

Espacios que suenan bien

Comparación entre tradición y modernidad



Celia Corbacho Cubillo

Trabajo Fin de Grado

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA



TRABAJO FIN DE GRADO

Celia Corbacho Cubillo

*Espacios que suenan bien
Comparación entre tradición y modernidad*

ESPACIOS QUE SUENAN BIEN
COMPARACIÓN ENTRE TRADICIÓN Y MODERNIDAD

Estudiante

Celia Corbacho Cubillo

Tutora

María de los Ángeles Navacerrada Saturio

Departamento de Estructuras y Física de la Edificación

Aula TFG 5

María Barbero Liñán, *coordinadora*

José Antonio Flores Soto, *adjunto*

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Universidad Politécnica de Madrid

Índice

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

1. EVOLUCIÓN DE LAS SALAS DE CONCIERTO

2. TIPOLOGÍA EN SALAS DE CONCIERTO

3. CRITERIOS DE DISEÑO

4. CASOS DE ESTUDIO

Real Concertgebouw, Ámsterdam

Gasteig Philharmonie, Múnich

5. PARÁMETROS ACÚSTICOS

6. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE CASOS

7. COMPARACIÓN DE CASOS

Materiales

Influencia de la posición del oyente en los parámetros acústicos

Simulación de rayos

CONCLUSIONES

ANEXOS

FUENTES

Bibliografía y recursos digitales

Procedencia de las ilustraciones

*«La arquitectura se convierte en música cuando se le da un alma»
Antoni Gaudí*

Resumen

Asistir a conciertos es una actividad cultural habitual que ha impulsado la evolución del diseño de las salas de concierto a lo largo del tiempo. Estos cambios formales han generado características acústicas diversas según el tipo de sala. Este trabajo analiza cómo estas diferencias influyen en la experiencia del espectador a través del estudio de dos casos emblemáticos: el Real Concertgebouw de Ámsterdam y el Gasteig Philharmonie de Múnich.

El Real Concertgebouw, con su diseño tradicional, es reconocido por su excelente acústica y se considera un modelo de referencia. En contraste, la Gasteig Philharmonie, construida un siglo después, presenta una forma en abanico que introduce nuevos retos y posibilidades acústicas.

El análisis se enfoca en examinar la influencia de tres aspectos fundamentales: los materiales empleados, los parámetros acústicos en distintas posiciones del espectador y la simulación del comportamiento del sonido en superficies específicas. Para ello, se han utilizado el software de simulación acústica Odeon y modelos tridimensionales que han permitido realizar una evaluación precisa de las condiciones acústicas de ambos auditorios y su impacto en la percepción del público.

Esta metodología ha facilitado una comparación detallada que pone de manifiesto cómo las decisiones de diseño espacial y la selección de materiales pueden transformar la experiencia auditiva en diferentes contextos arquitectónicos.

PALABRAS CLAVE

Parámetros acústicos · Software Odeon · Gasteig · Concertgebouw · Percepción sonora · Diseño de auditorios

Abstract

Attending concerts is a common cultural activity that has driven the evolution of concert hall design over time. These formal changes have proven diverse acoustic characteristics depending on the type of hall. This work analyzes how these differences influence the spectator's experience through the study of two iconic cases: the Royal Concertgebouw in Amsterdam and the Gasteig Philharmonie in Munich.

The Royal Concertgebouw, with its traditional design, is renowned for its excellent acoustics and is considered a benchmark model. In contrast, the Gasteig Philharmonie, built a century later, features a fan-shaped design that introduces new acoustic challenges and possibilities.

The analysis focuses on examining the influence of three fundamental aspects: the materials used, the acoustic parameters at different spectator positions, and the simulation of sound behaviour on specific surfaces. To achieve this, the acoustic simulation software Odeon and three-dimensional models were utilized, enabling a precise evaluation of the acoustic conditions in both auditoriums and their impact on audience perception.

This methodology has facilitated a detailed comparison, highlighting how spatial design decisions and material selection can transform the auditory experience in different architectural contexts.

KEYWORDS

Acoustic Parameters · Odeon software · Gasteig · Concertgebouw · Sound perception · Auditorium Design

Introducción

A lo largo de la historia, la relación entre la música y la arquitectura ha sido objeto de estudio. Ambas disciplinas, aunque aparentemente distintas, comparten principios fundamentales relacionados con la percepción del espacio. En este contexto, la acústica arquitectónica se comporta como un campo esencial en el diseño de espacios destinados a la música y las artes escénicas.

Desde la Antigüedad, el diseño de templos, teatros y otros espacios arquitectónicos ha considerado la acústica como un elemento clave, aunque muchas veces de forma intuitiva. Sin embargo, a medida que el conocimiento científico ha avanzado, esta relación ha evolucionado de manera significativa, integrando principios físicos y matemáticos que han transformado la manera en que se conciben los espacios dedicados a la música. Estos desarrollos han influido profundamente no solo en la arquitectura, sino también en el arte y la cultura, dando lugar a nuevas pautas en la interpretación y disfrute de las obras musicales.

Este Trabajo de Fin de Grado aborda el estudio de la acústica arquitectónica con un enfoque específico en las salas de conciertos, lugares que representan la culminación de siglos de evolución técnica y artística en el diseño acústico. Para ello, se han seleccionado como casos de estudio dos ejemplos emblemáticos: el Real Concertgebouw de Ámsterdam y la Filarmónica de Múnich. Estas dos salas, situadas en contextos históricos y culturales distintos, ilustran cómo el diseño acústico ha respondido a las demandas y aspiraciones de cada época, ofreciendo una visión comparativa de las mejores prácticas en la arquitectura de espacios musicales. En este sentido se plantea una visión comparativa de estos dos espacios en el que se busca resaltar si el diseño acústico, la selección de materiales y la integración de nuevas tecnologías han servido para mejorar la experiencia del público.

Evolución de las salas de concierto

Desde la Antigüedad, los auditorios y salas de conciertos han sido un tipo arquitectónico recurrente, diseñados específicamente para amplificar y distribuir el sonido de manera efectiva. Ya Vitruvio en el siglo I a.C, en su obra *De Architectura*, dedica el Capítulo 8 del Libro Quinto a la Acústica, y clasifica los teatros según sus propiedades en disonantes, circunsonantes, resonantes y consonantes, considerando estos últimos como los ideales en términos acústicos, pues permitían una propagación del sonido clara y sin distorsiones¹. Según Vitruvio, el lugar debía permitir que la voz se propagara de manera suave y sin obstrucciones, evitando elementos que interfirieran en la claridad del sonido.

A lo largo de los siglos, estos principios iniciales han evolucionado con el avance de la tecnología, el estudio de la acústica y los materiales de construcción, dando lugar a diseños innovadores en salas de concierto y auditorios modernos. Sin embargo, el objetivo sigue siendo el mismo: crear espacios donde la experiencia sonora sea óptima tanto para el público como para los intérpretes.

A continuación, se presenta un breve recorrido histórico sobre la arquitectura de este tipo de recintos.

Antigüedad

En la Antigua Grecia, los teatros y anfiteatros al aire libre eran las construcciones predominantes, con grandes capacidades, como el teatro en el Acrópolis de Atenas, que podía albergar a unos 30.000 espectadores. Estos espacios estaban más orientados a las representaciones teatrales que a la música.

La música en esa época se caracterizaba por ser seca y aguda, con una fuerte componente de improvisación, monodia y una mezcla de texto y danza. Para este tipo de representaciones, se construyeron odeones, edificios cerrados, generalmente con techos de madera y de menor tamaño que los teatros, ofreciendo un entorno más adecuado para las actuaciones musicales². Estos espacios tenían una capacidad muy limitada, llegando a albergar en torno a 200 espectadores, lo que los convertía en lugares exclusivos. Compartían la misma estructura principal que los teatros convencionales: el diseño del edificio solía ser semicircular o, en algunos casos, rectangular. Su principal característica era que se trataba de construcciones total o par-

1. Vitruvio, «De Architectura», en Los Diez libros de Arquitectura, vol. 5

2. Ángel Luis León Rodríguez, «La acústica de los teatros a través de la historia», en Segundo Congreso Nacional de Historia de la Construcción, 1998.

cialmente cubiertas, lo que permitía generar una reverberación de las voces, algo que no era fácil en los teatros al aire libre.

1.1. Reconstrucción del
Odeón de Pompeya

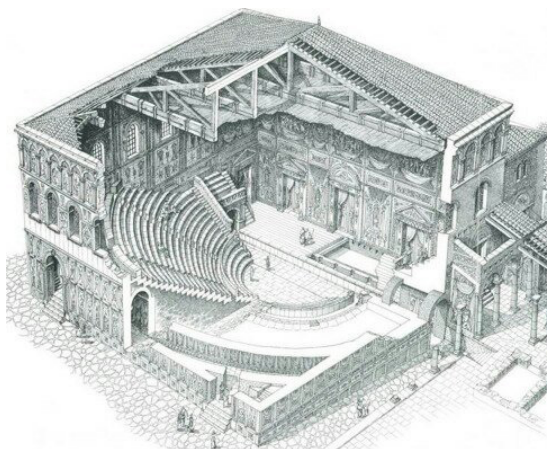


Figura 1.1

Edad Media

En el Medievo, entre los siglos X y XV, se produce una gran transformación del mundo teatral, con un enfoque principal en temas religiosos y escenificaciones influenciadas por el cristianismo. En cuanto a la música, durante este periodo, es necesario distinguir entre dos tipos de música: la música culta y la música popular o profana.

