

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Mejora de la acústica del Teatro Serrano de Gandía”

Tipología: **Orientación profesional**

TRABAJO FINAL DE MASTER

Autor/a: **Alba Victoria Felipe Cortés**

Tutor/a: **D. Francisco Javier
Redondo Pastor**

Cotutor/a: **Joaquín López Ibáñez**

GANDIA, 2014

Mejora de la acústica del Teatro Serrano de Gandía

Autora: Alba Victoria Felipe Cortés

Tutor: D. Javier Francisco Redondo Pastor

Cotutor externo: Joaquín López Ibáñez

Resumen. El presente trabajo trata de analizar las características acústicas del Teatro Serrano y proponer acciones de acondicionamiento. La caracterización consiste en la realización de las mediciones del tiempo de reverberación en la sala junto al análisis de los resultados, y la simulación informática mediante el programa Catt-Acoustic de la geometría, previamente realizada en 3D en Autocad. Mediante la simulación acústica se obtienen una serie de parámetros acústicos, entre ellos, el tiempo de reverberación. Finalmente, se comparan los dos resultados de forma que se obtengan unos resultados similares. Las propuestas de mejora acústica se realizarán en función de los resultados obtenidos en el estudio acústico.

Palabras clave: acústica, reverberación, sala, acondicionamiento, simulación.

Abstract. The present work tries to analyze the acoustic characteristics of Teatro Serrano and to propose actions of conditioning. The characterization consists in the accomplishment of the measurements of the time of reverberation in the room close to the analysis of the results, and the simulation by means of the program Catt-Acoustic of the geometry, before realized in 3D in Autocad. By means of the acoustic simulation there are obtained a series of acoustic parameters, between them, the time of reverberation. Finally, both results are compared so that a few similar results are obtained. The offers of acoustic improvement will be realized depending on the results obtained in the acoustic study.

Key words: acoustic, reverberation, room, conditioning, simulation.

INDICE

I. OBJETO Y ANTECEDENTES.....	4
<i>I.1 OBJETIVO.....</i>	<i>4</i>
<i>I.2 ESTRUCTURA.....</i>	<i>5</i>
II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	6
<i>II.1 PARÁMETROS ACÚSTICOS DE SALAS.....</i>	<i>6</i>
<i>II.2 TEORÍAS ACÚSTICAS.....</i>	<i>12</i>
III. DESCRIPCIÓN DEL TEATRO SERRANO.....	33
IV. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	40
V. MEDICIÓN DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN.....	41
<i>V.1 CONDICIONES DE MEDIDA.....</i>	<i>41</i>
<i>V.2 MATERIAL Y CONEXIONADO.....</i>	<i>46</i>
<i>V.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</i>	<i>47</i>
VI. SIMULACIÓN CATT-ACOUSTIC.....	56
<i>VI.1 MODELO 3D AUTOCAD.....</i>	<i>57</i>
<i>VI.2 DISEÑO MODELO ACÚSTICO CATT-ACOUSTIC.....</i>	<i>59</i>
<i>VI.3 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS.....</i>	<i>66</i>
<i>VI.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</i>	<i>76</i>
VII. CONCLUSIONES.....	81
VIII. BIBLIOGRAFIA.....	82

I. OBJETO Y ANTECEDENTES

I.1 OBJETIVO

El objetivo principal del siguiente proyecto es realizar un estudio acústico del Teatro Serrano de Gandía.

El estudio se divide en dos partes: por un lado, el conjunto de mediciones realizadas en la sala principal donde se hacen obras de teatro, ópera y conciertos, y por otro, la simulación acústica mediante el *software* Catt-Acoustic. Al final se obtienen una serie de parámetros acústicos, tanto por una vía como por la otra, que deben ser similares, sobre todo en cuanto el tiempo de reverberación, el cual es uno de los parámetros más importantes del estudio de una sala y es el que se halla en las mediciones realizadas en la propia sala mediante varios puntos de medida repartidos por todo el espacio de audición.

Los resultados obtenidos se comparan con los valores teóricos para poder determinar si la sala cumple los requisitos acústicos necesarios para el uso que se le da.

En el caso de que los resultados no sean lo más acertados posibles, se propondrá una solución para mejorar las carencias y de esta forma lograr que la sala tenga una mejor acústica.

1.2 ESTRUCTURA

El siguiente proyecto se va a dividir en cinco partes:

-En la primera parte se hace una introducción teórica de los parámetros acústicos más importantes en el estudio de las salas, y las distintas teorías científicas que estudian el comportamiento del campo sonoro dentro de un recinto.

-En la segunda parte se describe el lugar de estudio, que en este caso es el Teatro Serrano de Gandía. Se habla sobre las características constructivas del edificio, los usos a los que se destina el teatro y el entorno en el que se ubica.

-En el siguiente punto se desarrolla toda la parte práctica realizada, desde la metodología empleada hasta las mediciones realizadas para obtener el tiempo de reverberación, así como los resultados obtenidos y su posterior análisis.

-La cuarta parte se basa en la simulación informática mediante el programa Catt-Acoustic de la sala principal del teatro. Se explica cómo se realiza la forma geométrica del recinto mediante Autocad, y cómo se introducen los materiales que se emplean en el revestimiento, para acercar a la realidad las condiciones acústicas y arquitectónicas del Teatro Serrano al *software*. De esta forma, se obtienen una serie de parámetros acústicos que pasarán a ser analizados y contrastados con los obtenidos de forma experimental.

-En la quinta parte se reflejarán las conclusiones del estudio realizado.

-En la última parte, los anexos, se mostrarán los planos del edificio.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En el siguiente apartado se habla del conocimiento teórico previo al análisis acústico del recinto sometido a estudio. En primer lugar, se explican los diversos parámetros acústicos de las salas y después las distintas teorías acústicas empleadas para el estudio del campo sonoro en recintos.

II.1 PARÁMETROS ACÚSTICOS DE SALAS

Los parámetros acústicos de calidad de una sala se diferencian en dos, los subjetivos y los objetivos.

Los primeros son atributos que el oyente percibe de forma sensorial. Se pueden dividir en los siguientes tipos:

-Intimidad. Se refiere a la sensación de estar en una sala pequeña, en la que el sonido envuelve al oyente. Esta sensación está relacionada con el tiempo que separa la llegada del sonido directo y del primer sonido reflejado, también están relacionadas con las reflexiones laterales, ya que éstas producen distinta señal en cada oído, lo cual favorece la impresión espacial.

-Vivacidad. Viene dada por la reverberación para frecuencias medias y altas. Refuerza los sonidos modificando su duración y da a la música, la plenitud de tono.

-Calor. Es el mismo concepto que la vivacidad pero para las frecuencias bajas. Gracias a este parámetro la sala debe reforzar los sonidos graves de forma que haga la música más cálida.

-**Claridad.** La claridad viene representada por sonidos sucesivos y simultáneos que se perciben de forma separada en el tiempo. Está íntimamente relacionada con la relación entre energía directa y reverberada.

-**Difusión.** Es el atributo por el que el sonido parece provenir de todas direcciones con la misma intensidad. Depende de la reverberación y del poder difusor de las superficies.

-**Equilibrio.** Es la manera de percibir los distintos instrumentos con sonoridades relativamente equilibradas. Depende en gran medida del diseño de las superficies próximas a la orquesta.

Para evaluar la calidad de una sala, respecto a estos juicios subjetivos, se han desarrollado una serie de criterios objetivos:

-El calor, de forma objetiva se relaciona con la **calidez acústica (BR o Bass Ratio)** y se expresa de la siguiente manera:

$$BR = \frac{RT(125\text{ kHz}) + RT(250\text{ kHz})}{RT(500\text{ kHz}) + RT(1\text{ kHz})}$$

- El **brillo (Br)** que es lo contrario de la calidez, se calcularía mediante esta expresión:

$$Br = \frac{RT(2\text{ kHz}) + RT(4\text{ kHz})}{RT(500\text{ kHz}) + RT(1\text{ kHz})}$$

-La intimidad se relaciona con **el tiempo de retraso o Initial Time Delay Gap (ITDG)** respecto al sonido directo de la primera reflexión. Este tiempo debe ser menor de 20 ms en salas de concierto y de 25 ms en salas de ópera (Beranek).

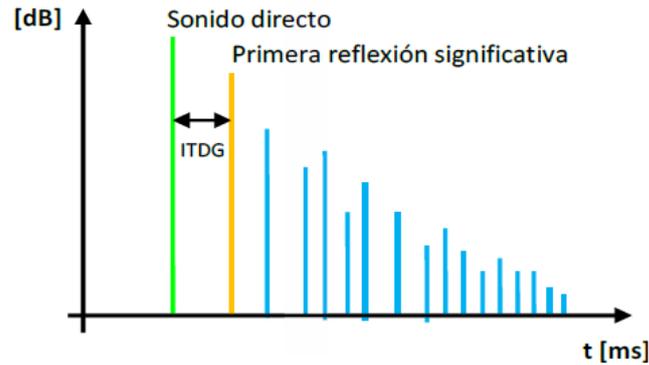


Figura 1. ITDG

-El **tiempo central (Ts)**, es el tiempo en milisegundos donde el nivel de energía integrado antes del tiempo central es igual a la energía recibida después de él. Un tiempo central corto provee una mayor claridad, mientras que un tiempo central largo corresponde a una mayor reverberación.

-La impresión espacial se compara con el **factor de energía lateral (L)** (Barron). Es el cociente entre la proyección (sobre el eje de los oídos) de la energía que llega de las reflexiones que llegan entre 5 y 80 ms y la energía total del conjunto de reflexiones entre 0 y 80 ms.

$$LF = \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) \cdot \cos^2\theta \, dt}{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) \, dt}$$

Se recomienda que L tenga valores altos, ya que de esta forma se obtiene una adecuada impresión espacial. Debe aumentar en las bajas frecuencias.

Existen otros dos parámetros relacionados con la sensación de espacialidad: **ASW** (*Apparent Source Width*), que está asociado con la impresión que ejerce sobre un

oyente si la música ejecutada en una sala emana de una fuente de mayor amplitud que la que corresponde con la anchura visual de la fuente real; y **LEV (Listener envelopment)**, que marca el grado de sonoridad envolvente.

-En cuanto a la vivacidad y el calor, se relacionan con el **tiempo de reverberación** de Sabine o el *Early Decay Time* (EDT). Es decir, el tiempo que tardaría en descender 60 dB bajo el nivel estacionario, si la caída fuera la misma que en los primeros 10 dB.

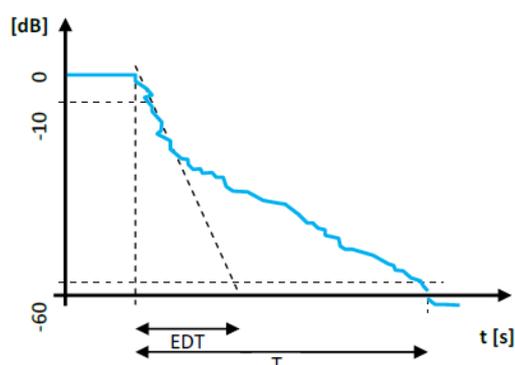


Figura 2. EDT y TR

El intervalo óptimo es de 1,5-2,2 s para el tiempo de reverberación y 1,7-2,3 para EDT, dependiendo del tipo de música:

Música barroca	$T_R < 1,5$
Música clásica	$1,5 < t_R < 1,7$
Música romántica	$1,9 < t_R < 2,2$
Ópera no Wagneriana	$t_R < 1,5$
Ópera Wagneriana	$1,6 < t_R < 2,0$

Tabla 1. Niveles de TR

Es recomendable que se aumente entre un 20% y un 50% el tiempo de reverberación para las frecuencias bajas, para aumentar la sensación de calor y cercanía a la música.

Un predominio de *EDT* sobre el TR equivale a un predominio del campo directo y las primeras reflexiones sobre el campo reverberado.

-**Definición (D-50)** es la denominada razón de energía temprana que tiene una ventana temporal de 50 ms (se considera el límite de perceptibilidad respecto de la palabra hablada) y es la fracción de energía recibida en esos primeros 50 ms y la energía total recibida. Su valor fluctúa entre 0 y 1.

-Para la evaluación de la claridad se usa la **Claridad (C)** (Abdel Alim), que se define como el cociente entre energía que llega entre 0 y 80 ms después de la onda directa y la energía que llega después de los 80 ms.

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

Los valores óptimos para la claridad dependen del tipo de música, debido a que un aumento de claridad conlleva un descenso de reverberación y viceversa. Se recomienda que sea siempre mayor de 0 dB y que para los asientos delanteros la claridad sea de 3-8 dB, y para los traseros de 0-5 dB.

-El **Factor de fortaleza (G) o Strength Factor**, es la diferencia entre el nivel de presión sonora producido por una fuente omnidireccional situado en cualquier punto de una sala, y el producido por la misma fuente situada en campo libre a 10 m.

El parámetro de sonoridad es el grado de amplificación producido por la sala, dependiendo de la distancia del oyente al escenario, de la energía asociada a las primeras reflexiones, de la superficie que ocupa el público y del nivel de campo reverberante.

-Coeficiente de correlación Cruzada Interaural (IACC), es la correlación entre los sonidos que llegan a ambos oídos de un oyente, y es indicativo del grado de similitud entre las dos señales.

$$IACC = \max_{-1 \leq \tau \leq 1} \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t)p_R(t + \tau)dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_L^2(t)dt \cdot \int_{t_1}^{t_2} p_R^2(t)dt}}$$

-STI (*Speech Transmission Index*) evalúa la inteligibilidad de la palabra. Se basa en la pérdida de comprensión de la voz al transmitirse en un recinto, debido a los efectos de la reverberación, ecos y ruido.

Como simplificación del STI surge el **RASTI (*Rapid Speed Transmission Index*)**, que se basa en la apreciación subjetiva de la inteligibilidad de un sistema electroacústico, usando las frecuencias que más afectan a la inteligibilidad del habla.

-Otro parámetro que también evalúa la inteligibilidad es la **pérdida de articulación de consonantes (%ALCons)**.

$$\%ALCons = \frac{200 r^2 RT^2}{VQM} \text{ (para } r \leq 3,16 D_c)$$

$$\%ALCons = 9RT \text{ (para } r < 3,16 D_c)$$

II.2 TEORÍAS ACÚSTICAS

TEORÍA ESTADÍSTICA

El método estadístico se utiliza para casos sencillos o como primera aproximación para la realización de un estudio acústico de una sala. Se hace uso de la matemática estadística (basada en la teoría de la probabilidad) para estudiar las combinaciones de fenómenos aleatorios que puedan suceder dentro de un recinto, cómo pueda ser el caso de las diversas reflexiones distribuidas de forma aleatorias (se debe recordar que los sonidos naturales son señales aleatorias e irregulares).

Por lo tanto, se obtiene de forma sencilla unas conclusiones objetivas de los aspectos cuantitativos del proceso, así como de sus posibles defectos. El problema surge cuando algunos fenómenos dejan de sucederse de manera aleatoria: en este caso, no se puede aplicar la teoría estadística.

El concepto de la reverberación es una parte significativa de esta teoría y a su vez, es un aspecto muy importante en el estudio de las cualidades acústicas de todo tipo de salas. La reverberación solo se puede formular en campos acústicos en los que las direcciones de propagación del sonido contribuyen con intensidades sonoras iguales, no solo en condiciones de estado estacionario, sino en cada uno de los instantes de decrecimiento de los campos sonoros, es decir, en campo sonoro difuso. Por ejemplo: si se considera un recinto cerrado y en su interior hay una fuente que irradia energía y un receptor que la capta. Al receptor le llega en primer lugar, la onda directa, seguida de las primeras reflexiones, constituyendo un campo acústico fuertemente direccional y no difuso. Con el transcurso del tiempo se generan sucesivas reflexiones, de forma que el campo acústico va tendiendo progresivamente a una mayor difusión, debido a la superposición

de un gran número de ondas planas, provenientes de todas las direcciones, con intensidades similares, con lo cual a mayor difusión, mayor reverberación y viceversa.

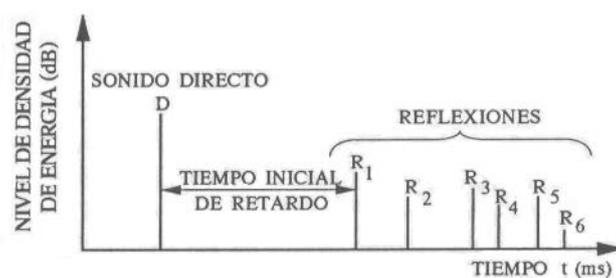
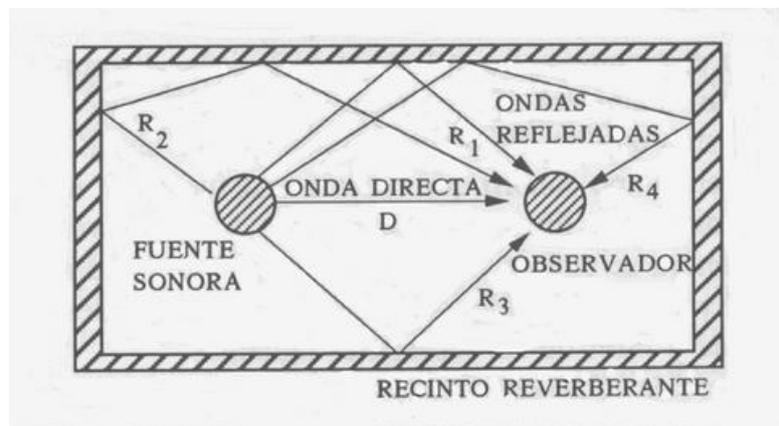


Figura 3. Propagación del sonido

Reverberación y tiempo de reverberación

Cuando una fuente sonora irradia energía acústica en un recinto, las ondas se van propagando de forma libre hasta pasado un cierto tiempo en el que la energía se ve reducida debido a la absorción por parte de las superficies de la sala. Pero llega un momento en el que el recinto absorbe la misma energía por unidad de tiempo que la emitida por la fuente, entonces podemos decir que la sala permanece estacionaria. A partir de ese instante, la densidad de energía media en la sala permanece constante. Si la

fuente dejase de emitir, la densidad de energía acumulada acabaría por desaparecer según fuese siendo absorbida por la sala.

