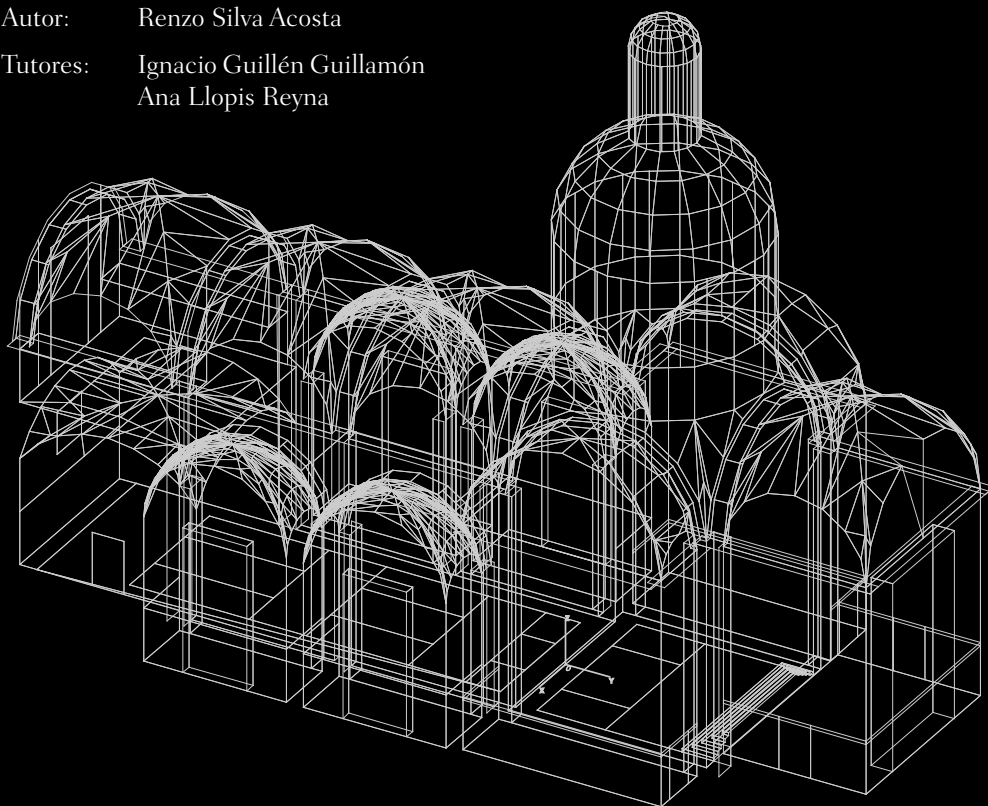


CONDICIONES ACÚSTICAS DE LA CAPILLA DE LA INMACULADA DEL REAL COLEGIO DE CORPUS CHRISTI DE VALENCIA

Autor: Renzo Silva Acosta

Tutores: Ignacio Guillén Guillamón
Ana Llopis Reyna



Grado en Fundamentos de la Arquitectura
Trabajo Final de Grado
Octubre 2018



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR
D'ARQUITECTURA

FIS-F0050

CONDICIONES ACÚSTICAS DE LA CAPILLA DE LA INMACULADA DEL REAL COLEGIO DE CORPUS CHRISTI DE VALENCIA

Autor: Renzo Silva Acosta
Tutores: Ignacio Guillén Guillamón
Ana Llopis Reyna

Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Grado en Fundamentos de la Arquitectura
Trabajo Final de Grado Curso 2018-19

Valencia, Octubre de 2018



FIS-F0050. CONDICIONES ACÚSTICAS DE LA CAPILLA DE LA INMACULADA DE REAL COLEGIO DEL CORPUS CHRISTI DE VALENCIA

Resumen

El Real Colegio Seminario de Corpus Christi de Valencia es la máxima representación arquitectónica del Renacimiento Español en Valencia. Como tal, ha sido estudiado asiduamente desde distintos aspectos arquitectónicos a lo largo de su historia, siendo este trabajo otra aportación más al conjunto de estas investigaciones.

Desde el punto de vista de sus condiciones acústicas, son tres los espacios significativos en cuanto a la funcionalidad del conjunto: la Iglesia, el Claustro y la Capilla de la Inmaculada. Este trabajo tiene por objeto la evaluación de las condiciones acústicas de este último espacio, marcando un primer paso para una evaluación acústica del conjunto del Real Colegio mediante el establecimiento de una metodología de trabajo.

Para la consecución de los objetivos se propone una metodología que consiste en el ajuste de un modelo virtual del interior del recinto basándose en la medición in situ de los parámetros acústicos. Con el modelo ajustado se procederá a una simulación acústica con la ayuda del software Odeon, evaluando así la calidad de audición en distintas condiciones de aforo aplicando la metodología del Factor de Merito establecida por Higini Arau.

Palabras clave

Real Colegio de Corpus Christi; El Patriarca; patrimonio; acondicionamiento acústico; simulación acústica.

FIS-F0050. ACOUSTICS CONDITIONS OF THE INMACULADA CHAPEL AT THE REAL SCHOOL OF CORPUS CHRISTI OF VALENCIA

Abstract

The Real School of Corpus Christi of Valencia is the most important architectonic representation of Spanish Renaissance in Valencia. That is the reason why its different architectural aspects and peculiarities have been studied assiduously along its history. Therefore, this Bachelor's thesis intends to be just another contribution to those previous studies

From an acoustical point of view, there are three relevant spaces in the building in terms of functionality: The Church, the Cloister and the Inmaculada Chapel. The aim of this thesis is to evaluate the acoustic conditions of the last one, therefore being this a first step towards setting a methodology for the acoustic assessment of the Real School.

In order to attain the goals, a virtual acoustic model of the space is created and adjusted to the real measurements of acoustic parameters. When the model is adjusted, an acoustic simulation will be carried out using the software Odeon, and the results will be evaluated to determine the audio quality under different audience conditions from implementation of the Figure of Merit created by Higiní Arau.

Keywords.

Real School of Corpus Christi; El Patriarca; heritage; acoustic conditioning; acoustic simulation.

FIS-F0050. CONDICIONS ACÚSTIQUES DE LA CAPELLA DE LA INMACULADA DEL REIAL COL·LEGI DE CORPUS CHRISTI DE VALÈNCIA

Resum

El Real Col·legi Seminari de Corpus Christi de València és la màxima representació arquitectònica del Renaixement Espanyol a València. Com a tal, ha sigut estudiat assíduament des de distints aspectes arquitectònics al llarg de la seua història, sent aquest treball una altra aportació més al conjunt d'aquestes investigacions.

Des del punt de vista de les seues condicions acústiques són tres els espais significatius quant a la funcionalitat del conjunt: l'Església, el Claustre i la Capella de la Inmaculada. Aquest treball té com a objecte l'avaluació de les condicions acústiques d'aquest últim espai, marcant un primer pas per a una avaluació acústica del conjunt del Real Col·legi per mitjà de l'establiment d'una metodologia de treball.

Per a la consecució dels objectius es proposa una metodologia que consistix en l'ajust d'un model virtual de l'interior del recinte basant-se en el mesurament in situ dels paràmetres acústics. Amb el model ajustat es procedirà a una simulació acústica amb l'ajuda del software Odeon, avaluant així la qualitat d'audició en distintes condicions d'aforament aplicant la metodologia del Factor de Merite establida per Higiní Arau.

Paraules clau.

Real Col·legi de Corpus Christi; El Patriarca; patrimoni; condicionament acústic; simulació acústica.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, con el permiso de resto de personas que han hecho posible el desarrollo de este trabajo de investigación, quisiera agradecer a Ignacio Guillén Guillamón, Profesor Titular de Univerdad, y a Ana Llopis Reyna, Catedrática de Univerdad, por haberme aconsejado, guiado y apoyado de principio a fin en la realización del presente trabajo, dirigiéndolo con eficacia y claridad.

Al Real Colegio Seminario de Corpus Christi de Valencia y a Daniel Benito Goerlich, Catedrático de Universidad de l'Universitat de València por las facilidades puestas a la hora de acceder a la realización de las mediciones acústicas en los distintos recintos.

A Pau Serrano por facilitarme las mediciones acústicas de los tres recintos involucrados en el trabajo.

A Carlos Lerma, profesor Contratado Doctor del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de l'Universitat Politècnica de València por la información arquitectónica sobre el Real Colegio a través de su Tesis Doctoral "Análisis Arquitectónico y Constructivo de Real Colegio de Corpus Chisti de Valencia.

En el ámbito personal, quisiera agradecer a mi familia por su preocupación, su afecto y su apoyo a lo largo de mi vida.

A las viejas y nuevas amistades que se han preocupado e interesado por mi bienestar y mis estudios, apoyándome y aconsejándome en muchos aspectos de mi vida.

Y, por su puesto, a mis compañeros y amigos de profesión, aquellos que desde el inicio de mi vida universitaria han formado parte de mi vida, me han apoyado en mis decisiones y me han acompañado en estos inolvidables años universitarios.

Gracias a todos.

Renzo Silva Acosta

Octubre de 2018

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Agradecimientos	5
Introducción	9
Objetivos de estudio	10
Metodología	10
Capítulo I. El Real Colegio Seminario de Corpus Christi	11
El conjunto del Real Colegio	12
Iglesia	12
Claustro	14
Capilla de la Inmaculada	15
Capítulo II. Los parámetros acústicos	17
Factor de mérito	17
Los parámetros temporales	18
Los parámetros energéticos	22
Capítulo III. Técnicas de simulación acústica	25
Método del trazado de rayos.	26
Método de la fuente imagen	27
Método híbrido	28
Capítulo IV. La acústica de la Capilla de la Inmaculada	31
Medidas acústicas in situ	31
Modelización y ajuste del modelo geométrico	33
Características técnicas de la simulación	36
Modelos de simulación	39

Capítulo V. Simulación y resultados	43
Caso 1: Ausencia de tapices, aforo medio lleno sin músicos	44
Caso 2: Ausencia de tapices, aforo lleno sin músicos	47
Caso 3: Ausencia de tapices, aforo medio lleno con músicos	50
Caso 4: Ausencia de tapices, aforo lleno con músicos	53
Caso 5: Presencia de tapices, aforo medio lleno sin músicos	56
Caso 6: Presencia de tapices, aforo lleno sin músicos	59
Caso 7: Presencia de tapices, aforo medio lleno con músicos	62
Caso 8: Presencia de tapices, aforo lleno con músicos	65
Capítulo VI. Análisis y conclusiones	69
Resumen de resultados	69
Conclusiones	70
Aportaciones	72
Bibliografía	74
Derechos y autoría de imágenes	76

INTRODUCCIÓN

En la sociedad occidental la religión ha jugado un papel importante en el desarrollo de las distintas culturas, pues su influencia en las costumbres y tradiciones de los ciudadanos llevó a una evolución y organización propia de cada cultura. Es evidente reconocer también la influencia de la religión en la arquitectura. La evolución de los edificios de culto ha marcado el desarrollo de una etapa de la historia de la arquitectura y, en aspectos generales, éstos han presentado una mayor relevancia frente a otras arquitecturas.

Este desarrollo histórico de los edificios eclesiales se ha caracterizado por su evolución arquitectónica y artística, dejando al margen el carácter funcional de estos edificios. Si se atiende al concepto de edificio de culto, entendido como un sitio de reunión, donde un grupo de adeptos se encuentran para escuchar las palabras del celebrante, la inteligibilidad de la palabra debió ser un aspecto prioritario a la hora de construir estas arquitecturas y no ser un mero resultado de los cambios de los diseños arquitectónicos de estos edificios.

La construcción de grandes iglesias en algunos casos dio como resultado la imposibilidad de poder dar discursos dentro de estos edificios. Esto obligó en algunas iglesias a abandonar el discurso mediante la palabra para dar paso a un discurso mediante la música litúrgica que permitía aprovechar mejor las propiedades acústicas de estos edificios¹. En lugar de adaptar la arquitectura a las necesidades de los ocupantes, se buscó la forma de adaptarse a las propiedades del edificio.

Resulta difícil pensar que, dejando las condiciones acústicas de los edificios eclesiales en un segundo plano, desde el odeón griego hasta el auditorio contemporáneo, la iglesia fue destinada a ser el espacio donde nace y se acoge, temporalmente, a la música, siendo durante muchos siglos el lugar concebido para su interpretación y su escucha².

La rehabilitación de los edificios patrimoniales a manos de las administraciones públicas con el fin de dotarlas de un nuevo uso, ya sea teatral o musical, ha puesto de manifiesto los problemas acústicos en las iglesias en toda su amplitud, produciendo un gran número de fracasos funcionales en sus intervenciones y obteniendo resultados claramente deficientes.³

¹ Lubman D.; Kiser B.; (2001) The history of western civilization told through the acoustic of its worship spaces. 17th International Congresses on Acoustics, Roma.

² Navarro J.; Sendra J. J.; (1996) La iglesia como lugar de la música. Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Madrid, pp. 381-387.

³ Sendra J. J.; Navarro J.; (1998) La evolución de las condiciones acústicas en las iglesias: del paleocristiano al tardobarroco. Instituto de Ciencias de la Construcción. Universidad de Sevilla.

OBJETIVOS DE ESTUDIO

El presente trabajo tiene dos objetivos principales; por una parte analizar la influencia del aforo en las condiciones acústicas de la Capilla de la Inmaculada del Real Colegio de Corpus Christi de Valencia, y por otra parte comprobar la idoneidad del recinto para la ejecución de una función alternativa a la de culto, específicamente a la de música de cámara.

El trabajo sigue una estructura instructiva de tal forma que, una vez finalizada su lectura, el lector sea capaz de comprender cómo se evalúa la acústica de salas y el proceso de simulación acústica de edificios patrimoniales.

METODOLOGÍA

El proceso para llegar a alcanzar dichos objetivos, analizar los resultados y llegar a establecer unas determinadas conclusiones pasa por 4 etapas;

- Creación de un modelo tridimensional acorde con la forma real del recinto.
- Obtención de un modelo de simulación con propiedades acústicas similares a las reales.
- Obtención de parámetros acústicos simulando distintos niveles de ocupación del recinto.
- Análisis de los parámetros acústicos obtenidos en las simulaciones.

Capítulo I

REAL COLEGIO SEMINARIO DE CORPUS CHRISTI

El Real Colegio Seminario de Corpus Christi de Valencia, también llamado Colegio del Patriarca, fue fundado en 1583 por San Juan de Ribera, nombrado obispo de Badajoz en 1562, Patriarca de Antioquia en 1568 y, posteriormente, arzobispo de Valencia en 1569. La creación del Real Colegio Seminario coincide con la renovación de la Iglesia Católica promovida por el Concilio de Trento (1545-1563). San Juan de Ribera, fuerte seguidor de las nuevas doctrinas establecidas por la Contrarreforma, consolida el Real Colegio con los ideales, los dictados religiosos y artísticos extraídos del Concilio de Trento.

Se considera uno de los monumentos más representativos de las pautas religiosas y arquitectónicas que gravitan en el medio valenciano de finales del siglo XVI y principios del siglo XVII⁴, siendo declarado Monumento histórico artístico nacional en 1962 y Bien de interés cultural en 2007 en la categoría de Monumento Histórico. Sin embargo, su declaración como Monumento no es debido a su importancia arquitectónica, sino que se debe al hecho de albergar el Museo del Patriarca, donde se exhibe la colección conservada de San Juan de Rivera⁵.

El Colegio del Patriarca hace suyo el lenguaje italianizante de los tratados de arquitectura como los de Serlio, Vignola o Palladio, por lo que resulta de gran interés en el contexto de la arquitectura renacentista valenciana y española⁶.



Figura 1: Exterior del Real Colegio Seminario del Corpus Christi

⁴ Bérchez J.; Gómez-Ferrer M., (1996) El Real Colegio del Corpus Christi o del Patriarca: Valencia, Generalitat Valenciana, Valencia.

⁵ Bérchez J. (1995) Monumentos de la Comunidad Valenciana : Catálogo de monumentos y conjuntos declarados e incoados. Tomo X, Valencia, arquitectura religiosa. Conselleria de Cultura, Educació i Ciència, Valencia

⁶ Merlo J. L., (2010) El Patriarca (Real Colegio del Corpus Christi), pp. 57. En: Taberner F.; Alcalde C.; Guía de arquitectura de Valencia, Colegio Territorial de Arquitectos de Valencia.

EL CONJUNTO DEL REAL COLEGIO SEMINARIO

El Colegio del Patriarca se levanta sobre una manzana completa de forma trapezoidal ubicada en el centro de Valencia, presentando una arquitectura unitaria y austera. Su fachada de mampostería se ve interrumpidas por pequeñas ventanas que parecen abrirse por meros hechos funcionales más que compositivos. En la fachada principal recaen dos portadas donde se implanta un acceso de doble zaguán separando así las distintas funciones de culto y enseñanza con dos accesos distintos, evitando interrupciones entre ambas. La portada izquierda, la más ornamentada dentro de la sobriedad de la fachada, lleva al zaguán que da paso a la iglesia del colegio, mientras que la portada de la derecha lleva al otro zaguán que da paso a tanto a la Capilla del Monumento y al Claustro, siendo el acceso al Real Colegio. Posee, además, un acceso trasero que da servicio a la zona más doméstica del Real Colegio y la, que giran alrededor de un patio.

LA IGLESIA

La construcción de la iglesia del Patriarca comienza en 1590, momento en que aun no se contaba con todo el terreno previsto para el Real Colegio; es por ello que su ubicación es tangente a la calle de la Cruz Nueva, al lado oeste del solar⁷. Se propone la implantación de una planta en cruz latina de una única nave, con capillas laterales, una cabecera recta y una cúpula en la intersección de los brazos del crucero. A los pies de la nave se genera un recinto elevado donde se traslada el coro.



