha acústica

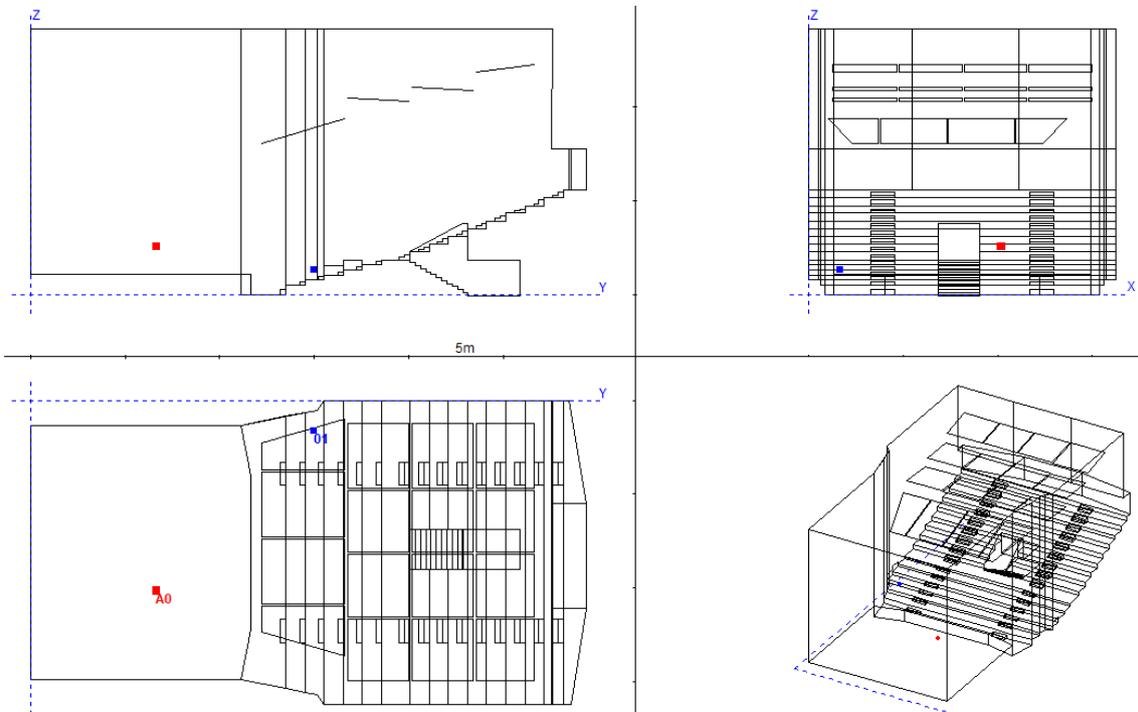


Figura 26: Vistas sin concha acústica

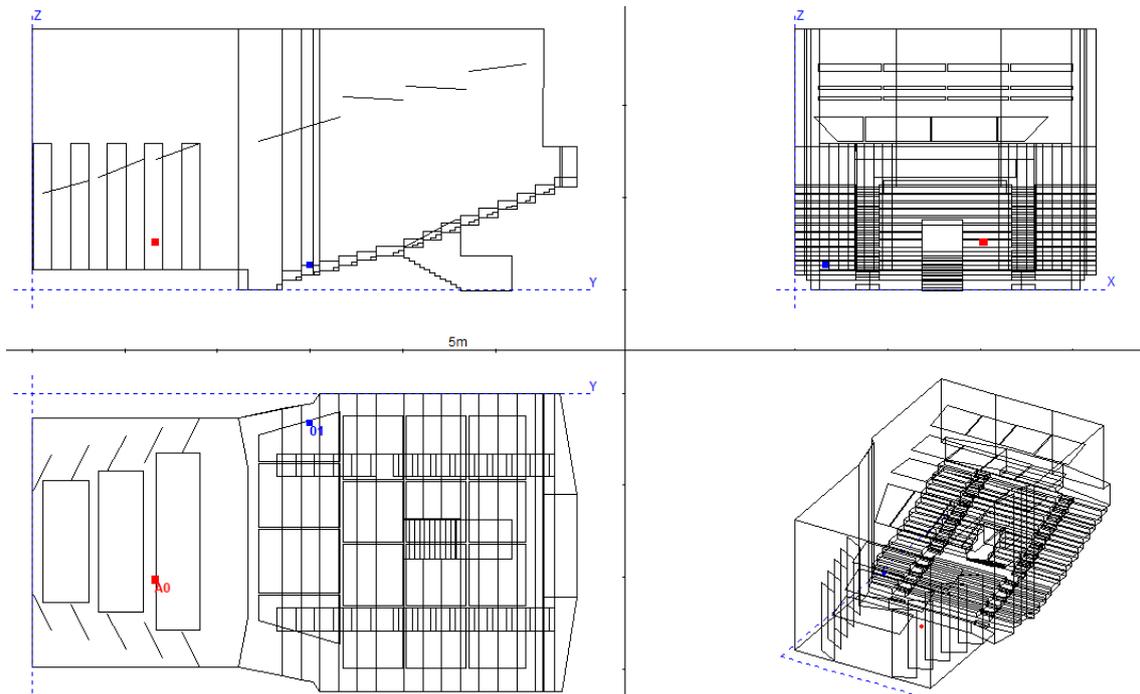


Figura 27: Vistas simulación Concha acústica

### 6.3 Resultados de la simulación

Cuando se realiza la simulación se comprueba que el grado de fugas del modelo es relativamente bajo para poder validar el modelo. En la Figura 28 se puede observar que el grado de fugas del modelo es de 0%.

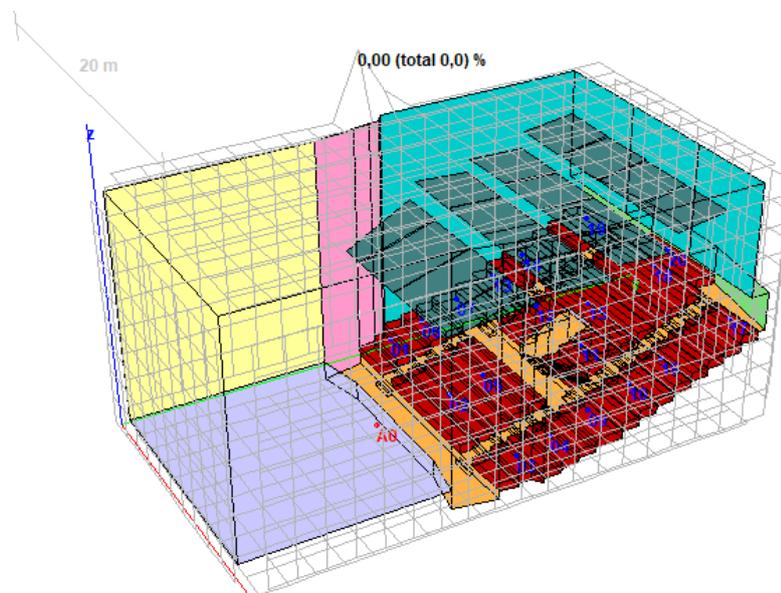


Figura 28: Grado de fugas del modelo

### 6.3.1 Sin concha acústica

Los resultados el tiempo de reverberación de la simulación sin concha acústica se muestran en la siguiente tabla comparando los resultados con los resultados de las medidas “*in situ*”.

F(Hz)	T30 (s) Resultados CATT	T30 (s) Medidas “ <i>in situ</i> ”	Diferencia (s)	Diferencia Normalizada (%)	TR <sub>mid</sub> CATT (s)	TR <sub>mid</sub> Medidas “ <i>in situ</i> ”
125	2,01	1,70	0,31	15,42	1,25	1,20
250	1,76	1,40	0,36	20,45		
500	1,24	1,23	0,01	0,81		
1000	1,26	1,16	0,10	7,94		
2000	1,11	1,08	0,03	2,70		
4000	0,88	0,92	0,04	4,55		

Tabla 20: Comparación de resultados del tiempo de reverberación de la simulación sin la concha acústica con las medidas “*in situ*”

Se puede observar una mayor diferencia en las frecuencias bajas, mientras que el resto de las frecuencias tienen un valor muy similar. El tiempo de reverberación medio tiene una diferencia de 0.05 s. Estos valores se consideran muy próximos y permiten validar el modelo.