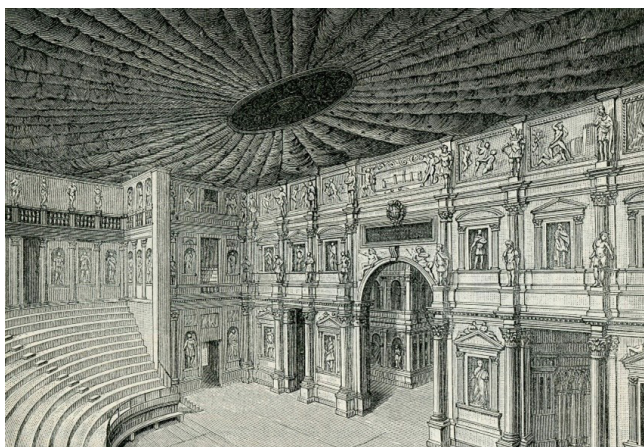
La música culta, que buscaba exaltar el cristianismo, se centraba en el Canto Gregoriano. Este tipo de música dio origen al drama litúrgico. Tanto las representaciones musicales como teatrales de carácter religioso se llevaban a cabo en iglesias y monasterios. Este tipo de música nace adaptándose a la arquitectura existente. En estos espacios, las preocupaciones acústicas desaparecen ya que lo principal era la exaltación del componente religioso. En contraste, la música popular, representada por juglares y goliardos, se interpretaba en la calle como entretenimiento para la población y no requería de espacios específicos para su representación.

Renacimiento

A partir del Renacimiento, se empieza a desarrollar una cultura arquitectónica que busca recuperar un sistema de formas extraído de la Antigüedad. Tanto el mundo teatral como el musical comienzan a vivir un auge considerable.

Los teatros renacentistas presentan las mismas formas que los teatros clásicos, pero en recintos cerrados y volumen inferior. Un ejemplo es el teatro Olímpico de Vicenza, el cual se muestra en la Figura 1.2. Por otro lado, en el panorama musical, los países de la zona franco-flamenca experimentan un gran desarrollo. Aparece el sistema de mecenazgo, lo que promueve el desarrollo de figuras como cantores, solistas, organistas y ministriles, entre otros. Este periodo se caracteriza por un creciente interés en la música.

ca, el estudio de nuevas composiciones y la aparición de grandes compositores como Palestrina³. Además, se producen mejoras significativas en los instrumentos musicales.



1.2. Dibujo del interior del Teatro Olímpico de Vicenza, Palladio

Figura 1.2

Barroco

Durante este periodo, los espacios acústicos se dividían principalmente en dos categorías muy distintas: aquellos con una gran reverberación y otros con alta definición, pero con un sonido menos envolvente.

Algunos compositores de la época ajustaban sus obras a las características acústicas de espacios existentes. Esta diversidad en las propiedades de los recintos presentaba un reto considerable para estos músicos, entre ellos J. S. Bach, quien componía pensando generalmente en iglesias amplias y reverberantes. Sin embargo, también compuso una parte significativa de su repertorio para capillas o salas pequeñas, con tiempos de reverberación reducidos, lo que dio lugar a piezas más dinámicas, como sus primeras fugas. En este mismo contexto, se lleva a cabo el desarrollo y la reconstrucción de iglesias luteranas en Europa, siguiendo la misma idea de componer para un espacio específico. Un ejemplo de ello es la «Pasión según San Mateo» de Bach (1729), que fue concebida especialmente para su interpretación en la Thomaskirche de Leipzig, donde Bach era cantor⁴.

Por otro lado, se desarrollan también nuevas edificaciones. La ópera, extendiéndose por toda Europa, impulsó la creación de edificios dedicados exclusivamente a su representación. Un hito significativo en este contexto fue la apertura de la primera ópera comercial en Venecia en 1637. Este teatro tuvo tanto éxito que, en un periodo de tan solo 63 años, se construyeron más de 16 nuevos teatros de ópera en la ciudad, reflejando el auge y la popularidad de este género musical y la correspondiente demanda de espacios arquitectónicos adecuados para su ejecución. Este desarrollo también se vio impulsado por el avance en la comprensión del comportamiento del sonido por parte de científicos europeos como Boyle y Newton.

3. J. Peter Burkholder, Claude V. Palisca, y Donald J. Grout, Burkholder Historia de la música Occidental, Octava Edición (Alianza Editorial, 2015).

4. Cañonero, J.M «Arquitectura de la música. La influencia de la música en los espacios arquitectónicos», 2015

Prácticamente todas las óperas construidas en este período presentaban techos planos, salvo algunas excepciones como la bóveda de Hannover Square Rooms. Asimismo, los suelos eran mayormente planos.

1.3. Ópera La Fenice, Venecia

1.4. Hannover Square Rooms

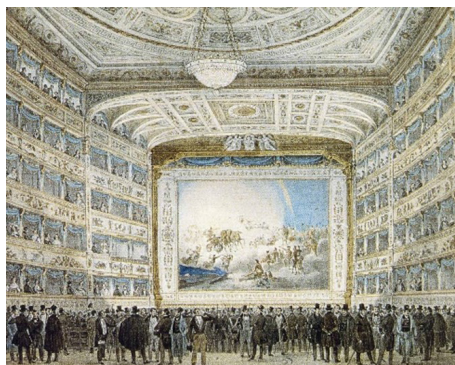


Figura 1.3

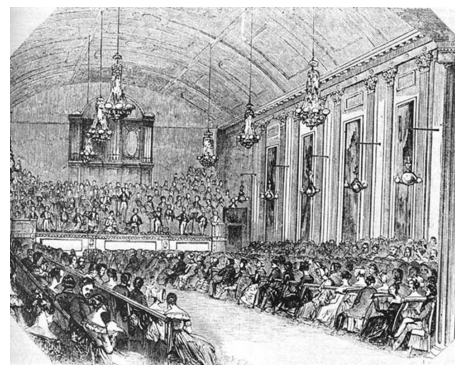


Figura 1.4

Clasicismo

Durante el Clasicismo, la música sacra, aunque seguía siendo relevante, comenzó a compartir protagonismo con composiciones orientadas al entretenimiento, lo que marcó un cambio tanto en la forma de componer como en la experiencia de escuchar. Desde una perspectiva acústica, los principales cambios sonoros en la transición del Barroco al Clasicismo dieron lugar a sonidos más envolventes desde el punto de vista del espectador.

A medida que la mentalidad y el estilo musical evolucionaban, los conciertos adquirieron una gran popularidad, lo que demandó espacios más amplios para su representación. Sin embargo, la arquitectura no logró adaptarse a la velocidad de este cambio, dejando su potencial sin ser aprovechado. Las primeras salas de conciertos de la época seguían inspiradas en los salones de los palacios cortesanos, con capacidades limitadas (alrededor de 300 espectadores) y una disposición mayormente rectangular. No fue sino hasta mediados del siglo XIX que surgieron grandes salas diseñadas específicamente para conciertos, como el Boston Music Hall, también de planta rectangular, pero con un aforo de hasta 2400 personas.



1.5. Vista interior del
Boston Music Hall

Figura 1.5

Se produjo una gran revolución en el ámbito de la acústica arquitectónica. El desarrollo tecnológico permitió realizar mediciones acústicas objetivas, y fue en esta época cuando Wallace Clement Sabine definió el concepto de tiempo de reverberación. Gracias a sus estudios y descubrimientos, Sabine fue consultado en 1898 para asistir en la construcción del Boston Music Hall. Durante este proyecto, Sabine realizó un análisis exhaustivo y descubrió el funcionamiento de la reverberación, estableciendo así las bases para el diseño acústico moderno de auditorios y salas de concierto.

Periodo romántico

Durante el Romanticismo se compuso gran parte del repertorio orquestal que sigue vigente hoy, gracias a compositores como Brahms, Strauss, Wagner, Mendelssohn o Tchaikovsky. Con el paso de los años, las orquestas fueron creciendo en tamaño, y se comenzó a experimentar más con la definición del sonido, explorando diversas formas musicales que incluían armonías complejas, melodías entrelazadas e incluso pasajes sin una melodía clara. A menudo, los compositores, al igual que en el Clasicismo, creaban sus obras pensando en espacios específicos de representación; un ejemplo de ello es «Parsifal» de Wagner, concebida exclusivamente para el *Festspielhaus* de Bayreuth.

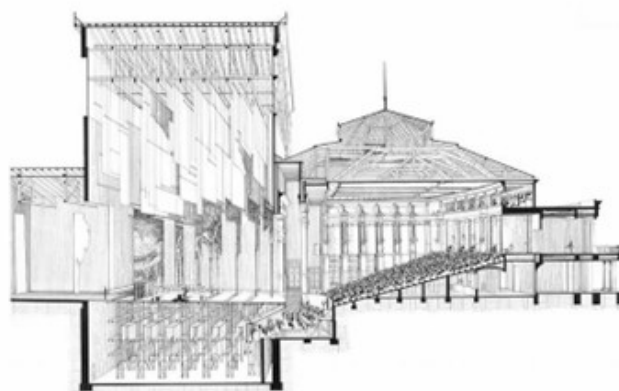


Figura 1.6

1.6. Sección del Festspielhaus de Bayreuth

Siglos XX y XXI

A partir del siglo XX, asistir a conciertos se convierte en una actividad cultural extendida, no solo en Europa, sino también en América y en países de Asia como Japón, donde se construyeron más de ochenta salas de conciertos y numerosos conservatorios. La música de este siglo está marcada por la innovación, incorporando nuevas armonías, instrumentos y efectos experimentales. Sin embargo, también hay espacio para estilos anteriores, lo que hace que esta época sea especialmente diversa. Como resultado, la sala de conciertos contemporánea ideal sería aquella capaz de adaptarse a una amplia variedad de estilos musicales.

Se empiezan a explorar nuevas formas arquitectónicas, destacando la introducción de salas en forma de abanico, un diseño estrechamente vinculado al avance en los conocimientos acústicos. En este contexto surgen auditorios que se han convertido en grandes referentes actuales, como la Filarmónica de Berlín de Hans Scharoun.

1.7. Filarmónica de Berlín, Alemania. Día de la inauguración



Figura 1.7

Sin embargo, tras un periodo de innovación, alrededor de 1985, se produjo un retorno a los diseños más tradicionales. Algunas salas del siglo XX han comenzado a adoptar la amplificación del sonido mediante altavoces, una técnica que, gracias a la aparición de nuevos géneros musicales, está ahora completamente establecida. No obstante, esto no implica que las salas de conciertos más antiguas se hayan vuelto obsoletas. La música sinfónica sigue teniendo una profunda relevancia cultural y sigue siendo altamente apreciada, tanto desde la perspectiva de compositores y espectadores como en otros campos culturales como el cine. La evolución de la música nueva convive con las tradiciones, permitiendo un desarrollo continuo.