Figura 2: Iglesia del Real Colegio de Corpus Christi

⁷Benito F., (1981) La arquitectura del Colegio del Patriarca y sus artífices. Valencia: Federico Domenech

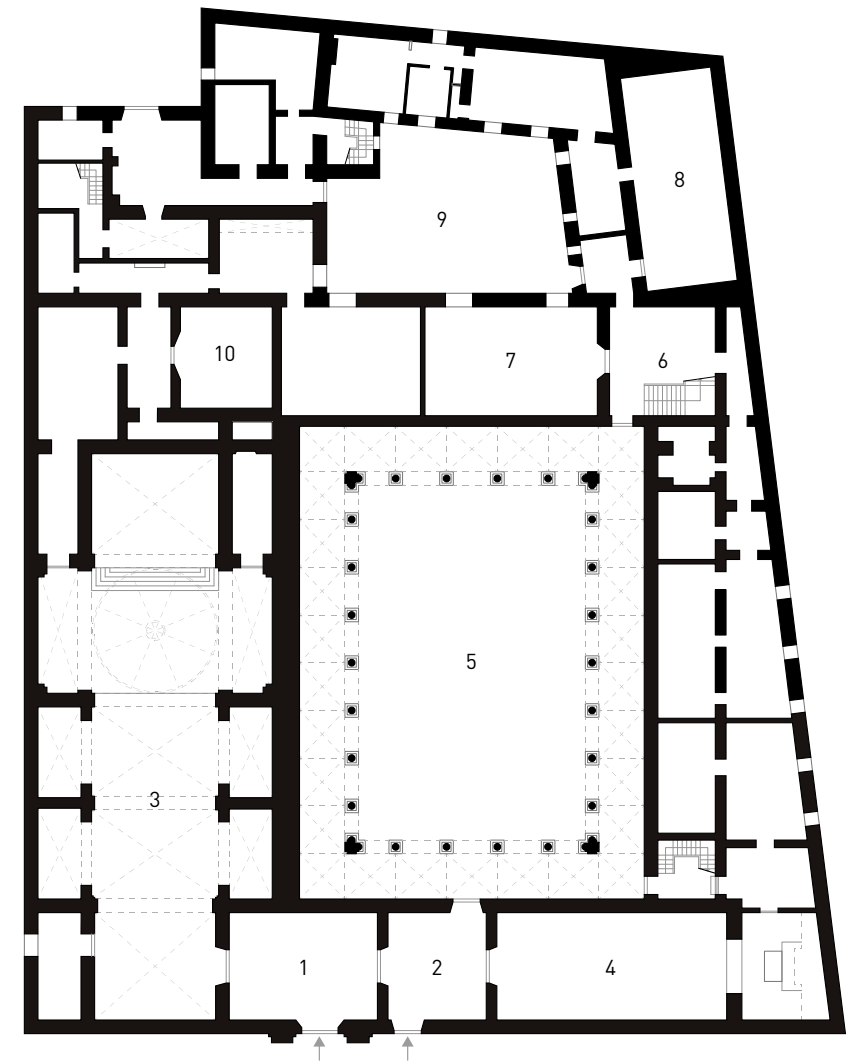


Figura 3: Planta del Real Colegio Seminario del Corpus Christi de Valencia

- | | |
|-----------------------------|----------------------|
| 1. Atrio | 6. Escalera mayor |
| 2. Zaguán | 7. Aula |
| 3. Iglesia | 8. Reflectorio |
| 4. Capilla de la Inmaculada | 9. Patio de servicio |
| 5. Claustro | 10. Relicario |

CLAUSTRO DEL REAL COLEGIO

El claustro del Real Colegio Seminario de Corpus Christi, uno de los más importantes del renacimiento español, ha sido considerado la obra más acabada del clasicismo renacentista valenciano: el punto de llegada del proceso de asimilación formal del nuevo lenguaje en unas tierras con una rica herencia constructiva medieval⁸.

Compuesto por una planta rectangular, dispone de dos niveles de galerías resueltas con bóvedas de arista. El acceso a la galería superior se realiza a través de la escalera principal ubicada tras la puerta en el extremo opuesto al acceso desde el zaguán de acceso al claustro.

El claustro se cierra en torno a pórticos generados por arcos de medio punto en los dos niveles de galerías. Las columnas que sostienen los arcos presentan distintos ordenes en los dos niveles del claustro. En la planta inferior presentan un orden dórico, descansando a su vez sobre plintos, mientras que en la planta superior las columnas presentan un orden jónico.

Alrededor del claustro se organizan los espacios oficiales del Real Colegio como la sala de estudio, el archivo, administración, etc.; excepto por el lado oeste donde se encuentra la iglesia, que no tiene conexión con el claustro. Se puede apreciar una estatua del Patriarca San Juan de Ribera en el centro del claustro presidiendo así el conjunto.



Figura 4: El Claustro del Real Colegio de Corpus Christi

⁸ Llopis J, (2007) El claustro del Colegio de Corpus Christi de Valencia. Análisis formal y compositivo. Archivo Español de Arte, Vol 80, nº 317.

CAPILLA DE LA INMACULADA

Este recinto independiente del resto de espacio se sitúa en la parte sur del Real Colegio. Se accede desde el zaguán del acceso derecho que da también acceso al Claustro.

Presenta una planta rectangular cubierta por una bóveda de cañón rebajada, ejecutada con técnica tabicada de ladrillo, decorada con pinturas al fresco. La continuidad de la bóveda se ve interrumpida por la presencia de pequeños lunetos en ambos laterales de la capilla. La capilla no cuenta con suficiente iluminación natural debido a que los lunetos que dan al Claustro están cerrados, siendo las orientadas al sur las únicas que aportan luz.

Los muros laterales disponen de un alto zócalo cubierto de azulejos, y sobre los muros se encuentran cuatro tapices flamencos herencia del padre de Juan de Ribera. El suelo es de mármol y el mobiliario de la nave consta de bancos de madera y cuatro sofás tapizados cerca del altar. El presbiterio de la capilla se encuentra elevada respecto de la nave, enmarcado por un arco de medio punto recubierto con retablos de madera y, a diferencia de la nave, se cubre con una bóveda nervada.

El altar es precedido por una Inmaculada, imagen que le da nombre a la capilla, aunque también es conocida como Capilla del Monumento debido a que alberga el monumento eucarístico en las celebraciones de Jueves y Viernes Santo.



Figura 5: Capilla de la Inmaculada

Capítulo II

LOS PARÁMETROS ACÚSTICOS

La acústica arquitectónica ha experimentado, y sigue experimentando, un número significativo de cambios en busca de mejor definición de los parámetros que ayuden a determinar la calidad acústica de salas, y aunque estos parámetros ven su origen con las investigaciones en relación con los auditorios o salas de conciertos, la mayoría puede extenderse a la cualificación de otro tipo de espacios.

Para determinar la calidad acústica de un espacio se considera un gran número de variantes (volumen, superficies, forma del recinto, coeficientes acústicos de los materiales, etc.), que determinan los valores cuantitativos de los parámetros. Sin embargo, otro estudio del que se encarga la acústica arquitectónica es la percepción humana de estos valores, dando un aspecto subjetivo a la hora de medir la calidad acústica de una sala.

Esta dualidad en el estudio de la calidad sonora de los recinto conlleva a la clasificación los valores de los parámetros acústicos obtenidos mediante procesos científicos a través de procesos completamente empíricos, determinando los valores óptimos mediante las preferencias subjetivas de los espectadores con el objetivo de la búsqueda de la perfecta correspondencia entre los valores objetivos y subjetivos⁹.

Este capítulo pretende recopilar la información de los parámetros acústicos¹⁰ considerados para determinar la calidad acústica del recinto objeto de estudio. Recordando que el objetivo es analizar la calidad de la sala para el caso de música de cámara, se considerarán los parámetros temporales y los energéticos, dejando los de inteligibilidad al margen puesto que hacen mayor referencia a la calidad de los espacios para la palabra y no para la música.

FACTOR DE MÉRITO

El factor de mérito (FM) es un método de criterio de los parámetros acústicos que se tienen en cuenta para determinar la calidad acústica de un recinto.

Según Arau, los valores de los parámetros acústicos pueden clasificarse en un intervalo de valores comprendidos entre 0 y 1. Si el valor de un parámetro acústico equivale a un factor de mérito de 1, eso significa que el valor de parámetro es excelente y aporta beneficios en la calidad acústica del recinto. Por el contrario, si el valor de un parámetro acústico equivale a un factor de mérito de 0, dicho parámetro está fuera de los valores recomendados y perjudica a la calidad acústica del recinto.

El factor de mérito global será la media aritmética de los factores de mérito de los parámetros considerados para la valoración acústica del recinto.

⁹ Gimenez A.; Marín A.; Sanchis A.; Romero J.; Cerdá S.; Jorge M. D.; (2001) Estudio de la evolución de parámetros acústicos que miden la calidad de salas de conciertos. 32ª TecniAcustica, Logroño.

¹⁰ Arau H., (1958) ABC de la Acústica Arquitectónica, Barcelona, CEAC, pp. 260-267

LOS PARÁMETROS TEMPORALES

Ciertos parámetros van relación con la reverberación, es decir, la persistencia de un sonido dentro de un recinto una vez cesada su emisión. Dependiendo de las reflexiones que sufre el sonido en las superficies internas del recinto, esta persistencia del sonido puede ser mayor o menor y durante gran parte del siglo XX fue fundamental para el diseño y la calificación acústica de los recintos arquitectónicos.

TIEMPO DE REVERBERACIÓN

Para poder cuantificar esta característica de la acústica se define el concepto de tiempo de reverberación (Tr), que, de acuerdo con Sabine¹¹, es el tiempo que transcurre para que el nivel de presión sonora decaiga 60 dB una vez la fuente haya dejado de emitir el sonido.

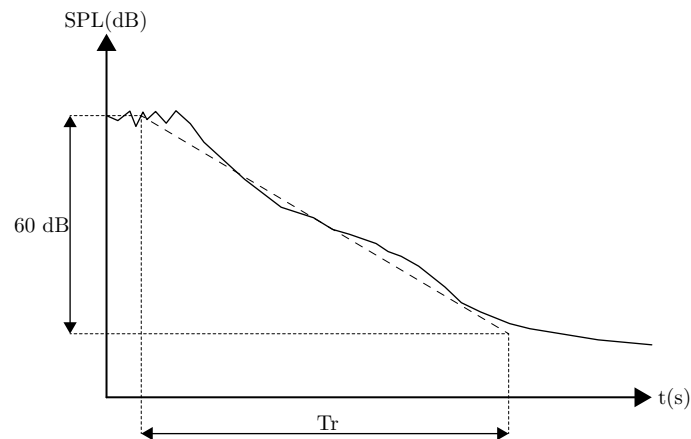


Figura 6: Representación gráfica del tiempo de reverberación

Esta pérdida del nivel de presión sonora viene determinada substancialmente por las características geométricas del recinto y por las propiedades acústicas de los materiales que lo conforman, pues cuanto más absorbentes sean los paramentos interiores del recinto, menores serán los valores de Tr ; en cambio, cuanto mayor sea el volumen del recinto, mayores serán los valores de Tr .

Aunque el tiempo de reverberación se defina como el tiempo en que el nivel de presión sonora caiga 60 dB, en la práctica se suele utilizar el parámetro T_{30} . Esto es debido a que sus valores guarda una gran similitud con el T_{60} y permite una mayor facilidad a la hora de calcular la acústica de un recinto, puesto que es más fácil simular una caída de 30 dB sobre el ruido de fondo que simular una caída de 60 dB.

¹¹ Sabine W. C., (1900) Architectural Acoustics. Am. Arch. Building news, 68.

El tiempo de reverberación varía dependiendo de la frecuencia de referencia, y estos valores pueden representarse de forma gráfica en la llamada curva tonal.

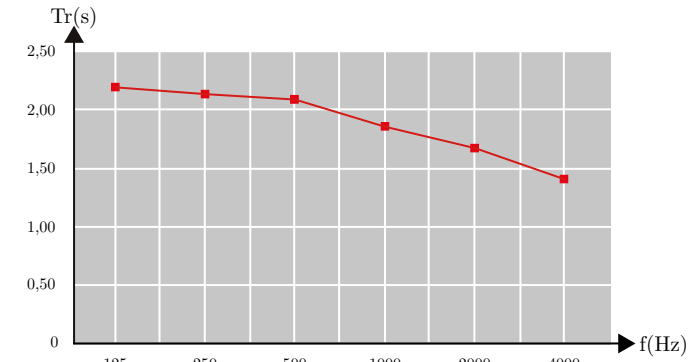


Figura 7: Curva tonal

Sin embargo, es habitual la utilización del tiempo de reverberación medio Tr_{mid} obtenido mediante la media aritmética de los tiempos de reverberación correspondientes a las bandas de frecuencias medias de 500 Hz y 1 kHz. Para poder determinar si el tiempo de reverberación de un recinto es el adecuado para llevar a cabo la función prevista es necesario conocer el tiempo de reverberación óptimo (Tr_{opt}) para dicho recinto, que va en función del volumen y de la actividad de uso del recinto. En el caso de recintos destinados para conciertos obtenemos como valores óptimos:

$$Tr_{\text{óptimo}} \text{ mínimo} = 0,4245 V^{0,1331}$$

$$Tr_{\text{óptimo}} \text{ máximo} = 0,6 V^{0,0325}$$

El tiempo de reverberación óptimo medio (Tr_{opt}) para el caso de la Capilla de la Inmaculada, cuyo volumen es 990 m³ aproximadamente, será de 0,91 segundos.

Según Arau, el factor de mérito correspondiente al tiempo de reverberación es el siguiente:

$$FM_{Tr_{mid}} = \begin{cases} 0 & \text{para } Tr_{mid} \leq 0,9Tr_{opt} - 0,5 \\ 1 - (1,8Tr_{opt} - 2Tr_{mid}) & \text{para } 0,9Tr_{opt} - 0,5 < Tr_{mid} < 0,9Tr_{opt} \\ 1 & \text{para } 0,9Tr_{opt} \leq Tr_{mid} \leq Tr_{opt} \\ 1 - 2(Tr_{mid} - Tr_{opt}) & \text{para } Tr_{opt} < Tr_{mid} < Tr_{opt} + 0,5 \\ 0 & \text{para } Tr_{mid} \geq Tr_{opt} + 0,5 \end{cases}$$

CALIDEZ

La calidez acústica (BR) hace referencia a la respuesta del recinto frente a frecuencias bajas. Cuando se dice que una sala es cálida se hace referencia a que hay una mayor riqueza de los sonidos graves debido a que hay una mayor reverberación de éstos, reforzándolos y amplificándolos, dando una sensación de suavidad y melosidad de la música en el recinto.

De forma analítica, el valor numérico de la calidez acústica se define como el cociente de los tiempos de reverberación de las frecuencias bajas (125 Hz y 250 Hz) y las frecuencias medias (500 Hz y 1 kHz).

$$BR = \frac{Tr_{(125Hz)} + Tr_{(250Hz)}}{Tr_{(500Hz)} + Tr_{(1kHz)}}$$

Según Arau, el factor de mérito para la calidez varía en función de la actividad que se va a realizar, siendo distinto para teatro y música. En este caso solo se cogerá de referencia el factor de mérito para la música.

$$FM_{Calidez-música} = \begin{cases} 0 & \text{para } BR \leq 0,85 \\ 4BR - 3,4 & \text{para } 0,85 < BR < 1,1 \\ 1 & \text{para } 1,1 < BR \leq 1,3 \\ 6,2 - 4BR & \text{para } 1,3 < BR < 1,55 \\ 0 & \text{para } BR \geq 1,55 \end{cases}$$

BRILLO

El brillo (Br) acústico, en cambio, hace referencia a la respuesta que un recinto presenta ante frecuencias altas. Cuando se dice que un recinto es brillante se refiere a que hay una mayor percepción de los sonidos agudos frente a los graves, dando así un sonido más claro y rico en armónicos.

De forma analítica, el valor numérico del brillo acústica se define como el cociente de los valores de los tiempos de reverberación de las frecuencias altas (2 kHz y 4 kHz) y las frecuencias medias (500 Hz y 1 kHz).

$$Br = \frac{Tr_{(2kHz)} + Tr_{(4kHz)}}{Tr_{(500Hz)} + Tr_{(1kHz)}}$$

Según Arau, para el brillo solo se aplica un factor de mérito, sirviendo tanto como para música como para teatro.

$$FM_{Brillo} = \begin{cases} 0 & \text{para } Br \leq 0,45 \\ 2,86Br - 1,29 & \text{para } 0,45 < Br < 0,8 \\ 1 & \text{para } 0,8 < Br \leq 1 \\ 3,857 - 2,86Br & \text{para } 1 \leq Br \leq 1,35 \\ 0 & \text{para } Br > 1,35 \end{cases}$$

EARLY DECAY TIME

El tiempo de caída inicial (EDT) se define como el tiempo que transcurre desde el cese de la emisión sonora de la fuente hasta el momento en que el nivel de la presión sonora disminuye 60 dB, calculado según la pendiente correspondiente a los primeros 10 dB de caída (puede definirse como 6 veces el tiempo que tarda en caer los primeros 10 dB)

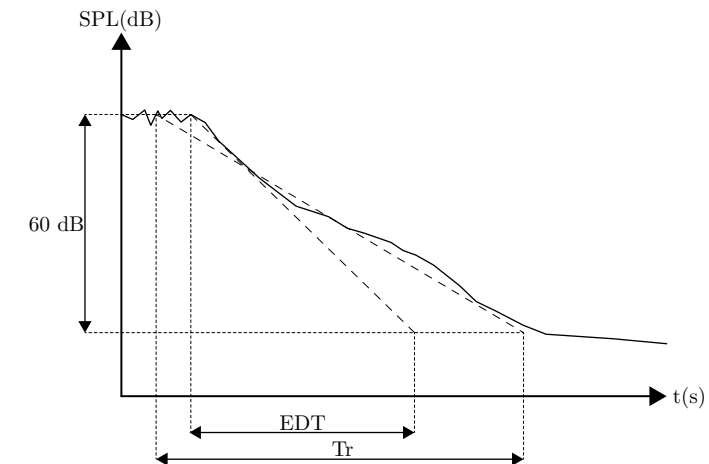


Figura 8: Representación gráfica del Tr y EDT

En el caso de una geometría regular y una distribución homogénea de los materiales, se produciría una difusión uniforme del sonido, lo que daría como consecuencia una caída de la presión sonora lineal, de forma que no existiría diferencia entre los valores EDT y Tr. Sin embargo, lo más normal es encontrar una difusión no uniforme debida a una distribución no uniforme de la absorción, dando lugar a diferentes valores para los dos parámetros.