A continuación, se muestran los resultados por bandas de frecuencia de octava concretando, con un mapa de colores, los resultados en la zona de audiencia.

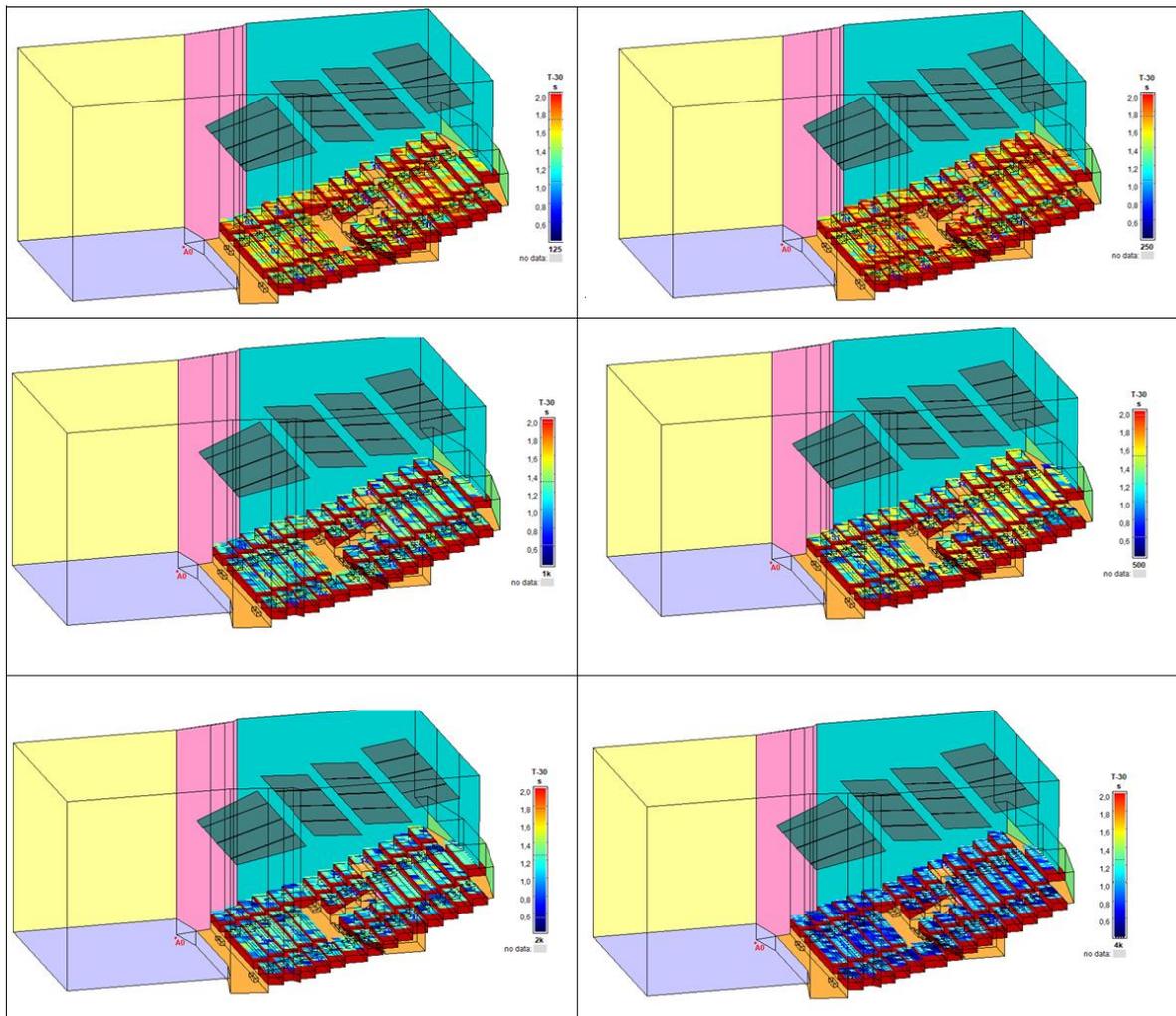


Figura 29: Resultados del tiempo de reverberación sin concha acústica por frecuencias de octava

El valor de  $C_{50}$  'speech average' es de 3,31 lo que menor que el resultado "in situ", 4,61, pero sigue estando dentro del rango del objetivo de parámetros acústicos. Se puede observar en la Figura 30.