El legado histórico ha dejado espacios adecuados para representaciones, pero el avance tecnológico y arquitectónico impulsa mundialmente la creación de nuevos recintos. En España, ejemplos destacados de esta tendencia

1.8. Sala del Kursaal, San Sebastián. Rafael Moneo



1.9. Auditorio de Mérida

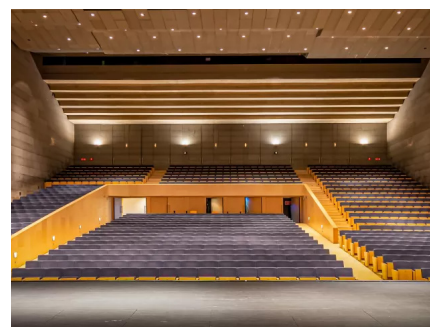
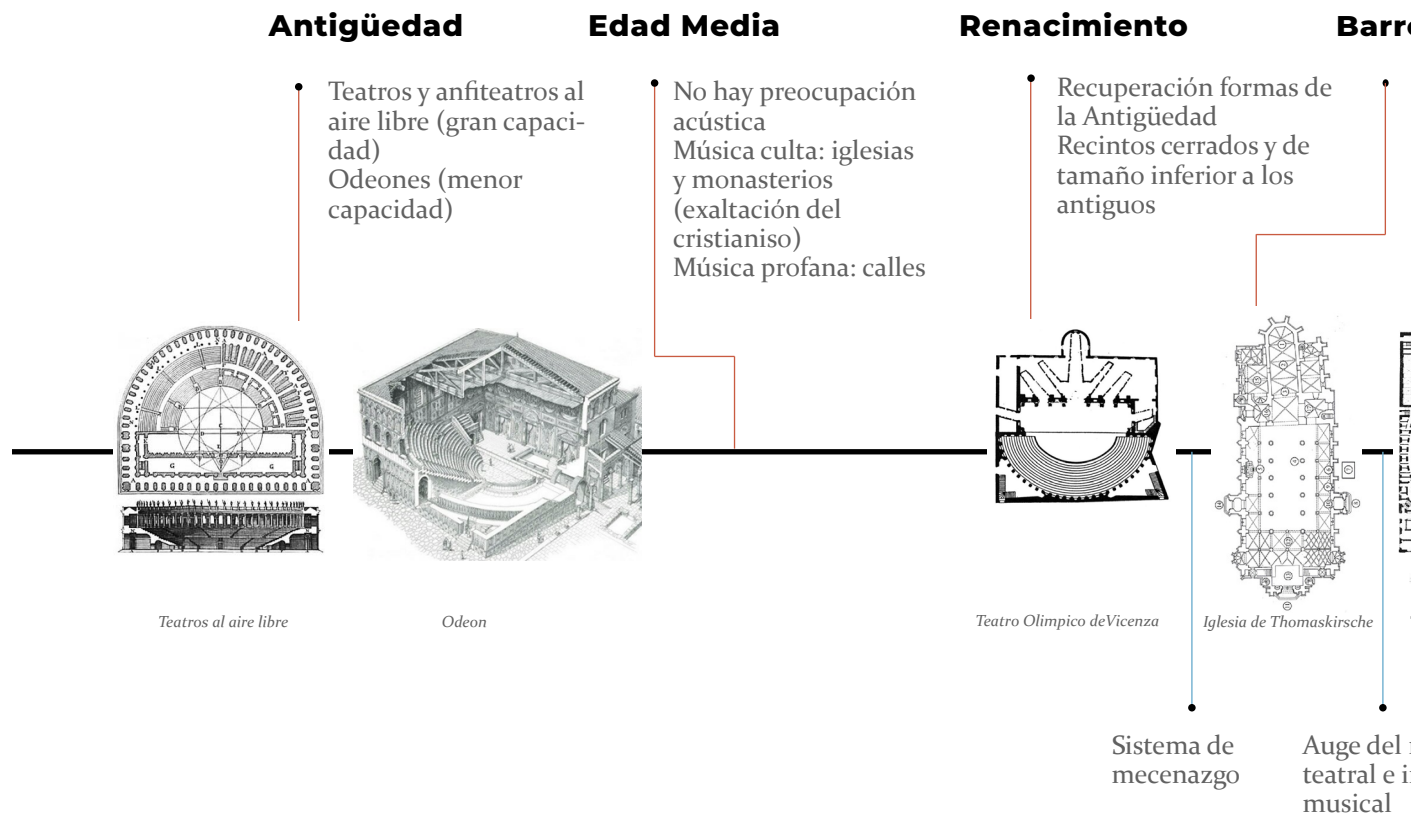


Figura 1.8

Figura 1.9

incluyen el Kursaal en San Sebastián, diseñado por Rafael Moneo, y el Auditorio de Mérida, obra de Nieto Sobejano.

En resumen, aunque desde los antiguos anfiteatros griegos hasta los modernos auditorios del siglo XXI estos espacios han evolucionado para adaptarse a las necesidades cambiantes de músicos y audiencias, la sensación es que la estructura básica y el concepto general de las salas de concierto no ha experimentado cambios radicales. Esta aparente falta de “grandes saltos formales” entre las salas de concierto me lleva a reflexionar en este Trabajo Fin de Grado sobre varias preguntas: ¿Han alcanzado las salas de conciertos tradicionales la perfección en su diseño, representando la forma óptima para disfrutar de la música, o las nuevas configuraciones de estos espacios ofrecen mejores experiencias auditivas? Para contestar a esta pregunta en este trabajo se han escogido dos salas de concierto con el objetivo de comparar un diseño tradicional y uno innovador más reciente.



oco

Clasicismo

Romanticismo

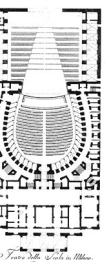
Siglos XX y XXI

Composición para lugares específicos
Creación de la Ópera
Salvo excepciones, techos planos
Reconstrucción iglesias luteranas

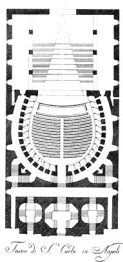
Enfocado al entretenimiento
Plantas rectangulares
Inspiración en palacios cortesanos

Composición para lugares específicos
No hay gran desarrollo arquitectónico

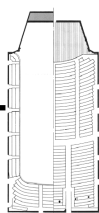
Experimentación forma
Innovación
Retorno a las formas tradicionales



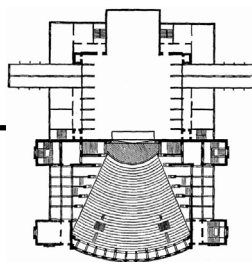
Teatro della Scala



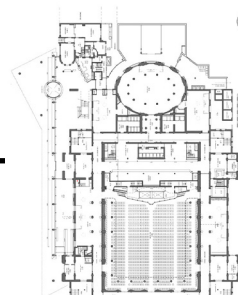
Teatro di S. Carlo



Boston Music Hall

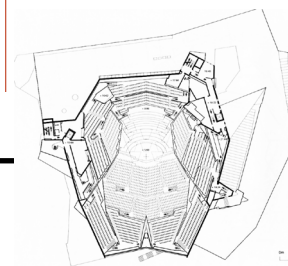


Festspielhaus



Concertgebouw Amsterdam

Plan ground floor



Filarmónica de Berlín

mundo
interés

Sabine: Tiempo de reverberación

Aumento tamaño orquestas

2

Tipologías en salas de concierto

La configuración arquitectónica y la geometría de un espacio ejercen una influencia determinante en su calidad acústica. El análisis de la evolución de las salas de conciertos revela una transformación continua que nos permite identificar y clasificar diferentes tipologías, cada una con características acústicas distintivas que responden a principios físicos y criterios de diseño innovadores⁵.

Tipología rectangular o caja de zapatos

La planta de estos espacios es rectangular y su altura es constante. Generalmente, el ancho estándar de estos recintos es de aproximadamente 22 metros, ya que inicialmente dependía del tamaño de las vigas transversales de madera requeridas para soportar la cubierta. La longitud máxima suele ser de 50 metros, lo que asegura que todos los espectadores tengan una buena visibilidad del escenario y de los músicos. La altura promedio es de alrededor de 12 metros. Los techos, que suelen ser planos, a menudo están decorados con artesonados muy elaborados, característicos del estilo neoclásico que predominó en las primeras etapas del desarrollo de este tipo de salas. Este diseño fue el estándar hasta la Primera Guerra Mundial.

A continuación, se enumeran las características generales que presentan los espacios con esta tipología:

- Tiempo de reverberación de 2 segundos en frecuencias medias
- El sonido llega al oyente desde todas las direcciones
- Claridad del sonido
- Sonido muy uniforme en todas las ubicaciones
- Buen equilibrio de sonoridad entre los instrumentos
- Gran número de primeras reflexiones laterales al estar el público próximo a las paredes
- Balcones estrechos

2.1. Esquema de planta en forma de caja de zapatos

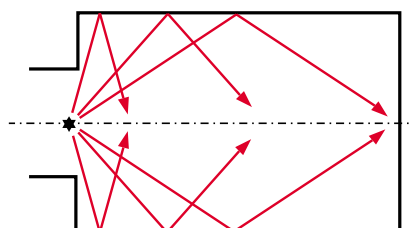


Figura 2.1

5. María Andrea Farina, «Salas para música. Arquitectura y comportamiento acústico», *Revista Española de Acústica - SEA* 51 (2020): 11-22

Tipología en forma de abanico

Tras la Primera Guerra Mundial, el avance de las nuevas tecnologías y los materiales de construcción permitió la exploración de formas innovadoras, ya que las restricciones constructivas se redujeron y se podían cubrir luces más amplias. Aunque la longitud seguía viéndose limitada por la visibilidad, se podía modificar y ampliar el ancho de los auditorios. Como resultado, las paredes laterales dejaron de ser perpendiculares y adoptaron una forma de abanico. En algunos casos, las paredes posteriores también adoptaron una curvatura, y la altura del techo tiende a ser menor que en el diseño anterior.