Los valores de EDT son, por lo general, menores que los del Tr, y están más relaciones con las primeras reflexiones en el recinto, por lo que proporciona una impresión más subjetiva de la reverberación que el Tr¹².

Son valores relacionados entre sí, por lo que su relación aporta información en cuanto a la percepción del sonido. Unos valores de EDT considerablemente bajos respecto al Tr darán como resultado un sonido más apagado para la música, pero, por otro lado, más inteligible para la palabra¹³.

Para la valoración del Early Decay Time hace falta conocer su relación con el tiempo de reverberación (Tr_{mid}) y también conocer la función del recinto de análisis. Según Arau, el factor de mérito correspondiente para EDT en el caso de conciertos es el siguiente:

$$FM_{EDT-CONCIERTO} = \begin{cases} 0 & \text{para } EDT_{mid} \leq 0,4Tr_{mid} \\ 2(EDT_{mid}/Tr_{mid}) & \text{para } 0,4Tr_{mid} < EDT_{mid} < 0,9Tr_{mid} \\ 1 & \text{para } 0,9Tr_{mid} \leq EDT_{mid} \leq Tr_{mid} \\ EDT_{mid}/Tr_{mid} & \text{para } EDT_{mid} > Tr_{mid} \end{cases}$$

PARÁMETROS ENERGÉTICOS

Existen otros parámetros relacionando con la intensidad relativa del sonido receptado y con la distinción de los sonidos individuales de una emisión simultánea. Estos parámetros se basan en una relación energética (en una razón de energía inicial y final), asociándose así con la respuesta subjetiva de los oyentes a la hora de calificar distintos aspectos de la acústica de un recinto.

CLARIDAD

Según Cremer, la claridad musical (C₈₀) se define como la relación logarítmica entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo y la primera reflexión respecto a la energía de las reflexiones tardías a partir de los primeros 80 ms, calculada en bandas de frecuencias de octava entre 125 Hz y 4 kHz.

Un valor elevado significa que la energía sonora inicial es muy superior a la tardía y, por tanto, se producirán muchas más reflexiones tempranas provenientes de paramentos o techos próximos al oyente, proporcionando así un sonido muy claro.

Se mide en decibelios y los valores recomendados dependen del tipo de música, pues para salas de conciertos, salas de ópera o salas de teatro los valores deseados pueden variar.

¹² Barron M.,(1995) Interpretation of early times in concert auditoria. Acustica, 81, pp. 320-331.

¹³ Gade A. C. (1989) Acoustical survey of eleven european concert halls: a basis for discussion of hall in Denmark. Acoustics Laboratory, Technical University of Denmark, Report N° 44.

Según Arau, su factor de mérito dependerá si el recinto está destinado para conciertos, ópera o teatro. En nuestro caso se utilizará el factor de mérito destinado a conciertos para la evaluación de C₈₀.

$$FM_{C_{80}-Conciertos} = \begin{cases} 0 & \text{para } C_{80} \leq -9 \\ 1,62 + 0,18C_{80} & \text{para } -9 < C_{80} \leq -4 \\ 1,10 + 0,05C_{80} & \text{para } -4 < C_{80} \leq -2 \\ 1 & \text{para } -2 < C_{80} \leq 4 \\ 1,6 - 0,16C_{80} & \text{para } 4 < C_{80} \leq 10 \\ 0 & \text{para } C_{80} \geq 10 \end{cases}$$

DEFINICIÓN

Según Thiele, la definición (D₅₀) es la relación entre la energía que llega al oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo y las primeras reflexiones) y la energía total recibida. Se calcula en bandas de frecuencia entre 125 Hz y 4 kHz y puesto que se trata de una relación entre energías, se puede expresado en porcentaje o en valor adimensional.

Cuanto mayor sea su valor, mejor será la inteligibilidad de la palabra y la sonoridad en el punto considerado. Por el contrario, un valor bajo implicaría falta de nitidez en la voz, que suele asociarse a tiempos de reverberación elevados.

Su valor puede variar de forma considerable en función de la posición dentro del recinto, por lo que a la hora de diseñar una sala se debe optar por una solución que de la máxima invariabilidad posible de este parámetro.

Su factor de mérito dependerá si el recinto está destinado para conciertos, ópera o teatro. En nuestro caso se utilizará el factor de mérito destinado a conciertos para la evaluación de D₅₀.

$$FM_{D_{50}-Conciertos} = \begin{cases} D_{50}/0,45 & \text{para } D_{50} \leq 0,45 \\ 1 & \text{para } 0,45 < D_{50} \leq 0,6 \\ 2,2 - 2D_{50} & \text{para } D_{50} > 0,6 \end{cases}$$

Capítulo III

TÉCNICAS DE SIMULACIÓN ACÚSTICA

Los modelos computacionales¹⁴, a lo largo de décadas, han alcanzado niveles de desarrollo lo suficientemente satisfactorios como para poder estar más cerca de la previsión y estudio de recintos acústicos. Esto es debido a las mejoras en la velocidad de cálculo que se ha conseguido a nivel informático y también al desarrollo de nuevos métodos de análisis. Sin embargo, todavía no se puede hablar de un nivel de precisión total.

Los modelos que simulan un comportamiento del sonido como ondas sonoras se caracterizan por crear resultados muy precisos para frecuencias concretas, lo suficiente como para ser usados para los recintos arquitectónicos, donde se requieren resultados en bandas de octavas. Sin embargo, las limitaciones de este tipo de modelo redujeron su utilización a recintos pequeños y solo para frecuencias bajas.

La alternativa a los modelos de ondas sonoras es la modelización la propagación del sonido asociándola al movimiento de partículas viajando a la velocidad del sonido a lo largo de rayos sonoros, aplicando en estos modelos las leyes de la óptica geométrica. Estos modelos geométricos son adecuados para sonidos en altas frecuencias y para recintos grandes.

Los modelos geométricos tienden a necesitar altos ordenes de reflexión, por lo cual, para evitar problemas en cuanto a la velocidad de cálculo, los modelos puramente geométricos deben limitarse a bajos ordenes de reflexión, introduciendo posteriormente algún método estadístico para modelar ordenes de reflexión más altos.

Sin embargo, aunque dan resultados mucho más precisos que los obtenidos mediante modelos de ondas sonoras, estos resultados siguen sin ser del todo satisfactorios debido a la pérdida del carácter ondulatorio del sonido. Una forma de introducir ondas de sonido en los modelos geométricos es a través de la asignación de coeficientes de dispersión en cada una de las superficies del recinto. De esta forma la reflexión desde una superficie puede ser modificada desde un comportamiento puramente especular a un comportamiento más o menos difuso, lo cual es esencial para el desarrollo de los modelos computacionales para obtener resultados fiables.

Existen dos modelos métodos geométricos destacados llamados el Método de Trazados de Rayos y el Método de la Fuente Imagen.

¹⁴ Rindel J. H., (2000) The use of computer modeling in room acoustics. Journal of Vibroengineering N°3(4), pp. 219-224.

MÉTODO DEL TRAZADO DE RAYOS

Este método se basa en la emisión de un número elevado de rayos sonoros omnidireccionales desde un punto del recinto que actúa como fuente, haciendo un seguimiento de su recorrido.

Se hace un seguimiento de estos rayos a lo largo del recinto, los cuales van perdiendo energía a medida que van colisionando con los paramentos del recinto. En cada reflexión generada, el decrecimiento energético de los rayos sonoros va acorde con el coeficiente de absorción de las superficies donde se llevan a cabo las reflexiones.

Las reflexiones generadas provocan un cambio de dirección de los rayos sonoros. Estas reflexiones seguirán los criterios de la geometría óptica establecidas por la ley de Snell, considerándolas reflexiones especulares.

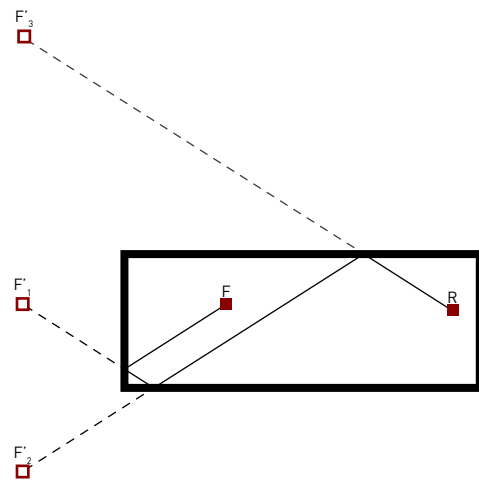


Figura 9: Reflexiones de 1^{er}, 2^{do} y 3^{er} orden y sus imágenes

A la hora de obtener los cálculos correspondientes a un punto receptor, se le asignará un volumen, siendo normalmente una esfera de radio determinado. El número de rayos que atraviesan este volumen y la energía asociada a ellos dará lugar al nivel de presión sonora en un punto receptor correspondientes a las bandas de frecuencia de interés.

Este método se fue desarrollando y los rayos pasaron a ser conos circulares¹⁵. A estos conos se les asocia una función de densidad especial de tal forma que el solapamiento con los conos vecinos no genere que la energía de frente de onda no sea mayor que la emitida por la fuente¹⁶.

¹⁵ Kulowski A., (1985) Algorithmic representation of the ray tracing technique. Applied Acoustics 18, pp. 449-469.

¹⁶ Vian J. P.; van Maercke D, (1986) Calculation of the room impulse response using a ray-tracing method. Proceeding of the ICA symposium on acoustic and theatre planning for the performing arts, Canada, pp. 74-78.

Siendo aún difícil obtener una razonable precisión con esta técnica, el avance en este método ha llevado a la sustitución de los conos por prismas de base triangular¹⁷, de esta forma se consigue recubrir el frente de onda esférico solucionando el problema de la superposición de los conos.

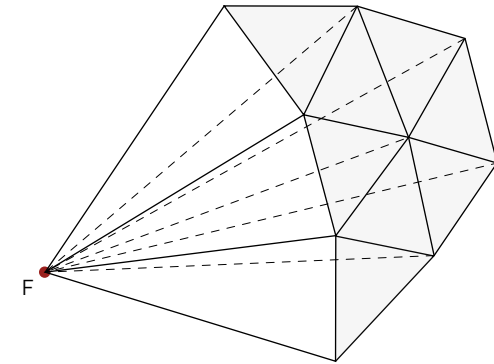


Figura 10: Trazado de rayos de prismas de base triangular

Este método tiene el inconveniente de que posibles falsas reflexiones puedan ser recolectadas en los datos, además de que otras posibles reflexiones no se detecten. Esto da como consecuencia un elevado número de rayos sonoros para la obtención de resultados más precisos, lo que conlleva a un aumento considerable del tiempo de cálculo computarizado, debido a que tiene que evaluar el recorrido de cada rayo sonoro en cada banda de frecuencia.

MÉTODO DE LA FUENTE IMAGEN

El método se basa en el principio de que una reflexión especular puede ser construida geoméricamente a través de la imagen de la fuente generada respecto al plano de la superficie reflejante.

En un recinto paralelepédico es muy simple construir todas las fuentes imagen hasta cierto orden de reflexión, siendo de esta forma un método muy preciso¹⁸. Sin embargo, el caso de un recinto con una geometría más compleja daría lugar a un incremento de las fuentes imagen, dando como resultado un modelado poco cómodo para el cálculo.

¹⁷ Lewers T., (1993) A combined beam tracing and radiant exchange computer model of room acoustic. Applied Acoustics 38, pp. 161-178.

¹⁸ Allen J. B.; Berkley D. A., (1979) Image method for efficiently simulating small-room acoustics. The Journal of the Acoustical Society of America 65, pp. 943-950.

Poniendo de ejemplo el caso de un recinto delimitado por n superficies, todas ellas visibles desde la fuente, elaborando el árbol de reflexiones hasta considerar las de orden i , se puede hallar el número total de reflexiones de orden menor o igual a i ¹⁹.

$$N(i) = n \frac{(n-1)^i - 1}{n-2}$$

Se puede apreciar que el incremento del orden de reflexión aumenta de forma exponencial el número de fuentes imagen. En el caso de un recinto delimitado por 10 superficies, considerando un orden de reflexión de 3, da como resultado 910 fuentes imagen. Sin embargo, aumentado el orden de reflexión a 5, aumenta hasta 73810 el número de fuentes imagen a considerar.

Además, en las situaciones de geometrías complejas puede darse el caso de que no todas las fuentes imagen sean visibles para todos los receptores, es decir, los rayos que genera una fuente imagen solo serán receptados dentro de la pirámide generada por la fuente imagen como vértice y cuyas aristas pasan por los vértices de la superficie que la ha generado.

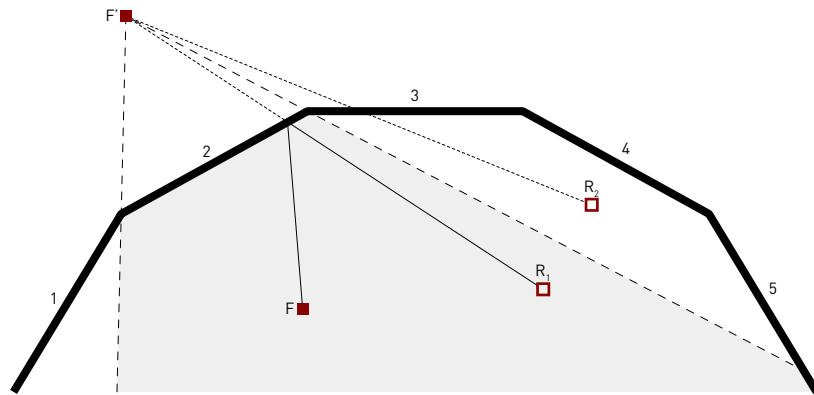


Figura 11: Test de visibilidad: La energía de F' generada por la superficie 2 llegará a R_1 pero no a R_2

La necesidad de un orden de reflexión elevado para una mayor precisión de los resultados añadido a la necesidad de determinar qué receptores captan la energía de cada fuente imagen generada aumenta considerablemente el tiempo de cálculo, siendo este método aplicable solo en recintos geoméricamente simples.

¹⁹ Galindo M., (2003) La Acústica en Espacios Religiosos Católicos: Iglesias Gótico-Mudéjares. Tesis doctoral, Universidad de Sevilla.

MÉTODO HÍBRIDO

Los inconvenientes del método del trazado de rayos y el método de la fuente imagen llevó a la creación de un método híbrido que tuviere las mejores características de cada uno y limitar la incidencia de sus inconvenientes.

El primer algoritmo de este tipo fue presentado en 1989²¹, y se basa en la idea de encontrar fuentes imagen con una gran probabilidad de ser validas mediante el trazado de rayos desde la fuente y registrar las superficies en las que éstas colisionan. Las secuencias de reflexiones generadas luego pasan por la denominada prueba de visibilidad, que se lleva a cabo con un estudio a la inversa trazando rayos desde el receptor hacia la fuente imagen, la cual generará una secuencia inversa a la anterior. Es normal que más de un rayo siga la misma secuencia de superficies y genere las mismas imágenes válidas, por lo que es necesario asegurar que cada fuente imagen valida detectada sea aceptada solo una vez, pues de lo contrario se detectarían reflexiones duplicadas generando errores en la simulación. Por consiguiente, es necesario un seguimiento de las sucesiones mediante un diagrama de árbol.

El número finito de rayos usados da como consecuencia una longitud limitada del ecograma obtenido. Esto puede dar como resultado ciertas deficiencias, pues el hecho de tener un número limitado de rayos no permite considerar todas las fuentes imagen; por consiguiente, serán necesarios otros métodos para la obtención de la cola reverberante. Esta parte requiere mucho esfuerzo de cálculo y se basa normalmente en un método estadístico para recoger el resto de las contribuciones.

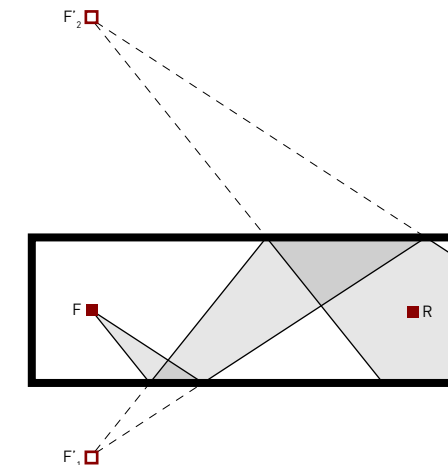


Figura 12: Principio del método híbrido

²⁰ Vorländer M., (1989) Simulation of the transient and steady state sound propagation in room using a new combined ray-tracing/image-source algorithm. The Journal of the Acoustical Society of America 86, pp. 172-178.

Capítulo IV

LA ACÚSTICA DE LA CAPILLA DE LA INMACULADA

MEDIDAS ACÚSTICAS IN SITU

La señal emitida ha sido recogida en 7 puntos del recinto. La distribución de los puntos de medida en la sala se muestra en la Figura X.