La reverberación es la persistencia del sonido en una sala después de que cesa la fuente. Esta persistencia del sonido puede ser beneficiosa en algunos casos o puede enmascarar unos sonidos con otros. Es evidente, pues, que la reverberación tiene una influencia considerable en el comportamiento acústico de un recinto.

Si se representa la variación de la densidad de energía con el tiempo, desde que la fuente comienza a emitir hasta que interrumpe su emisión, se distinguirían tres fases:

-Un primer tramo en el que la densidad de energía iría creciendo de forma gradual y continua (régimen transitorio).

-Llega un segundo tramo en el que se igualan las energías emitida por la fuente con la absorbida por el recinto, con lo cual se alcanza el régimen estacionario.

-Por último, en un cierto instante de tiempo t_0 la fuente interrumpe su emisión. La densidad de energía comienza a descender de forma gradual y continua.

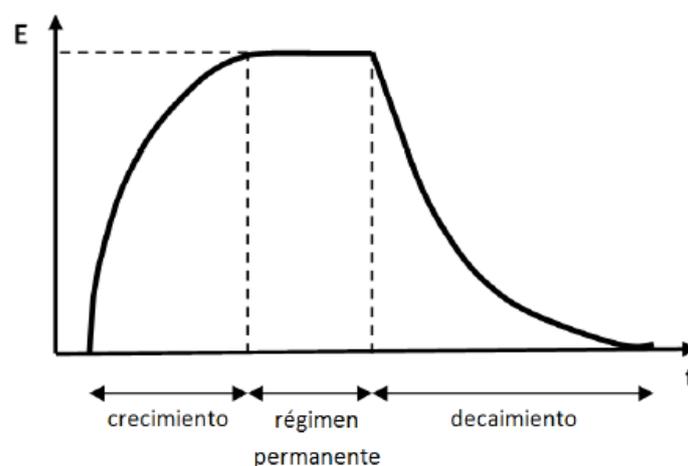


Figura 4. Evolución señal en una sala

Wallace Clement Sabine después de una serie de ensayos reafirmó la teoría que el tiempo de reverberación es un parámetro adecuado para la evaluación de la calidad acústica de una sala. Lo definió como el tiempo requerido después de cesar la fuente, para reducir la energía presente en la sala a la millonésima parte de su valor en régimen estacionario. Representa el descenso de sonido, y no la duración de la reverberación que ésta sería infinita, ni la duración de la reverberación audible, que depende de la potencia de emisión de la fuente y del nivel de ruido de fondo existente.

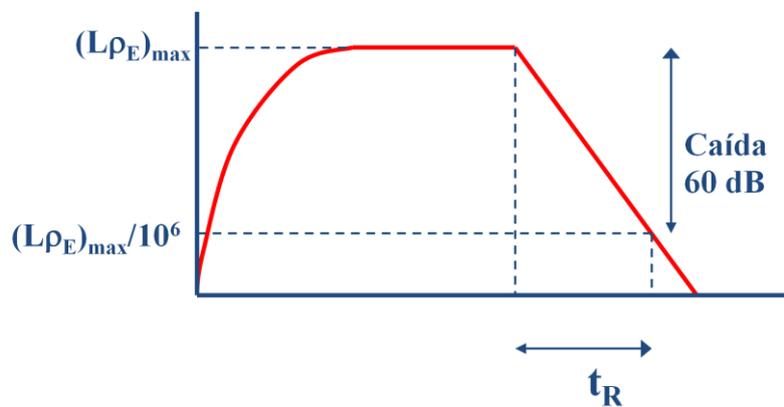


Figura 5. Definición gráfica del TR

Por lo tanto, el tiempo de reverberación es el que tarda en decrecer 60 dB la energía que recibe el receptor tras parar bruscamente la fuente de excitación (T60), aunque existen otras interpretaciones en función del nivel de ruido de fondo del recinto, como por ejemplo T30 y T20. El primero es el tiempo de reverberación de caída de 60 dB pero siguiendo la pendiente de caída de los primeros 30 dB, debido a que la señal de la fuente no puede estar por encima de los 60 dB. Se calcula el T60 siguiendo la pendiente marcada por los 30 dB.

T20 se utiliza cuando el ruido de fondo es elevado y la excitación de la fuente solo supera en 20 dB al ruido de fondo.

Sabine.

La ecuación de Sabine establece que el tiempo de reverberación de una sala está determinado por el volumen de la misma y el área de absorción equivalente total, y es independiente de la distribución del material absorbente de la sala.

$$T_R = 0.162 V/A$$

$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \alpha_4 S_4 + \dots$$

Además, se basa en el *camino libre medio*, (los caminos que recorre una onda en una sala entre las diferentes reflexiones que se producen al colisionar con las paredes) asumiendo la hipótesis de la teoría estadística como son las características de campo acústico uniforme, campo difuso, sala viva y distribución homogénea e isotrópica de la sala. La dependencia de l_m con la forma de la sala está dada por el cociente del volumen V y el área de la superficie total S : $l_m = 4V/S$.

La fórmula de Sabine es una de las más utilizadas en el campo de la acústica pero presenta ciertas limitaciones como por ejemplo, la no obtención de tiempo de reverberación nulo en campo abierto, debido a que no se cumplen las condiciones de campo difuso. En salas absorbentes, se obtienen tiempos de reverberación más altos que los reales.

Eyring.

La teoría de Eyring corrige las limitaciones que presenta la ecuación de Sabine manteniendo la suposición de campo difuso, además de basarse también en el libre recorrido medio:

$$RT = 0.162 \frac{V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})}$$

Coefficiente de absorción sonora.

Es una magnitud que expresa la reducción de energía asociada a las ondas sonoras tanto en su propagación a través del aire como cuando inciden sobre sus superficies límite.

Se define como la relación entre la energía absorbida por una superficie respecto la energía incidente, en función de la frecuencia.

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

Para analizar las propiedades de absorción de los materiales se debe tener en cuenta el ángulo de incidencia de las reflexiones que inciden sobre ellos, ya que su absorción puede depender del mismo. Por tanto, la capacidad de absorción será el promedio de los valores para ondas que inciden desde todos los ángulos.

Para el caso de n espacios de igual superficie, el coeficiente de absorción medio se expresa de la siguiente forma:

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots + \alpha_n \cdot S_n}{S}$$

El siguiente paso es determinar el área de absorción sonora equivalente como unidad de absorción en m² que representa una superficie capaz de absorber sonido igual que una superficie de 1 m² totalmente absorbente.

$$\mathbf{A} = \bar{\alpha} \cdot \mathbf{S}$$

TEORÍA GEOMÉTRICA

La teoría geométrica es el estudio de la onda mediante rayos acústicos. El uso de las leyes geométricas que rigen la propagación sonora, puede ser útil para analizar la distribución del sonido en un recinto, del campo acústico directo y de las primeras reflexiones o detectar ecos o focalizaciones provocadas por las superficies de la sala. Es decir, permite localizar aquellos aspectos negativos de las reflexiones sonoras así como proporcionar una alta fiabilidad si la longitud de onda es pequeña frente a las dimensiones de la sala, es decir, la teoría geométrica funciona mejor para las medias y altas frecuencias.

Para realizar el trazado de rayos para el estudio acústico, es necesario utilizar un software específico de simulación del comportamiento de una sala. Se determinan los puntos de incidencia de los rayos sobre las superficies límites del recinto, así como las pérdidas asociadas a la absorción sonora de los materiales.

Concepto de rayo sonoro

Para poder entender las leyes geométricas, antes hay que explicar el concepto de rayo sonoro. Según el Principio de Fermat, toda onda se propaga por el camino más rápido, que para velocidad de propagación constante, es el camino más corto, y en la propagación libre de obstáculos es la línea recta entre dos puntos. El rayo sonoro se explica cómo energía acústica que se propagada a través de una delgada línea. Los rayos parten de una fuente acústica, portando todos la misma energía (fuente omnidireccional), o en el caso de una fuente cualquiera, la energía sería dependiente de la direccionalidad de la fuente.

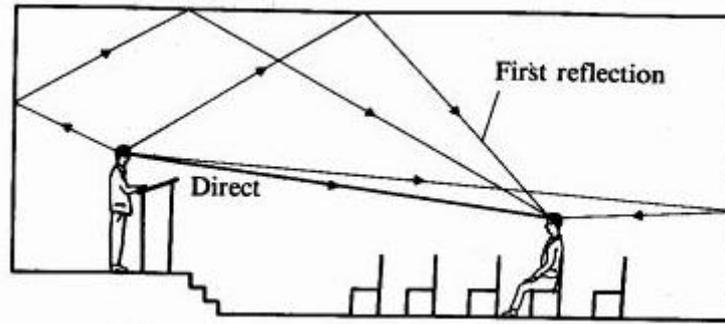


Figura 6. Sonido directo y primeras reflexiones

La teoría geométrica presenta ciertas limitaciones, como es el caso de los fenómenos de reflexión difusa, difracción y refracción:

Reflexión.

Es el fenómeno que se produce cuando un rayo que se encuentra con un obstáculo retorna con parte de la energía, en la misma dirección y sentido contrario a la onda incidente.

Si la superficie del obstáculo es lisa, el rayo incidente se refleja en una sola dirección, es decir, se produce una **Reflexión Especular**, siguiendo las leyes de Snell. En el caso de que la superficie sea rugosa, el rayo incidente se refleja en todas las direcciones, según la Ley de Lambert, se produce **Reflexión Difusa**.

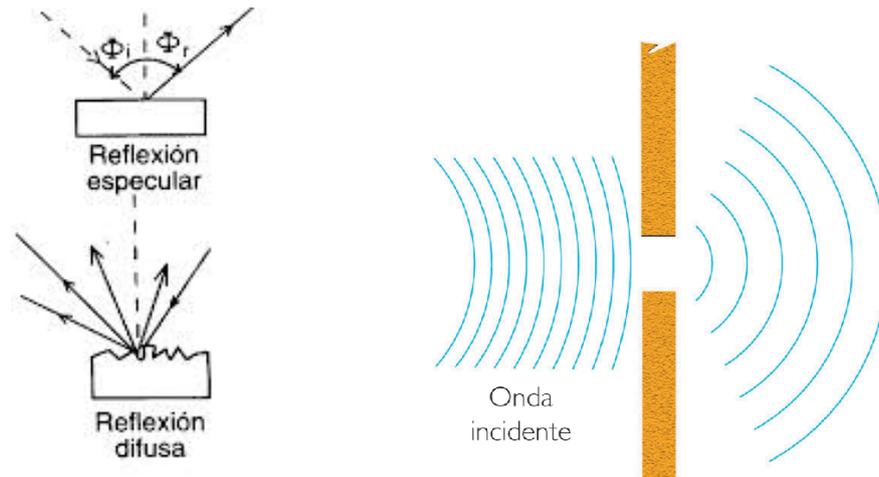


Figura 7. Reflexión y difracción

Difracción.

Si el obstáculo no es grande, no se generará una onda sino una sombra acústica (se debe al tamaño de la fuente no puntual y a la frecuencia de la onda que bordea el obstáculo), es decir, la energía bordea el obstáculo. Los límites de la sombra resultante se determinan mediante rayos tangentes a la superficie del obstáculo.

Refracción.

El fenómeno de refracción se produce cuando un rayo cambia de dirección al cambiar de medio. En el campo de la óptica geométrica, ocurre cuando cambia la dirección de propagación de un rayo cuando pasa a través de una región ocupada por dos medios adyacentes con velocidades de propagación diferentes. Para el campo de la acústica este fenómeno se da en los rayos sonoros, aunque no suele ser muy habitual, ya que por lo general las propiedades del medio en una sala son prácticamente uniformes. Las únicas excepciones son las columnas de aire caliente producidas por los sistemas de calefacción: la velocidad del sonido aumenta con el incremento de temperatura, con lo cual puede llegar a provocar una pérdida de inteligibilidad por parte del oyente que se sitúe detrás de la columna.

En acústica hay que diferenciar entre ondas largas para bajas frecuencias (longitud de onda larga) y ondas cortas para altas frecuencias (longitud de onda corta). Las ondas largas no producen ningún tipo de sombra acústica, se reflejan especularmente sobre una superficie rugosa. En cambio, las ondas cortas sí que producen sombra acústica por no poder bordear los obstáculos y se reflejan difusamente sobre superficie rugosa.

Se observa, que a determinadas frecuencias se podrá aplicar o no la acústica geométrica:

-A 34 Hz le corresponde una longitud de onda de 10 metros, con lo cual al ser una onda larga se producirán difracciones. No es aplicable la acústica geométrica en este caso.

-A 125 Hz ($\lambda=2,5$ m) las superficies rugosas reflejan especularmente.

-A 500 Hz ($\lambda =68$ cm) se produce sobre todo, reflexión difusa.

-A 2000 Hz ($\lambda =17$ cm) cualquier objeto empieza a producir sombra acústica.

-A partir de 8000 Hz ($\lambda =4$ cm) cada irregularidad en una superficie se comporta como un espejo y refleja especularmente.

Un cerramiento de grandes dimensiones, en zig-zag, reflejaría a bajas frecuencias, como un único espejo plano, a medias generaría más o menos reflexiones difusas y en frecuencias altas todas las superficies se reflejarían especularmente.

En resumen, todo esto son impedimentos para desarrollar los métodos empleados por la acústica geométrica:

-Ocurrirá difracción en el caso de que la longitud de onda sea grande respecto a la sala.

-Las dimensiones del relieve de las superficies deben ser inferiores a la longitud de onda del sonido considerado. En caso contrario el sonido se reflejaría difusamente.

-La diferencia de impedancia entre el aire y los cerramientos debe ser grande, para que predomine el fenómeno de reflexión.

Método de la fuente-imagen.

El método geométrico se basa, como se ha visto, en la sustitución de los frentes de ondas por sus direcciones de propagación asimilándolos a rayos sonoros que emergen de la fuente y se comportan de igual forma que los rayos luminosos.

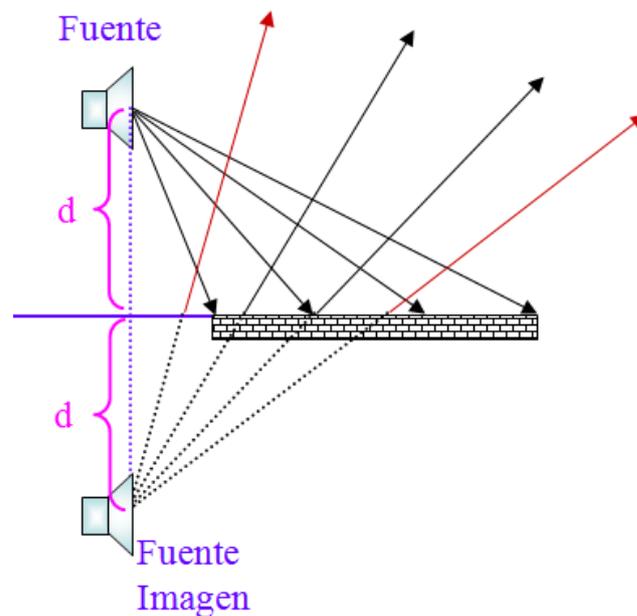


Figura 8. Método fuente-imagen

Aplicando las leyes de la reflexión se construyen los rayos, de manera que todos los que son reflejados por una superficie plana, parecen provenir de la imagen de la fuente. Este

método es útil en el caso de cerramientos planos y considerando pocas reflexiones ya que cuantas más tengamos, aumenta el número de imágenes, pudiendo ser inviable.

Mediante un diagrama que simula una sala rectangular, se puede observar el efecto del aumento de imágenes de la fuente a medida que aumenta el número de reflexiones:

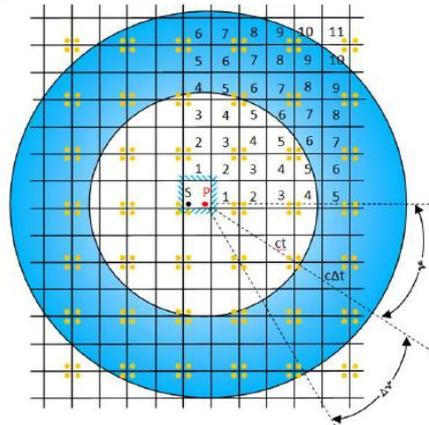


Figura 9. Diagrama

Focalizaciones

La acústica geométrica también trata de remediar los efectos de un sonido mal distribuido, es decir, poder guiar el sonido en aquellas zonas dónde se necesite, según sus características geométricas.

En el caso de techos abovedados, concentraran sus reflexiones de forma no conveniente si la altura es del orden del radio de la bóveda (caso *a*). Si el radio es mayor del doble de la altura, la reflexión del techo deja de ser perjudicial, ya que el sonido converge todo por igual a la zona del público (caso *c*). Y si el radio es menor que la mitad de la altura, la concentración se produce a altura suficiente para no perturbar la audición (caso *d*).

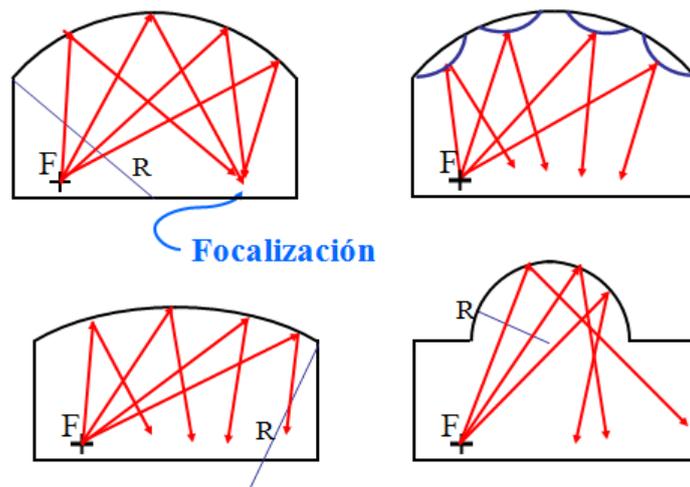


Figura 10. Casos focalización

También se estudia el efecto de los rebotes de los rayos en las paredes laterales. En la siguiente figura se representan tres casos distintos de distribución de rayos reflejados por las paredes en salas con distintas configuraciones.