Las características generales de esta tipología de sala son las siguientes:

- El tiempo de reverberación suele ser bajo debido a la reducción de la altura del techo y al aumento del área de absorción del público
- Permite un aforo considerablemente mayor que el de una sala con forma de caja de zapatos
- La claridad del sonido es baja
- Ausencia de primeras reflexiones laterales en la parte central de la sala

2.2. Esquema de planta en forma de abanico

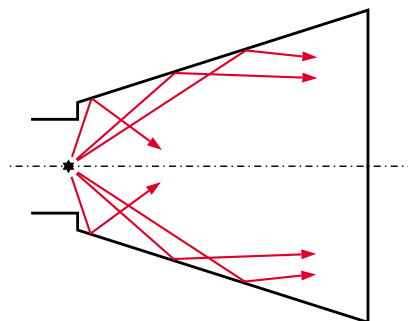


Figura 2.2

Tipología en forma de herradura

Este tipo de sala surgió a mediados del siglo XVII, diseñado por el arquitecto Carlo Fontana (Teatro San Cassiano, Venecia). Se caracteriza por tener una planta en forma de herradura, con el foso situado por debajo del nivel de la platea y la caja escénica separada del espacio destinado al público. Pensado no tanto para música sinfónica sino para la ópera, estas salas dieron pie a los teatros del siglo XIX.

Sus características generales son las siguientes:

- El tiempo de reverberación suele ser de aproximadamente 1,5 s, independientemente del tamaño y la capacidad, lo que la hace adecuada para la ópera gracias a la buena inteligibilidad de la palabra, pero no tan apropiada para la música sinfónica
- Baja energía asociada a las primeras reflexiones laterales

- La distancia máxima entre la audiencia y el escenario está limitada por la visibilidad, generalmente alrededor de 30 metros
- Presenta una buena claridad del sonido
- La calidad sonora es mejor en los niveles superiores que en la platea
- Presencia de reflexiones laterales
- Este tipo de sala tiene problemas con las focalizaciones que se producen en la parte final debido a la pared cóncava

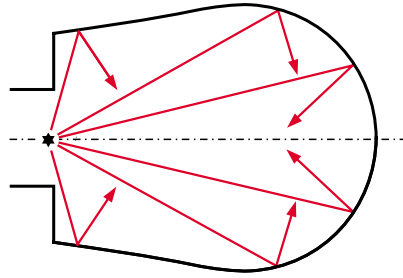


Figura 2.3

2.3. Esquema de planta en forma de herradura

Tipología Arena

A partir del siglo XX se comienza a experimentar formalmente al colocar a la orquesta en una ubicación menos convencional. Estos espacios se caracterizan por situar la orquesta en el centro y a un nivel más bajo que el público.

Esta tipología presenta las siguientes características generales:

- Pueden albergar a un gran número de asistentes
- El tiempo de reverberación puede alcanzar valores óptimos para la música sinfónica
- Al no ser salas homogéneas, se presentan diversas condiciones de audición
- Proporcionan un sonido envolvente en las áreas cercanas a la orquesta
- Visualmente, permiten observar perspectivas que antes no se consideraban, como la parte trasera de la orquesta y la gestualidad del director

La falta de homogeneidad en este tipo de salas puede no ser necesariamente una desventaja, pero sí depende más de las preferencias individuales en relación con la elección de la ubicación del espectador.

A la vista de lo expuesto, la forma de la planta del auditorio juega un papel crucial en su acústica. Por ello, este factor ha sido determinante en la selección de los dos casos de estudio. Se han escogido dos auditorios con geometrías distintas, ambas consideradas apropiadas para la música sinfónica:

1. Un auditorio de planta tradicional rectangular, conocido como tipo «caja de zapatos», el Real Concertgebouw de Ámsterdam
2. Un auditorio de diseño más innovador, con forma de abanico, la sala principal del Gasteig Kulturzentrum en Múnich

El propósito de esta selección es examinar cómo estas diferencias geométricas, entre otros factores, influyen en las características acústicas de los espacios. Se busca determinar si estas variaciones en la forma generan cambios significativos en la calidad acústica de los auditorios.

Las salas de conciertos más reconocidas a nivel internacional suelen tener una planta rectangular, aunque otras formas también pueden ofrecer buenos resultados acústicos. No existe una única solución arquitectónica que garantice una calidad acústica óptima. La forma de la sala debe permitir la presencia de primeras reflexiones significativas en todos los puntos. La existencia de estas primeras reflexiones en una sala contribuye a mejorar la claridad y la impresión espacial con la que se percibe la música en el recinto.

Volumen y capacidad

La principal preocupación al diseñar una nueva sala debe ser la capacidad total, ya que este factor determina tanto el tamaño como la complejidad del espacio. Es fundamental garantizar que el número de asientos total sea realmente necesario. Ningún conjunto musical rinde al máximo en una sala medio vacía, y gran parte de las necesidades acústicas se simplifican si la sala es más pequeña.

La cantidad de público influye en el volumen de la sala, lo cual determina el nivel de reverberación, que a su vez se puede ajustar mediante la absorción. Por eso, un aspecto clave en el diseño de salas de concierto es la absorción, ya que el grado de reverberación en un espacio depende de los materiales de recubrimiento y de la absorción que ofrecen tanto el público como las sillas.

La absorción total de un recinto (A_{tot}) se obtiene:

$$A_{tot} = \sum S_i \alpha_i + A_p$$

donde:

S_i = superficie "i"

α_i = coeficiente de absorción de la superficie "i"

A_p = absorción del público

El coeficiente de absorción α se define como la relación entre la energía sonora absorbida y la energía sonora incidente sobre un material. Un valor cercano a 1 indica que el material es muy absorbente, mientras que un valor cercano a 0 significa que es poco absorbente.

Es importante tener en cuenta las dimensiones y volumen de la sala ya que, de acuerdo con la fórmula de Sabine, a mayor volumen de la sala, ma-

yor deberá ser la absorción total del recinto para alcanzar el tiempo de reverberación medio (RTmid) deseado.

Dada la complejidad del tema, a lo largo del tiempo se han ido estableciendo algunas recomendaciones sobre la relación entre el volumen (V) de una sala de conciertos y el número de asientos (N). Esta relación debe situarse aproximadamente entre:

$$4 \leq \frac{V}{N} \leq 6$$

Es decir, se debe contar con un volumen de entre 4 y 6 m³ por cada asiento.

Anfiteatros y balcones

La razón principal para incorporar balcones en grandes salas de concierto es reducir la distancia entre el escenario y las filas más alejadas. Sin embargo, ya sea un balcón grande o varios pequeños, surgen algunos inconvenientes: los espectadores sentados bajo un voladizo pronunciado no reciben el sonido reflejado desde la parte superior de la sala, lo que genera una falta de reverberación. Además, si el balcón es demasiado profundo y la abertura no tiene la altura adecuada, incluso el sonido directo proveniente del escenario puede verse amortiguado.

En el caso de incorporar varios balcones a la sala, es necesario aumentar la cantidad de pasillos y accesos, lo que implica que parte de esa superficie se suma a la absorción acústica total del recinto.

Se considera recomendable para un buen diseño considerar lo siguiente:

La distancia D (véase en la figura 13), no debe ser menor a 2,5 veces la altura H. Además, el techo y las paredes traseras y laterales deben diseñarse de manera que reflejen el sonido directamente hacia la cabeza de los oyentes.

3.1. Criterio práctico de máxima profundidad D de la zona situada debajo de un balcón

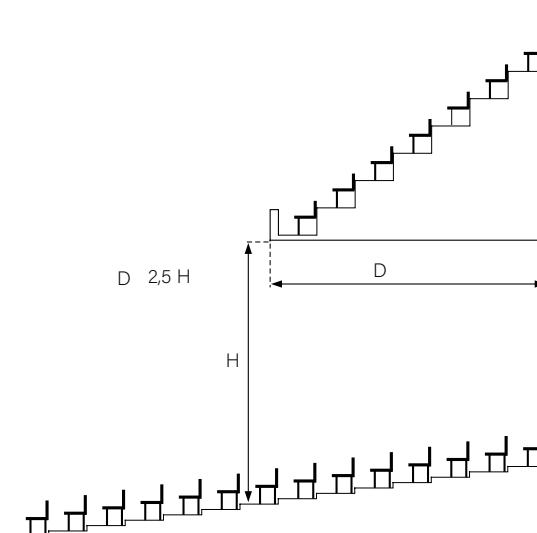
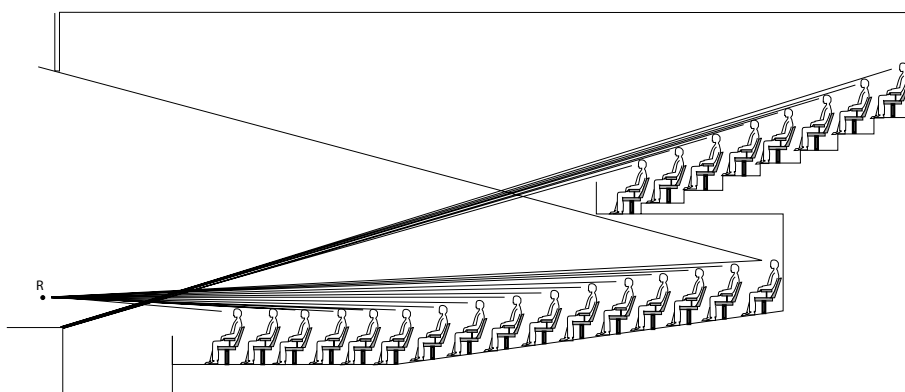


Figura 3.1

Visuales

Para garantizar que el sonido directo llegue al espectador sin ser obstruido por las personas sentadas en las filas delanteras, es fundamental que la visibilidad del escenario no se vea comprometida. Esto está estrechamente relacionado con la inclinación del suelo. En caso de contar con suelos inclinados, la pendiente debe ser suficiente para permitir que la línea de visión pase por encima de la cabeza del espectador de la fila anterior. La inclinación del anfiteatro no debe superar los 45° , pero dependerá también del límite máximo permitido por razones de seguridad, generalmente alrededor de los 35° .