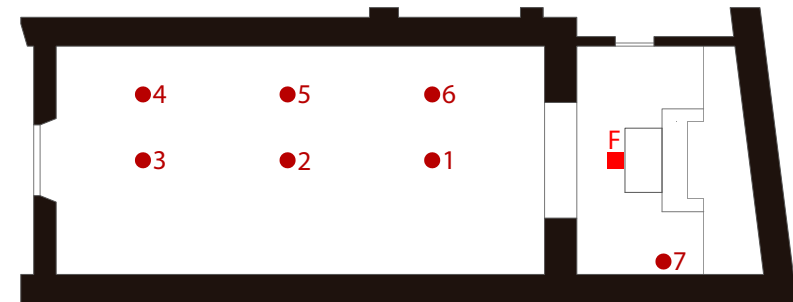


Figura 13: Localización de los puntos de medida registrados

La fuente se situó en la zona del altar a 1,5 metros de altura sobre el suelo. Los receptores utilizados para recoger la señal emitida por la fuente en los puntos seleccionados dentro del recinto se situaron a una altura de 1,3 metros del suelo.



Figura 14: Fuente emisora posicionada en el altar

Los receptores captan la señal emitida por la fuente sonora, recogiendo los datos que perciben de la fuente y, partiendo de todos los resultados de cada receptor, se obtienen los valores de T_{30} medio del recinto.

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T_{30} (s)	2,33	2,29	2,41	2,17	1,92	1,67

Tabla 1: Valores T_{30} recogidos por los receptores

Estos valores de T_{30} obtenidos por los receptores puede representarse en su respectiva curva tonal, el cual servirá de base para el ajuste del modelo de simulación

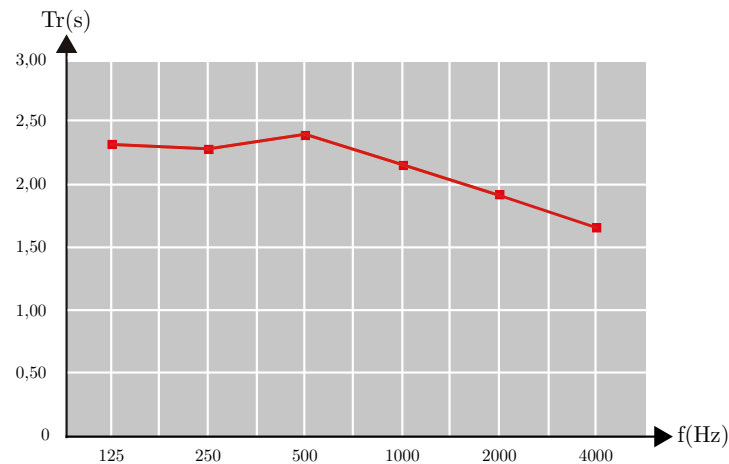


Figura 15: Curva tonal de los valores T_{30} medidos

MODELIZACIÓN Y AJUSTE DEL MODELO GEOMÉTRICO

A partir de los valores obtenidos con las mediciones in situ se procede a la obtención de un modelo tridimensional lo bastante fiel a la realidad con el cual poder realizar un análisis exhaustivo del comportamiento acústico del recinto.

Este proceso comienza con la elaboración de un modelo geométrico. Este modelo se llevó a cabo con el programa AutoCAD, obteniendo así un modelo simplificado de la Capilla de la Inmaculada compuesto por 312 superficies. Aunque se tienda a elaborar modelos detallados para hacerlo coincidir más con el volumen real, esto no es sinónimo de una mayor precisión de los resultados de los parámetros acústicos simulados, siendo más importante la asignación adecuada de las propiedades acústicas (absorción y difusión) a las superficies que lo conforman, propiedades difíciles de obtener con exactitud²¹.

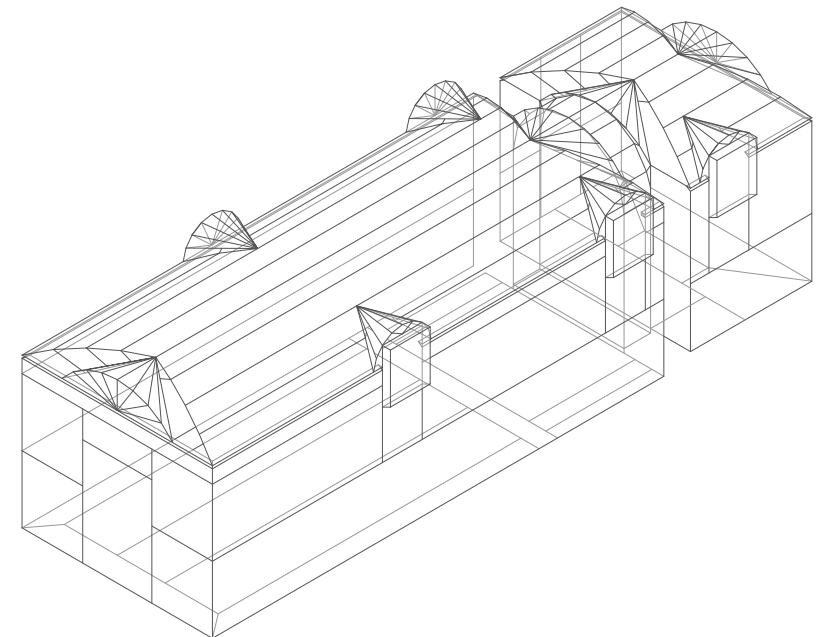


Figura 16: Modelado geométrico tridimensional de la Capilla de la Inmaculada

²¹ Rindel J. H., Shiokawa H., Christensen C. L., Gade A. C., (1999) Comparisons between computer simulations of room acoustical parameters and those measured in concert halls. The Journal of the Acoustical Society of America 105, pp. 1173, 3PAAA3.

Una vez realizado el modelo geométrico con el programa AutoCAD se exporta al software de simulación acústica ODEON²². Ya dentro del software de simulación se procede a la asignación de los materiales constructivos de acabado del recinto en cada una de las superficies de las que se compone el modelo virtual, con sus correspondientes coeficientes de absorción en cada banda de frecuencias que oscilan desde 125 Hz a 4 kHz.

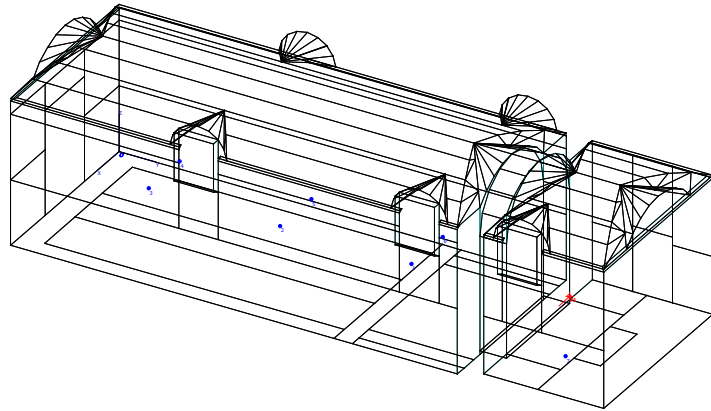


Figura 17: Modelado geométrico importado al software Odeon

En la mayoría de los casos, un problema importante cuando se realiza la calibración de los modelos virtuales de edificios patrimoniales es la falta de información de los materiales que los componen debido a su antigüedad. Además, el paso del tiempo en los edificios históricos puede haber generado desgaste en los materiales, modificando sus propiedades acústicas y dificultando su equivalencia con los materiales actuales²³. Esto puede generar que un mismo material pueda haber modificado sus coeficientes acústicos en distintos puntos del recinto en diferentes magnitudes, dificultando así asignar un valor global de dichos coeficientes.

Además de las ya mencionadas alteraciones de las propiedades de los materiales, el posible desconocimiento de alguna composición constructiva del recinto y las simplificaciones geométricas en el modelo de simulación pueden generar imprecisiones en la primera simulación virtual de recinto. Es por ello por lo que la simulación debe pasar por un ajuste de tal forma que sus resultados de cálculo coincidan con los obtenidos en las mediciones in situ. Con todo esto obtenemos una primera simulación virtual del recinto cuyo comportamiento se aproxima al real.

²² Odeon Room Acoustic Software (2009). User Manual. Denmark.

²³ Planells A.; Segura J.; Cerdá S.; Barba A.; Cibrián R.; Giménez A.; (2016) ¿Son válidos los coeficientes de absorción normalizados en la simulación acústica de edificios patrimoniales? 47ª TecniAcustica EuroRegio2016, Oporto.

Para el ajuste de los resultados simulados se tiene en cuenta el Just Noticeable Difference (JND) correspondiente al parámetro que se pretende ajustar.

El JND es un parámetro acústico que indica la variación mínima de un determinado parámetro para provocar un cambio en su percepción subjetiva²⁴. Este parámetro es útil para las simulaciones computacionales puesto que da un intervalo de precisión respecto a los resultados medidos in situ en los cuales pueden variar los resultados de simulación.

Este ajuste se ha basado en tomar como referencia el tiempo de reverberación calculado in situ y, a través de un proceso iterativo, ir modificando los coeficientes de absorción (y/o difusión) de aquellos materiales cuyas propiedades acústicas no se encuentran en bibliografías o cuyo estudio in situ dispone de una elevada complejidad. Para este caso, la modificación de estos coeficientes se ha realizado en el techo de la capilla, pues es un material con mucha presencia en el recinto y dispone, además, de un alto grado de incertidumbre puesto que las bibliotecas de materiales no cuentan con los valores propios de una bóveda tabicada con pinturas al fresco.

El ajuste de los coeficientes de absorción se realiza hasta que la diferencia entre el valor T_{30} obtenido en la medición in situ y el T_{30} obtenido mediante la simulación no sea superior al 5%, correspondiente al JND asociado al parámetro acústico T_{30} .

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T_{30} Medición	2,33	2,30	2,41	2,17	1,92	1,67
T_{30} Simulación	2,35	2,29	2,43	2,19	1,95	1,68
Diferencia	0,02	0,00	0,02	0,02	0,03	0,01
JND (5%)	0,12	0,11	0,12	0,11	0,10	0,08

Tabla 2: Comparación del T_{30} simulado y el T_{30} medido in situ

Con los valores del parámetro acústico T_{30} obtenidos por simulación dentro de margen del 5% de error, establecido por el JND de dicho parámetro, respecto a los valores obtenidos en la medición in situ, se puede dar por válido el modelo virtual, obteniendo así un modelo de simulación para el análisis de la Capilla de la Inmaculada.

²⁴ San Martín R.; Lopetegui K.; Arana M.; (2009) Determinación del Just Noticeable Difference (JND) de parámetros acústicos mediante campos sonoros reales. 40ª TecniAcustica, Cadiz

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA SIMULACIÓN

DATOS PREVIOS

En la simulación se ha considerado una temperatura interior de 19° y una humedad relativa de 66%. Estos datos afectarán la densidad del aire e influirán en la pérdida de presión sonora de la onda emitida debido a su rozamiento con el aire.

REFERENCIAS DE CÁLCULO

El número de rayos emitidos por la fuente (Number of rays) es de 7166 rayos y se ha considerado un orden de reflexión máximo (Max. reflection order) de 2000 y una longitud de respuesta de impulso (Impulse response length) de 3000 ms.

Además, se establece un orden de transición (Transition Orden) de valor 2. Esto significa que para las reflexiones de orden menor a 2 el programa usará el método de fuente imagen, y para las de orden superior se empleará el método de trazado de rayos.

Estos datos son los recomendados por el software para las características del recinto, evitando así tiempos de cálculos excesivos.

FUENTE EMISORA Y RECEPTORES

En la simulación se ha utilizado una fuente puntual de emisión omnidireccional ubicada en la zona del presbiterio a una altura de 150 cm y a una distancia de 120 cm del escalón de acceso, coincidiendo en el eje longitudinal de simetría de la capilla.

La colocación de los receptores es un factor importante para captar las propiedades acústicas del recinto. En el caso de la Capilla de la Inmaculada, para la obtención de los parámetros acústicos se han empleado 7 receptores. Debido a la simetría del recinto, los receptores se han colocado a lo largo del plano longitudinal de simetría y en la mitad izquierda de la capilla.

NÚMERO DE RECEPTOR	COORDENADAS	DESCRIPCIÓN DE LA UBICACIÓN
1	3,58; 13,2; 1,30	Eje central de la sala, zona delantera
2	3,58; 8,20; 1,30	Eje central de la sala, zona central
3	3,58; 3,20; 1,30	Eje central de la sala, zona trasera
4	1,54; 3,20; 1,30	Parte izquierda, zona trasera
5	1,54; 8,20; 1,30	Parte izquierda, zona central
6	1,54; 13,2; 1,30	Parte izquierda, zona delantera
7	6,77; 20,9; 1,60	Altar, zona derecha

Tabla 3: Coordenadas y posiciones de los receptores

En la Tabla 3 se muestran las coordenadas de los receptores, además de una descripción de su ubicación. El origen de coordenadas se puede apreciar en la Figura 18.

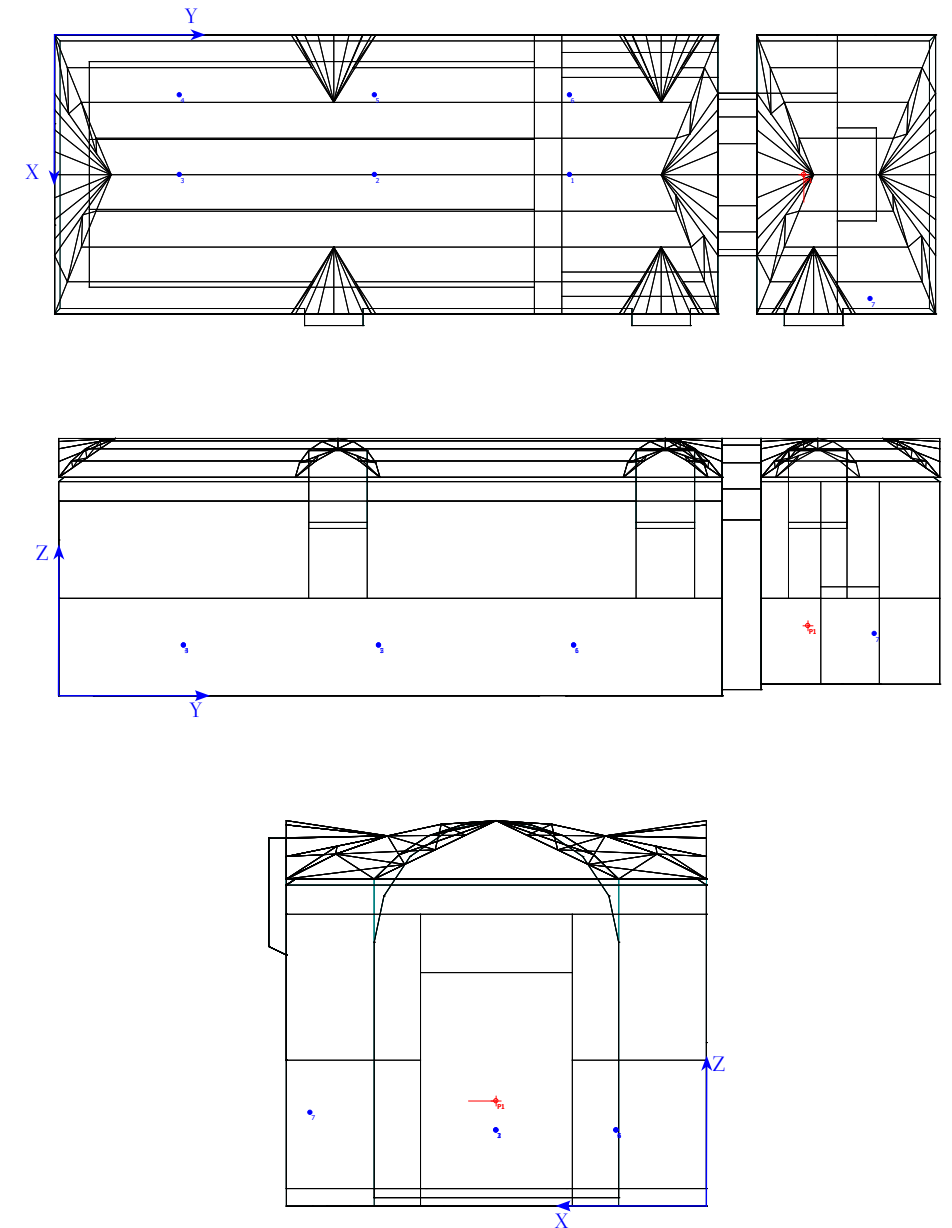


Figura 18: Vistas diédricas del modelo virtual de la Capilla de la Inmaculada

MATERIALES

Los materiales empleados para la simulación y sus respectivos coeficientes de absorción tras el proceso iterativo de calibración son los mostrados en la Tabla 4.

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Pavimento mármol	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Zócalo de azulejos	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
Pared con enlucido	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
Madera fijada a muro	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02
Bóveda tabicada	0,21	0,23	0,19	0,19	0,18	0,17
Cornisa de escayola	0,08	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04
Puerta de madera	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
Ventana	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
Retablo de madera	0,10	0,11	0,10	0,08	0,08	0,05
Moqueta	0,12	0,10	0,20	0,40	0,64	0,93
Tapices	0,14	0,35	0,55	0,75	0,70	0,60
Músicos	0,27	0,53	0,67	0,93	0,87	0,80

Tabla 4: Coeficientes de absorción de los materiales empleados

OCUPACIÓN

El mobiliario afectado por la ocupación del recinto consta de bancos de madera y de sofás tapizados. Para la simulación se considerará la completa, parcial y nula ocupación de este mobiliario para las simulaciones acústicas.