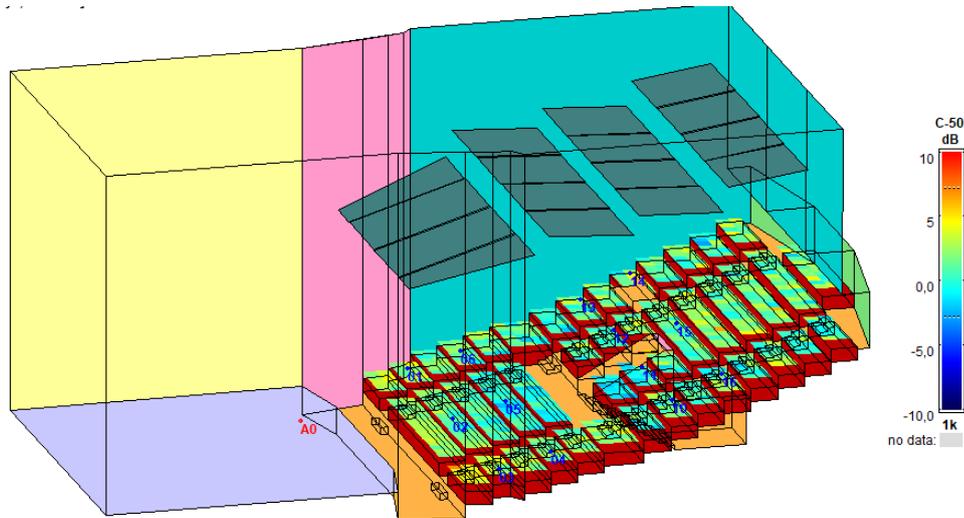


Figura 30:  $C_{50}$  a la frecuencia de 1kHz

De igual manera sucede con el resultado  $D_{50}$ , el valor del resultado de la simulación es menor que el resultado "in situ" con un valor de 0,65 y de 0,70 respectivamente.

En el Anexo\_Resultados Simulación se puede consultar los resultados específicos.

### 5.3.2 Con concha acústica

Los resultados el tiempo de reverberación de la simulación con concha acústica se muestran en la siguiente tabla comparando los resultados con los resultados de las medidas "in situ".

F(Hz)	T30 (s) Resultados CATT	T30 (s) Medidas "in situ"	Diferencia	Diferencia Normalizada (%)	TR <sub>mid</sub> CATT	TR <sub>mid</sub> Medidas "in situ"
125	1,67	1,62	0,05	2,99	1,17	1,19
250	1,44	1,31	0,13	9,03		
500	1,25	1,23	0,02	1,60		
1000	1,10	1,16	0,06	5,45		
2000	1,15	1,11	0,04	3,48		
4000	1,03	0,96	0,07	6,80		

Tabla 21: Comparación de resultados del tiempo de reverberación de la simulación con concha acústica con las medidas "in situ"

En la Tabla 21 se muestra que los resultados del tiempo de reverberación por bandas de frecuencia de octava y el medio son muy similares, a excepción de la frecuencia de 250 Hz.

A continuación, se muestran los resultados por bandas de frecuencia de octava concretando, con un mapa de colores, los resultados en la zona de audiencia.