En los dos casos, las paredes no son paralelas, siendo en a) divergentes y en b) convergentes, vistas desde la fuente. En el caso a) los rayos reflejados se dirigen al fondo de la sala, reforzando la zona con más débil sonido directo, mientras que en la configuración b) los rayos se distribuyen más uniformemente por toda la sala.

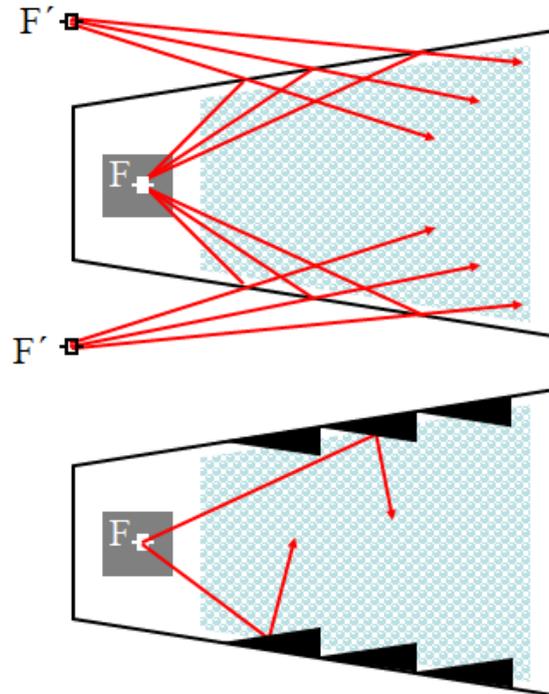


Figura 11. Casos focalización salas rectangulares

Ecos

Este fenómeno es producido cuando una señal acústica emitida por una fuente es percibida por un receptor como dos o más señales desfasadas.

El sistema auditivo humano tiene un tiempo de respuesta medio de unos 50 ms, es decir, dos señales acústicas que llegan con un desfase temporal inferior a 50 ms, se perciben como una señal única. Por lo tanto, este es el límite de tiempo para que un sonido reflejado se una al directo, es decir, se produzca un eco. Si se multiplica la velocidad de propagación del sonido por el tiempo de respuesta medio, se obtiene un resultado de 17 metros, que es la diferencia de recorridos entre el sonido directo y el reflejado. Si esta diferencia es mayor de 17 metros, el sonido reflejado llegará cuando ya finalizó la

impresión sonora del sonido directo, percibiéndose entonces, dos sonidos distintos, que es la sensación de eco.

El sonido reflejado contribuirá a la reverberación, y junto con el sonido directo, se formará una audición más prolongada.

Es importante el estudio del eco en aquellas partes de la sala en la que se magnifique el efecto. La forma más eficaz de remediar el problema es hacer más absorbente los espacios con eco.

TEORÍA ONDULATORIA

Existen propiedades del campo acústico que no pueden ser detectadas ni cuantificadas por las teorías descritas anteriormente, y que sin embargo, pueden afectar a la acústica de una sala. Es decir, es la única que contempla el fenómeno ondulatorio del sonido, pudiendo estudiar la influencia del dimensionado y las proporciones del recinto en su calidad acústica. Por ejemplo, la producción de ondas estacionarias puede producir una distribución altamente heterogénea del campo de presiones acústicas de la misma.

La forma descrita para estudiar la naturaleza ondulatoria del sonido es mediante la resolución de la ecuación de onda, la cual presenta una cierta complejidad en su estudio matemático.

Su principio básico es el de considerar el volumen de aire comprendido en el interior de un recinto cerrado con un sistema vibratorio complejo, formado por la combinación de múltiples sistemas con un grado de complejidad menor.

Cuando una fuente emite sonido, se origina un proceso vibratorio generando vibraciones forzadas y modos de vibración, llegando finalmente a una situación estacionaria cuando estas se amortiguan. Pero, cuando se desconecta la fuente sonora, sólo se conservan los modos naturales de vibración amortiguándose gradualmente de forma exponencial.

Estos modos naturales de vibración de una sala llevan asociadas unas frecuencias propias de vibración y que dependen de la naturaleza, forma y tamaño de la misma, así como de sus condiciones de contorno.

La ecuación de onda. Obtención de las frecuencias propias de una sala paralelepípeda con paredes rígidas.

Para el estudio del caso práctico se emplea una sala paralelepípeda con paredes rígidas de dimensiones x, y, z .

La ecuación de onda que determina la propagación de las ondas sonoras en cualquier fluido y sin pérdidas es la siguiente:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{\rho_0}{k} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

Donde:

p : presión sonora [Pa]

x, y, z : coordenadas cartesianas de propagación [m]

k : rigidez volumétrica del fluido [μ bares]

c : velocidad de propagación de la onda sonora [ms^{-1}]

ρ_0 : densidad volumétrica del fluido [g/cm^3]

La ecuación de onda es una ecuación diferencial homogénea, lineal, de coeficientes constantes, de variables separadas y por lo tanto su solución general es el del tipo:

$$p(x,y,z,t)=P_1(x)*P_2(y)*P_3(z)*T(t)$$

El resultado final, después de diversos cálculos es la obtención de tres ecuaciones diferenciales de segundo orden, lineales de coeficientes constantes y homogéneas cuya solución general es del tipo:

$$P_1(x)=A_1*\cos(k_x*x)+B_1*\text{sen}(k_x*x)$$

$$P_2(y)=A_2*\cos(k_y*y)+B_2*\text{sen}(k_y*y)$$

$$P_3(z)=A_3*\cos(k_z*z)+B_3*\text{sen}(k_z*z)$$

Donde A y B son constantes arbitrarias (reales o complejas) que se determinarán a partir de las condiciones iniciales y las condiciones de frontera.

Las condiciones de contorno, para una sala de paredes rígidas, se expresan mediante el hecho de que en los puntos que están en contacto con las paredes del recinto, el desplazamiento de las partículas es nulo y por tanto es máximo en valor absoluto la presión de las partículas.

Aplicando esto a los dos cerramientos normales al eje OX ($x=0$, $x=l_x$) resulta que, en ellos, $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$, siendo p :

$$p= P_1(x)*P_2(y)*P_3(z)*T(t); \quad \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial P_1}{\partial x} P_2(y)*P_3(z)*T(t)$$

Y como $p(x,y,z,t)$ es máxima, deberá cumplirse que:

$$\frac{\partial P_1}{\partial x} = 0 \text{ para } x=0, x=l_x$$

$$\frac{\partial P_1}{\partial x} = -A_1 k_x \text{sen}(k_x x) + B_1 \text{cos}(k_x x)$$

Que para $x=0$ resulta:

$$\left[\frac{\partial P_1}{\partial x} \right]_{x=0} = B_1 k_x = 0 \text{ luego } B_1 = 0$$

Del mismo modo, para $x=l_x$:

$$\left[\frac{\partial P_1}{\partial x} \right]_{x=l_x} = -A_1 k_x \text{sen}(k_x l_x) = 0,$$

luego:

$$k_x * l_x = n_x \pi$$

Siendo n_x cualquier número entero.

Aplicando las otras condiciones de contorno,

$$\frac{\partial P}{\partial y} = 0 \text{ para } y=0, y=l_y \qquad \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \text{ para } z=0, z=l_z$$

Se obtiene que:

$$k_x = \frac{n_x \pi}{l_x} \qquad k_y = \frac{n_y \pi}{l_y} \qquad k_z = \frac{n_z \pi}{l_z}$$

Como $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$ y $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c}$:

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

Ésta sería la fórmula que da las frecuencias propias de resonancia del local paralelepípedo estudiando, sin más que ir dándole valores enteros a n_x, n_y, n_z .

La presión acústica originada para cada una de esas resonancias sería:

$$p = A \cos\left(\frac{n_x \pi}{l_x} x\right) \cos\left(\frac{n_y \pi}{l_y} y\right) \cos\left(\frac{n_z \pi}{l_z} z\right) \cos 2\pi f t$$

Siendo $A = A_1 * A_2 * A_3 * D$, la amplitud de la onda de presiones en los vientres. Esta fórmula el conjunto de ondas estacionarias en el recinto estudiado dando para cada tanda de valores naturales una onda estacionaria tridimensional.

Para los puntos en los que se anula alguno de los cosenos, la presión acústica se anula. Estos puntos forman tres conjuntos de planos equidistantes llamados planos nodales, que son ortogonales entre sí.

El número de modos propios aumenta conforme aumenta la frecuencia. Este efecto se debe a la aparición de ondas estacionarias que provienen de las interferencias fruto de la combinación de ondas incidentes y reflejadas dentro de un recinto. La presencia de todas estas ondas confiere a la sala una sonoridad especial ya que se producen concentraciones de energía alrededor de las frecuencias propias, es el denominado efecto coloración.

Modos.

Dentro de una sala, se pueden dar los siguientes tipos de modos naturales de vibración:

-**Modos Axiales.** Son aquellos producidos cuando la dirección de propagación de la onda es paralela a un eje. Ocurre cuando dos cosenos directores se anulan. La onda estacionaria se produce entre dos planos paralelos.

-**Modos Tangenciales.** Estos modos se producen cuando la dirección de propagación de las ondas correspondientes permanece paralela al plano de uno de los cerramientos.

-**Modos Oblicuos.** Son los que corresponden a valores no nulos de n_x , n_y , n_z . La dirección de propagación no es paralela a ningún plano de los cerramientos.

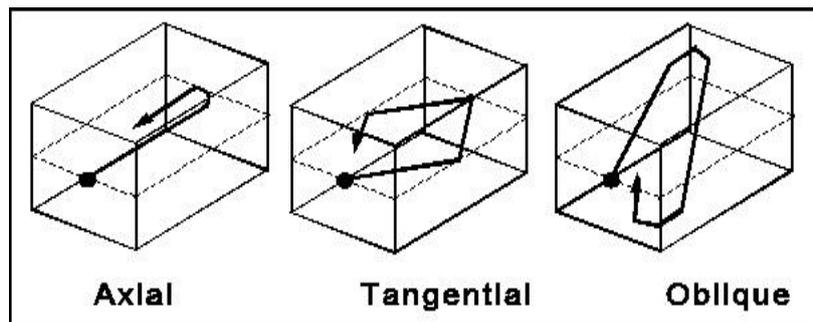


Figura 12. Modos

Se puede realizar una representación ilustrativa de la distribución, tipo y número de los modos propios de la vibración dentro de un sistema cartesiano llamado red recíproca. Para una determinada onda se tendrían tres planos, cuya intersección sería un punto. El vector que une el origen de coordenadas con dicho punto, daría la dirección de propagación de la correspondiente onda estacionaria. Para los modos axiales el punto se situaría en un eje de la sala, para los tangenciales sobre un plano coordenado y para los modos oblicuos en el interior de la sala.

Conclusiones de diseño.

Para evitar los problemas acústicos asociados a los modos de resonancia de una sala, como es el efecto de coloración, se evitarán salas excesivamente regulares, así como grandes planos y superficies paralelas reflectantes.

El máximo efecto se produce con ángulos entre 5° y 7° de inclinación entre paredes opuestas, lo que proporciona una distribución de modos más uniforme.

Las simetrías, así como las relaciones sencillas entre las dimensiones de una sala, favorecen el que una frecuencia corresponda a diversos modos propios, aumentando así las irregularidades del campo acústico.

Existen varias ecuaciones que sirven para mantener las dimensiones de una sala. La teoría clásica nos explica:

Para las salas de pequeñas dimensiones, las proporciones sean:

$$\frac{h}{1} = \frac{b}{\sqrt[3]{2}} = \frac{l}{\sqrt[3]{4}}$$

Para salas mayores:

$$\frac{h}{2} = \frac{b}{3} = \frac{l}{5}$$

Sin embargo, la teoría moderna se basa en otro tipo de ecuaciones:

Para salas grandes:

$$\frac{h}{1} = \frac{b}{1,202} = \frac{l}{1,435}$$

Para salas pequeñas:

$$\frac{h}{1} = \frac{b}{1,404} = \frac{l}{1,863}$$

Además, existen gráficas como el Diagrama de Bolt, que nos permite obtener las proporciones adecuadas. En el gráfico se delimitan dos zonas, la zona interior de color azul cuyas proporciones aseguran una distribución uniforme de modos propios, y el resto de superficie cuyas proporciones dan una distribución no favorable de frecuencias propias.

III. DESCRIPCIÓN DEL TEATRO SERRANO

En el siguiente apartado se describe cómo es el edificio, dónde se sitúa y el papel que tiene dentro de la ciudad de Gandía, capital de La Safor.

Un poco de historia

El actual Teatro Serrano es el resultado de una rehabilitación realizada a partir del año 1995 hasta el año 2006 por el arquitecto Horacio Fernández del Castillo.

Se mantiene la estructura de planta rectangular de proporciones alargadas (18m x 64,70 m), con dos paredes medianeras y dos fachadas: la principal que se sitúa cara al Paseig de les Germanies y la lateral, a la Calle Sant Vicent. Las dos fachadas se restauraron al completo para recuperar los elementos decorativos que se perdieron con el paso del tiempo, como los pináculos modernistas que rematan la fachada principal.

La tarea de rehabilitación fue ardua y costosa debido al mal estado del Teatro que data de principios del siglo XX, y que permaneció cerrado desde los años 60 hasta bien

entrado los años 90, que es cuando Gandía se dio cuenta de la importancia de recuperar una programación cultural acorde a la ciudad.

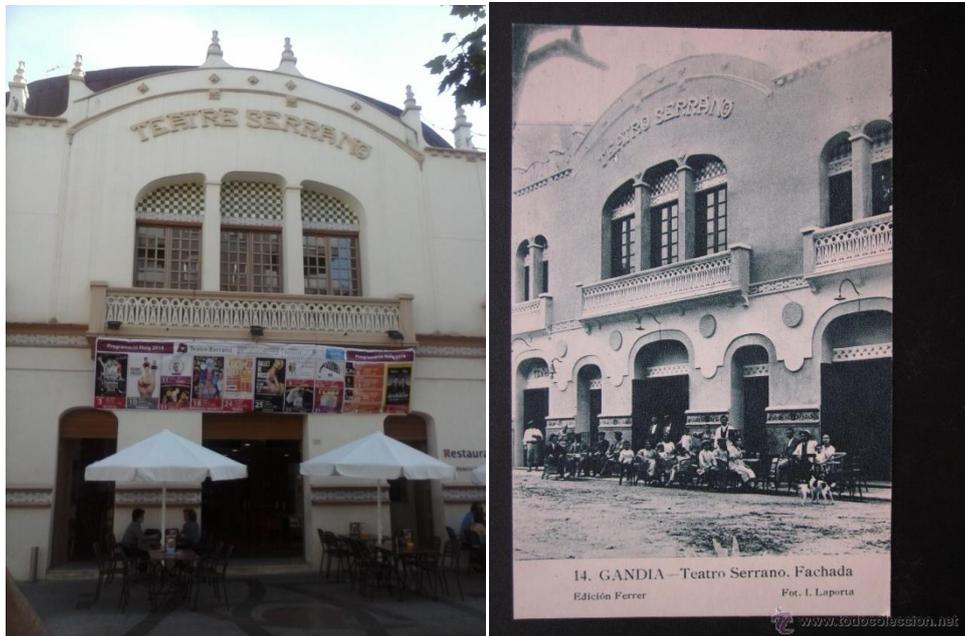


Figura 13. Fachada Teatro Serrano

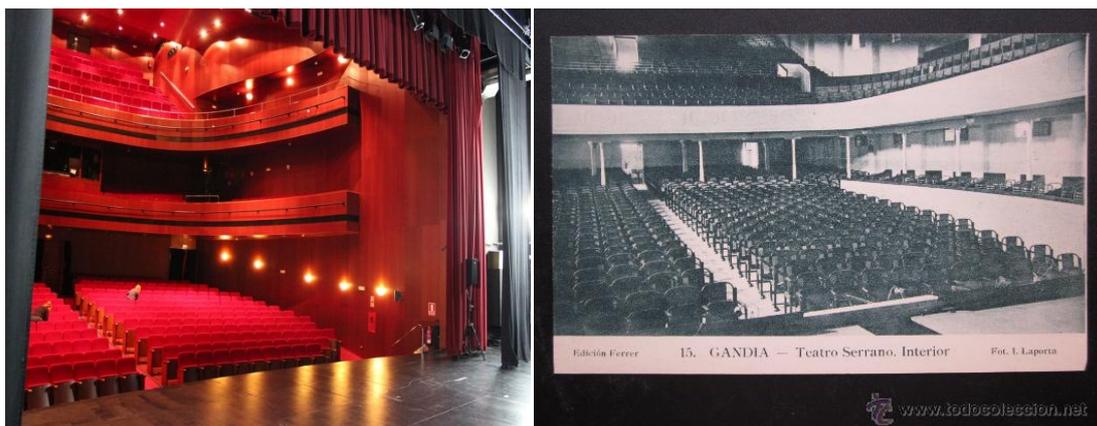


Figura 14. Interior Teatro Serrano

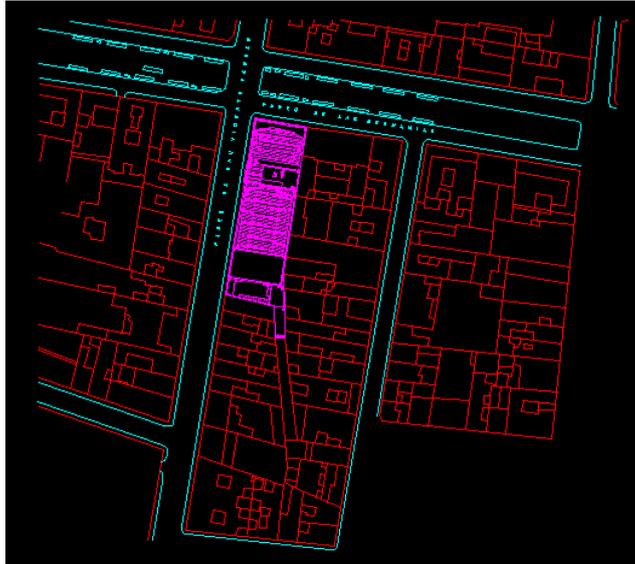


Figura 15. Ubicación Teatro Serrano

Estructura.

La superficie construida es de 4.219 m² distribuidos en cuatro plantas, una planta baja y una planta subterránea. Los espacios utilizados para la realización de espectáculos se dividen en dos salas de distintas características. La más grande tiene una capacidad para 604 personas, y la otra, más pequeña, dispone de 107 butacas. Funcionan de manera autónoma e independiente una de la otra, por lo tanto, se pueden realizar distintas actividades en el mismo instante.