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Sofá tapizado (0%)	0,49	0,66	0,80	0,88	0,82	0,70
Sofá tapizado (50%)	0,50	0,67	0,82	0,92	0,87	0,77
Sofá tapizado (100%)	0,52	0,68	0,85	0,97	0,93	0,85
Banco de iglesia (0%)	0,27	0,25	0,19	0,18	0,18	0,07
Banco de iglesia (50%)	0,42	0,43	0,47	0,52	0,54	0,46
Banco de iglesia (100%)	0,57	0,61	0,75	0,86	0,91	0,86

Tabla 5: Coeficientes de absorción del mobiliario respecto a su ocupación

MODELOS DE SIMULACIÓN

Llegados a este punto se va a proceder a la cuantificación objetiva de los parámetros acústicos de calidad de salas.

Aprovechando el hecho de que las mediciones de la Capilla de la Inmaculada se llevaron a cabo sin los tapices que cuelgan de los muros laterales debido a que fueron llevados a restaurar, se puede obtener la simulación contando con la ausencia y presencia de los tapices, pudiendo apreciar cómo afecta en el acondicionamiento acústico del recinto el uso de materiales porosos como los tapices.

MODELO VIRTUAL SIN TAPICES

La simulación del recinto sin público y sin la presencia de los tapices laterales es la que se ha medido in situ y es la que ha servido de base para la obtención del modelo virtual que usaremos para la obtención de nuestros objetivos.

Debido a que el resultado de los parámetros acústicos en recinto sin público no es lo que interesa para analizar el comportamiento de la sala durante actuaciones musicales, no se va a proceder a hacer un análisis de los resultados de los parámetros acústicos obtenidos en este modelo. Sin embargo, estos resultados se verán reflejados en la Tabla 6 para tener la referencia de esta simulación, de tal forma que se podrán comparar con los resultados del modelo virtual con la presencia de los tapices.

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	2,37	2,29	2,43	2,23	2,00	1,77
T ₃₀ (s)	2,35	2,29	2,43	2,19	1,95	1,68
SPL (dB)	-12,9	-13,2	-12,9	-13,5	-14,4	-15,4
C ₈₀ (dB)	-2,20	-2,10	-2,50	-1,90	-1,30	-0,40
D ₅₀	0,27	0,28	0,26	0,29	0,32	0,36
Ts (ms)	170	164	177	160	142	123
LF ₈₀	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21

Br	0,79
BR	1,00
STI	0,45
SPL(A)	-7,63

Tabla 6: Parámetros acústicos de la simulación del modelo virtual sin tapices

MODELO VIRTUAL CON TAPICES

A partir del modelo base de la capilla sin tapices y sin público se puede hacer la simulación del recinto con los tapices ya colocados, que es, en principio, el estado en el cual se realizaran las actuaciones musicales.

Con los resultados de esta simulación reflejados en la Tabla 7 se puede hacer una comparación con los valores obtenidos en el modelo virtual sin tapices reflejado en la Tabla 6, observando que la presencia de los tapices repercute de forma importante en los parámetros acústicos obtenidos.

Al reemplazar una gran área de muro compuesto por enlucido y azulejos del zócalo por un material considerablemente más absorbente es evidente que esto se verá reflejado en una disminución de los parámetros temporales. La diferencia entre los valores de Tr_m y EDT_m de ambas simulaciones ronda el segundo, un valor objetivamente significativo y claramente perceptible al oído humano.

También llama la atención la diferencia entre los valores de C_{80} y D_{50} de ambas simulaciones, pues se puede observar que los valores de C_{80} aumentan considerablemente con la presencia de los tapices a comparación de los valores de D_{50} . Esto es debido al aumento de la absorción y, por tanto, la reducción del nivel de energía de las reflexiones, especialmente de las reflexiones tardías, ocasionando así un aumento de ambos parámetros, en especial del parámetro C_{80} .

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	1,91	1,57	1,45	1,26	1,17	1,14
T_{30} (s)	1,86	1,51	1,4	1,22	1,15	1,08
SPL (dB)	-13,9	-15	-15,5	-16,6	-17,1	-17,6
C_{80} (dB)	-1,2	0,2	0,6	1,8	2,2	2,5
D_{50}	0,32	0,38	0,4	0,46	0,48	0,49
T_s (ms)	138	109	101	85	80	76
LF_{80}	0,20	0,18	0,17	0,16	0,16	0,17

Br	0,85
BR	1,29
STI	0,54
SPL(A)	-10,12

Tabla 7: Parámetros acústicos de la simulación del modelo virtual con tapices

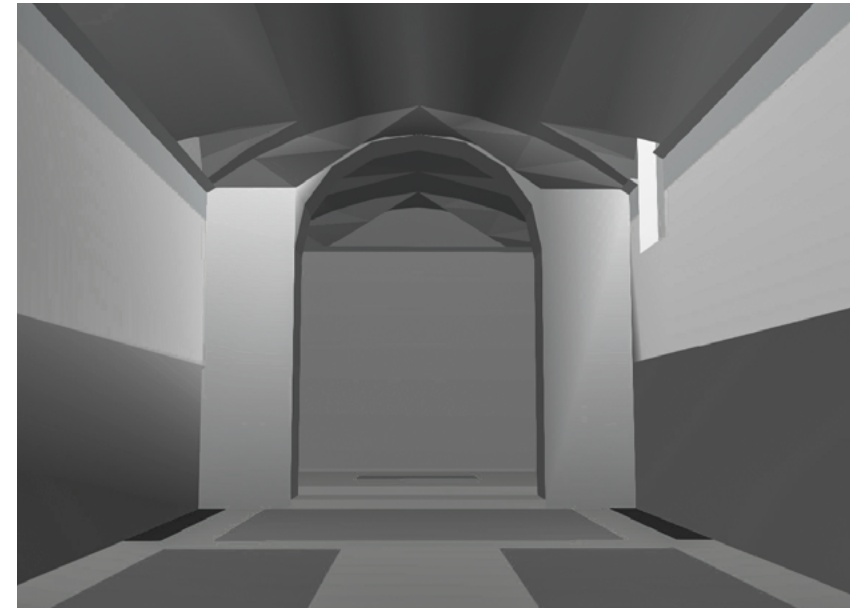


Figura 19: Vista interior del modelo virtual de la Capilla de la Inmaculada



Figura 20: Vista interior de la Capilla de la Inmaculada

Capítulo V

SIMULACIÓN Y RESULTADOS

Partiendo de los modelos de simulaciones con la ausencia y presencia de los tapices laterales en el interior de la Capilla de la Inmaculada, se procederá a la simulación acústica de los distintos casos posibles a la hora de llevar a cabo la actividad musical en el interior del recinto.

Para intentar abarcar todos los casos posibles se considerarán distintas situaciones respecto a la ocupación del aforo y al número de músicos intérpretes, pues la variación de estos dos aspectos influirá en las condiciones acústicas del recinto.

Por ello se considerarán 8 casos de estudio en los que varían los siguientes factores;

- La ausencia y presencia de los tapices laterales;
- La ocupación del recinto, considerando una simulación de sala medio llena y completamente ocupada;
- El número de intérpretes, considerando una simulación sin presencia de músicos y una ocupación total de la zona de actuación musical.

La simulación sin músicos es una forma de poder abarcar la idea de un músico solista cuyos coeficientes de absorción no serán lo mismos que los fijados por un grupo de 3 ó 4 intérpretes, de tal forma que se puede tener un intervalo para considerar la influencia de la densidad de ocupación de músicos a la hora de realizar la actividad musical.

Para el análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones acústicas se harán referencia a los parámetros acústicos del capítulo 3, mostrando los valores de los parámetros acústicos obtenidos por simulación, datos obtenidos mediante fórmulas y su valoración a través del factor de mérito.

CASO 1

AUSENCIA DE TAPICES, AFORO MEDIO LLENO SIN MÚSICOS

TIEMPO DE REVERBERACIÓN

Los valores medios en cada banda de octava del tiempo de reverberación (T_{30}) captados por los receptores correspondientes a este caso se muestran en la Tabla 8:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T_{30} (s)	2,20	2,14	2,09	1,86	1,68	1,41

Tabla 8: Caso 1: valores de T_{30} obtenidos por simulación

El Tr_{mid} de la capilla en este caso adopta un valor de 1,98 segundos y los valores medio de T_{30} en cada banda de octava forman la curva tonal de la capilla correspondiente a este caso que se muestra en la Figura 21:

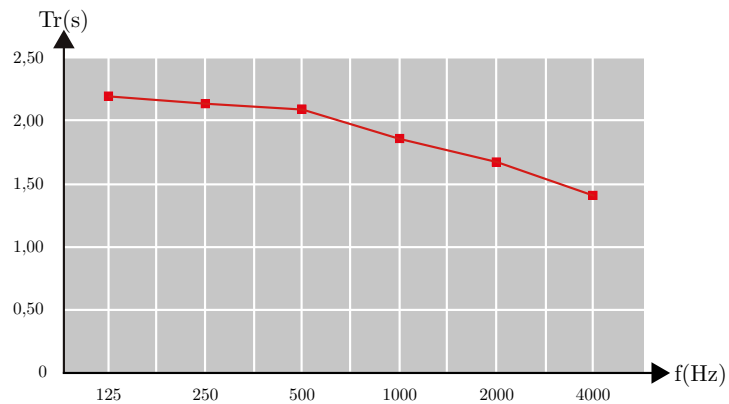


Figura 21: Caso 1: curva tonal

Para la evaluación del tiempo de reverberación se procederá a la obtención de su factor de mérito, que depende de la relación de Tr_{mid} y Tr_{opt} . Recordando que el Tr_{mid} es 1,98 s y el Tr_{opt} es 0,91 s, se tiene un tiempo de reverberación del recinto que excede notablemente el tiempo de reverberación óptimo, obteniendo un factor de mérito con valor 0. Esto hace ver que el tiempo de reverberación en este caso no es para nada adecuado para la correcta función del recinto.

$$\text{Como } Tr_{mid} \geq Tr_{opt} + 0.5; \quad FM_{Tr_{mid}} = 0$$

CALIDEZ

Con los valores de T_{30} obtenidos y representado en la curva tonal, a través de la relación de las frecuencias bajas y medias se obtiene la calidez del recinto.

$$\text{Calidez (BR): } 1,10;$$

Como la calidez de la sala vale 1,10, su factor de mérito es 1, puesto que se encuentra dentro de los valores recomendados. Esto da a entender que existe una excelente riqueza de frecuencias bajas, dando una excelente suavidad y melosidad a la música.

$$\text{Como } 1,1 \leq BR \leq 1,3; \quad FM_{Calidez} = 1$$

BRILLO

Con los valores de T_{30} obtenidos y representado en la curva tonal, a través de la relación de las frecuencias altas y medias se obtiene el brillo del recinto.

$$\text{Brillo (Br): } 0,78;$$

Teniendo un brillo de 0,78 se obtiene un factor de mérito de 0,95, muy cercano a la unidad. Esto significa que el recinto presenta buena respuesta a frecuencias altas, dando un sonido claro y rico en armónicos.

$$\text{Como } 0,45 \leq Br \leq 0,8; \quad FM_{Brillo} = 0,95$$

EARLY DECAY TIME

Los valores medios en cada banda de octava del Early Decay Time (EDT) captados por los receptores correspondientes a este caso se muestran en la Tabla 9:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	2,19	2,09	2,10	1,91	1,72	1,51

Tabla 9: Caso 1: valores de EDT obtenidos por simulación

El EDT_m de la capilla en este caso adopta un valor de 2,01 segundos y según su relación con el Tr_{mid} y la actividad que va a realizarse en el recinto puede obtenerse su factor de mérito correspondiente. Debido a que el EDT_m en este caso es ligeramente mayor al Tr_{mid} se obtiene un factor de mérito superior a la unidad: 1.02. Esto sucede en recintos con mucha difusión y es un caso poco frecuente.

$$\text{Como } EDT_m > Tr_m; \quad FM_{EDT} = 1,02$$

CLARIDAD

Los valores medios en cada banda de octava de la Claridad Musical (C_{80}) correspondiente a este caso se muestran en la Tabla 10:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C_{80} (dB)	-1,80	-1,50	-1,60	-1,00	-0,30	0,60

Tabla 10: Caso 1: valores de C_{80} obtenidos por simulación

Para valorar la claridad musical del recinto se utiliza su factor de mérito en función de un uso del recinto destinados a conciertos. Teniendo como Índice de Claridad un valor de -1,30 dB, que se encuentra entro del intervalo recomendado, se obtiene in factor de mérito de valor 1, por lo que la claridad de la música será ideal.

$$\text{Como } -2 \leq C_{80} \leq 4; \quad \text{FM}_{\text{Claridad}} = 1$$

DEFINICIÓN

Los valores medios en cada banda de octava de la Definición (D_{50}) correspondiente a este caso se muestran en la Tabla 11:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
D_{50}	0,29	0,31	0,30	0,33	0,36	0,41

Tabla 11: Caso 1: valores de D_{50} obtenidos por simulación

Para valorar la definición del recinto se utiliza su factor de mérito en función de un uso del recinto destinado a conciertos. Teniendo como Índice de Definición un valor de 0,32, que se encuentra por debajo de lo recomendado, se obtiene un factor de mérito de valor 0,70, que da a entender la definición del sonido es aceptable en este caso.

$$\text{Como } D_{50} \leq 0,45; \quad \text{FM}_{\text{Definición}} = 0,70$$

FACTOR DE MÉRITO GLOBAL

Mediante la media aritmética de los factores de mérito obtenidos se obtiene el factor de mérito global de este caso.

$$\text{FM}_{\text{Global}} = 0,78$$

CASO 2

AUSENCIA DE TAPICES, AFORO LLENO SIN MÚSICOS

TIEMPO DE REVERBERACIÓN

Los valores medios en cada banda de octava del tiempo de reverberación (T_{30}) captados por los receptores correspondientes a este caso se muestran en la Tabla 12:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T_{30} (s)	2,06	1,98	1,89	1,68	1,52	1,29

Tabla 12: Caso 2: valores de T_{30} obtenidos por simulación

El Tr_{mid} de la capilla en este caso adopta un valor de 1,79 segundos y los valores medio de T_{30} en cada banda de octava forman la curva tonal de la capilla correspondiente a este caso que se muestra en la Figura 22:

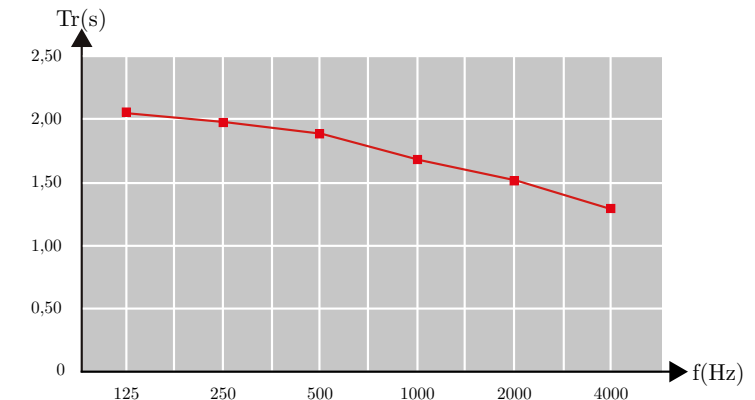


Figura 22: Caso 2: curva tonal

Para la evaluación del tiempo de reverberación se procederá a la obtención de su factor de mérito, que depende de la relación de Tr_{mid} y Tr_{opt} . Recordando que el Tr_{mid} es 1,79 s y el Tr_{opt} es 0,91 s, se tiene un tiempo de reverberación del recinto que excede notablemente el tiempo de reverberación óptimo, obteniendo un factor de mérito con valor 0. Esto hace ver que el tiempo de reverberación en este caso no es para nada adecuado para la correcta función del recinto.

$$\text{Como } \text{Tr}_{\text{mid}} \geq \text{Tr}_{\text{opt}} + 0,5; \quad \text{FM}_{\text{Trmid}} = 0$$

CALIDEZ

Con los valores de T_{30} obtenidos y representado en la curva tonal, a través de la relación de las frecuencias bajas y medias se obtiene la calidez del recinto.

$$\text{Calidez (BR): } 1,13;$$

Como la calidez de la sala vale 1,13, su factor de mérito es 1, puesto que se encuentra dentro de los valores recomendados. Esto da a entender que existe una excelente riqueza de frecuencias bajas, dando una excelente suavidad y melosidad a la música.

$$\text{Como } 1,1 \leq BR \leq 1,3; \quad FM_{\text{Calidez}} = 1$$

BRILLO

Con los valores de T_{30} obtenidos y representado en la curva tonal, a través de la relación de las frecuencias altas y medias se obtiene el brillo del recinto.

$$\text{Brillo (Br): } 0,79;$$

Teniendo un brillo de 0,79 se obtiene un factor de mérito de 0,96, muy cercano a la unidad. Esto significa que el recinto presenta buena respuesta a frecuencias altas, dando un sonido claro y rico en armónicos.

$$\text{Como } 0,45 \leq Br \leq 0,8; \quad FM_{\text{Brillo}} = 0,96$$

EARLY DECAY TIME

Los valores medios en cada banda de octava del Early Decay Time (EDT) captados por los receptores correspondientes a este caso se muestran en la Tabla 13:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	2,06	1,97	1,89	1,71	1,55	1,35

Tabla 13: Caso 2: valores de EDT obtenidos por simulación

El EDT_m de la capilla en este caso adopta un valor de 1,80 segundos y según su relación con el Tr_{mid} y la actividad que va a realizarse en el recinto puede obtenerse su factor de mérito correspondiente. Debido a que el EDT_m en este caso es ligeramente mayor al Tr_m se obtiene un factor de mérito superior a la unidad: 1,01. Esto sucede en recintos con mucha difusión y es un caso poco frecuente.