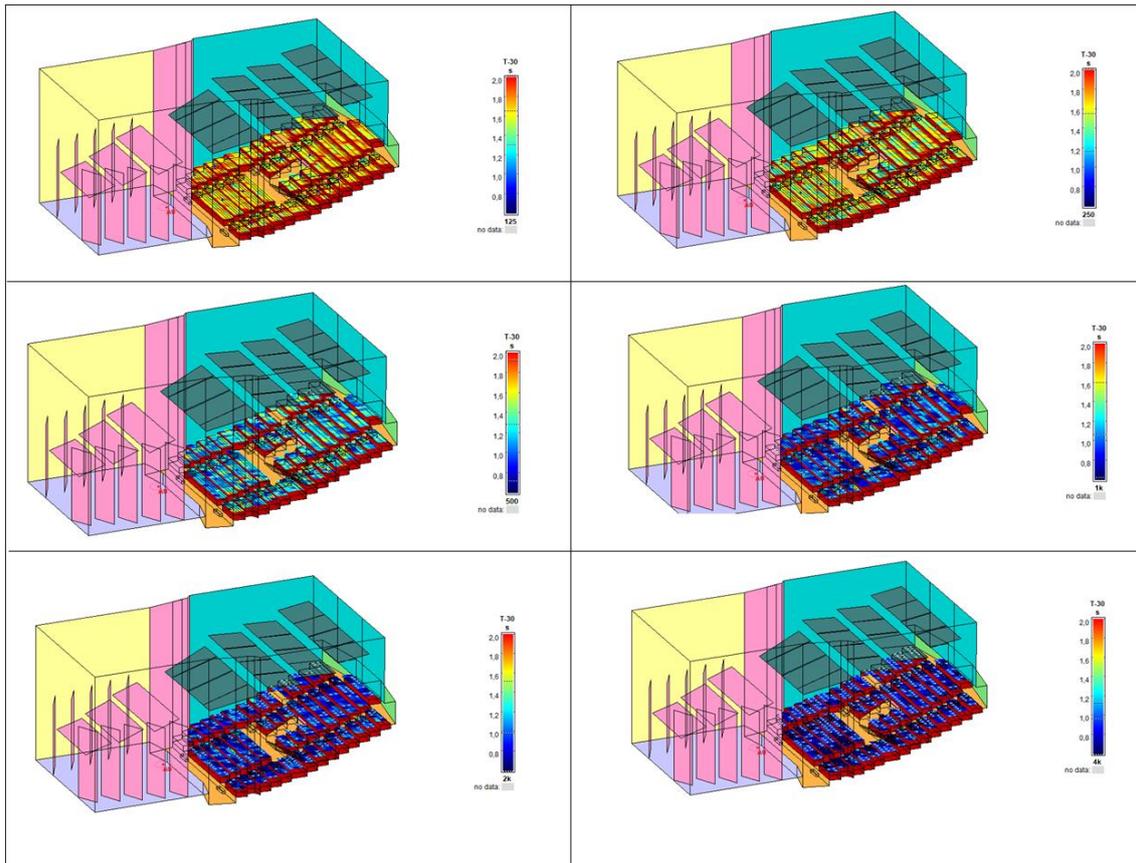


Figura 31: Resultados del tiempo de reverberación con concha acústica por frecuencias de octava

En cuanto a los resultados del brillo, se obtiene un resultado de 0,83 con una diferencia de 0,04 respecto a las medidas “*in situ*” que tiene un valor de 0,87.

Por último, la calidez acústica de la sala da como resultado 1,32, mientras que el resultado obtenido en las medidas “*in situ*” se obtiene un valor de 1,23.

## 7. PROPUESTAS DE MEJORA

En este apartado se exponen las propuestas de mejora para el “Auditori Nou” teniendo en cuenta los resultados obtenidos y los objetivos de los parámetros acústicos recomendados.

Una vez analizados los datos de las medidas “*in situ*” y validado el modelo de simulación se proponen mejoras respecto a la configuración de la sala con concha acústica, es decir, destinada a música. El análisis de los resultados sin concha acústica, destinado a la palabra, se cumplen todos los parámetros analizados.

Como objetivo principal se plantea cumplir con el tiempo de reverberación medio recomendado para recintos para música de cámara. Para cumplir el parámetro y mejorar la sala, se van a considerar las características de una concha acústica que expone Antoni Carrión [3].

Según [3], para crear primeras reflexiones importantes es necesario una estructura de la concha acústica desmontable, formada por superficies reflectantes y rígidas. Teniendo en cuenta que una concha acústica demasiado pequeña puede producir demasiada energía de primeras reflexiones y, por el contrario, una concha acústica demasiado grande puede desembocar a la reducción de la efectividad de esta.