La sala grande, se podría decir que es la principal, dónde se realizan las funciones de danza de gran formato, conciertos musicales y ópera y se divide en dos pisos dónde albergan balcones semicirculares. Dispone de una superficie de 1294,1 m² y una altura de 11 m de altura media. El suelo de la planta baja tiene 273,14 m², el del primer piso 106 m² y el del tercer piso 115 m². El total de superficie del techo es de 323,6 m² y el conjunto de superficie de paredes laterales es de 476,5 m². El volumen total, por tanto,

es de 3.030 m^3 . Esta es la sala que se utiliza en el presente proyecto para la realización del estudio acústico.

La sala pequeña dispone de un falso techo de madera que limita la altura del escenario, de forma que imposibilita la instalación de equipamientos mecánicos de elevación, pero sin embargo, su forma es ideal para la música de cámara, representaciones teatrales de pequeño formato o para proyecciones audiovisuales.



Figura 16. Interior del Teatro Serrano

Consideraciones técnicas.

El equipamiento escénico del que dispone el teatro consiste en una compleja maquinaria escénica, montacargas y tarimas. Por otro lado está el sistema de iluminación con distintos canales de regulación, y una sala de control del sonido dónde se encuentra el material de regulación de los canales de sonido y los equipos informáticos. Además, se encuentran repartidos por toda la sala altavoces de distintos tamaños y características para la correcta audición del espectador tanto en la planta baja como en las distintas alturas.



Figura 17. Mecanismo escenario

Al ser un teatro cerrado, el ruido de fondo dentro del espacio es un parámetro más importante que el ruido exterior, ya que existen dos tipos de componentes: el primero es debido al ruido producido por el sistema de climatización y demás instalaciones eléctricas y/o hidráulicas y la segunda va asociada al nivel de campo reverberante existente en la sala. La primera depende de los niveles recomendados de ruido de fondo mientras que la segunda depende del volumen del recinto y los materiales utilizados como revestimientos de sus superficies internas.

El sistema de ventilación del teatro está adecuado a las necesidades acústicas, es decir, para evitar que el ruido de fondo sea excesivo o mayor de lo permitido, el canal de ventilación se encuentra repartida por toda la sala debajo de las butacas mediante pequeños sistemas de salida de aire.



Figura 18. Butacas

En cuanto a los materiales acústicos utilizados, destaca el uso de difusores de madera en el *hall* de los distintos pisos, y superficies de alta absorción como son las cortinas del escenario o el revestimiento de las butacas y el suelo.

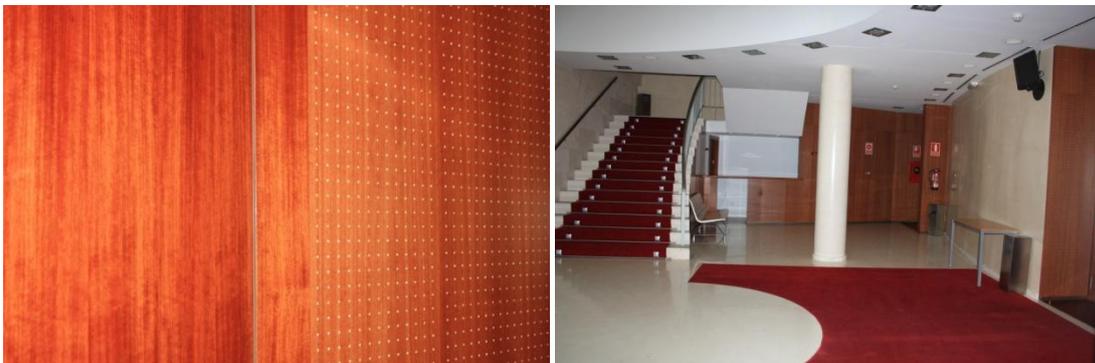


Figura 19. Hall del Teatro Serrano

IV. METODOLOGÍA

El presente proyecto se divide en dos partes: por un lado, se realizan una serie de mediciones acústicas dentro de la sala, con lo que podemos decir, que ésta es la parte experimental del trabajo. Lo que se quiere obtener con esta fase más práctica, es el tiempo de reverberación actual de la sala, para ello, se deben seguir ciertas pautas de medición, el equipo necesario, el número de posiciones de medición requerido y el método para evaluar los datos y presentar el informe de ensayo.

La metodología que se utiliza es, en este caso, la que se presenta en la norma ISO 3382-2:2008, que se refiere a la medición de parámetros acústicos en recintos, concretamente el tiempo de reverberación.

La otra parte del proyecto se basa en la simulación informática de la acústica de la sala. Para ello, se modeliza el teatro de forma que el programa Catt-Acoustic pueda trabajar sobre éste mediante el trazado de rayos sonoros, según la teoría geométrica. Esta teoría defiende el uso de los rayos para poder analizar la distribución del sonido en un recinto, del campo acústico directo y de las primeras reflexiones. De esta forma, se determinan los puntos de incidencia de los rayos sobre las superficies del recinto, así como las pérdidas asociadas a la absorción sonora de los materiales que recubren las superficies interiores.

V. MEDICIÓN DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN

El tiempo de reverberación es uno de los parámetros más importantes en el campo de la acústica de salas, ya que ayuda a determinar los usos a los que se puede destinar el recinto en cuestión, además es el que mejor representa las características acústicas.

V.1 CONDICIONES DE MEDIDA

Para la realización de las medidas del tiempo de reverberación, se ha seguido el procedimiento descrito en la norma UNE-EN ISO 3382:2008 *Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios*.

Según el procedimiento de la norma, se debe medir con la sala vacía, ya que las personas pueden influir considerablemente en el tiempo de reverberación, y con el telón y el cortafuegos recogido.

Ya que el teatro Serrano es un recinto grande, se deben recoger los datos de humedad relativa y temperatura ya que pueden contribuir de manera significativa a la absorción acústica a frecuencias elevadas. Por lo tanto, estos dos datos se recogieron con ayuda del anemómetro y los resultados obtenidos fueron de 21,2°C de temperatura y 38% de humedad.

Para una mayor precisión de medida se realizaron dos tipos con dos posiciones de fuente en el escenario. Los dos tipos de medición aunque se hicieron en puntos distintos del escenario, si que conservaron una altura de aproximadamente 1,5 del suelo, según la norma, ya que de esta forma el sonido llega mejor a toda la zona de audiencia del teatro.

En cuanto al número de posiciones del micrófono se escogieron 19, con el fin de abarcar toda la sala, incluida la zona de audiencia de los dos pisos en forma de herradura.

El micrófono, en este caso el sonómetro, se situaba a una altura de 1,2 m del suelo, ya que esta es la altura a la que se encuentra la cabeza de un oyente sentado.



Figura 20. Colocación fuente y micrófono

La distancia desde cada posición de micrófono a la superficie reflectante más cercana debe ser al menos $\frac{1}{4}$ de longitud de onda y separados entre ellos una distancia superior a 2 m, evitando posiciones simétricas. Además, debe haber una separación con la fuente emisora de 2,5 m mínimo, para evitar una influencia excesiva del sonido directo.

El sonómetro, que es el que recoge las medidas realizadas, debe estar previamente, calibrado (realizado en laboratorio). En el momento de utilizarlo, la configuración que se debe utilizar para determinar el tiempo de reverberación es el modo “tiempo de reverberación”, en bandas de tercios de octava entre 100 Hz y 5 kHz, (ya que es la franja más representativa para el caso de este estudio) y tiempo de medición de 15 segundos.

Tras la configuración y el montaje del equipo, el sistema se encarga de realizar las medidas de forma automática capturando los datos a través del sonómetro mientras emite la fuente, y mostrando por pantalla el tiempo de reverberación y las diferentes caídas de nivel de presión sonora a diferentes frecuencias.

Después de realizar las mediciones, los datos son volcados del sonómetro al ordenador.

En la tabla siguiente se recogen los puntos de medida realizados para cada posición de fuente, y la posición de la butaca y fila en la que se ha medido:

Puntos de emisión fuente	Punto de medida	Fila	Posición butaca	Lado	Planta
F1	1	7	23	izquierdo	P. Baja (Platea)
	2	13	19		
	3	8	3		
	4	8	20	derecho	
	5	13	22		
	6	3	10		
F2	7	3	20	derecho	P. Primera (Gradas)
	8	8	11	izquierdo	
	9	12	3		
	10	4	9		
	11	1	5	derecho	
	12	1	20		
	13	2	15	izquierdo	
F1	14	1	1		
	15	1	6		
	16	2	11		
	17	1	3	derecho	P. Segunda
	18	3	4	central	
	19	1	4	izquierdo	

Tabla 2. Puntos de medida

Además de las medidas de ruido presentadas en la tabla anterior, se recogieron medidas del ruido de fondo, que es aquel que prevalece en ausencia de la emisión generada por la fuente con la que se realiza la medida, es decir, es aquel ruido que pueda afectar negativamente a la calidad del sonido del teatro si excede los niveles permitidos.

Y las posiciones para determinar el ruido de fondo fueron las siguientes:

Puntos de medición ruido de fondo	Fila	Posición	Lado	SPL(dB)
1	12	Pasillo central	-	27
2	9	centro	izquierdo	22
3	4	centro	derecho	28

Tabla 3. Puntos de medida ruido de fondo

Con los siguientes gráficos se puede observar de manera más sencilla las posiciones:

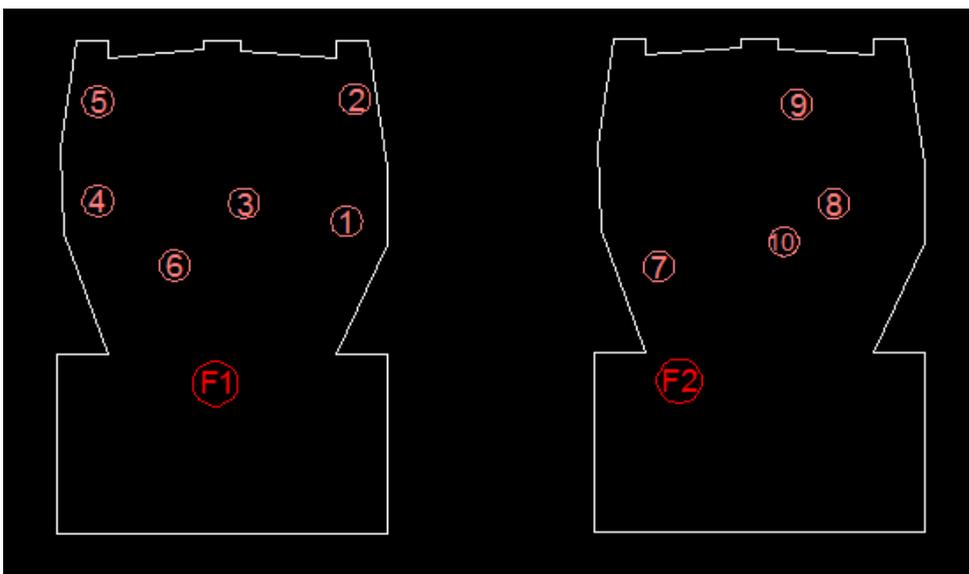


Figura 13. Posición de mediciones en la platea

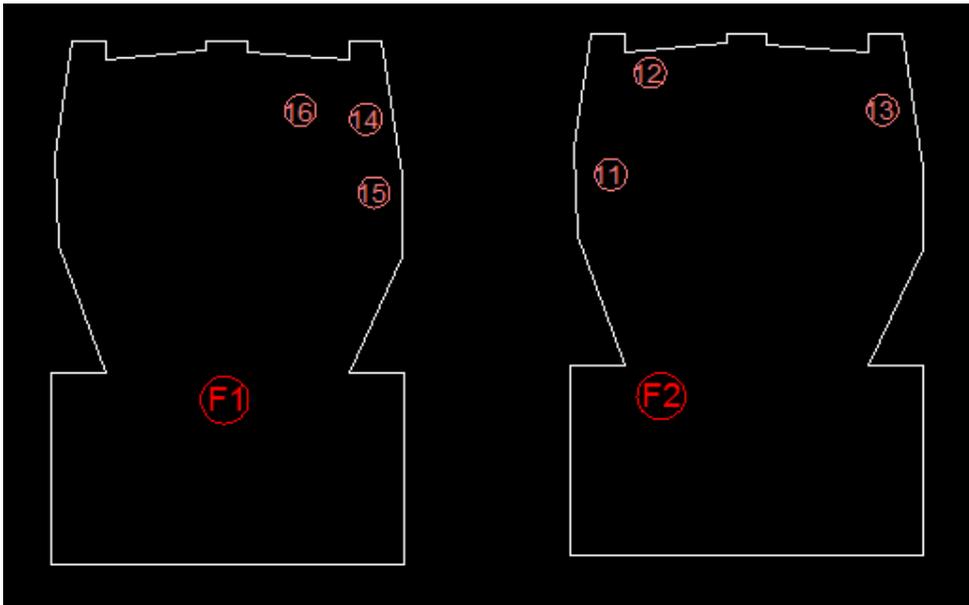


Figura 22. Posición de mediciones en primer piso

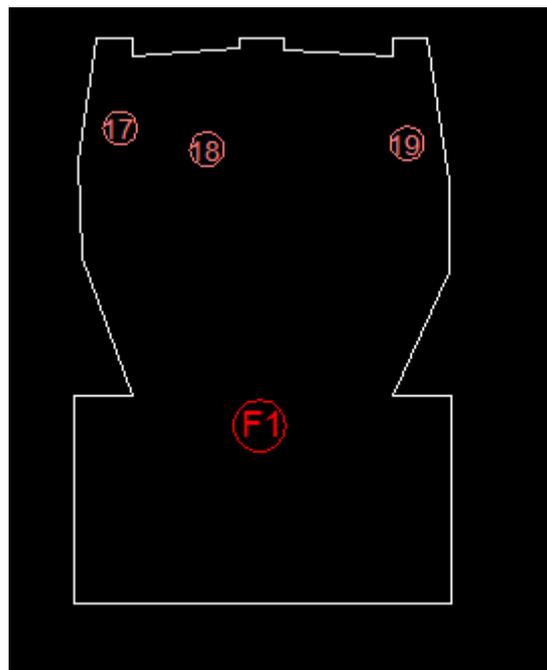


Figura 23. Posición de mediciones en segundo piso

V.2 MATERIAL Y CONEXIONADO

En cuanto al equipo, la instrumentación necesaria se compone según la normativa de una fuente acústica, un micrófono, y un equipo de análisis. En el presente estudio acústico, se utilizó una fuente auto-amplificada Bruel & Kjaer 4224 con generador de ruido incorporado y un sonómetro Bruel & Kjaer 2250 con un trípode. Además, para realizar la conexión entre la fuente y el sonómetro se utilizó el siguiente cableado:

-dos cables XLR-XLR de 10 metros.

-un cable XLR-RCA.

-un conector BNC-RCA.

-un adaptador BNC-canon.

-un alargador de 50 metros.



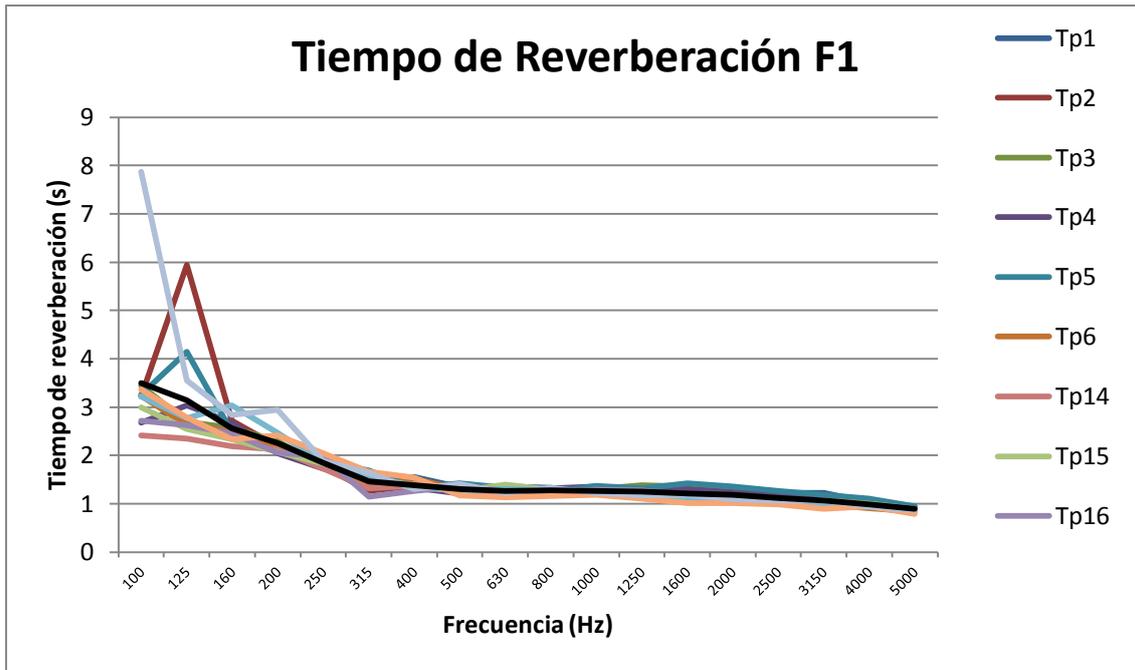
Figura 24. Equipo de trabajo

V.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el apartado siguiente, se muestran los resultados obtenidos de los tiempos de reverberación medidos en cada punto promediado por el número de repeticiones en cada uno, la media global que representan para cada una de las posiciones de la fuente en el escenario y la desviación estándar. Además, se analizan otros parámetros como la inteligibilidad, la calidez acústica y el brillo.