$$\text{Como } EDT_m > Tr_m; \quad FM_{EDT} = 1,01$$

CLARIDAD

Los valores medios en cada banda de octava de la Claridad Musical (C_{80}) correspondiente a este caso se muestran en la Tabla 14:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C_{80} (dB)	-1,40	-1,00	-0,90	-0,20	0,50	1,40

Tabla 14: Caso 2: valores de C_{80} obtenidos por simulación

Para valorar la claridad musical del recinto se utiliza su factor de mérito en función de un uso del recinto destinados a conciertos. Teniendo como Índice de Claridad un valor de -0,55 dB, que se encuentra dentro del intervalo recomendado, se obtiene un factor de mérito de valor 1, por lo que la claridad de la música será ideal.

$$\text{Como } -2 \leq C_{80} \leq 4; \quad FM_{\text{Claridad}} = 1$$

DEFINICIÓN

Los valores medios en cada banda de octava de la Definición (D_{50}) correspondiente a este caso se muestran en la Tabla 15:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
D_{50}	0,31	0,33	0,33	0,37	0,40	0,45

Tabla 15: Caso 2: valores de D_{50} obtenidos por simulación

Para valorar la definición del recinto se utiliza su factor de mérito en función de un uso del recinto destinado a conciertos. Teniendo como Índice de Definición un valor de 0,35, que se encuentra por debajo de lo recomendado, se obtiene un factor de mérito de valor 0,78, que da a entender la definición del sonido es aceptable en este caso.

$$\text{Como } D_{50} \leq 0,45; \quad FM_{\text{Definición}} = 0,78$$

FACTOR DE MÉRITO GLOBAL

Mediante la media aritmética de los factores de mérito obtenidos se obtiene el factor de mérito global de este caso.

$$FM_{\text{Global}} = 0,79$$

CASO 3

AUSENCIA DE TAPICES, AFORO MEDIO LLENO CON MÚSICOS

TIEMPO DE REVERBERACIÓN

Los valores medios en cada banda de octava del tiempo de reverberación (T_{30}) captados por los receptores correspondientes a este caso se muestran en la Tabla 16:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T_{30} (s)	2,17	2,06	2,00	1,78	1,58	1,34

Tabla 16: Caso 3: valores de T_{30} obtenidos por simulación

El Tr_{mid} de la capilla en este caso adopta un valor de 1,89 segundos y los valores medio de T_{30} en cada banda de octava forma la curva tonal de la capilla correspondiente a este caso y se muestra en la Figura 23:

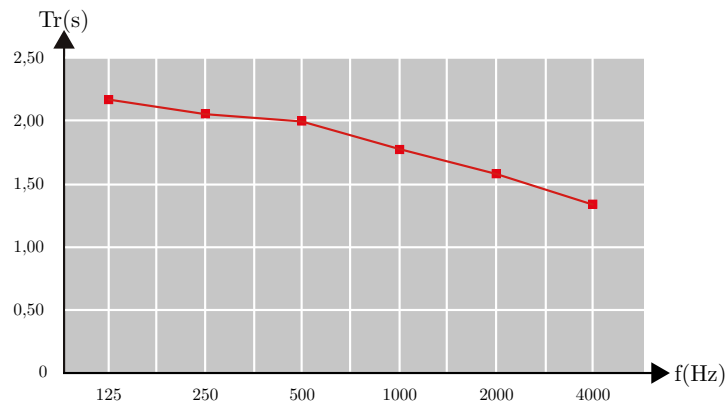


Figura 23: Caso 3: curva tonal

Para la evaluación del tiempo de reverberación se procederá a la obtención de su factor de mérito, que depende de la relación de Tr_{mid} y Tr_{opt} . Recordando que el T_{mid} es 1,89 s y el T_{opt} es 0,91 s, se tiene un tiempo de reverberación del recinto que excede notablemente el tiempo de reverberación óptimo, obteniendo un factor de mérito con valor 0. Esto hace ver que el tiempo de reverberación en este caso no es para nada adecuado para la correcta función del recinto.

$$\text{Como } Tr_{mid} \geq Tr_{opt} + 0,5; \quad FM_{Tr_{mid}} = 0$$

CALIDEZ

Con los valores de T_{30} obtenidos y representado en la curva tonal, a través de la relación de las frecuencias bajas y medias se obtiene la calidez del recinto.

$$\text{Calidez (BR): } 1,12;$$

Como la calidez de la sala vale 1,12, su factor de mérito es 1, puesto que se encuentra dentro de los valores recomendados. Esto da a entender que existe una excelente riqueza de frecuencias bajas, dando una excelente suavidad y melosidad a la música.

$$\text{Como } 1,1 \leq BR \leq 1,3; \quad FM_{Calidez} = 1$$

BRILLO

Con los valores de T_{30} obtenidos y representado en la curva tonal, a través de la relación de las frecuencias altas y medias se obtiene el brillo del recinto.

$$\text{Brillo (Br): } 0,77;$$

Teniendo un brillo de 0,77 se obtiene un factor de mérito de 0,92, muy cercano a la unidad. Esto significa que el recinto presenta buena respuesta a frecuencias altas, dando un sonido claro y rico en armónicos.

$$\text{Como } 0,45 \leq Br \leq 0,8; \quad FM_{Brillo} = 0,92$$

EARLY DECAY TIME

Los valores medios en cada banda de octava del Early Decay Time (EDT) captados por los receptores correspondientes a este caso se muestran en la Tabla 17:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	2,13	1,99	1,97	1,73	1,60	1,42

Tabla 17: Caso 4: valores de EDT obtenidos por simulación

El EDT_m de la capilla en este caso adopta un valor de 1,85 segundos y según su relación con el Tr_{mid} y la actividad que va a realizarse en el recinto puede obtenerse su factor de mérito correspondiente. Debido a que el EDT_m en este caso es ligeramente menor al Tr_m se obtiene un factor de mérito de valor 1. Esto da a entender que la caída del nivel de presión sonora tiene un carácter más o menos lineal.

$$\text{Como } 0,9 Tr_m < EDT_m \leq Tr_m; \quad FM_{EDT} = 1$$

CLARIDAD

Los valores medios en cada banda de octava de la Claridad Musical (C_{80}) correspondiente a este caso se muestran en la Tabla 18:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C_{80} (dB)	-1,50	-1,00	-0,90	0,00	0,50	1,30

Tabla 18: Caso 3: valores de C_{80} obtenidos por simulación

Para valorar la claridad musical del recinto se utiliza su factor de mérito en función de un uso del recinto destinados a conciertos. Teniendo como Índice de Claridad un valor de -0,45 dB, que se encuentra entro del intervalo recomendado, se obtiene in factor de mérito de valor 1, por lo que la claridad de la música será ideal.

$$\text{Como } -2 \leq C_{80} \leq 4; \quad FM_{\text{Claridad}} = 1$$

DEFINICIÓN

Los valores medios en cada banda de octava de la Definición (D_{50}) correspondiente a este caso se muestran en la Tabla 19:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
D_{50}	0,31	0,34	0,34	0,38	0,41	0,45

Tabla 19: Caso 3: valores de D_{50} obtenidos por simulación

Para valorar la definición del recinto se utiliza su factor de mérito en función de un uso del recinto destinado a conciertos. Teniendo como Índice de Definición un valor de 0,36, que se encuentra por debajo de lo recomendado, se obtiene un factor de mérito de valor 0,88, que da a entender la definición del sonido es aceptable en este caso.

$$\text{Como } D_{50} \leq 0,45; \quad FM_{\text{Definición}} = 0,80$$

FACTOR DE MÉRITO GLOBAL

Mediante la media aritmética de los factores de mérito obtenidos se obtiene el factor de mérito global de este caso.

$$FM_{\text{Global}} = 0,79$$

CASO 4**AUSENCIA DE TAPICES, AFORO LLENO CON MÚSICOS****TIEMPO DE REVERBERACIÓN**

Los valores medios en cada banda de octava del tiempo de reverberación (T_{30}) captados por los receptores correspondientes a este caso se muestran en la Tabla 20:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T_{30} (s)	2,02	1,93	1,81	1,58	1,45	1,23

Tabla 20: Caso 4: valores de T_{30} obtenidos por simulación

El Tr_m de la capilla en este caso adopta un valor de 1,70 segundos y los valores medio de T_{30} en cada banda de octava forma la curva tonal de la capilla correspondiente a este caso y se muestra en la Figura 24:

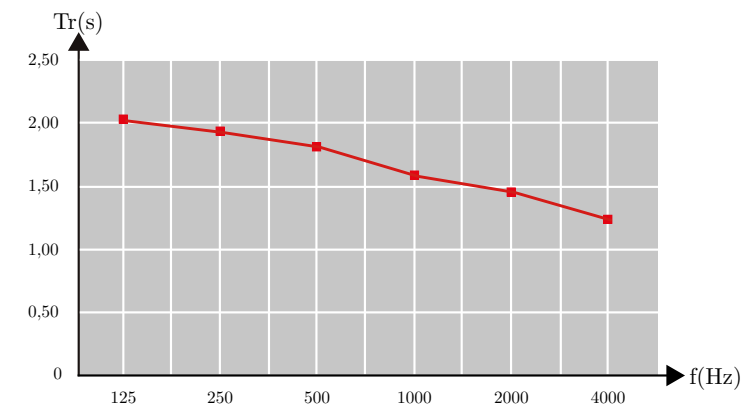


Figura 24: Caso 4: curva tonal

Para la evaluación del tiempo de reverberación se procederá a la obtención de su factor de mérito, que depende de la relación de Tr_{mid} y Tr_{opt} . Recordando que el Tr_{mid} es 1,70 s y el Tr_{opt} es 0,91 s, se tiene un tiempo de reverberación del recinto que excede notablemente el tiempo de reverberación óptimo, obteniendo un factor de mérito con valor 0. Esto hace ver que el tiempo de reverberación en este caso no es para nada adecuado para la correcta función del recinto.

$$\text{Como } Tr_{mid} \geq Tr_{opt} + 0,5; \quad FM_{Tr_{mid}} = 0$$

CALIDEZ

Con los valores de T_{30} obtenidos y representado en la curva tonal, a través de la relación de las frecuencias bajas y medias se obtiene la calidez del recinto.

$$\text{Calidez (BR): } 1,17;$$

Como la calidez de la sala vale 1,17, su factor de mérito es 1, puesto que se encuentra dentro de los valores recomendados. Esto da a entender que existe una excelente riqueza de frecuencias bajas, dando una excelente suavidad y melosidad a la música.

$$\text{Como } 1,1 \leq BR \leq 1,3; \quad FM_{\text{Calidez}} = 1$$

BRILLO

Con los valores de T_{30} obtenidos y representado en la curva tonal, a través de la relación de las frecuencias altas y medias se obtiene el brillo del recinto.

$$\text{Brillo (Br): } 0,79;$$

Teniendo un brillo de 0,79 se obtiene un factor de mérito de 0,97, muy cercano a la unidad. Esto significa que el recinto presenta buena respuesta a frecuencias altas, dando un sonido claro y rico en armónicos.

$$\text{Como } 0,45 \leq Br \leq 0,8; \quad FM_{\text{Brillo}} = 0,97$$

EARLY DECAY TIME

Los valores medios en cada banda de octava del Early Decay Time (EDT) captados por los receptores correspondientes a este caso se muestran en la Tabla 21:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	2,01	1,86	1,74	1,58	1,45	1,26

Tabla 21: Caso 4: valores de EDT obtenidos por simulación

El EDT_m de la capilla en este caso adopta un valor de 1,66 segundos y según su relación con el Tr_{mid} y la actividad que va a realizarse en el recinto puede obtenerse su factor de mérito correspondiente. Debido a que el EDT_m en este caso es ligeramente menor al Tr_m se obtiene un factor de mérito de valor 1. Esto da a entender que la caída del nivel de presión sonora tiene un carácter más o menos lineal.

$$\text{Como } 0,9 Tr_m < EDT_m \leq Tr_m; \quad FM_{EDT} = 1$$

CLARIDAD

Los valores medios en cada banda de octava de la Claridad Musical (C_{80}) correspondiente a este caso se muestran en la Tabla 22:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C_{80} (dB)	-1,10	-0,50	-0,20	0,80	1,30	2,10

Tabla 22: Caso 4: valores de C_{80} obtenidos por simulación

Para valorar la claridad musical del recinto se utiliza su factor de mérito en función de un uso del recinto destinados a conciertos. Teniendo como Índice de Claridad un valor de 0,30 dB, que se encuentra dentro del intervalo recomendado, se obtiene un factor de mérito de valor 1, por lo que la claridad de la música será ideal.

$$\text{Como } -2 \leq C_{80} \leq 4; \quad FM_{\text{Claridad}} = 1$$

DEFINICIÓN

Los valores medios en cada banda de octava de la Definición (D_{50}) correspondiente a este caso se muestran en la Tabla 23:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
D_{50}	0,33	0,36	0,37	0,42	0,45	0,49

Tabla 23: Caso 4: valores de D_{50} obtenidos por simulación

Para valorar la definición del recinto se utiliza su factor de mérito en función de un uso del recinto destinado a conciertos. Teniendo como Índice de Definición un valor de 0,40, que se encuentra por debajo de lo recomendado, se obtiene un factor de mérito de valor 0,88, que da a entender la definición del sonido es aceptable en este caso.

$$\text{Como } D_{50} \leq 0,45; \quad FM_{\text{Definición}} = 0,88$$

FACTOR DE MÉRITO GLOBAL

Mediante la media aritmética de los factores de mérito obtenidos se obtiene el factor de mérito global de este caso.

$$FM_{\text{Global}} = 0,81$$

CASO 5

PRESENCIA DE TAPICES, AFORO MEDIO LLENO SIN MÚSICOS

TIEMPO DE REVERBERACIÓN

Los valores medios en cada banda de octava del tiempo de reverberación (T_{30}) captados por los receptores correspondientes a este caso se muestran en la Tabla 24:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T_{30} (s)	1,74	1,43	1,35	1,21	1,14	1,01

Tabla 24: Caso 5: valores de T_{30} obtenidos por simulación

El Tr_{mid} de la capilla en este caso adopta un valor de 1,28 segundos y los valores medio de T_{30} en cada banda de octava forma la curva tonal de la capilla correspondiente a este caso y se muestra en la Figura 25:

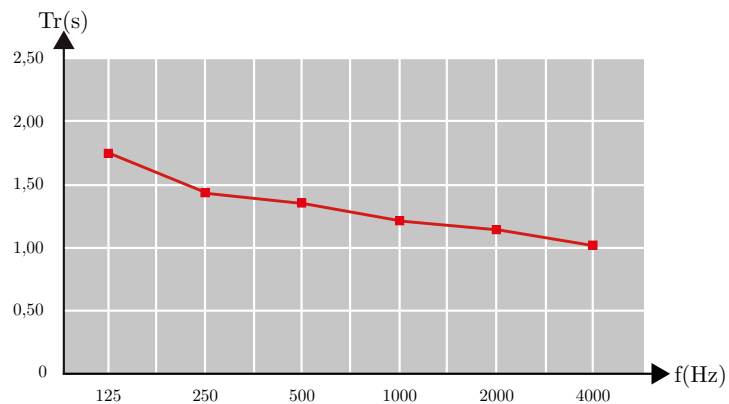


Figura 25: Caso 5: curva tonal

Para la evaluación del tiempo de reverberación se procederá a la obtención de su factor de mérito, que depende de la relación de Tr_{mid} y Tr_{opt} . Recordando que el Tr_{mid} es 1,28 s y el Tr_{opt} es 0,91 s, se tiene un tiempo de reverberación del recinto que excede levemente el tiempo de reverberación óptimo, obteniendo un factor de mérito con valor 0,25. Esto hace ver que el tiempo de reverberación en este caso no llega a ser adecuado para la correcta función del recinto.

$$\text{Como } T_{opt} < Tr_m \leq T_{opt} + 0,5; \quad FM_{Tr_{mid}} = 0,25$$

CALIDEZ

Con los valores de T_{30} obtenidos y representado en la curva tonal, a través de la relación de las frecuencias bajas y medias se obtiene la calidez del recinto.

$$\text{Calidez (BR): } 1,24;$$

Como la calidez de la sala vale 1,24, su factor de mérito es 1, puesto que se encuentra dentro de los valores recomendados. Esto da a entender que existe una excelente riqueza de frecuencias bajas, dando una excelente suavidad y melosidad a la música.

$$\text{Como } 1,1 \leq BR \leq 1,3; \quad FM_{Calidez} = 1$$

BRILLO

Con los valores de T_{30} obtenidos y representado en la curva tonal, a través de la relación de las frecuencias altas y medias se obtiene el brillo del recinto.

$$\text{Brillo (Br): } 0,84;$$

Teniendo un brillo de 0,84 se obtiene un factor de mérito de 1. Esto significa que el recinto presenta una excelente respuesta a frecuencias altas, dando un sonido claro y rico en armónicos.

$$\text{Como } 0,8 \leq Br \leq 1; \quad FM_{Brillo} = 1$$

EARLY DECAY TIME

Los valores medios en cada banda de octava del Early Decay Time (EDT) captados por los receptores correspondientes a este caso se muestran en la Tabla 25:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	1,8	1,47	1,34	1,17	1,08	1,05

Tabla 25: Caso 5: valores de EDT obtenidos por simulación

El EDT_m de la capilla en este caso adopta un valor de 1,26 segundos y según su relación con el Tr_{mid} y la actividad que va a realizarse en el recinto puede obtenerse su factor de mérito correspondiente. Debido a que el EDT_m en este caso es ligeramente menor al Tr_m se obtiene un factor de mérito de valor 1. Esto da a entender que la caída del nivel de presión sonora tiene un carácter más o menos lineal.