Para la composición de una concha acústica óptima se recomienda:

- Las paredes laterales deben formar un abanico, siendo la zona más próxima al proscenio mayor que la anchura de la pared posterior.
- El techo debe de tener una inclinación donde la altura de la zona del proscenio sea mayor que la altura a nivel de la pared posterior. Ambas inclinaciones comprendidas entre 10° y 15°.

Las paredes laterales, la pared posterior y el techo deben de ser módulos independientes y las superficies en el interior de la concha acústica tienen que ser revestidas por un material muy reflectante.

Teniendo en consideración las recomendaciones sobre las conchas acústicas se observa que en el “Auditori Nou” no se dispone de pared posterior móvil y además entre los diferentes módulos del techo se encuentra un espacio de aproximadamente 0,5 m lo que reduce la efectividad de la concha acústica.

Las propuestas de mejora residen en buscar una inclinación de la concha acústica que mantenga el menor hueco entre los tramos del techo posibles, además de un cambio de material a uno más reflectante, que se podría suplir por un barnizado para que refleje más.

A continuación, se muestran los resultados de las propuestas de mejora del tiempo de reverberación.

<b>F(Hz)</b>	<b>T30 (s) Resultados CATT</b>	<b>TR<sub>mid</sub> CATT (s)</b>
<b>125</b>	1,88	1,30
<b>250</b>	1,77	
<b>500</b>	1,36	
<b>1000</b>	1,15	
<b>2000</b>	1,19	
<b>4000</b>	1,02	

Tabla 22:Resultados mejoras Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación medio, de esta manera, cumple con el valor recomendado, 1,3 s-1,8 s. Los resultados del brillo y de la calidez acústica cumplen con la normativa con un valor de 0,89 y 1,43 respectivamente. Mientras que el C<sub>80</sub> ha disminuido, pero no llega a cumplirse con un valor de 4,30 dB.

En la siguiente figura, se muestra el resultado de la simulación de la propuesta de mejoras, con un mapa de colores que representan el nivel del T30 según la posición.