f(Hz)	Tp1	Tp2	Tp3	Tp4	Tp5	Tp6	Tp14	Tp15	Tp16	Tp17	Tp18	Tp19	Tmedio	Tdesv
100		3,22	3,44	2,68	3,26	3,23	2,41	3	2,72	3,22	3,37	7,87	3,49	1,49
125	2,61	5,94	2,69	3,03	4,14	2,63	2,35	2,55	2,63	2,77	2,79	3,55	3,14	1,01
160	2,52	2,72	2,57	2,68	2,48	2,5	2,19	2,33	2,45	3,04	2,34	2,84	2,56	0,24
200	2,13	2,19	2,29	2,04	2,16	2,14	2,12	2,07	2,06	2,47	2,42	2,94	2,25	0,26
250	1,75	1,78	1,78	1,72	1,89	1,99	1,72	1,83	1,98	1,86	2,04	1,88	1,85	0,11
315	1,4	1,26	1,55	1,52	1,69	1,33	1,32	1,57	1,14	1,51	1,66	1,63	1,47	0,17
400	1,56	1,37	1,33	1,33	1,33	1,51	1,37	1,35	1,26	1,38	1,54	1,3	1,39	0,10
500	1,34	1,28	1,39	1,21	1,42	1,3	1,3	1,26	1,35	1,25	1,17	1,41	1,31	0,08
630	1,36	1,35	1,25	1,18	1,33	1,21	1,19	1,39	1,28	1,3	1,13	1,23	1,27	0,08
800	1,33	1,29	1,28	1,32	1,24	1,32	1,27	1,29	1,25	1,28	1,16	1,33	1,28	0,05
1000	1,24	1,26	1,3	1,36	1,37	1,2	1,21	1,27	1,29	1,22	1,19	1,23	1,26	0,06
1250	1,36	1,36	1,38	1,26	1,32	1,22	1,15	1,17	1,28	1,2	1,11	1,17	1,25	0,09
1600	1,3	1,29	1,36	1,3	1,42	1,16	1,11	1,15	1,14	1,08	1,01	1,19	1,21	0,12
2000	1,31	1,2	1,32	1,24	1,36	1,12	1,13	1,14	1,12	1,12	1,01	1,09	1,18	0,11
2500	1,22	1,2	1,2	1,17	1,27	1,03	1,08	1,07	1,03	1,06	0,98	1,07	1,12	0,09
3150	1,22	1,11	1,16	1,11	1,18	0,99	1,04	1,07	0,99	0,97	0,89	1,07	1,07	0,10
4000	1,02	0,98	1,06	1,02	1,1	0,91	0,98	1	0,97	0,93	0,94	0,95	0,99	0,06
5000	0,93	0,91	0,93	0,91	0,95	0,84	0,87	0,9	0,9	0,87	0,79	0,87	0,89	0,04

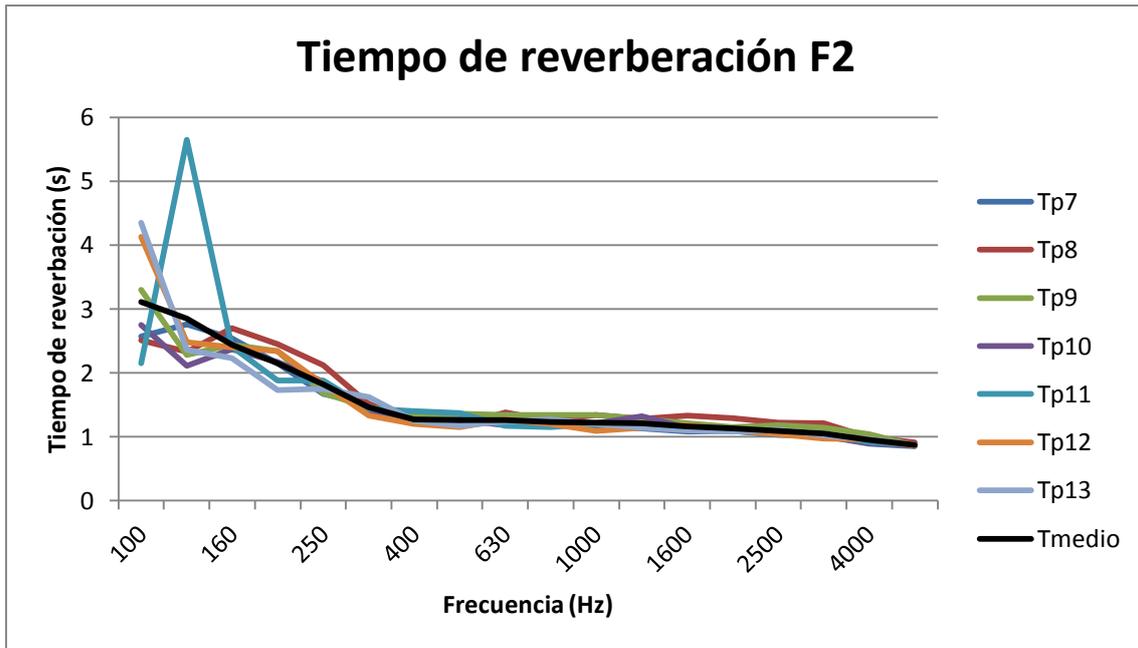
Tabla 3. TR para cada punto de medida para la posición de fuente 1



Gráfica 1. TR Posición fuente 1

f(Hz)	Tp7	Tp8	Tp9	Tp10	Tp11	Tp12	Tp13	Tmedio	Tdesv
100	2,57	2,51	3,3	2,75	2,15	4,13	4,35	3,11	0,85
125	2,76	2,33	2,28	2,11	5,65	2,48	2,36	2,85	1,25
160	2,54	2,7	2,44	2,37	2,41	2,4	2,23	2,44	0,15
200	2,15	2,45	2,34	2,17	1,88	2,34	1,73	2,15	0,26
250	1,67	2,12	1,68	1,86	1,88	1,82	1,75	1,83	0,15
315	1,51	1,51	1,46	1,38	1,44	1,33	1,62	1,46	0,10
400	1,28	1,21	1,34	1,21	1,4	1,2	1,25	1,27	0,08
500	1,33	1,18	1,36	1,26	1,37	1,15	1,17	1,26	0,09
630	1,27	1,38	1,34	1,18	1,17	1,27	1,24	1,26	0,08
800	1,2	1,25	1,34	1,22	1,15	1,2	1,27	1,23	0,06
1000	1,17	1,34	1,34	1,21	1,2	1,09	1,2	1,22	0,09
1250	1,13	1,28	1,28	1,32	1,19	1,14	1,14	1,21	0,08
1600	1,08	1,33	1,21	1,14	1,12	1,18	1,1	1,17	0,09
2000	1,09	1,29	1,15	1,11	1,09	1,1	1,08	1,13	0,07
2500	1,03	1,22	1,18	1,05	1,04	1,04	1,11	1,10	0,08
3150	1,01	1,21	1,14	1,01	1,03	0,97	1,02	1,06	0,09
4000	0,89	0,99	1,04	0,9	0,92	0,96	0,96	0,95	0,05
5000	0,85	0,91	0,86	0,86	0,87	0,86	0,87	0,87	0,02

Tabla 4. TR para cada punto de medida para la posición de fuente 2



Gráfica 2. TR para posición de fuente 2

A continuación, se representa la media de las dos medias de cada posición de fuente, es decir, la media global.

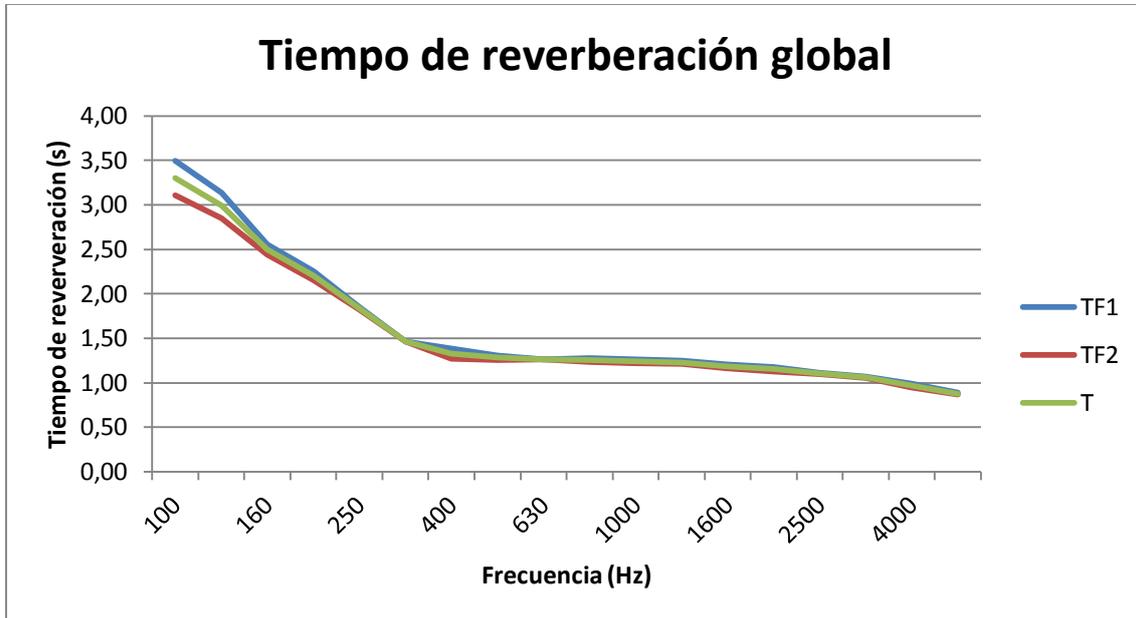
f(Hz)	TF1	TF2	T
100	3,49	3,11	3,30
125	3,14	2,85	3,00
160	2,56	2,44	2,50
200	2,25	2,15	2,20
250	1,85	1,83	1,84
315	1,47	1,46	1,46
400	1,39	1,27	1,33
500	1,31	1,26	1,28
630	1,27	1,26	1,27
800	1,28	1,23	1,26
1000	1,26	1,22	1,24
1250	1,25	1,21	1,23
1600	1,21	1,17	1,19
2000	1,18	1,13	1,16
2500	1,12	1,10	1,11
3150	1,07	1,06	1,06
4000	0,99	0,95	0,97
5000	0,89	0,87	0,88

Tabla 5. Media TR de posición de fuente 1 y 2

Si se observan los resultados tanto en las tablas con los promediados para las dos posiciones de fuente como para el promedio de ambas, se aprecia que en bajas frecuencias existe una mayor desviación de los resultados de las medidas realizadas en cada punto. Por otro lado, en bajas frecuencias se obtienen también valores altos de tiempo de reverberación, hasta los 400 Hz; a partir de ahí los valores empiezan a descender hasta obtener un valor más o menos estable que se sitúa sobre un segundo. Este comportamiento es muy deseable para que se generen buenas condiciones de audición. A partir de 2 kHz, existe una disminución inevitable de los valores de TR debida a la atenuación producida por el aire. Dicha disminución es especialmente notoria en recintos grandes.

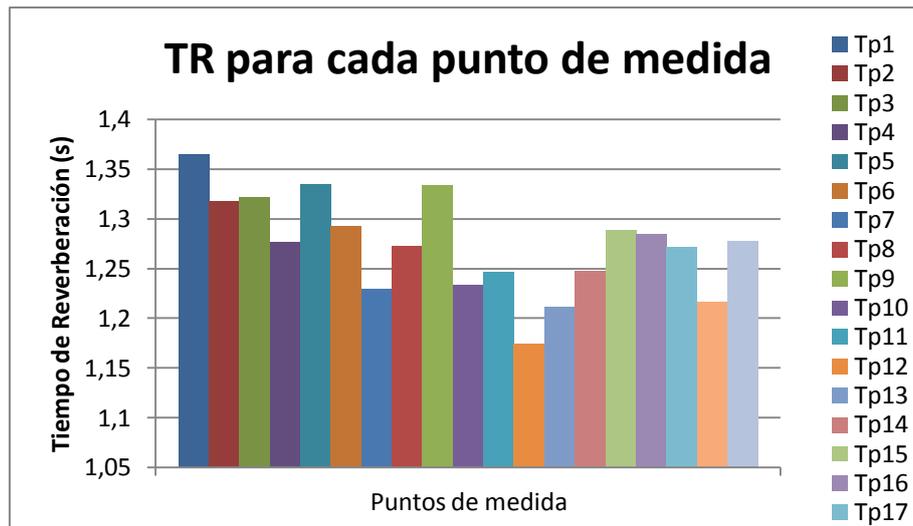
Hay un dato que sobresale por encima de los demás con un tiempo de reverberación de cinco segundos, concretamente en la posición 11 con la segunda posición de fuente. Esto puede ser debido a un fallo en la medición, aunque no es de suma importancia ya

que sólo ocurre en este caso y además para bajas frecuencias, dónde los valores son más altos.



Gráfica 3. TR de las dos posiciones de fuente

Por último, se obtiene el tiempo de reverberación medio del recinto para cada posición, pero en vez de para toda las frecuencias desde 100 Hz hasta 5kHz, desde 400 hasta 1250 Hz, ya que las altas y bajas frecuencias no son representativas.



Gráfica 4. TR para cada punto de medida

Los tiempos de reverberación obtenidos en cada posición tienen cierta similitud, con lo cual se puede deducir que en ese rango de frecuencias, el teatro posee un comportamiento uniforme.

Por último, es necesario calcular el tiempo de reverberación óptimo del Teatro Serrano según las mediciones realizadas. Para ello, se utiliza la valoración de Beranek. Considerando los volúmenes entre 100 y 10.000 m³, se recomienda que el valor promediado de los TR correspondientes a la banda de 500 Hz y 1 Hz para una sala ocupada destinada a actividades teatrales está comprendido entre **0,7 y 1,2 s**.

Según el siguiente gráfico, el margen de valores recomendados de RT_{mid} en función del volumen del recinto es el que se muestra. La sala que se estudia en el presente proyecto tiene un volumen de 3.030 m³, con lo cual, el valor recomendado de RT_{mid} se sitúa entre 0,9-1,1 s.

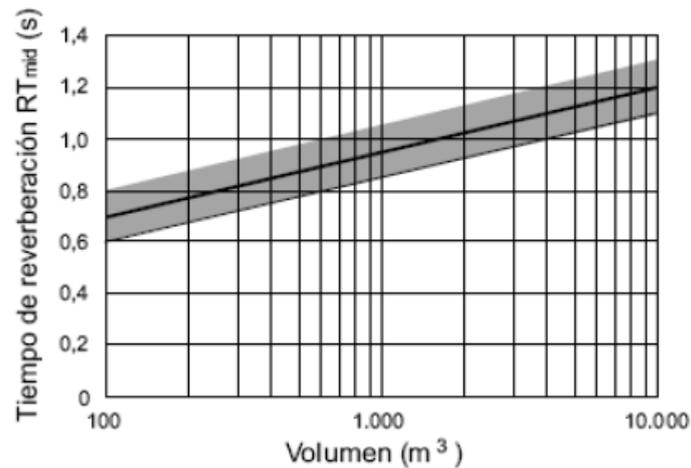


Figura 25. Márgen de valor recomendado de RTmid

Para poder averiguar si el tiempo de reverberación del teatro se encuentra dentro de este límite, se utiliza la siguiente expresión:

$$RT_{\text{mid}} = \frac{RT(500 \text{ Hz}) + RT(1 \text{ kHz})}{2}$$

El resultado de realizar la operación es:

$$RT_{\text{mid}} = 1,26 \text{ s}$$

El valor obtenido roza el límite del valor máximo recomendado para este tipo de salas, pero tampoco es relevante ya que por encima de 1,5 s la sala resultaría excesivamente “viva” para su utilización como teatro, y un valor inferior a 0,5 s daría lugar a salas “secas”, aunque esto resultaría adecuado para salas en las que se realicen discursos u otros usos destinados a la palabra.

Por otro lado, se debe tener en cuenta lo dicho anteriormente sobre el comportamiento del TR representado en las gráficas: se mantiene constante en el rango que interesa, es decir, a partir de los 500 Hz la tendencia es la de uniformidad en función de la frecuencia.

Todo esto es válido para representaciones teatrales, pero en el caso de que el teatro realice conciertos de música clásica, sinfónica u ópera, el RT_{mid} ya no resulta tan recomendable.

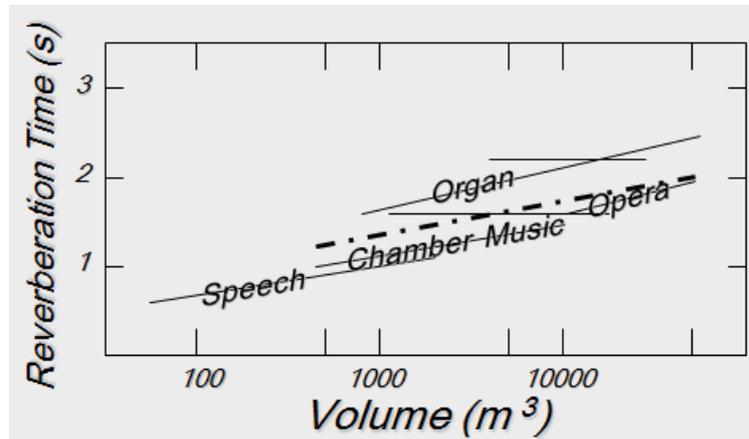


Figura 26. TR recomendados para cada tipo de uso de la sala

En cuanto a la calidez acústica, el resultado obtenido es el siguiente:

$$BR = \frac{RT(125 \text{ kHz}) + RT(250 \text{ kHz})}{RT(500 \text{ Hz}) + RT(1 \text{ kHz})} = 2,52$$

Y el resultado obtenido del brillo:

$$Br = \frac{RT(2 \text{ kHz}) + RT(4 \text{ kHz})}{RT(500 \text{ Hz}) + RT(1 \text{ kHz})} = 0,8$$

Teniendo en cuenta los valores recomendados para los parámetros descritos:

$$1,10 \leq BR \leq 1,45$$

$$Br \leq 0,87$$

Se puede deducir que la riqueza en sonido de graves es demasiado alta, sobrepasando el límite establecido, y sin embargo, existe buena calidad y abundancia de sonidos agudos.

Y por último se analiza la inteligibilidad con los parámetros %ALCons y RASTI. Si aplicamos las fórmulas, se obtienen los siguientes resultados:

$$\%ALCons = \frac{200 \cdot D_2^2 \cdot TR^2 \cdot N}{VQM}$$

Donde:

D= distancia entre emisor y receptor: 5 m.

TR= tiempo de reverberación de la sala en 2kHz: 1,38 s.