$$\text{Como } 0,9 Tr_m < EDT_m \leq Tr_m; \quad FM_{EDT} = 1$$

CLARIDAD

Los valores medios en cada banda de octava de la Claridad Musical (C_{80}) correspondiente a este caso se muestran en la Tabla 26:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C_{80} (dB)	-0,8	0,6	1,2	2,4	2,9	3,3

Tabla 26: Caso 5: valores de C_{80} obtenidos por simulación

Para valorar la claridad musical del recinto se utiliza su factor de mérito en función de un uso del recinto destinados a conciertos. Teniendo como Índice de Claridad un valor de 1,80 dB, que se encuentra entro del intervalo recomendado, se obtiene in factor de mérito de valor 1, por lo que la claridad de la música será ideal.

$$\text{Como } -2 \leq C_{80} \leq 4; \quad FM_{\text{Claridad}} = 1$$

DEFINICIÓN

Los valores medios en cada banda de octava de la Definición (D_{50}) correspondiente a este caso se muestran en la Tabla 27:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
D_{50}	0,34	0,4	0,43	0,49	0,51	0,54

Tabla 27: Caso 5: valores de D_{50} obtenidos por simulación

Para valorar la definición del recinto se utiliza su factor de mérito en función de un uso del recinto destinado a conciertos. Teniendo como Índice de Definición un valor de 0,46, que se encuentra dentro de los valores recomendados, se obtiene un factor de mérito de valor 1, que da a entender la definición del sonido es excelente en este caso.

$$\text{Como } 0,45 < D_{50} \leq 0,6; \quad FM_{\text{Definición}} = 1$$

FACTOR DE MÉRITO GLOBAL

Mediante la media aritmética de los factores de mérito obtenidos se obtiene el factor de mérito global de este caso.

$$FM_{\text{Global}} = 0,88$$

CASO 6**PRESENCIA DE TAPICES, AFORO LLENO SIN MÚSICOS****TIEMPO DE REVERBERACIÓN**

Los valores medios en cada banda de octava del tiempo de reverberación (T_{30}) captados por los receptores correspondientes a este caso se muestran en la Tabla 28:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T_{30} (s)	1,62	1,33	1,21	1,08	1,04	0,95

Tabla 28: Caso 6: valores de T_{30} obtenidos por simulación

El Tr_{mid} de la capilla en este caso adopta un valor de 1,15 segundos y los valores medio de T_{30} en cada banda de octava forma la curva tonal de la capilla correspondiente a este caso y se muestra en la Figura 26:

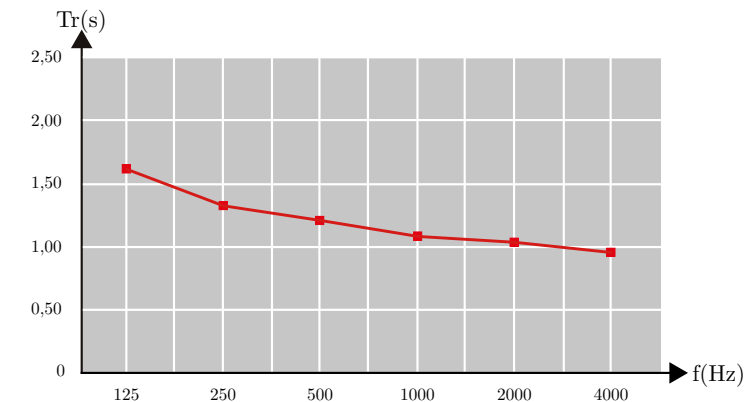


Figura 26: Caso 6: curva tonal

Para la evaluación del tiempo de reverberación se procederá a la obtención de su factor de mérito, que depende de la relación de Tr_{mid} y Tr_{opt} . Recordando que el Tr_{mid} es 1,15 s y el Tr_{opt} es 0,91 s, se tiene un tiempo de reverberación del recinto que excede levemente el tiempo de reverberación óptimo, obteniendo un factor de mérito con valor 0,52. Esto hace ver que el tiempo de reverberación en este caso es aceptable para la correcta función del recinto.

$$\text{Como } T_{\text{opt}} < Tr_{\text{m}} \leq T_{\text{opt}} + 0,5; \quad FM_{\text{Tmid}} = 0,52$$

CALIDEZ

Con los valores de T_{30} obtenidos y representado en la curva tonal, a través de la relación de las frecuencias bajas y medias se obtiene la calidez del recinto.

$$\text{Calidez (BR): } 1,29;$$

Como la calidez de la sala vale 1,29, su factor de mérito es 1, puesto que se encuentra dentro de los valores recomendados. Esto da a entender que existe una excelente riqueza de frecuencias bajas, dando una excelente suavidad y melosidad a la música.

$$\text{Como } 1,1 \leq BR \leq 1,3; \quad FM_{\text{Calidez}} = 1$$

BRILLO

Con los valores de T_{30} obtenidos y representado en la curva tonal, a través de la relación de las frecuencias altas y medias se obtiene el brillo del recinto.

$$\text{Brillo (Br): } 0,87;$$

Teniendo un brillo de 0,87 se obtiene un factor de mérito de 1. Esto significa que el recinto presenta una excelente respuesta a frecuencias altas, dando un sonido claro y rico en armónicos.

$$\text{Como } 0,8 \leq Br \leq 1; \quad FM_{\text{Brillo}} = 1$$

EARLY DECAY TIME

Los valores medios en cada banda de octava del Early Decay Time (EDT) captados por los receptores correspondientes a este caso se muestran en la Tabla 29:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	0,72	1,39	1,25	1,09	1,03	0,95

Tabla 29: Caso 6: valores de EDT obtenidos por simulación

El EDT_m de la capilla en este caso adopta un valor de 1,17 segundos y según su relación con el Tr_{mid} y la actividad que va a realizarse en el recinto puede obtenerse su factor de mérito correspondiente. Debido a que el EDT_m en este caso es ligeramente mayor al Tr_m se obtiene un factor de mérito superior a la unidad: 1,02. Esto sucede en recintos con mucha difusión y es un caso poco frecuente.

$$\text{Como } EDT_m > Tr_m; \quad FM_{EDT} = 1,02$$

CLARIDAD

Los valores medios en cada banda de octava de la Claridad Musical (C_{80}) correspondiente a este caso se muestran en la Tabla 30:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C_{80} (dB)	-0,40	0,90	1,60	2,80	3,40	3,90

Tabla 30: Caso 6: valores de C_{80} obtenidos por simulación

Para valorar la claridad musical del recinto se utiliza su factor de mérito en función de un uso del recinto destinados a conciertos. Teniendo como Índice de Claridad un valor de 2,20 dB, que se encuentra dentro del intervalo recomendado, se obtiene un factor de mérito de valor 1, por lo que la claridad de la música será ideal.

$$\text{Como } -2 \leq C_{80} \leq 4; \quad FM_{\text{Claridad}} = 1$$

DEFINICIÓN

Los valores medios en cada banda de octava de la Definición (D_{50}) correspondiente a este caso se muestran en la Tabla 31:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
D_{50}	0,35	0,41	0,45	0,51	0,54	0,56

Tabla 31: Caso 6: valores de D_{50} obtenidos por simulación

Para valorar la definición del recinto se utiliza su factor de mérito en función de un uso del recinto destinado a conciertos. Teniendo como Índice de Definición un valor de 0,48, que se encuentra dentro de los valores recomendados, se obtiene un factor de mérito de valor 1, que da a entender la definición del sonido es excelente en este caso.

$$\text{Como } 0,45 < D_{50} \leq 0,6; \quad FM_{\text{Definición}} = 1$$

FACTOR DE MÉRITO GLOBAL

Mediante la media aritmética de los factores de mérito obtenidos se obtiene el factor de mérito global de este caso.

$$FM_{\text{Global}} = 0,92$$

CASO 7

PRESENCIA DE TAPICES, AFORO MEDIO LLENO CON MÚSICOS

TIEMPO DE REVERBERACIÓN

Los valores medios en cada banda de octava del tiempo de reverberación (T_{30}) captados por los receptores correspondientes a este caso se muestran en la Tabla 32:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T_{30} (s)	1,69	1,32	1,15	0,98	0,95	0,89

Tabla 32: Caso 7: valores de T_{30} obtenidos por simulación

El Tr_{mid} de la capilla en este caso adopta un valor de 1,07 segundos y los valores medio de T_{30} en cada banda de octava forma la curva tonal de la capilla correspondiente a este caso y se muestra en la Figura 27:

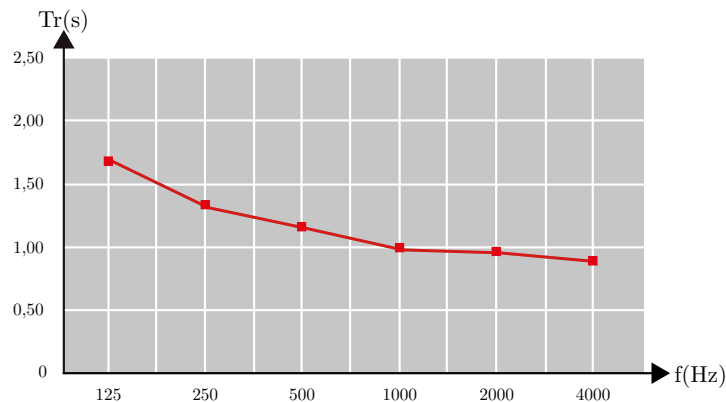


Figura 27: Caso 7: curva tonal

Para la evaluación del tiempo de reverberación se procederá a la obtención de su factor de mérito, que depende de la relación de Tr_{mid} y Tr_{opt} . Recordando que el Tr_{mid} es 1,07 s y el Tr_{opt} es 0,91 s, se tiene un tiempo de reverberación del recinto que excede levemente el tiempo de reverberación óptimo, obteniendo un factor de mérito con valor 0,68. Esto hace ver que el tiempo de reverberación en este caso es aceptable para la correcta función del recinto.

$$\text{Como } T_{opt} < Tr_m \leq T_{opt} + 0,5; \quad FM_{Tr_{mid}} = 0,68$$

CALIDEZ

Con los valores de T_{30} obtenidos y representado en la curva tonal, a través de la relación de las frecuencias bajas y medias se obtiene la calidez del recinto.

$$\text{Calidez (BR): } 1,41;$$

Como la calidez de la sala vale 1,41, su factor de mérito es 0,55, puesto que excede los valores recomendados. Esto da a entender que existe un exceso de calidez, dando una mayor percepción de las frecuencias bajas.

$$\text{Como } 1,3 \leq BR \leq 1,45; \quad FM_{Calidez} = 0,55$$

BRILLO

Con los valores de T_{30} obtenidos y representado en la curva tonal, a través de la relación de las frecuencias altas y medias se obtiene el brillo del recinto.

$$\text{Brillo (Br): } 0,86;$$

Teniendo un brillo de 0,86 se obtiene un factor de mérito de 1. Esto significa que el recinto presenta una excelente respuesta a frecuencias altas, dando un sonido claro y rico en armónicos.

$$\text{Como } 0,8 \leq Br \leq 1; \quad FM_{Brillo} = 1$$

EARLY DECAY TIME

Los valores medios en cada banda de octava del Early Decay Time (EDT) captados por los receptores correspondientes a este caso se muestran en la Tabla 33:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	1,76	1,36	1,21	1,02	0,99	0,96

Tabla 33: Caso 7: valores de EDT obtenidos por simulación

El EDT_m de la capilla en este caso adopta un valor de 1,12 segundos y según su relación con el Tr_{mid} y la actividad que va a realizarse en el recinto puede obtenerse su factor de mérito correspondiente. Debido a que el EDT_m en este caso es ligeramente mayor al Tr_m se obtiene un factor de mérito superior a la unidad: 1,05. Esto sucede en recintos con mucha difusión y es un caso poco frecuente.

$$\text{Como } EDT_m > Tr_m; \quad FM_{EDT} = 1,05$$

CLARIDAD

Los valores medios en cada banda de octava de la Claridad Musical (C_{80}) correspondiente a este caso se muestran en la Tabla 34:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C_{80} (dB)	-0,50	1,20	2,10	3,60	3,90	4,20

Tabla 34: Caso 7: valores de C_{80} obtenidos por simulación

Para valorar la claridad musical del recinto se utiliza su factor de mérito en función de un uso del recinto destinados a conciertos. Teniendo como Índice de Claridad un valor de 2,85 dB, que se encuentra entro del intervalo recomendado, se obtiene in factor de mérito de valor 1, por lo que la claridad de la música será ideal.

$$\text{Como } -2 \leq C_{80} \leq 4; \quad FM_{\text{Claridad}} = 1$$

DEFINICIÓN

Los valores medios en cada banda de octava de la Definición (D_{50}) correspondiente a este caso se muestran en la Tabla 35:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
D_{50}	0,35	0,43	0,48	0,55	0,57	0,58

Tabla 35: Caso 7: valores de D_{50} obtenidos por simulación

Para valorar la definición del recinto se utiliza su factor de mérito en función de un uso del recinto destinado a conciertos. Teniendo como Índice de Definición un valor de 0,52, que se encuentra dentro de los valores recomendados, se obtiene un factor de mérito de valor 1, que da a entender la definición del sonido es excelente en este caso.

$$\text{Como } 0,45 < D_{50} \leq 0,6; \quad FM_{\text{Definición}} = 1$$

FACTOR DE MÉRITO GLOBAL

Mediante la media aritmética de los factores de mérito obtenidos se obtiene el factor de mérito global de este caso.

$$FM_{\text{Global}} = 0,88$$

CASO 8

PRESENCIA DE TAPICES, AFORO LLENO CON MÚSICOS

TIEMPO DE REVERBERACIÓN

Los valores medios en cada banda de octava del tiempo de reverberación (T_{30}) captados por los receptores correspondientes a este caso se muestran en la Tabla 36:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
T_{30} (s)	1,58	1,26	1,11	0,95	0,92	0,84

Tabla 36: Caso 8: valores de T_{30} obtenidos por simulación

El Tr_{mid} de la capilla en este caso adopta un valor de 1,03 segundos y los valores medio de T_{30} en cada banda de octava forma la curva tonal de la capilla correspondiente a este caso y se muestra en la Figura 28:

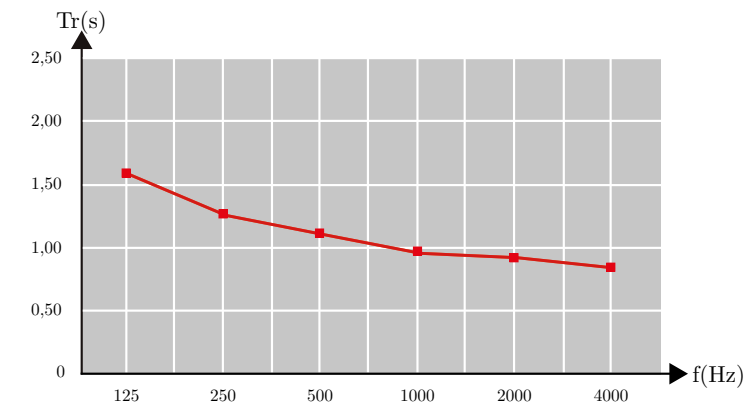


Figura 28: Caso 8: curva tonal

Para la evaluación del tiempo de reverberación se procederá a la obtención de su factor de mérito, que depende de la relación de Tr_{mid} y Tr_{opt} . Recordando que el Tr_{mid} es 1,03 s y el Tr_{opt} es 0,91 s, se tiene un tiempo de reverberación del recinto que excede levemente el tiempo de reverberación óptimo, obteniendo un factor de mérito con valor 0,75. Esto hace ver que el tiempo de reverberación en este caso es adecuado para la correcta función del recinto.

$$\text{Como } T_{\text{opt}} < Tr_{\text{m}} \leq T_{\text{opt}} + 0,5; \quad FM_{\text{Trmid}} = 0,75$$

CALIDEZ

Con los valores de T_{30} obtenidos y representado en la curva tonal, a través de la relación de las frecuencias bajas y medias se obtiene la calidez del recinto.

$$\text{Calidez (BR): } 1,38;$$

Como la calidez de la sala vale 1,38, su factor de mérito es 0,69, puesto que excede los valores recomendados. Esto da a entender que existe un exceso de calidez, dando una mayor percepción de las frecuencias bajas.

$$\text{Como } 1,3 \leq \text{BR} \leq 1,45; \quad \text{FM}_{\text{Calidez}} = 0,69$$

BRILLO

Con los valores de T_{30} obtenidos y representado en la curva tonal, a través de la relación de las frecuencias altas y medias se obtiene el brillo del recinto.

$$\text{Brillo (Br): } 0,85;$$

Teniendo un brillo de 0,85 se obtiene un factor de mérito de 1. Esto significa que el recinto presenta una excelente respuesta a frecuencias altas, dando un sonido claro y rico en armónicos.

$$\text{Como } 0,8 \leq \text{Br} \leq 1; \quad \text{FM}_{\text{Brillo}} = 1$$

EARLY DECAY TIME

Los valores medios en cada banda de octava del Early Decay Time (EDT) captados por los receptores correspondientes a este caso se muestran en la Tabla 37:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
EDT (s)	1,67	1,32	1,17	0,97	0,93	0,87

Tabla 37: Caso 7: valores de EDT obtenidos por simulación

El EDT_m de la capilla en este caso adopta un valor de 1,07 segundos y según su relación con el Tr_{mid} y la actividad que va a realizarse en el recinto puede obtenerse su factor de mérito correspondiente. Debido a que el EDT_m en este caso es ligeramente mayor al Tr_m se obtiene un factor de mérito superior a la unidad: 1,04. Esto sucede en recintos con mucha difusión y es un caso poco frecuente.

$$\text{Como } \text{EDT}_m > \text{Tr}_m; \quad \text{FM}_{\text{EDT}} = 1,05$$

CLARIDAD

Los valores medios en cada banda de octava de la Claridad Musical (C_{80}) correspondiente a este caso se muestran en la Tabla 38:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
C_{80} (dB)	-0,10	1,60	2,60	4,10	4,50	4,90

Tabla 38: Caso 8: valores de C_{80} obtenidos por simulación

Para valorar la claridad musical del recinto se utiliza su factor de mérito en función de un uso del recinto destinados a conciertos. Teniendo como Índice de Claridad un valor de 3,35 dB, que se encuentra entro del intervalo recomendado, se obtiene in factor de mérito de valor 1, por lo que la claridad de la música será ideal.

$$\text{Como } -2 \leq C_{80} \leq 4; \quad \text{FM}_{\text{Claridad}} = 1$$

DEFINICIÓN

Los valores medios en cada banda de octava de la Definición (D_{50}) correspondiente a este caso se muestran en la Tabla 39:

FRECUENCIAS (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
D_{50}	0,37	0,45	0,50	0,58	0,60	0,61

Tabla 39: Caso 8: valores de D_{50} obtenidos por simulación

Para valorar la definición del recinto se utiliza su factor de mérito en función de un uso del recinto destinado a conciertos. Teniendo como Índice de Definición un valor de 0,54, que se encuentra dentro de los valores recomendados, se obtiene un factor de mérito de valor 1, que da a entender la definición del sonido es excelente en este caso.

$$\text{Como } 0,45 < D_{50} \leq 0,6; \quad \text{FM}_{\text{Definición}} = 1$$

FACTOR DE MÉRITO GLOBAL

Mediante la media aritmética de los factores de mérito obtenidos se obtiene el factor de mérito global de este caso.

$$\text{FM}_{\text{Global}} = 0,91$$

Capítulo VI

ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

RESUMEN DE RESULTADOS

Para una visión más clara de los resultados obtenidos en el Capítulo V mediante el proceso de simulación acústica, en la Tabla 40 se pueden apreciar los valores más relevantes para poder analizar y reflexionar sobre el comportamiento acústico del recinto frente a los distintos casos de simulación.