3.2. Diseño de visuales (R es el punto de referencia)

Figura 3.2

Escenario

El campo sonoro dentro de una orquesta es sumamente complejo y prácticamente imposible de describir con detalle, ya que depende de una serie de factores interconectados. Entre estos se encuentran la orquestación de cada obra, la directividad y potencia sonora de cada instrumento, la disposición de los músicos en el escenario, el uso de tarimas, el comportamiento acústico de las superficies reflectantes que rodean a los músicos, y la acústica de la sala en general.

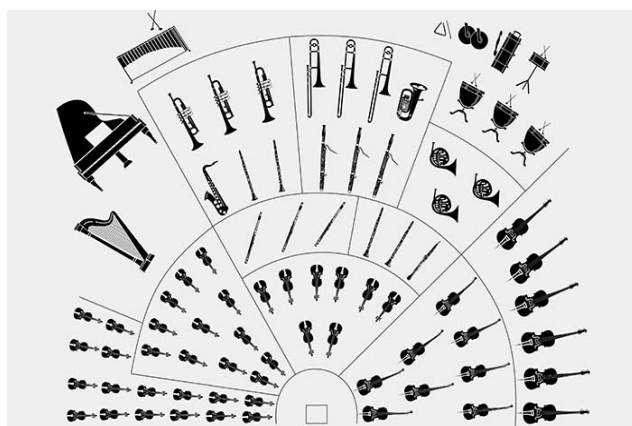


Figura 3.3

3.3. Distribución habitual de los instrumentos correspondientes a una orquesta sinfónica

En lo que respecta a la potencia sonora, los instrumentos de metal suelen emitir un nivel de potencia aproximadamente 10 dB más alto que el de los instrumentos de viento madera. A su vez, estos últimos tienen una potencia sonora unos 3 dB superior a la de los instrumentos de cuerda.

Para garantizar una óptima experiencia acústica y visual, la altura del escenario debería situarse entre 50 y 120 centímetros por encima del patio de butacas. Además, en el caso de grandes orquestas, un ligero escalonamiento dentro del escenario facilita la comunicación entre los músicos y mejora la calidad del sonido percibida por el público.

Por otro lado, desde el punto de vista del diseño acústico, inclinar las paredes laterales hacia el escenario favorece la generación de reflexiones tempranas que enriquecen el sonido para los músicos y contribuyen a una mejor proyección hacia la audiencia. De esta manera, el revestimiento de estas paredes y del fondo con madera rígida evita resonancias no deseadas y optimiza la calidad del sonido en la sala.

Asimismo, un suelo de madera flexible sobre cámara de aire ofrece una absorción adecuada de bajas frecuencias y amplifica el sonido de los instrumentos que están en contacto con él, mejorando así la comunicación entre los instrumentistas y la calidad percibida del sonido por el público.

El resultado de tener en cuenta todas estas características en el diseño de una sala es la generación de un ambiente sonoro más rico y equilibrado, tanto para los músicos como para los espectadores, optimizando la experiencia musical en su conjunto.

Superficie

A la hora de dimensionar un escenario, es esencial considerar el espacio individual necesario para los músicos. Se recomienda asignar estas superficies netas por intérprete⁶:

- 1.25 m² para violas, violines e instrumentos de viento
- 2 m² para violoncellos e instrumentos de viento más grandes
- 1.8 m² para contrabajos
- 1 m² por cada timbal y el doble para los demás instrumentos de percusión
- 0.5 m² por persona en coro

Los espacios escénicos de las salas más antiguas (anteriores al siglo XX) tienen una superficie promedio de 158 m², mientras que los de las salas más recientes (de mediados del siglo XX en adelante) alcanzan los 203 m², lo que correspondería a orquestas de entre 100 y 150 músicos. Las salas antiguas, que suelen tener techos altos sobre el escenario, se caracterizan generalmente por escenarios menos profundos, con una profundidad media de 10,7 m. En las salas más recientes, esta profundidad aumenta a un promedio de 12,8 m.

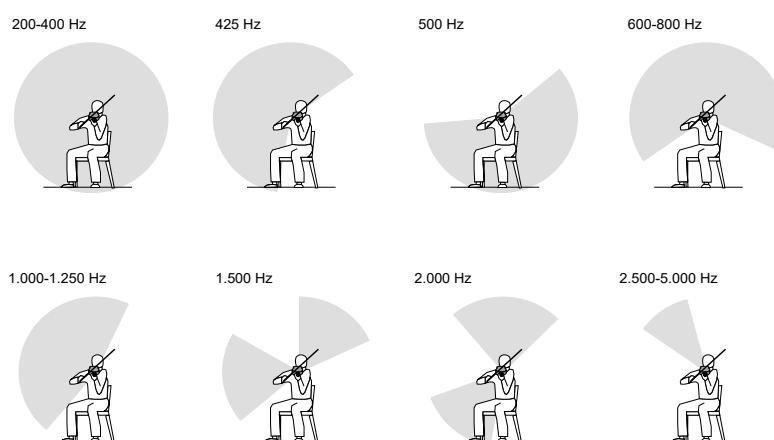
A modo de ejemplo:

- Viena, Musikverein (1870): 163 m²
- Amsterdam, Concertgebouw (1888): 160 m²
- Boston, Symphony Hall (1900): 152 m²

6. Leo Beranek, *Concert Halls and Opera Houses*, 2004.

- Berlin Philharmonie (1963): 172 m²
- Sydney Opera House (1973): 181 m²
- Glasgow, Royal Concert Hall (1990): 218 m²

En los conciertos en directo surge una complejidad relativa al diseño debido a la directividad de los instrumentos musicales. Cada instrumento tiene un patrón distinto según su rango de frecuencias, lo cual suele estar vinculado al estilo de interpretación y a la disposición de los asientos en la orquesta. A modo ilustrativo, en la Figura 3.4 podemos observar las principales direcciones de radiación sonora de un violín en determinadas frecuencias⁷.



3.4. Principales direcciones de radiación de un violín para frecuencias entre 200 Hz y 5000 Hz

Figura 3.4

Forma

Los escenarios excesivamente anchos o profundos presentan desventajas importantes. Si el escenario es demasiado ancho, los oyentes sentados en los extremos de la sala escuchan primero los instrumentos más cercanos, antes de captar el sonido proveniente del lado opuesto del escenario. Por otro lado, si el escenario es muy profundo, el sonido de los instrumentos ubicados en la parte trasera llega a los oídos del público con un pequeño retraso en comparación con el de los instrumentos en la parte delantera.

Con el fin de evitar los inconvenientes mencionados y garantizar una superficie de aproximadamente 190 m², se recomienda que el escenario destinado a una orquesta sinfónica se ajuste a un rectángulo de aproximadamente 16,8 m de ancho por 12,2 m de profundidad.

7. Jürgen Meyer, *Acoustics and the Performance of Music: Manual for Acousticians, Audio Engineers, Musicians, Architects and Musical Instrument Makers*, Quinta Edición (Springer, 2009).

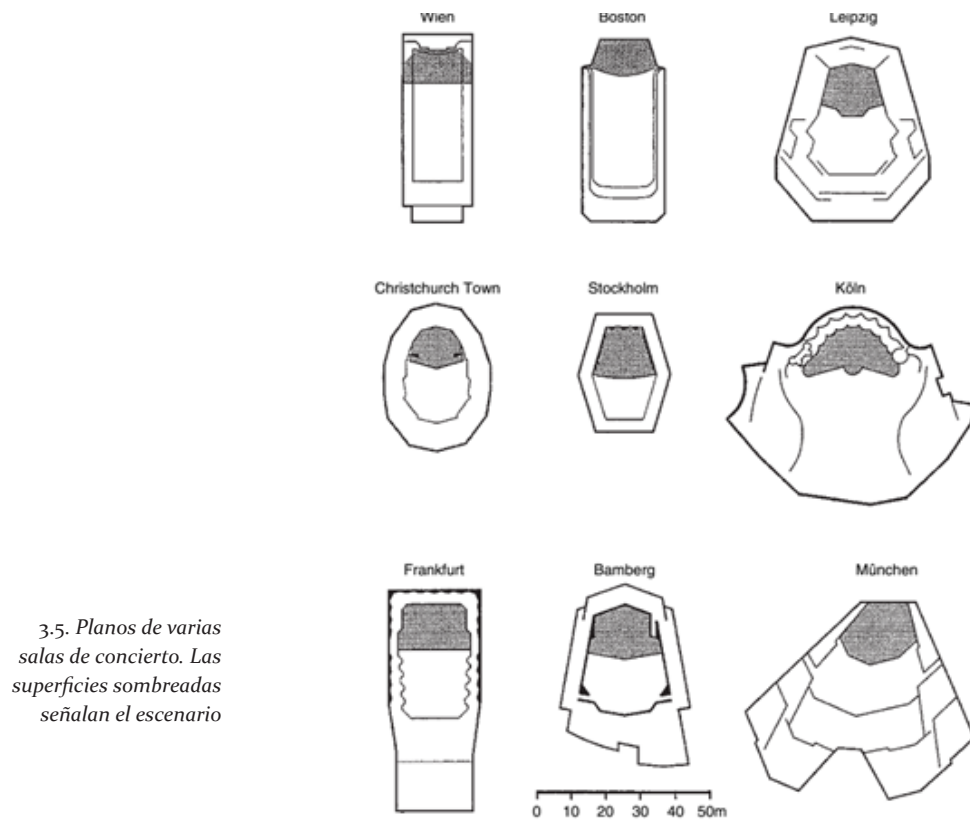


Figura 3.5

Materiales

La mayor parte de la absorción acústica en una sala con dimensiones adecuadas será proporcionada por las butacas, lo que permite que el resto de las superficies tenga acabados reflectantes. La absorción adicional solo se añadirá para corregir fenómenos acústicos indeseados, como los ecos. Uno de los materiales más utilizados en salas de conciertos es la madera. Este material es especialmente valorado en las salas de conciertos no solo por sus propiedades como material reflector, sino también por su estética.