N y M= 1

V= volumen de la sala: 3030 m³

Esta fórmula se aplica porque $r \leq 3,16 D_c$. Y para calcular D_c se necesita saber:

$$D_c = \sqrt{QR}$$

Q= factor de directividad de la fuente: 1.

$R = \frac{S \cdot \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} = 386,5$. Es la constante de la sala. S= 1294,1 m² y $\bar{\alpha} = 0,23$.

$D_c = 2,75$ y se cumple que $r \leq 3,16 D_c$.

Por lo tanto, si se calcula %ALCons se obtiene un resultado de: **3,14%**.

El cálculo del RASTI se realiza mediante la siguiente expresión:

$$STI = -0,1845 \cdot \ln(\%ALCons) + 0,9482 = \mathbf{0,7}$$

Para determinar si existe un buen entendimiento de la palabra, se puede utilizar la siguiente tabla como referencia, dónde se relaciona el %ALCons y el STI/RASTI.

%ALCons	STI/RASTI	Valoración subjetiva
1,4%-0%	0,88-1	Excelente
4,8%-1,6%	0,66-0,86	Buena
11,4%-5,3%	0,50-0,64	Aceptable
24,2%-12%	0,36-0,49	Pobre
46,5%-27%	0,24-0,34	Mala

Tabla 6. Relación entre %ALCons y STI/RASTI

Los valores obtenidos se encuentran dentro del rango de %ALCons: 4,8%-1,66% y en el STI/RASTI: 0,66-0,86. Con lo cual, la valoración subjetiva correspondiente es la de una inteligibilidad buena, aunque se acerca más al rango siguiente de 5,3%-11,4% de inteligibilidad aceptable.

La sala principal del Teatro Serrano no es muy adecuada para conciertos de música, sin embargo para teatro y ópera, sí lo es.

VI. SIMULACIÓN CATT-ACOUSTIC

La simulación se realiza mediante un software llamado Catt-Acoustic, el cual resulta ser una herramienta útil para el estudio del comportamiento acústico de un recinto. Estudia la geometría de la sala y la distribución de los materiales absorbentes en la sala, así como las posiciones de la fuente sonora y el receptor, todo ello teniendo en cuenta cual es la zona de audiencia. La geometría de la sala de estudio se representa de forma tridimensional mediante el programa de dibujo Autocad. De esta forma, se puede representar la propagación del sonido en todas las direcciones mediante trazado de rayos, desde la posición de la fuente que indiquemos y mediante reflexiones, hasta que la energía va reduciéndose.

Los resultados obtenidos mediante esta simulación son los parámetros necesarios para poder determinar las condiciones acústicas de una sala.

A continuación se muestra el proceso de diseño del modelo acústico del Teatro Serrano de Gandía, primero de forma tridimensional con el programa Autocad, y después la simulación de los distintos parámetros acústicos sobre el mismo mediante el Catt-Acoustic y sus posteriores análisis.

VI.1 MODELO 3D AUTOCAD

El programa Autocad es una herramienta muy potente de dibujo que permite realizar diseños en dos y tres dimensiones. El diseño tridimensional de la sala se realizó en base a los planos en dos dimensiones proporcionados por el Ayuntamiento de Gandía. El diseño se centró sólo en la sala de estudio ya que el teatro cuenta con más espacios.

A partir de un origen de coordenadas se realizan los vértices que conforman las distintas superficies del modelo en tres dimensiones y se designan las capas que sean necesarias para poder diferenciar los distintos espacios: butacas, suelo, techo, etc.

Las figuras que a continuación se presentan, muestran el teatro desde distintos ángulos. De forma característica del Serrano se observa la forma de herradura que tiene la zona de audiencia y el techo escalonado.

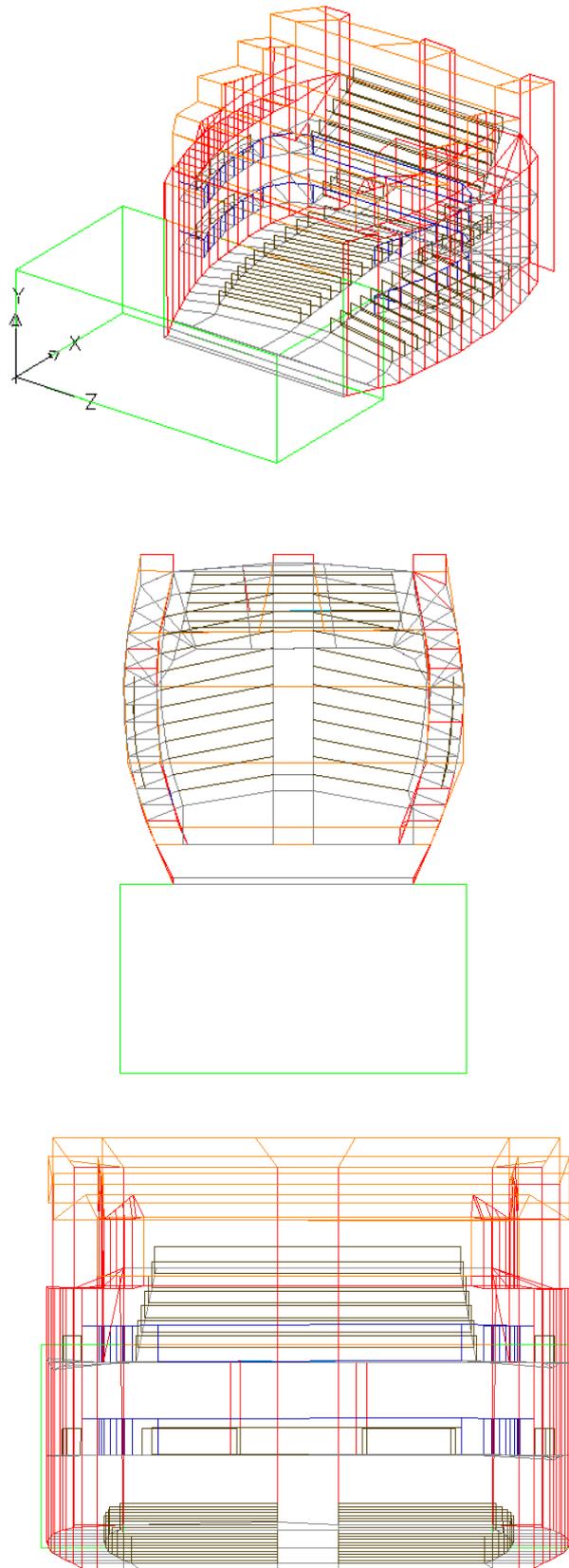


Figura 27. Teatro Serrano representao en 3D

VI.2 DISEÑO MODELO ACÚSTICO CATT-ACOUSTIC

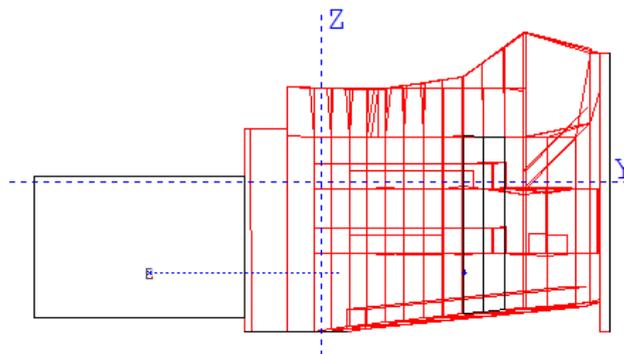
Una vez realizado el modelo geométrico de la sala en Autocad, el siguiente paso es simular el comportamiento acústico de la sala mediante Catt-Acoustic. El cálculo de los parámetros acústicos que se obtienen mediante el programa se divide en tres grandes apartados:

-Audience Area Mapping: En esta parte se generan mapas con diversos parámetros acústicos sobre los planos de audiencia seleccionados. El algoritmo de cálculo se basa en el trazado de rayos.

-Early Part Detailed ISM: Se estudian las primeras reflexiones y se generan ecogramas donde se puedan apreciar ecos.

-Full Detailed Calculation: Es el módulo mediante el cual se generan ecogramas completos que pueden ser utilizados para la estimación de parámetros.

En el momento en el que se le proporciona al programa la geometría de la sala de estudio, van apareciendo ventanas con los distintos parámetros acústicos, y también detalles de la geometría, como pueda ser, los planos acotados de la sala:



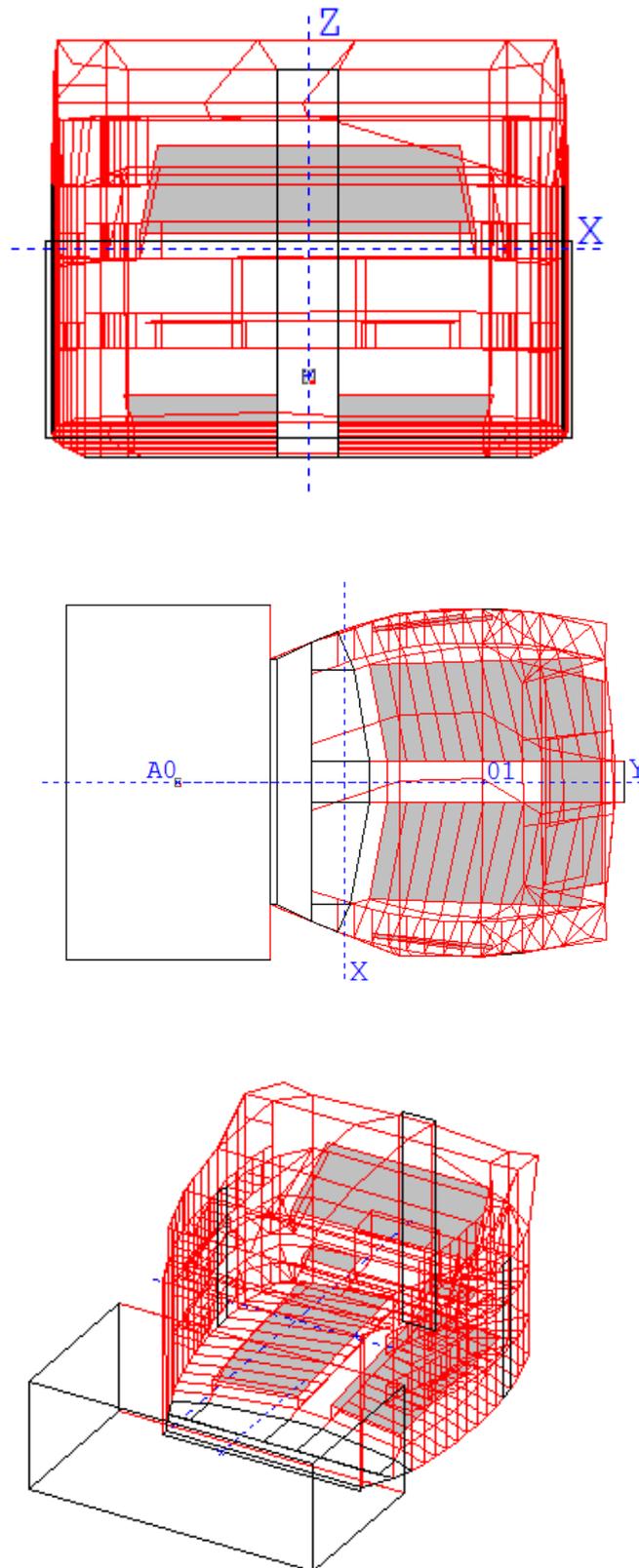


Figura 28. Detalles de la geometría

Se puede observar en las siguientes imágenes las distintas cotas y la posición de la fuente emisora y el receptor. En este caso, se sitúa la fuente dentro del escenario coincidiendo con la posición de fuente 1, y el receptor en un punto intermedio del plano de audiencia, concretamente en la platea.

Además el programa nos da una referencia del volumen total de la sala: 2371 m^3 y la superficie del plano de audiencia: 169 m^2 . Hay que tener en cuenta que el plano de audiencia se distribuye entre las tres alturas del teatro.

A parte de la geometría de la sala, es importante tener en cuenta los materiales que recubren el interior, ya que determinará también el comportamiento acústico. Por lo tanto, se deben asignar en el programa Catt-Acoustic los valores de los coeficientes de absorción acústica de cada material, para la banda de frecuencias desde 125 Hz a 4kHz.

Los valores de absorción acústica de cada material están acordes a sus propiedades y comportamiento frente al sonido, por eso, cada material es diferente y tiene unos valores en concreto.

En la siguiente tabla se muestran los materiales que se encuentran dentro de la sala de estudio del Teatro Serrano, sus valores de coeficientes de absorción así como en qué espacios se distribuyen. Hay que tener en cuenta, que un mismo material puede pertenecer a varias zonas, como por ejemplo la madera: se distribuye por el techo, paredes y barandillas.

Los siguientes materiales no han sido medidos directamente, sino que han sido escogidos por sus coeficientes de absorción mostrado en las fichas técnicas comerciales, y que se han elegido para obtener unos valores de tiempo de reverberación similares a los medidos en la sala del teatro.

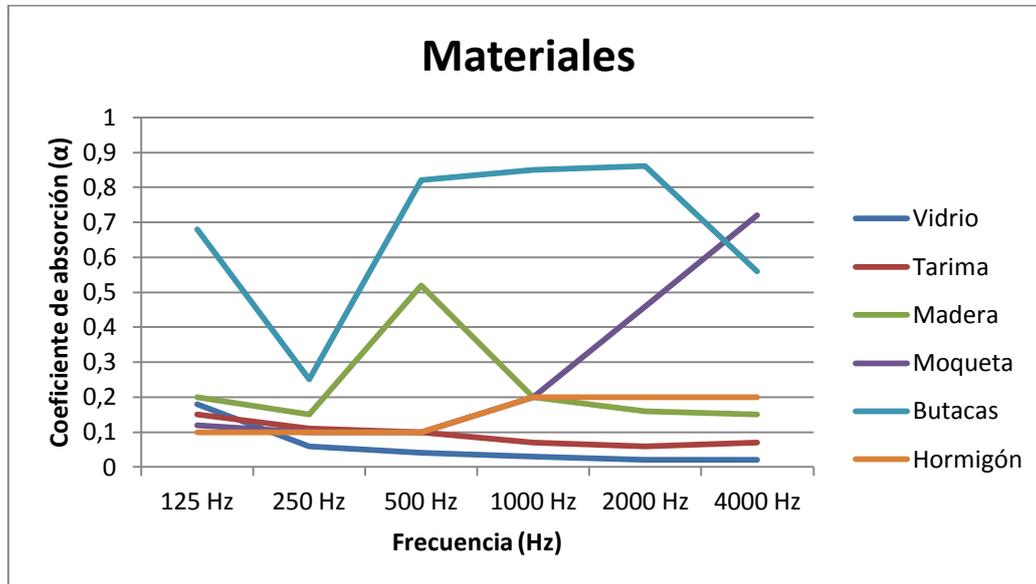
Material	Descripción
Vidrio	Cristal de la sala de control
Tarima de madera	Tarima de madera escenario
Paneles de madera	Paneles de madera barnizada en paredes y techo
Moqueta	Moqueta para suelo de audiencia
Butacas	Sillas con porcentaje medio de superficie tapizada y ocupadas
Hormigón	Hormigón pintado en el interior del escenario

Tabla 7. Materiales

Coefficiente de absorción α	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Vidrio	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Tarima	0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07
Madera	0,2	0,15	0,52	0,2	0,16	0,15
Moqueta	0,12	0,1	0,1	0,2	0,46	0,72
Butacas	0,68	0,25	0,82	0,85	0,86	0,56
Hormigón	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2

Tabla 8. Coeficientes de absorción de los materiales

Para poder visualizar de forma más gráfica los valores de coeficientes de absorción, se representan las curvas de absorción para cada uno de los materiales asignados a las distintas superficies, para la banda de frecuencias asignada.

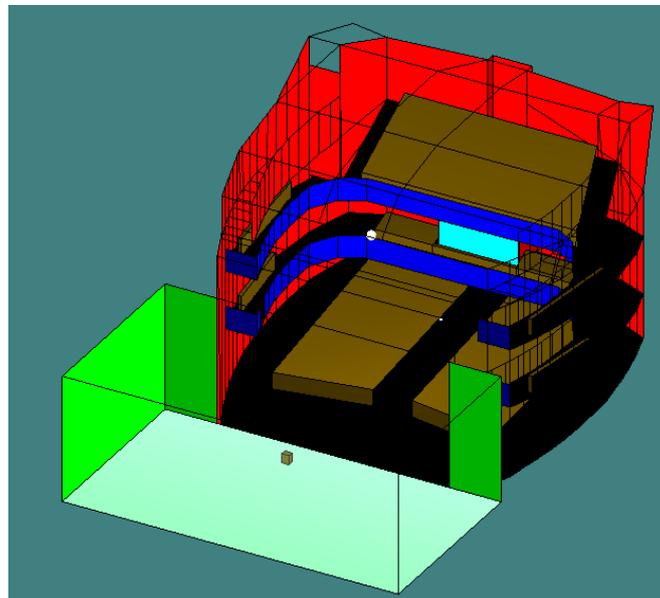


Gráfica 5. Curva de absorción de los distintos materiales

En las siguientes imágenes se observa la sala vista desde varias perspectivas, obtenidas mediante el programa Catt-Acoustic. Los colores representan cada una de las capas designadas anteriormente mediante Autocad, y que son aprovechadas también para visualizar dónde se sitúan los materiales.