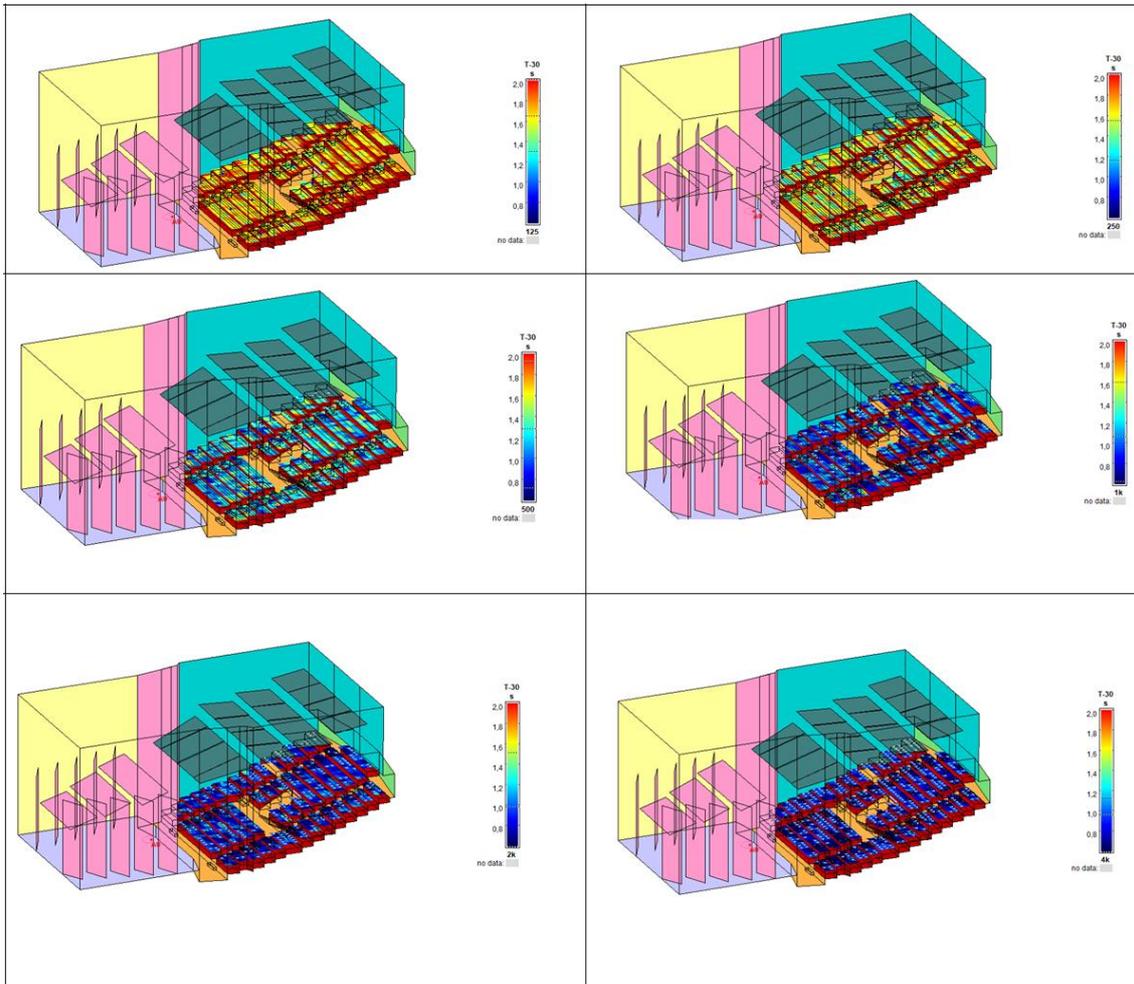


Figura 32: Resultados del tiempo de reverberación con concha acústica por frecuencias de octava

## 8. CONCLUSIONES

Para finalizar, se hace un resumen de las conclusiones extraídas a lo largo de todo el proyecto.

**Primero**, respecto a las medidas realizadas “*in situ*” con la tarjeta de audio y utilizando el software ARTA y con el sonómetro se obtienen resultados similares.

**Segundo**, los resultados obtenidos del tiempo de reverberación medio de la sala son próximos a las recomendaciones para ambas configuraciones, sin embargo, no llega a cumplirse en el caso de la sala destinada a música debido a que se obtiene un resultado de 1,19 s mientras que el valor recomendado para música de cámara está entre 1,30 s y 1,70 s.

**Tercero**, se concluye que la acústica del “Auditori Nou” es adecuada para las recomendaciones de los objetivos acústicos de sala destinada a la palabra ya que cumple todos los parámetros acústicos estudiados, es decir, el tiempo de reverberación medio, la claridad del habla, la definición y, además, el ruido de fondo medido se encuentra por debajo del límite de las curvas *noise criteria*.

**Cuarto**, se concluye que la acústica del “Auditori Nou” no es adecuada para las recomendaciones de los objetivos acústicos de sala destinada a la música, ya que, no cumple uno de los parámetros más importantes, el tiempo de reverberación medio. Tampoco cumple con el parámetro  $C_{80}$ . Sin embargo, sí que se cumple con los valores recomendados del brillo, la calidez acústica y el parámetro ITDG.

**Quinto**, la concha acústica de la sala presenta carencias como los huecos existentes entre los diferentes tramos de los módulos del techo que no están recomendados en [3]. Además, la inclinación de los módulos utilizada no es la ideal para una sala destinada a música de cámara ya que no cumple con los parámetros comentados en el párrafo anterior.

**Sexto**, se valida el modelo de la simulación realizada con el software de simulación acústica CATT-Acoustic ya que se obtienen resultados similares a los obtenidos en las mediciones “*in situ*”. Además, se obtiene información adicional a la proporcionada por las medidas como la sonoridad G, el nivel SPL en cada posición o el ecograma para cada punto.