4

Casos de estudio

Para el estudio comparativo que se plantea como objetivo de este trabajo, se eligen dos auditorios con una tipología de planta diferente, de entre 11 grandes salas de concierto de relevancia mundial. En la tabla 1 se indican el nombre del auditorio, el año de inauguración, el periodo musical, tipología y capacidad de éste. A continuación, en la última columna se muestra la categoría propuesta por Beranek⁸, siendo la mejor Categoría A+: “Superior” y la más baja C: “Aceptable”, que se basa en parámetros objetivos y calculables (TR, Sonoridad, calidez, brillo, etc.)

Auditorio	Año	Estilo	Periodo musical	Tipología	Aforo	Arquitecto	Categoría
Goteborg Koncerthus	1945	Neoclásico	Moderno	Caja de zapatos	1300	Eriksson	B+
Derngate Northampton	1884	Moderno	Romanticismo	Arena	1500	RHWL	B
Musikverein Vienna	1870	Neoclásico	Romanticismo	Caja de zapatos	1700	Theophil von Hansen	A+
Barbican Center Hall London	1982	Brutalista	Contemporáneo	Abanico	1943	Chamberlin, Powell and Bon	C+
Liederhalle Stuttgart	1956	Brutalista	Moderno	Herradura	2000	Rolf Gutbrod y Adolf Abel	B+
St Davis Hall Cardiff	1982	Moderno	Contemporáneo	Arena	2000	Seymour Harris Partnership	A
Concertgebouw Amsterdam	1888	Neoclásico	Romanticismo	Caja de zapatos	2000	Adolf Leonard van Gendt	A+
Grosses Festspielhaus Salzburg	1960	Neoclásico	Moderno	Abanico	2179	Clemens Holzmeister	B+
Usher Hall Edinburgh	1914	Estilo Beaux-Arts	Moderno	Herradura	2200	Stockdale Harrison	B+
Gasteig Philharmonie Munich	1985	Brutalista	Contemporáneo	Abanico	2400	Raue, Rollenhagen, Lindemann	B+
Royal Festival Hall London	1949	Moderno	Moderno	Caja de zapatos	2700	Robert Matthew y Leslie Martin	B+

Tabla 1. Comparativa de salas de concierto previa al desarrollo del trabajo

Tras esta comparativa previa al desarrollo del trabajo, se escogen el Real Concertgebouw, en Ámsterdam, y la Filarmónica de Múnich. Ambas tienen una capacidad y un volumen similar, una categoría destacada y distan entre sí un siglo, lo que permitirá estudiar el avance o estancamiento en relación con la acústica de las salas de concierto.

8. Leo Beranek, *Concert Halls and Opera Houses*, 2004

[4.1]

Caso de estudio 1. Concertgebouw, Ámsterdam

El primer caso de estudio es el Real Concertgebouw, una sala de conciertos situada en Ámsterdam, Países Bajos. Junto al Musikverein de Viena y al Symphony Hall de Boston, se considera una de las tres mejores salas de conciertos a nivel mundial. Este edificio es la sede de la Real Orquesta del Concertgebouw de Holanda, una de las orquestas más prestigiosas y reconocidas en la actualidad.

4.1. Fachada principal del Concertgebouw



Figura 4.1

A finales del siglo XIX, la vida musical en Ámsterdam se organizaba a través de sociedades. La ciudad contaba con importantes salas que atraían a un gran público. La sala Felix Meritis era una pequeña sala de forma cilíndrica y ovalada que, a pesar de sus dimensiones reducidas, ofrecía una buena acústica. La sociedad más grande era el Parkzaal, que contaba con su propia orquesta y aproximadamente 2000 miembros. Como muestran las imágenes de las figuras 4.2 y 4.3, la gente iba allí a escuchar música, comer y beber.

4.2. Sociedad Felix Meritis



4.3. Parkzaal



Figura 4.2

Figura 4.3

El ambiente del lugar tenía muy buena reputación, sin embargo, se dice que la acústica era terrible⁹.

En 1881 se anunció el cierre del Parkzaal, generando el descontento de muchos asistentes, ya que iba a ser reemplazado por un teatro destinado a la Exposición Universal de 1883. La sala de Felix Meritis se volvía insuficiente para acomodar a todos los interesados en asistir a los eventos. Ante esta situación, surgió la iniciativa de construir una nueva sala: el Concertgebouw, cuya traducción es simplemente «edificio de conciertos». Este proyecto se llevó a cabo de manera privada, y se formó un comité de seis miembros para gestionarlo. Para identificar un emplazamiento adecuado para el Concertgebouw, el comité recurrió a Pierre Cuypers, el arquitecto responsable del Rijksmuseum, que se encontraba en construcción en ese momento. Cuypers desempeñó un papel crucial al ayudar en la negociación para la adquisición de un terreno cercano al nuevo museo, ubicado en las afueras de la ciudad y rodeado de los campos de Nieuwer-Amstel.

4.4. Plano de situación del Concertgebouw

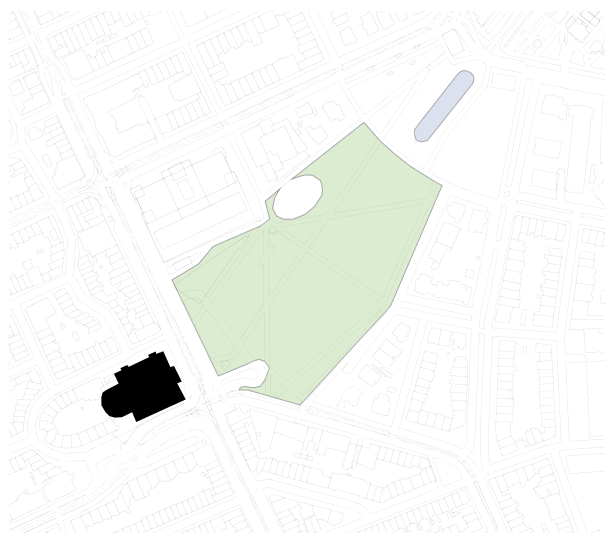


Figura 4.4

En marzo de 1882, se concretaron los planes para la creación de una sociedad anónima cuyas acciones podían adquirirse a un precio de 1.000 florines cada una. Finalmente, a principios de julio de ese mismo año, se fundó oficialmente la sociedad N.V. Het Concertgebouw, aunque, en ese momento, solo se habían vendido un poco más de la mitad de las acciones. Este proceso marcó el inicio de la construcción del edificio del Concertgebouw.

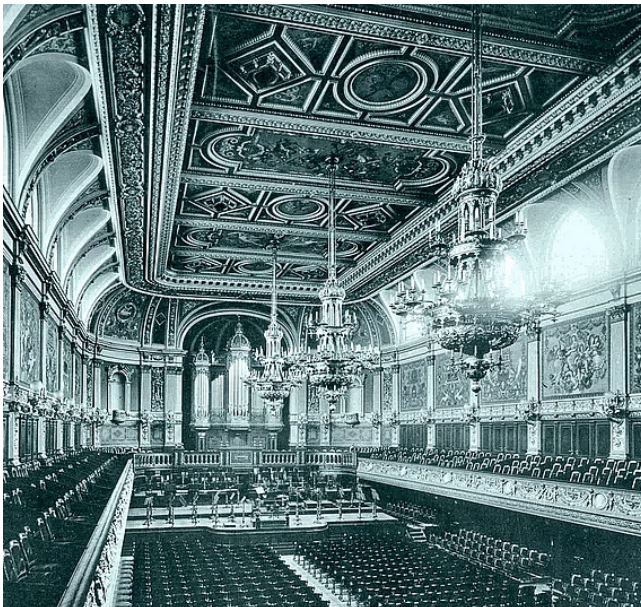
Para el diseño del edificio se organizó un concurso cerrado entre cinco arquitectos invitados, ninguno de los cuales tenía experiencia previa en la construcción de salas de concierto. Aunque el concurso era abierto y no se estableció un estilo predefinido, los planos de la Tonhalle circularon entre los participantes y se utilizaron como referencia. Hubo un amplio debate sobre la inclinación del suelo de la sala. El jurado favorecía un suelo inclinado para mejorar las líneas de visión, mientras que el comité prefería un

9. Pamela Clements y Martijn Vercammen, «Concertgebouw Amsterdam: History of the main hall and its acoustics Part 1: The early years: acoustic design and resolution of acoustic difficulties»

diseño con suelo plano. Debido a la falta de consenso, se decidió dejar la elección al criterio del arquitecto.

La construcción de este auditorio comenzó en 1883, bajo la dirección de Adolf Leonard van Gendt, y presenta un estilo neoclásico característico de la época. Fue inaugurado el 11 de abril de 1888 con un concierto en el que participaron alrededor de 620 músicos, quienes interpretaron obras de Wagner, Haendel, Bach y Beethoven.

Durante el periodo en que el Concertgebouw estaba en proceso de construcción, la acústica era una ciencia aún desconocida, compuesta por una variedad de factores que todavía no estaban definidos. No fue hasta el siglo XX que se desarrollaron equipos profesionales de grabación, lo que significaba que los arquitectos solo contaban con ejemplos previos de éxito como referencia. Es por esto por lo que la Sala Principal es extremadamente similar a la Gewandhaus en Leipzig (1781).



4.5. Interior de la Gewandhaus de Leipzig (1886)

Figura 4.5

Mientras se iniciaba la construcción, van Gendt realizó varias visitas a la Gewandhaus, lo que llevó a algunas modificaciones en el diseño del Concertgebouw. Leipzig contaba con un sistema de calefacción que utilizaba aire caliente, soplado a través de paredes dobles. Se decidió adoptar este sistema y se optó por duplicar las paredes de la sala. Además, el tejado se construyó utilizando cerchas de acero, con una altura de 28 metros.

Los inicios del Concertgebouw no fueron buenos. Pronto comenzaron a surgir en la prensa informes sobre la acústica que mostraban opiniones muy diversas, pero todos coincidían en un aspecto clave: la calidad del sonido dependía de la posición del espectador. No estaba claro qué producía estos problemas y, al introducirse el órgano en la sala, se vieron aún más perjudicados. Para solucionar el problema instalaron cortinas en las puer-

tas de entrada, detrás del escenario, llenaron áreas vacías del escenario con plantas y colocaron moqueta bajo los instrumentos de percusión y, por no ser por la falta de fondos, se habría colocado en los pasillos también. Todo esto, sumado a la localización, aún alejada de carreteras principales, resultó en audiencias muy escasas.