Capa	Color	Material
Techo	Naranja	Madera
Paredes	Rojo	Madera
Cabina	Azul claro	Cristal
Barandillas	Azul oscuro	Madera
Suelo	Negro	Moqueta
Audiencia	Marrón	Butacas superficie tapizada
Escenario	Verde	Hormigón
Suelo escenario	Azul turquesa	Tarima madera

Tabla 9. Capas de los materiales



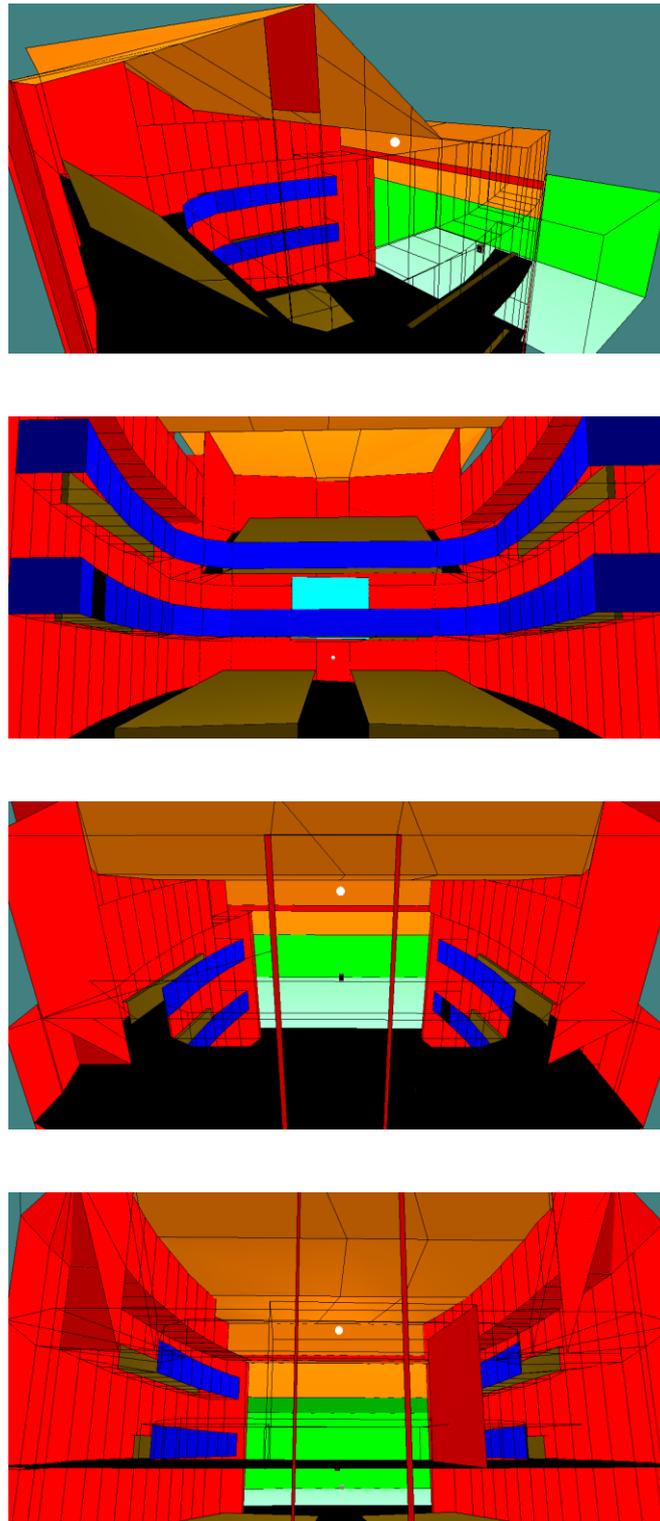


Figura 29. Simulación de la sala

Con el fin de realizar la simulación al completo de los parámetros acústicos, se definen una serie de áreas de audiencia que se distribuyen a lo largo y alto del teatro, dónde se sentará el público, es decir, en la platea, primer y segundo piso.

Estos planos de audiencia se sitúan de forma horizontal a una distancia del suelo que se considera la posición media de altura de la cabeza de los oyentes (sobre un metro). El programa proporcionará un mapeado de color en función del parámetro acústico a calcular, para poder realizar una idea general del comportamiento acústico de la sala.

Las áreas de audiencia definidas se pueden observar en las imágenes anteriores del interior del teatro (color marrón). Se distribuyen en dos zonas separadas por el pasillo central en la platea, dos más en los laterales del primer piso y la zona central, también partida por la sala de control de sonido, y por último, en el tercer piso en los laterales y en la zona céntrica, con cierta inclinación del suelo.

VI.3 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS

Una vez realizado el diseño del modelo acústico del teatro, asignado los materiales y definidas las áreas de audiencia, se procede al cálculo de los parámetros acústicos mediante los módulos anteriormente descritos.

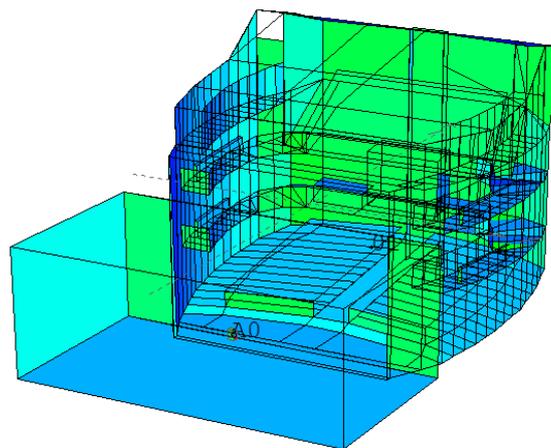


Figura 30. Simulación del Teatro Serrano

-Audience Area Mapping.

En este módulo se muestran los parámetros siguientes: valor del nivel de presión sonora (SPL) en cuatro tiempos distintos, la definición (D-50), el índice de claridad musical (C-80), el factor de fortaleza (G), el tiempo central (Ts), el factor de energía lateral (LF) también para cuatro tiempos y el estudio de la inteligibilidad de la palabra (RASTI). Todos se dan para frecuencias en las bandas de octava de 1 kHz.

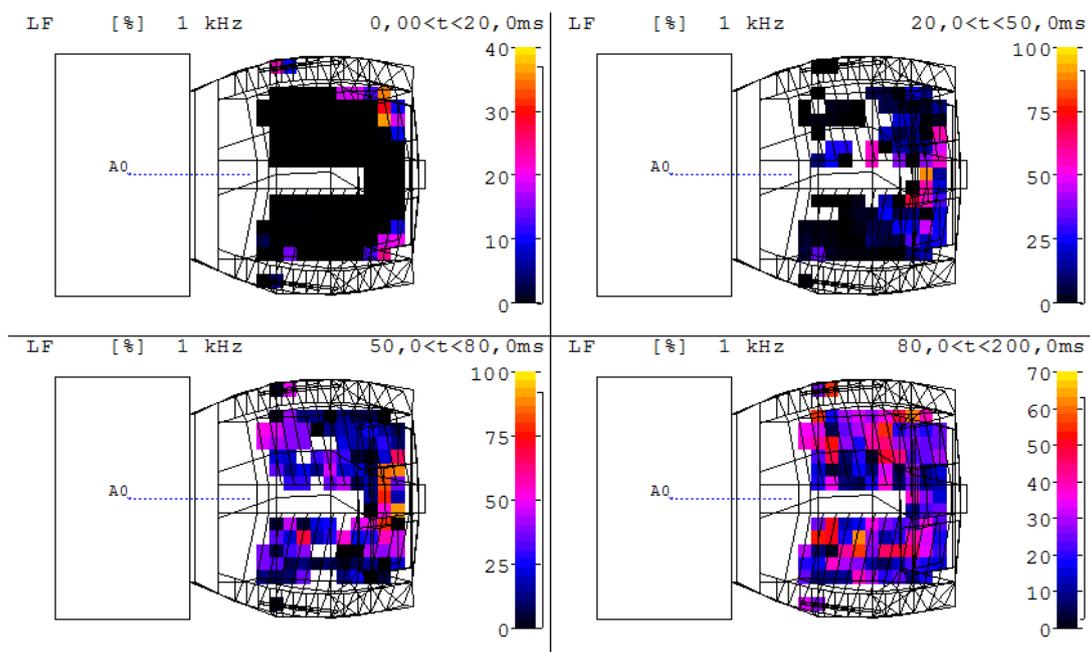


Figura 31. Mapeado zona de audiencia

El factor de energía lateral que está relacionado con la impresión espacial, es bastante bajo para 1 kHz, no llega al 30 % en casi todos los tiempos. Para que exista una buena espacialidad, debería ser alta a bajas frecuencias.

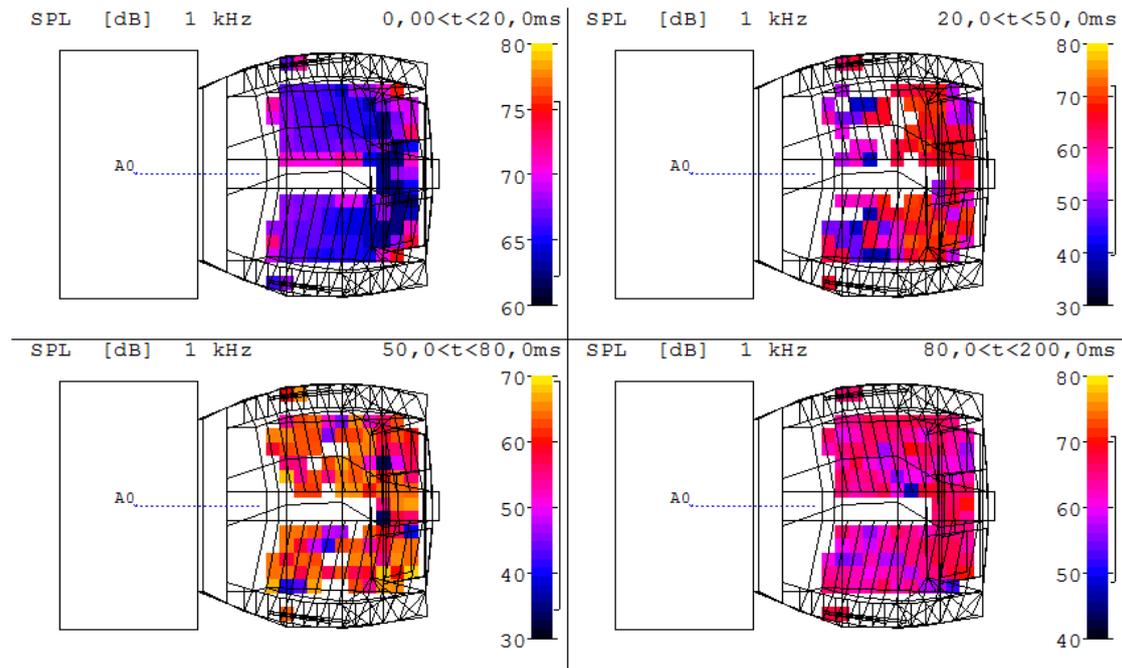


Figura 32. Mapeado zona de audiencia

El nivel de presión sonora (SPL), que se reparte por toda la zona de audiencia en la banda frecuencial de 1 kHz, es de 60 a 65 dB en las primeras reflexiones, y conforme va aumentando el tiempo es mayor el número de dB hasta estabilizarse entre 55 y 70 dB para un tiempo de entre 80 y 200 ms. Esto tiene sentido ya que el nivel de presión sonora va aumentando hasta llegar a un máximo para después ir decayendo. La zona central, al ser la que recibe el sonido directo, tiene mayores niveles de dB.

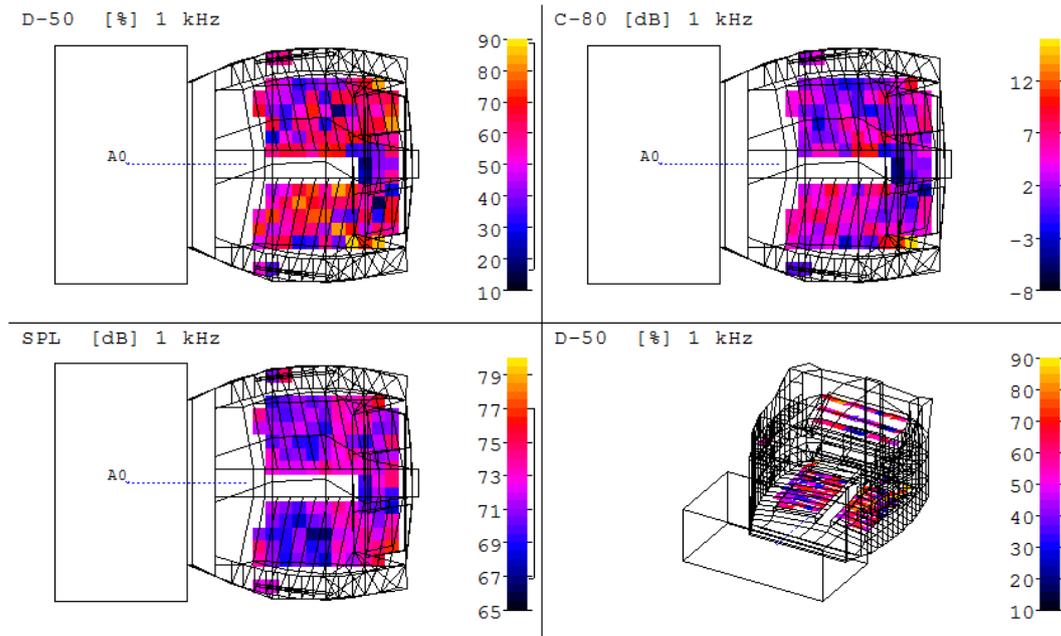


Figura 33. Mapeado zona de audiencia

La definición (D-50) es baja en algunas zonas como pueda ser las primeras filas de la platea y los laterales de los diferentes pisos, y la zona central del último piso. El resto de zonas viene marcado de entre un 50 y 70 % de perceptibilidad de la palabra hablada.

En cuanto a la claridad (C-80), parece que exista bastante proporción de zonas de audiencia con una buena claridad de entre 0 y 6 dB.

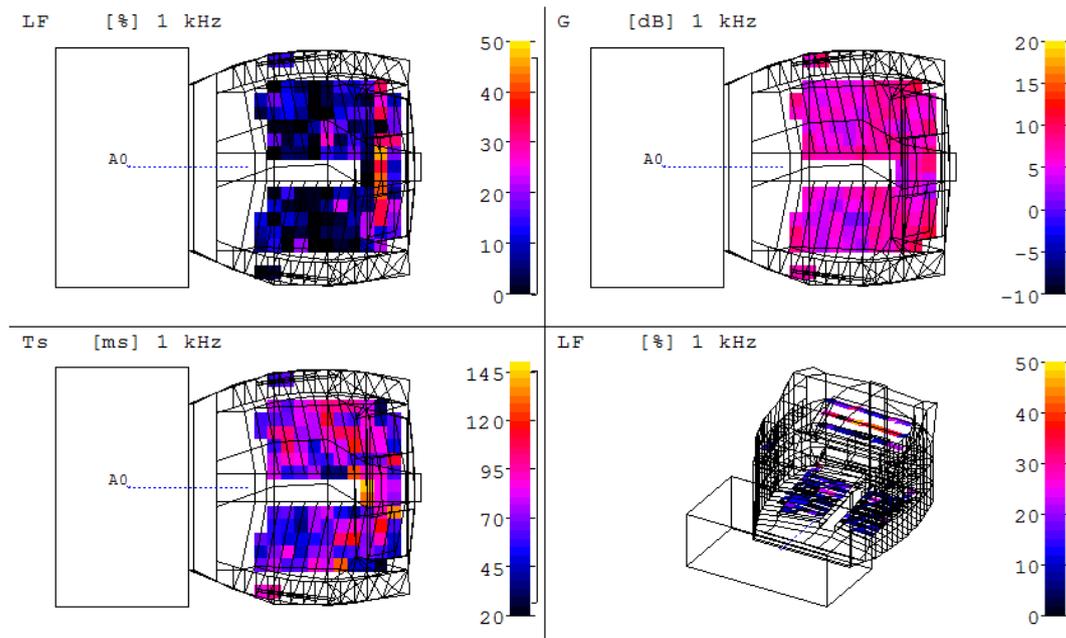


Figura 34. Mapeado zona de audiencia

El factor de fortaleza (G) o sonoridad está comprendido entre los 5 y 10 dB por toda la zona de audiencia, teniendo picos más altos de 15 dB en las esquinas y algunos asientos centrales o más cercanos al pasillo de la platea.

Y por último, en cuanto al T_s o tiempo central es bastante alto en toda la zona del público en general, aunque existe cierta heterogeneidad. Hay asientos centrales que llegan hasta los 130 ms, pero la mayoría de zonas se queda en 105 ms. Esto demuestra la importancia del campo reverberante en esta sala.

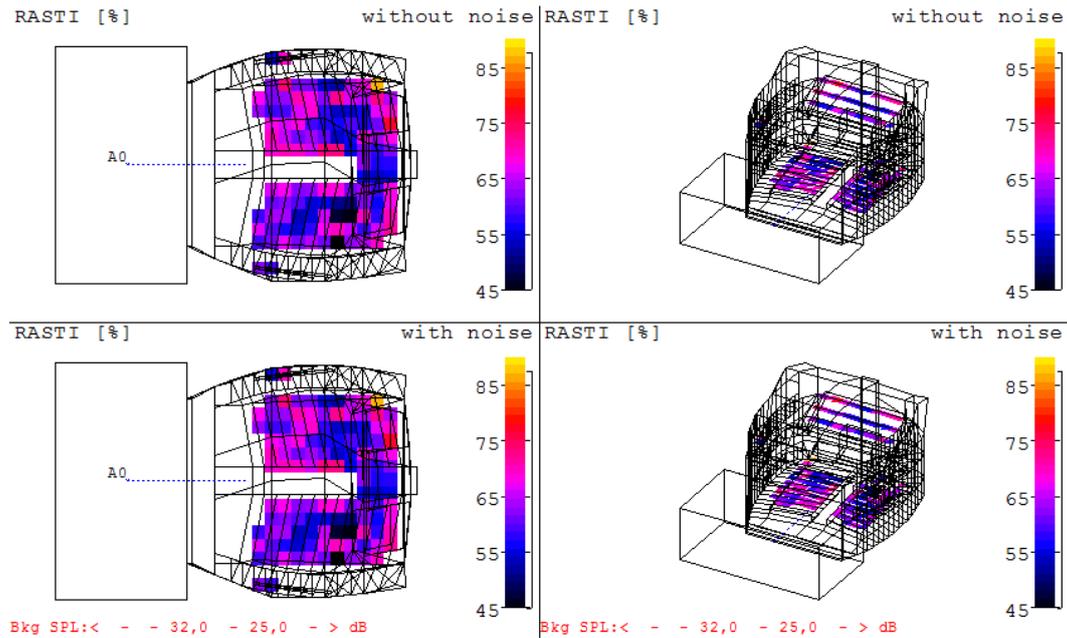


Figura 35. 1 Mapeado zona de audiencia

Según el parámetro RASTI, la inteligibilidad de la palabra es bastante heterogénea en todo el plano de audiencia, variando desde un 55% hasta un 75%. Las zonas centrales parecen ser las que menor inteligibilidad tienen.