**Séptimo**, se propone una inclinación distinta y un cambio de material de las superficies que componen la concha acústica, con el objetivo de establecer una configuración óptima para la sala destinada a la música de cámara. Con la propuesta se cumple con los parámetros acústicos recomendados del tiempo de reverberación medio, el brillo, la calidez acústica y el parámetro ITDG. La inclinación propuesta reduce los huecos entre módulos y produce primeras reflexiones a los músicos y a la primera zona de la audiencia. El cambio de material consiste en un barnizado de las superficies que aumenta un 21,7% las propiedades reflectantes del material respecto al utilizado.

**Octavo**, si se dispone de presupuesto sería conveniente la instalación de una pared posterior móvil para completar la concha acústica de la sala y adaptar el tamaño según el uso.

**Noveno**, al no cumplirse las recomendaciones para la sala destinada a la música, se debe de tener en consideración, que al ser una sala multiusos, se tiene que llegar a una solución de compromiso para el uso de palabra y música.

Como futuras propuestas de ampliación del proyecto se propone un análisis de los parámetros objetivos acústicos no analizados como %ALCons, 1-IAAC<sub>E3</sub>, ST1<sub>MID</sub> o LF<sub>E4</sub>. Además de un estudio detallado para la configuración de la concha acústica adaptándolo al número de intérpretes y tipo de música. También el estudio de la distribución e inclinación de los paneles reflectantes suspendidos en el techo de la sala.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

### *Libros y artículos*

- [1] Avilés R. *Manual de acústica ambiental y arquitectónica*. Ed. Paraninfo. 2017.
- [2] Beranek, L.L. “*Audience and chair absorption in large halls: IP*”, JASA 45, 13-19. 1969.
- [3] Carrión A. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Ed. UPC, 1998, 2006.
- [4] 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*

- [5] Apuntes de clase de la asignatura Acústica para la Edificación. Curso 2019-20.
- [6] CATT-Acoustic v9.1.f User’s Manual CATT-Acoustic™ v9.1.f 2020
- [7] CATT-Acoustic v9.1.f with TUCT v2 Introduction Manual. 2020
- [8] Ivo Mateljan. ARTA user manual V. 1.9.2. (<http://www.artalabs.hr/>) noviembre 2019.
- [9] Manual del Usuario del Analizador portátil 2250 con software para el tiempo de reverberación BZ-7272. B&K
- [10] M-AUDIO Fast Track Pro User-Guide. 2010.

### *Normas y comunicaciones administrativas*

[11] UNE-EN ISO 3382-1:2010. Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos.

### *Páginas web*

[12] Ajuntament Alaquàs <https://www.alaquas.org/mapacatastro.asp>

[13] CATT-Acoustic <https://www.catt.se/>

[14] Google Earth [Google Earth Alaquàs](#)

[15] INE <https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=2903>

[16] Unió Musical d'Alaquàs <https://musicalalaquas.com/>

[17] Wikipedia, Alaquàs <https://ca.wikipedia.org/wiki/Alaqu%C3%A0s>

[18] Wikipedia, Coordenadas esféricas  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Coordenadas\\_esf%C3%A9ricas](https://es.wikipedia.org/wiki/Coordenadas_esf%C3%A9ricas)

[19] Yliaster Arquitectora <http://arquitectora.es/project/teatro-auditorio-alaquas/>

### *Ecuaciones*

(1) Coeficiente de absorción acústica

(2) Área de absorción de superficie

(3) Área de absorción total; Fuente: Manual de acústica ambiental y arquitectónica [1]

(4) Absorción de personas

(5) Absorción del aire

(6) Fórmula de Rayleigh

(7) Tiempo de Reverberación Sabine

(8) Absorción total del recinto

(9) Tiempo de reverberación medio

(10) Calidez acústica (BR)

(11) Brillo (Br)

(12) Claridad musical ( $C_{80}$ )

(13) Promedio claridad musical “*musical average*”

(14) Claridad verbal ( $C_{50}$ )

(15) Promedio claridad vocal “*speech average*”

(16) Definición ( $D_{50}$ )

(17) Definición ( $D_{50}$ ) a partir de  $C_{50}$

(18) Sine sweep Exponencial; Fuente: Farina [4]

(19) Frecuencia angular