CASO		1	2	3	4	5	6	7	8
EDT	EDT _{mid}	2,01	1,80	1,85	1,66	1,26	1,17	1,12	1,07
	FM _{EDT}	1,02	1,01	1,00	1,00	1,00	1,02	1,05	1,04
Tr	T _{mid}	1,98	1,79	1,89	1,70	1,28	1,15	1,07	1,03
	FM _{Tr}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,52	0,68	0,75
C ₈₀	C ₈₀	-0,97	-0,20	-0,13	0,63	1,80	2,20	2,85	3,73
	FM _{C80}	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
D ₅₀	D ₅₀	0,32	0,35	0,36	0,40	0,46	0,48	0,52	0,54
	FM _{D50}	0,70	0,78	0,80	0,88	1,00	1,00	1,00	1,00
Br	Br	0,78	0,79	0,77	0,79	0,84	0,87	0,86	0,85
	FM _{Brillo}	0,95	0,96	0,92	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00
BR	BR	1,10	1,13	1,12	1,17	1,24	1,29	1,41	1,38
	FM _{Calidez}	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,55	0,69
FM _{Global}		0,78	0,79	0,79	0,81	0,88	0,92	0,88	0,91

Tabla 40: Resumen de resultados de los casos de simulación

En la Tabla 40 se pueden apreciar los valores de los parámetros acústicos de cada caso de simulación, así como su factor de mérito asociado. También se pueden apreciar los valores de los factores de mérito globales de cada caso de simulación, facilitando así su comparación entre ellos y entre los factores de mérito de cada parámetro que lo conforma.

Según Arau, los casos en los que el factor de mérito global es superior a 0,8 son aptos para llevar a cabo su actividad prevista. Sin embargo, aunque todos los parámetros tienen la misma ponderación a la hora de determinar el factor de mérito global, no todos los parámetros acústicos tienen la misma relevancia, por lo que es necesario analizar cada parámetro acústico en base al factor de mérito global de cada caso.

CONCLUSIONES

Llevado a cabo todo el procedimiento de simulación y obtenidos los parámetros acústicos de todos los casos de estudio, a continuación se procede a una valoración de los resultados obtenidos en la Capilla de la Inmaculada;

1 La obtención del modelo de simulación se ha basado en el ajuste de la simulación tomando de referencia los valores del tiempo de reverberación obtenido en las mediciones in situ. La elección de este parámetro como punto de partida para el ajuste del modelo se debe a que dentro de un recinto cerrado suele tener un valor constante, con pequeñas desviaciones entre distintos puntos dentro del mismo. El ajuste de la curva tonal del modelo simulado se encuentra dentro del 5% establecido por el JND correspondiente al tiempo de reverberación, en comparación con la curva tonal real del recinto. Además, los coeficientes de absorción de los materiales empleados para esta simulación fueron también válidos en el modelo virtual de la Iglesia, dando resultados acordes al 5% establecido por el JND.

2 De manera general, se puede afirmar que la presencia de los tapices laterales afecta de forma significativa a los parámetros acústicos obtenidos por simulación, mejorando condiciones acústicas del recinto.

Observando los parámetros acústicos obtenidos en las simulaciones, se puede apreciar que los valores de T_{30} obtenidos en las simulaciones de aforo sin los tapices exceden considerablemente el valor de Tr_{opt} requerido para la música en un espacio de ese volumen. La colocación de los tapices reduce considerablemente los valores de T_{30} y de EDT en cada banda de octava, reduciéndolo entre 0,5 y 1 segundo, algo considerablemente normal puesto que ha aumentado la superficie absorbente.

La presencia de los tapices mejora los parámetros D_{50} y Br del recinto respecto al modelo sin tapices, dándoles valores más adecuados aunque ya eran buenos en el otro caso de simulación.

El parámetro C_{80} obtiene un valor excelente en todos los casos de simulación, por lo que, en el caso de la música, habrá una clara identificación de los distintos sonidos que compondrán una obra musical, pudiendo individualizar los sonidos que lo integran.

Por otra parte, los valores de EDT son prácticamente iguales a los de T_{30} en todos los casos de simulación, dando a entender que el recinto cuenta con una difusión muy homogénea. Esto tiene sentido conociendo el interior del recinto, pues la presencia de elementos ornamentales, los retablos de madera y las cornisas son elementos que aportan una mayor difusión del sonido en frecuencias medias y agudas.

3 La influencia del aforo no afecta de la misma forma en condiciones de presencia y ausencia de tapices. En la simulación realizada sin la presencia de tapices se puede apreciar una mayor reducción del T_{30} en comparación con la simulación con la presencia de los tapices. Esto se debe a que la presencia de tapices otorga al recinto de una mayor superficie de absorción del sonido, haciendo que la influencia del aforo no afecte de la misma forma que en la simulación con ausencia de tapices, donde la presencia del aforo tendrá una mayor influencia en las condiciones acústicas del recinto. Esto hace ver que cuanto más absorbente sean los paramentos de una sala, menos influencia en la absorción acústica tendrá su aforo.

Sin embargo, aunque la influencia del aforo es mayor en la simulación sin tapices, los valores del T_{30} siguen sin alcanzar valores aceptables para la música.

4 La presencia y número de los músicos también influye de forma positiva la calidad tonal del recinto, pues ayudan a la reducción del tiempo de reverberación en todos los casos puesto que los músicos se encuentran en el punto de fuente sonora y su presencia proporciona una gran absorción del sonido, haciendo que las reflexiones provenientes del altar lleguen con menos energía a los espectadores.

Sin embargo, hay un caso en concreto que la excesiva absorción a causa de los tapices, el aforo y los músicos produce un exceso de calidez acústica, amplificando la presencia de las frecuencias bajas y pudiendo dar una percepción del sonido un poco artificial.

5 En base a los resultados obtenidos se puede decir que, en general, el recinto es idóneo para la interpretación de la música de cámara. Sin embargo, la interpretación de la música en la capilla sin la presencia de los tapices, aunque en general se obtienen unos factores de mérito aceptables, los valores de los tiempos de reverberación no son para nada beneficiosos en el resultado de la simulación, por lo que es preferible y aconsejable la interpretación musical con la presencia de los tapices.

En el caso de una interpretación musical realizada por un solista daría, en general, unos parámetros acústicos del recinto excelentes a excepción del tiempo de reverberación. Sin embargo, una interpretación musical realizada por un grupo más grande de músicos mejoraría el tiempo de reverberación de forma considerable pero daría mayor presencia de sonidos graves en la música que se interpreta debido a un exceso de calidez del recinto.

Hay que tener en cuenta que la percepción de la música también depende de la calidad de los instrumentos musicales y de la virtuosidad de los intérpretes, por lo que a los datos objetivos obtenidos en las simulaciones hay que añadirles el factor humano de los músicos.

APORTACIONES

Con este trabajo de investigación se ha contribuido al análisis de las condiciones acústicas de uno de los espacios que compone uno de los edificios patrimoniales más importantes de Valencia como es el Real Colegio Seminario de Corpus Christi.

Con la obtención de una fiel reproducción virtual de la Capilla de la Inmaculada se ha analizado de forma exhaustiva sus condiciones acústicas; además, esta simulación puede utilizarse para comprobar las modificaciones en las propiedades acústicas que puedan ocasionar futuras intervenciones, ya sean de mantenimiento o intervenciones que buscan una optimización del rendimiento del recinto.

El análisis acústico del Real Colegio Seminario del Corpus Christi se verá completo con el estudio del Claustro y de la Iglesia, por lo que este trabajo marca un primer paso en el estudio acústico del Real Colegio.

Bibliografía

ALLEN J. B.; BERKLEY D. A., (1979) Image method for efficiently simulating small-room acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America* 65, pp. 943-950.

ARAU H., (1958) ABC de la Acústica Arquitectónica, Barcelona, CEAC.

BARBA A.; GIMÉNEZ A.; (2011) El Teatro Principal de Valencia: acústica y arquitectura escénica. *Teatros de la Generalitat, Universitat Politècnica de València y Ministerio de Ciencia e Innovación.*

BARRON M., (1995) Interpretation of early times in concert auditoria. *Acustica*, 81, pp. 320-331.

BENITO F., (1981) La arquitectura del Colegio del Patriarca y sus artífices. Valencia: Federico Domenech.

BÉRCHEZ J. (1995) Monumentos de la Comunidad Valenciana: Catálogo de monumentos y conjuntos declarados e incoados. Tomo X, Valencia, arquitectura religiosa. Conselleria de Cultura, Educació i Ciència, Valencia

BÉRCHEZ J.; GÓMEZ-FERRER M., (1996) El Real Colegio del Corpus Christi o del Patriarca: Valencia, Generalitat Valenciana, Valencia.

GADE A. C. (1989) Acoustical survey of eleven european concert halls: a basis for discussion of hall in Denmark. *Acoustics Laboratory, Technical University of Denmark, Report N° 44.*

GALINDO M., (2003) La Acústica en Espacios Religiosos Católicos: Iglesias Gótico-Mudéjares. Tesis doctoral, Universidad de Sevilla.

GIMÉNEZ A.; MARÍN A.; SANCHIS A.; ROMERO J.; CERDÁ S.; JORGE M. D.; (2001) Estudio de la evolución de parámetros acústicos que miden la calidad de salas de conciertos. 32ª *TecniAcustica*, Logroño.

GUILLÉN I., SERRANO P.; GÓMEZ V.; LLOPIS A.; (2015) Estudio acústico de claustros. Grado de influencia de los coeficientes de difusión en la simulación acústica de un claustro. *TecniAcustica 2015. 46º Congreso Español de Acústica. 9º Congreso Ibérico de acústica. Simposio Europeo sobre Acústica Virtual y AMISONICS*, Valencia.

KULOWSKI A., (1985) Algorithmic representation of the ray tracing technique. *Applied Acoustics* 18, pp. 449-469.

LEWERS T., (1993) A combined beam tracing and radiant exchange computer model of room acoustic. *Applied Acoustics* 38, pp. 161-178.

LLOPIS J., (2007) El claustro del Colegio de Corpus Christi de Valencia. Análisis formal y compositivo. *Archivo Español de Arte*, Vol 80, n° 317.

LUBMAN D.; KISER B; (2001) The history of western civilization told through the acoustic of its worship spaces. 17th International Congresses on Acoustics, Roma.

MERLO J. L., (2010) El Patriarca (Real Colegio del Corpus Christi), pp. 57. En: Taberner F.; Alcalde C.; *Guía de arquitectura de Valencia*, Colegio Territorial de Arquitectos de Valencia.

NAVARRO J.; SENDRA J. J.; (1996) La iglesia como lugar de la música. *Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Madrid, pp. 381-387.

PLANELLS A.; SEGURA J.; CERDÁ S.; BARBA A.; CIBRIÁN R.; GIMÉNEZ A.; (2016) ¿Son válidos los coeficientes de absorción normalizados en la simulación acústica de edificios patrimoniales? 47ª *TecniAcustica EuroRegio2016*, Oporto.

RINDEL J. H., (2000) The use of computer modeling in room acoustics. *Journal of Vibroengineering* N°3(4), pp. 219-224.

RINDEL J. H., SHIOKAWA H., CHRISTENSEN C. L., GADE A. C., (1999) Comparisons between computer simulations of room acoustical parameters and those measured in concert halls. *The Journal of the Acoustical Society of America* 105, pp. 1173, 3PAAA3.

SABINE W. C., (1900) *Architectural Acoustics*. Am. Arch. Building news, 68.

SAN MARTÍN R.; LOPETEGUI K.; ARANA M.; (2009) Determinación del Just Noticeable Difference (JND) de parámetros acústicos mediante campos sonoros reales. 40ª *TecniAcustica*, Cadiz

SANCHO J.; LLOPIS A.; LLINARES J.; (2008) *Acústica arquitectónica y urbanística*. LIMUSA, S.A.

SENDRA J. J., NAVARRO J.; (1996) El concilio de Trento y las condiciones acústicas en las iglesias. *Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Madrid, PP. 385-490.

SENDRA J. J.; NAVARRO J.; (1998) La evolución de las condiciones acústicas en las iglesias: del paleocristiano al tardobarroco. *Instituto de Ciencias de la Construcción*. Universidad de Sevilla.

VIAN J. P.; VAN MAERCKE D.; (1986) Calculation of the room impulse response using a ray-tracing method. *Proceeding of the ICA symposium on acoustic and theatre planning for the performing arts*, Canada, pp. 74-78.

VORLÄNDER M., (1989) Simulation of the transient and steady state sound propagation in room using a new combined ray-tracing/image-source algorithm. *The Journal of the Acoustical Society of America* 86, pp. 172-178.

Derechos y autoría de las imágenes

Imagen de portada: Modelo virtual de la Iglesia del Real Colegio

Elaboración propia

Figura 1: Exterior del Real Colegio Seminario del Corpus Christi.

Fuente Propia

Figura 2: La Iglesia del Real Colegio del Corpus Christi

Fuente: Vicente Gómez Lozano.

Figura 3: Planta del Real Colegio Seminario del Corpus Christi de Valencia.

Plano redibujado en AutoCad a partir del plano del Colegio Territorial de Arquitectos de Valencia disponible en: <http://www.arquitectosdevalencia.es/arquitectura-de-valencia/i-ac-xvi/el-patriarca>; con modificaciones de deducción propia.

Figura 4: El Claustro del Real Colegio de Corpus Christi.

Fuente: Vicente Gómez Lozano

Figura 5: Capilla de la Inmaculada.

Fuente: Vicente Gómez Lozano

Figura 6: Representación gráfica del tiempo de reverberación.

Elaboración propia

Figura 7: Curva tonal.

Elaboración propia

Figura 8: Representación gráfica del Tr y EDT.

Elaboración propia

Figura 9: Reflexiones de 1^{er}, 2^{do} y 3^{er} orden y sus imágenes.

Elaboración propia.

Figura 10: Trazado de rayos de prismas de base triangular.

Elaboración propia

Figura 11: Test de visibilidad.

Elaboración propia

Figura 12: Principio del método híbrido.

Elaboración propia

Figura 13: Localización de los puntos de medida registrados.

Elaboración propia a partir de Figura 4.

Figura 14: Fuente emisora posicionada en el altar.

Fuente: Vicente Gómez Lozano

Figura 15: Curva tonal de los valores T_{30} medidos.

Elaboración propia a partir de datos facilitados por Pau Serrano.

Figura 16: Modelado geométrico tridimensional de la Capilla de la Inmaculada.

Elaboración propia con el software AutoCad con las medidas facilitadas por Carlos Lerma.

Figura 17: Modelado geométrico importado al software Odeon.

Elaboración propia con el software Odeon

Figura 18: Vistas diédricas del modelo virtual de la Capilla de la Inmaculada.

Elaboración propia con el software Odeon.

Figura 19: Vista interior del modelo virtual de la Capilla de la Inmaculada.

Elaboración propio con el programa Odeon.

Figura 20: Vista interior de la Capilla de la Inmaculada.

Fuente: Vicente Gómez Lozano.

Figura 21: Caso 1: curva tonal.

Elaboración propia.

Figura 22: Caso 2: curva tonal.

Elaboración propia.

Figura 23: Caso 3: curva tonal.

Elaboración propia.

Figura 24: Caso 4: curva tonal.

Elaboración propia.

Figura 25: Caso 5: curva tonal.

Elaboración propia.

Figura 26: Caso 6: curva tonal.

Elaboración propia.

Figura 27: Caso 7: curva tonal.

Elaboración propia.

Figura 28: Caso 8: curva tonal.

Elaboración propia.