Años después, tras mucho debate, se establece un plan de reforma que modificaba la totalidad del escenario. Se reconstruyó y se redujo su altura 20 cm en la parte delantera, 1,2 m en los laterales y 2,3 m en la parte trasera, reduciendo la excesiva separación vertical entre las secciones de la orquesta y dejando al descubierto una superficie reflectante en la parte trasera de la orquesta.

4.6. Escenario previo a 1899

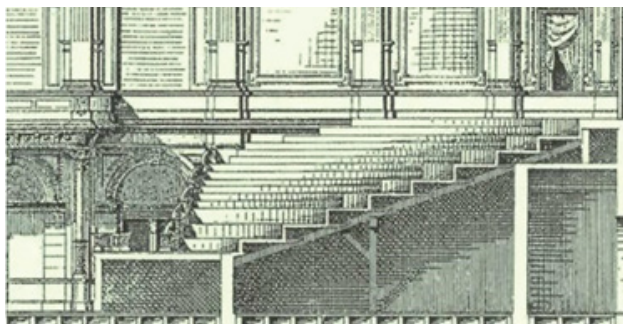


Figura 4.6

4.7. Escenario tras la reconstrucción en 1899

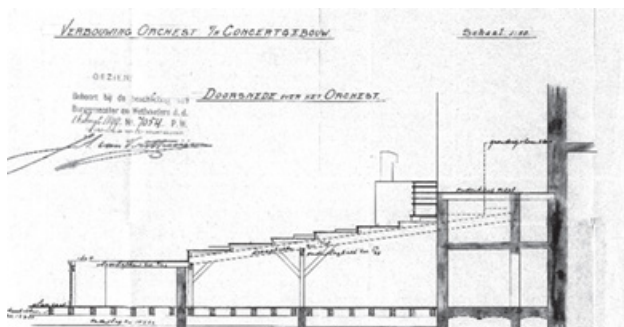


Figura 4.7

Posteriormente, en 1899, cuando se reabre la sala, el equilibrio entre las secciones había mejorado considerablemente.

Debido a la falta de fondos, el Concertgebouw no tuvo apenas mantenimiento y no fue hasta 1972, cuando fue declarado oficialmente monumento protegido, que su situación económica se volvió más favorable. Se planteó una restauración completa, tanto en su interior como en su exterior. Durante este proceso se descubrió que la cimentación estaba deteriorada, lo que podría haber puesto en peligro la seguridad del edificio.

Entre los motivos que impulsaron la reforma encontramos el aumento de fondos económicos, el problema constructivo y la falta de espacio. A pesar de su buena acústica, ya mejorada, algunos espectadores no estaban sa-

tisfechos debido a su espacio reducido. Sin embargo, se desaconsejó realizar cambios significativos para no modificar la acústica existente.

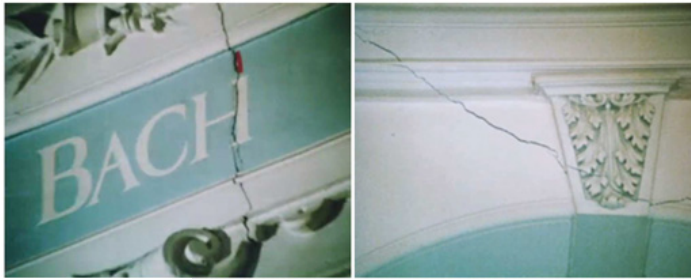


Figura 4.8

4.8. Estado de las paredes interiores previo a la reforma

Emplazamiento

En la época de construcción, el emplazamiento era un terreno de turba acuosa sin urbanizar fuera de los límites de la ciudad y no había conexión con el transporte público, por lo que en sus primeros años sufrió de una escasa afluencia. Sin embargo, la ciudad de Ámsterdam creció de forma rápida y la ampliación y mejora del transporte atrajo más público. Pasó de ser un fracaso a una atracción mundial.

Actualmente, el teatro se sitúa en una zona de gran atracción turística, frente al *Museumplein*, al lado de museos importantes como el Van Gogh Museum, el Moco Museum o el Rijksmuseum. La fachada principal se enmarca en una plaza rodeada por estos edificios de carácter cultural, comportándose como un hito más en el paisaje urbano.

Arquitectura

El Real Concertgebouw, originalmente construido sobre 2168 pilotes de madera sobre un suelo compuesto principalmente de capas de barro y arena, presenta unas dimensiones remarcables. La sala principal mide 44 x 28,7 x 17,5 metros, sumando un volumen total de 22099 m³. Los pasillos que rodean la sala tienen un ancho de 2,7 metros. A parte de la gran sala principal, el edificio también presenta una sala más pequeña, más adecuada para música de cámara, de forma ovalada situada encima del gran salón.



Figura 4.9



Figura 4.10

4.9. Interior de la sala sinfónica

4.10. Interior de la sala de cámara

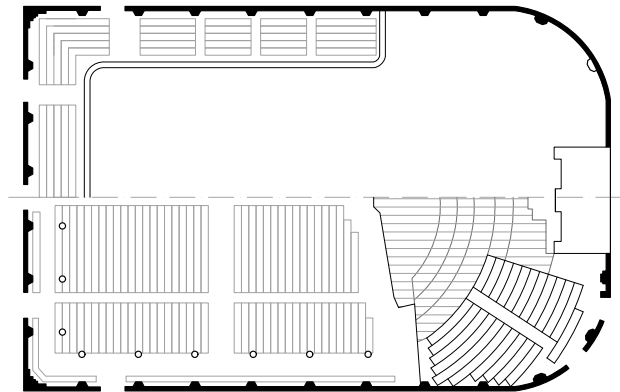
Interior

El interior de la sala destaca por su diseño detallado y funcional. El techo, con un elaborado artesonado, está construido con yeso sobre una base de cañas. Las paredes presentan una configuración irregular: debajo del palco están recubiertas de yeso sobre ladrillo, mientras que por encima del palco el yeso se aplica directamente sobre cañas.

Para optimizar la acústica, se incorporaron 65 m² de material absorbente en forma de cortinas, estratégicamente ubicadas en la parte frontal de la sala, detrás de los balcones y alrededor de las puertas.

El suelo es completamente plano y cuenta con asientos desmontables. Está formado por una base de hormigón sobre la que descansan tablas de madera fijadas a listones, con una capa intermedia de 4 cm de arena para rellenar las cavidades. Solo los pasillos del piso principal están cubiertos por moqueta.

Los asientos están tapizados con un tejido grueso, adecuado para el confort y la acústica. Por último, el escenario, fabricado en madera pesada y dispuesto en voladizo, se encuentra elevado 150 cm del suelo, asegurando una buena visibilidad y proyección del sonido.



4.11. Planta y sección de la sala
sinfónica del Concertgebouw

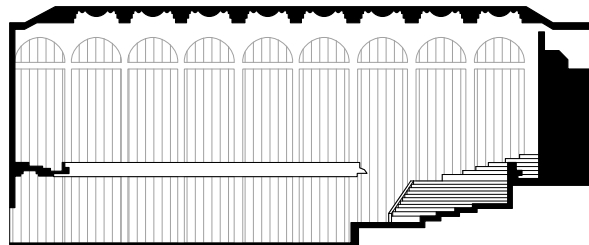


Figura 4.11

[4.2]

Caso de estudio 2. Gasteig Philharmonie Munich

El segundo caso de estudio es el Gasteig Kulturzentrum de Múnich, el mayor centro cultural de Europa. La construcción de esta sala comenzó en 1978, siguiendo los planos de los arquitectos Raue, Rollenhagen, Lindemann y Grossmann tras ganar un concurso. Dentro de este edificio podemos encontrar cuatro salas; la principal para 2400 espectadores y un volumen de 29800 m³, la sala “Carl Orff” con una capacidad de 600, la sala Kleiner Saal con 200 y una sala de teatro experimental.

4.12. Exterior del
Gasteig Kulturzentrum.
Fachada principal



Figura 4.12

El origen de este edificio se remonta a los devastadores bombardeos que sufrió Múnich en 1944. La destrucción del Odeón y la *Tonhalle*, las salas de conciertos más importantes de la ciudad, dejó a la Filarmónica de Múnich sin hogar. Paralelamente, instituciones como la *Volkshochschule* (escuela para adultos) y la Biblioteca Municipal enfrentaban dificultades por la falta de espacios adecuados. Para solucionar este problema y mejorar la vida cultural de la ciudad, se decidió construir este nuevo edificio.

La ubicación del Gasteig fue objeto de controversia debido a que inicialmente se había considerado como edificio memorial a las víctimas del nacionalismo. Sin embargo, esta decisión se revirtió y se permitió la construcción del centro cultural.

Los dibujos a continuación, originales de los arquitectos, han sido proporcionados por el propio Centro Cultural, e ilustran tanto el exterior como algunas de las salas del complejo.



Figura 4.13



Figura 4.14



Figura 4.16

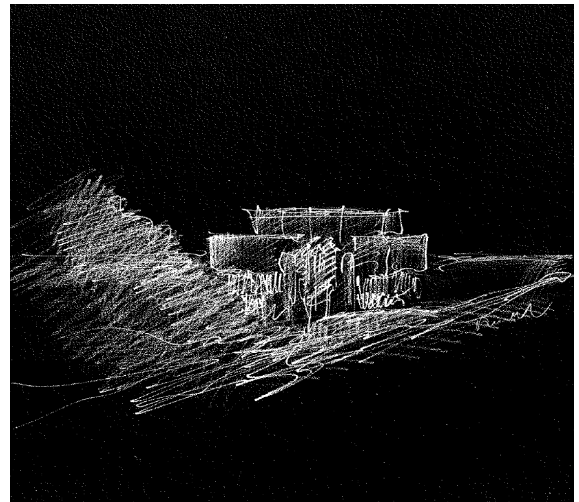


Figura 4.15



Figura 4.17

4.13. Sala principal

4.14 y 4.15. Exterior

4.16. Sala Carl-Orff

4.17. Sala Black-Box

En la zona existía una amplia propiedad municipal que albergaba una antigua residencia de ancianos, conocida como el Hospital Gasteig. Este edificio, que había cumplido su función, debía ser sustituido por un espacio más acogedor. Se consideró que ahí podría establecerse el nuevo centro cultural, lo que también favorecería al distrito de *Haidhausen*.