-Early Part Detailed ISM

En esta parte se realiza el cálculo de los ecogramas para la frecuencia de 1 kHz. Lo que se analiza aquí es la presencia de ecos, rayos a 50 ms. Para ellos se estudian las primeras reflexiones mediante el método de trazado de rayos que el Catt-Acoustic proporciona, permitiendo ver un ecograma y hacer un seguimiento de los rayos.

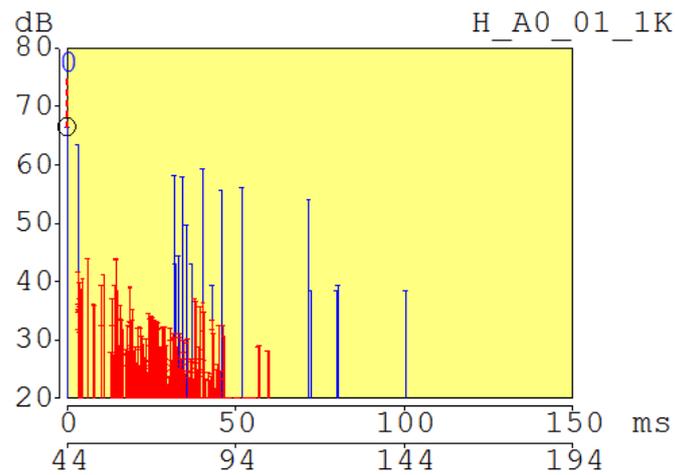


Figura 14. Ecograma

Si se observa la imagen, existen rayos en 50 ms, con lo cual existe cierta presencia de ecos relacionados con la reverberación. El sonido directo más el reflejado son los rayos de color azul, y los de primer orden de color rojo.

Full Detailed Calculation

Finalmente se obtiene el tiempo de reverberación estimado y los parámetros que se presentan en el primer módulo, pero estudiados con mayor profundidad.

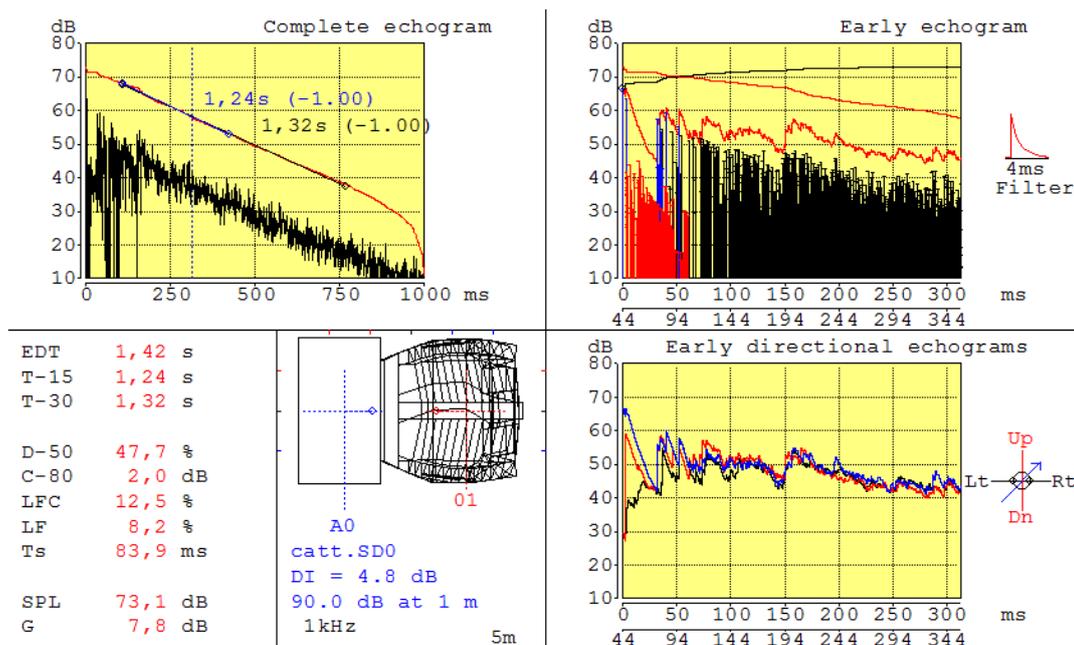


Figura 15. Resultado parámetros acústicos

Si comparamos los resultados obtenidos en el primer módulo con los de la imagen, el D-50 presenta un resultado final bajo, el C-80 determina buena claridad en toda la zona de audiencia, LF presenta una baja espacialidad, Ts es alto, lo que demuestra que la sala es bastante reverberante, SPL es bastante alto y la G se sitúa dentro de los límites normales de fortaleza.

El ecograma completo muestra la curva de decaimiento del sonido y el tiempo de reverberación medio: 1,32 segundos. El ecograma temprano recoge de forma más completa las primeras reflexiones. El sonido directo y las primeras reflexiones son de color azul y las de orden difuso de color rojo. El resto de reflexiones difusas son de color negro.

Las curvas representan la integración del tiempo de decaimiento.

En la siguiente imagen, se muestran las curvas de decaimiento del sonido en función de la frecuencia:

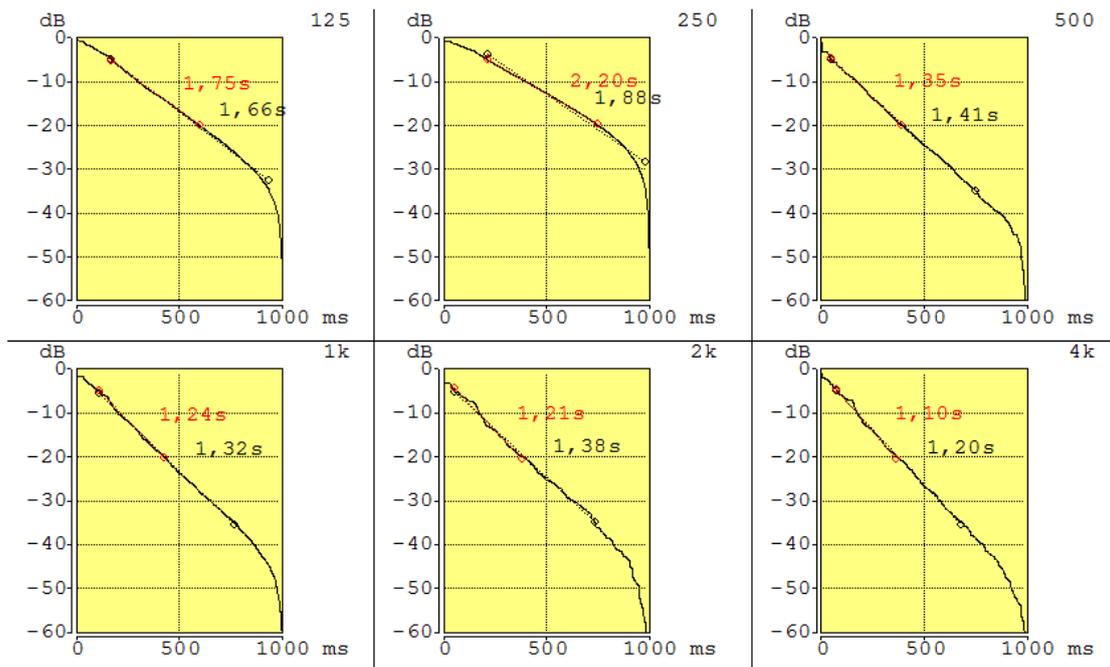


Figura 16. TR

Por último, se representa la curva global del tiempo de reverberación, así como sus valores para la banda de frecuencias desde 125 Hz hasta 4 kHz, y los resultados de la absorción de la sala. Como se puede observar, la sala es menos absorbente a bajas frecuencias, siendo el tiempo de reverberación más alto, y conforme va aumentando la frecuencia la reverberación disminuye.

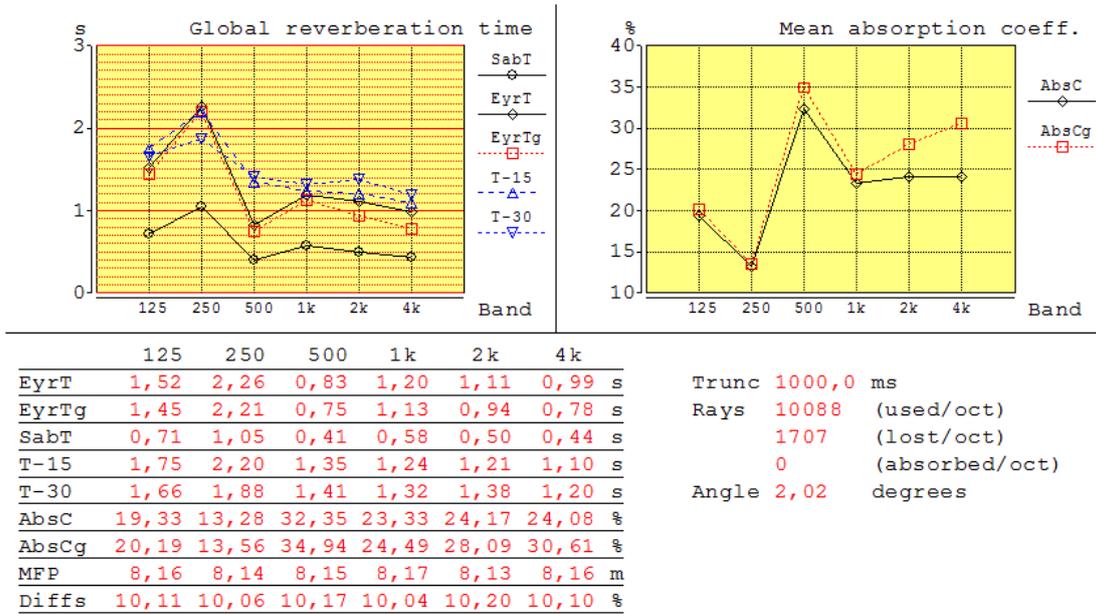


Figura 17. TR y absorción

VI.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de mostrar los parámetros obtenidos a través del programa Catt-Acoustic para la sala de estudio, del Teatro Serrano, hay que analizar los resultados obtenidos, concretamente, el tiempo de reverberación, ya que es el parámetro más importante y el que se ha buscado con las mediciones realizadas dentro de la sala.

Si se comparan los resultados finales de tiempo de reverberación medio obtenido mediante las mediciones y el obtenido con el programa Catt-Acoustic, los valores para las frecuencias desde los 250 Hz hasta los 2000 Hz se acercan bastante, pero a muy bajas o a muy altas frecuencias no:

Frecuencia (Hz)	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
TR medido	3,00	1,84	1,28	1,24	1,16	0,97
TR Catt	1,66	1,88	1,41	1,32	1,38	1,20

Tabla 10. Comparación resultados TR medido con el simulado

Hay que tener en cuenta que estos datos se han realizado para la posición de fuente 1, ya que los tiempos son muy parecidos en las dos posiciones de fuente.

El contraste de valores para las frecuencias muy bajas o altas radica en ciertas limitaciones de las que dispone el Catt-Acoustic para la simulación: no se puede representar la geometría tal y como es en la realidad, ya que demasiadas esquinas o superficies inclinadas, no son asimiladas por el programa. Esto significa que se debe rectificar la geometría para poder obtener los datos acústicos. Por ejemplo, un techo con superficie en escalón debe ser cambiado por un techo totalmente liso. Es decir, el programa trabaja mejor con salas más sencillas.

En general, el tiempo de reverberación de la sala principal del Teatro Serrano es bastante aceptable, tal y como se ha comentado en el apartado 5.3, un RT_{mid} de 1,26 s. se considera bueno para una sala destinada al teatro, pero ya que el Teatro Serrano se utiliza para más tipo de representaciones, no es apta para música o discursos.

A bajas frecuencias existen tiempos de reverberación excesivamente elevados, y esto no interesa porque empeora el grado de inteligibilidad de la sala, es más recomendable que el tiempo de reverberación se mantenga constante con la frecuencia. Esto se podría remediar con la colocación de material adecuado.

Una buena opción sería colocar más material absorbente en la sala. La moqueta o el tapizado de las butacas son los materiales más absorbentes que están en la sala, con lo cual, sería conveniente utilizar materiales de absorción similar y que pueda ser colocado fácilmente sin realizar grandes cambios en la sala. La zona ideal para ello sería la pared posterior dónde se encuentran las dos puertas de salida y entrada. Esta pared, que está recubierta totalmente de madera, podría ser más absorbente si se colocase una cortina gruesa de terciopelo de parte a parte de la superficie requerida. Con esto, se conseguirían mejores resultados.

Por ejemplo, con una cortina de 475 g/m² se obtienen los siguientes coeficientes de absorción:

Frecuencia(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Coef. Absorción (α)	0,4	0,3	0,5	0,7	0,7	0,6

Tabla 11. 1 Coeficientes absorción cortina

Analizando también la geometría de la sala, hay varias cosas que llaman la atención en cuanto a características acústicas de la sala:

- Debajo de los balcones existen huecos muy pequeños que parece que puedan afectar la emisión acústica, pero ocurre todo lo contrario, es decir, la mayor parte de reflexiones que proceden de la parte superior de la sala disminuye sustancialmente, lo que conlleva una disminución del sonido reverberante en dicha zona. Además, a medida que se hace más profundo el hueco entre el balcón y el nivel inferior, el ángulo de llegada del sonido reverberante es progresivamente menor. Esto lleva asociado un aumento de la definición de la voz D-50.



Figura 18. Balcones Teatro Serrano

- Los materiales escogidos para el recubrimiento de la sala son adecuados para dotar a la sala de las características acústicas necesarias. Por un lado, el tapizado de las butacas y la moqueta ayudan a la absorción del sonido, y por otro, la madera de paredes y techo reflejan adecuadamente el sonido hacia la zona de audiencia. Además, el diseño de las superficies reflectoras ayudan a que se cumpla esta condición.

El techo es un buen ejemplo de superficie reflectora: la forma en escalón permite que las primeras reflexiones lleguen adecuadamente a la zona de audiencia, tanto la de la zona de la platea como el resto de pisos.

El único inconveniente es que es en el techo donde también se instala todo el equipo de iluminación, y como se puede observar en la imagen anterior, existen huecos por los que pueda tener salida el sonido. Este espacio lleva al techo que realmente recubre el edificio, y que está rematado por una superficie de chapa.



Figura 19. Techo

- Las paredes laterales de la sala también son adecuadas para generar reflexiones laterales. La forma circular de la sala y el material de las paredes, la madera, ayudan y complementan la función del techo.



Figura 20. Laterales de la sala

- La forma de herradura de la sala tiene ciertos inconvenientes. El público sentado en las butacas laterales, sobretodo en el primer y segundo piso puede que tengan peores condiciones acústicas, ya que en esas zonas de paredes cóncavas, propician la aparición de focalizaciones del sonido, pudiendo perder así la inteligibilidad. Sólo ocurre cuando el actor está situado en un lateral del escenario, ya que el perfil óptimo gira con él; si se coloca de cara al público, esto no sucede.

VII. CONCLUSIONES

El presente proyecto ha sido realizado por una parte para realizar un estudio acústico de la sala principal del Teatro Serrano de Gandía, y por otro, para proponer las posibles mejoras.

El tiempo de reverberación ha sido el parámetro más importante a la hora de evaluar la acústica, ya que con él se puede hacer una idea de si el teatro se está utilizando de forma correcta, o necesita cambiar ciertos materiales para tener una mejor acústica en función del uso. Pero además, es necesario generar en el recinto el máximo número de primeras reflexiones útiles hacia la zona del público. La adecuada colocación y elección de los materiales hace posible este requerimiento.

Cómo se ha comentado antes, la simulación acústica da una idea de los parámetros acústicos y el comportamiento de la sala, pero es imprescindible visitarla físicamente y recorrer cada espacio para poder ver cómo afecta el sonido y de qué manera. Las mediciones *in situ* ayudan a determinar el tiempo de reverberación.

En definitiva, la reforma del Teatro Serrano de Gandía ha sido realizada teniendo en cuenta la acústica, factor muy importante ya que junto a la buena visibilidad son determinantes para que el edificio pueda ser utilizado para lo que se ha construido, es decir, para realizar obras de teatro u óperas.

No obstante, siempre se pueden mejorar algunos aspectos como el problema en la baja absorción a bajas frecuencias que puede ser remediado con la utilización de trampas para bajos.

VIII. BIBLIOGRAFIA

Apuntes de la asignatura Acústica de Salas del Máster de Ingeniería Acústica

CATT-Acoustic v8. User's Manual. (2002)

UNE-EN ISO 3382-2 (Diciembre 2008). "Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de Reverberación en recintos ordinarios".

BARRON, M. (1993), "Auditorium acoustics and architectural design". E & FN SPON.

CARRIÓN ISBERT, A. (1998), "Diseño acústico de espacios arquitectónicos".
Barcelona, Edicions UPC.

KUTTRUFF, H. (2000), "Room acoustics". Elsevier Science Publishers Ltd.

LONG, M. (2006), "Architectural acoustics". Elsevier Academic Press.

LLINARES, J.; LLOPIS, A; SANCHO, J. (1996), "Acústica arquitectónica y urbanística". Universidad Politécnica de Valencia.

RECUERO LÓPEZ, M; GIL GONZÁLEZ, C. (1993), "Acústica arquitectónica".
Benzal, Madrid.

PÁGINAS WEB

Base de datos de coeficientes de absorción sonora de distintos materiales

<<http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/4527/4456>> (24 de julio de 2014)

Coefficientes de absorción de distintos materiales

<http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_08_09/io3/public_html/Absorbentes.gif> (24 de julio de 2014)

El Teatro Serrano<<http://www.teatreserrano.com/#!el-edificio/cfrw>> (10 de julio de 2014)

Fotografías del Teatro Serrano

<http://pacoapolinar.blogspot.com.es/2008_01_01_archive.html> (11 de julio de 2014)

Fotografías antiguas del interior del Teatro Serrano

<<http://www.todocoleccion.net/gandia-valencia-teatro-serrano-interior~x27171172>> (10 de julio de 2014)

Google maps. Localización del Teatro

Serrano<<https://www.google.es/maps/@38.9653318,-0.1841598,604m/data=!3m1!1e3?hl=es>> (11 de julio de 2014)