El proceso constructivo del centro cultural no estuvo exento de complicaciones. La necesidad de realizar modificaciones arquitectónicas durante la obra, sumada a las dificultades generales que atravesaba el sector de la construcción en ese momento, impactaron significativamente en la planificación y el coste del proyecto. Además, el suelo sobre el que se realizó la cimentación no era del todo adecuado para la construcción. La presencia de gravas cuaternarias y agua subterránea obligó a implementar un sistema de drenaje y a utilizar pilotes perforados para asegurar la estabilidad de la estructura.

El presupuesto inicial se multiplicó por más del doble, pasando de 137 a 372 millones de marcos alemanes. Sin embargo, gracias a la decisión de llevar a cabo el proyecto a través de una sociedad privada de *leasing*, se logró ajustar los gastos, estableciéndose finalmente en 335 millones de marcos. En 1984, el proyecto culminó con el traslado de la Biblioteca Municipal, la *Volkshochschule*, la Escuela Municipal de Canto y Música y el Conservatorio Richard Strauss al nuevo centro cultural Gasteig.

Durante este proceso no fueron pocas las quejas de muchos de los habitantes de la zona, por lo que el alcalde realizó un comunicado meses previos a la apertura:

Debemos agradecer a nuestros conciudadanos de *Haidhausen*, que durante la fase de construcción tuvieron que vivir con todas las tensiones que un proyecto tan grande implica inevitablemente. Que el Gasteig terminado os haga olvidarlo rápidamente. Que cautive a los visitantes con su atracción magnética. ¡Y que al final llegue a ser una fuente de inspiración para la Munich intelectual y cultural, para una Munich amante de las musas!

Múnich, 14 de agosto de 1985

Georg Kronawitter, Alcalde de la ciudad

Tras superar los problemas económicos principales, la Filarmónica de Múnich fue inaugurada el 10 de noviembre de 1985 con un concierto al que asistieron 2500 invitados, entre ellos el presidente de aquel momento. Desde su inauguración, ha sido la sede de la Orquesta Filarmónica de Múnich y actualmente también funciona como un centro cultural, siendo uno de los más grandes de Europa. Cuenta con una biblioteca pública e instalaciones educativas.

Su ubicación en altura permite una amplia vista de la ciudad, con el río Isar como protagonista y antiguos barrios residenciales de fondo. Se integra en el tejido urbano, creando un diálogo visual entre lo antiguo y lo nuevo. Esta ubi-

cación elevada también justifica el nombre de Gasteig, que proviene de la expresión «*gache Steig*» que, en alemán, significa «pendiente pronunciada».



4.18. Plano de situación del Gasteig Kulturzentrum

Figura 4.18

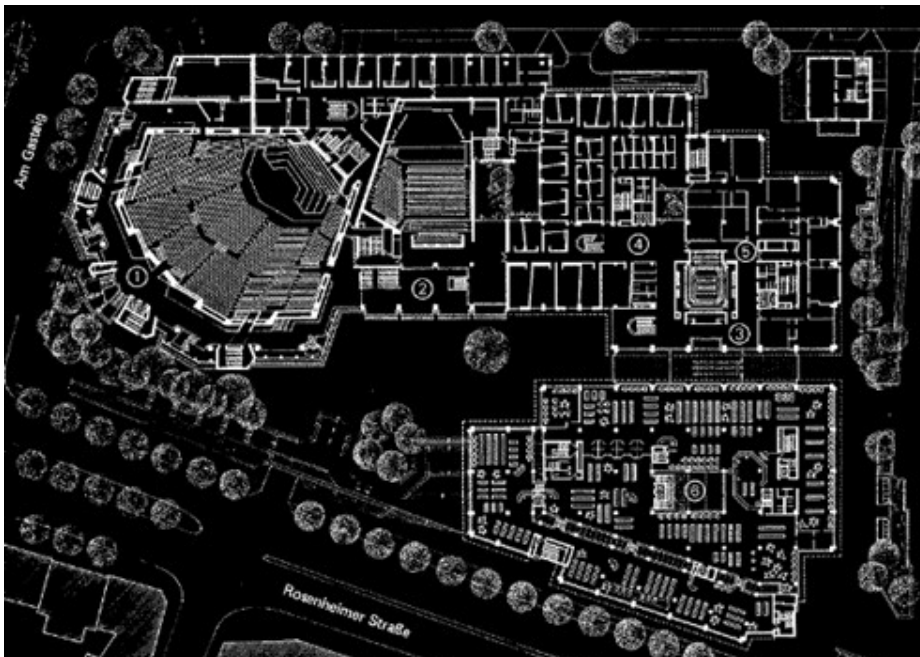
Además, está situada cerca de otros grandes centros culturales como el Museo de Ciencias Naturales, lo que crea un gran polo cultural en la ciudad.

Durante el estudio del terreno, se hallaron evidencias de antiguas canteras de arcilla, las mismas que suministraron los ladrillos para otras construcciones emblemáticas como puede ser la iglesia *Frauenkirche*. Este hallazgo supuso gran parte de la inspiración del proyecto. El diseño proponía una orientación estratégica hacia el río Isar, maximizando las vistas panorámicas y acentuando la elevación natural del terreno. La sala de conciertos, a una cota aún más elevada, debía ser un hito visual, y la fachada estaba pensada para causar un impacto significativo desde puntos clave como el Museo Alemán.

El proyecto proponía un diseño utilizando ladrillos locales tanto en exterior como en interior. La fachada exterior se planteó con una estética simple pero distintiva y una línea de cornisa continua. Los espacios interiores, en cambio, se conciben como vestíbulos diferenciados, con múltiples niveles. Presenta un estilo brutalista, con volúmenes masivos y materiales robustos. Esta elección respondía a la búsqueda de una imagen sólida y duradera para un centro cultural de gran envergadura.

Si analizamos la organización espacial del conjunto, podemos observar un sistema compartimentado, con cada función (filarmónica, biblioteca, etc.) ocupando un volumen independiente. Esta disposición, aunque es funcional, limita la interacción entre los diferentes espacios y dificulta la

fluidez de la circulación. Tiene un gran hall, que sirve como núcleo central del edificio y espacio de reunión y bienvenida para los visitantes.



4.19. Distribución en planta de las diferentes funciones. (1: Philharmonie, 2: Carl-Orff-Saal, 3: Black Box, 4: Conservatorio Richard Strauss, 5: Volkshochschule, 6: Biblioteca)

Figura 4.19

La fachada de ladrillo se realza mediante un saliente de cristal de 32 metros de altura. El exterior es similar y uniforme en todos los volúmenes, con líneas y bordes bien definidos, posiblemente para dar una imagen de uniformidad que contrarreste la compartimentación mencionada anteriormente, mientras que el interior presenta un diseño mucho más variado e independiente.

Según las entrevistas realizadas a los arquitectos, la biblioteca debía ser el contrapunto a la imponente masa de la Filarmónica. A pesar del exterior masivo y compacto, el interior debía estar más articulado y dividido. La Biblioteca y la Filarmónica y las otras dos instituciones, la *Volkshochschule* y el Conservatorio Richard Strauss, debían desarrollarse de manera más discreta¹⁰, tal y como explicaron los arquitectos:

Queríamos crear dos puntos de interés espacial particularmente atractivos: uno en las áreas de vestíbulo de la Filarmónica y otro en el espacio compartido entre la biblioteca.

Para proteger este centro cultural, sensible al ruido, se tuvieron en cuenta las interacciones con infraestructuras subterráneas, como la línea del metro *S-Bahn*: el edificio está ubicado justo al lado del túnel central del sistema de ferrocarril urbano de la ciudad. La línea de ferrocarril, que es una vía de balasto estándar con traviesas de madera, es una de las más concurridas de Alemania en términos de metro ligero. Los ingenieros debían garantizar que el nivel de ruido de fondo en la sala de conciertos no superara el límite especificado de 25 dB durante el paso de un tren, de modo que la

10. Allgemeine Kommunal Leasing, ed., *Gasteig Kulturzentrum Broschuere* (Gasteig Kulturzentrum, 1985).

4.20. Construcción de la línea
S-Bahn bajo el Centro Cultural



Figura 4.20

sala también pudiera ser utilizada para grabaciones. Para garantizar esto, en 1983, se instalaron en 1983 esteras bajo balasto a lo largo de 345 metros. Dentro de la sala principal hay que destacar el techo, resultado de una síntesis de las ideas arquitectónicas originales, requisitos acústicos y las posibilidades técnicas y artesanales. Para no restar protagonismo ni al techo ni al gran órgano de la sala, se opta por una paleta de materiales y colores más discreta en tonos rojizos.

Proceso constructivo

Debido a la gran amplitud y complejidad del proyecto se decidió dividir la obra en dos fases:

1. Primera fase: Biblioteca, Volkshochschule y Conservatorio Richard Strauss
2. Segunda fase: Filarmónica y Carl-Orff-Saal



4.21. Sala principal en
fase de construcción

Figura 4.21

Primera fase

La cimentación de la primera fase, exceptuando una franja en la biblioteca a lo largo de la carretera Rosenheimer Straße, se caracteriza por realizarse de forma superficial sobre la grava cuaternaria del terreno. La parte de la biblioteca es la situada sobre la línea del metro (*S-Bahn*). Esta sección del edificio fue cimentada a gran profundidad mediante pilotes de perforación que alcanzan hasta debajo del fondo del túnel. En el resto del edificio se optó por una cimentación con zapatas por razones económicas. Los componentes del edificio mayormente tienen 2 sótanos y 4 o 5 pisos, con alturas de entre 4,80 y 3,60 metros. Se diseñaron como estructuras de esqueleto de hormigón armado, con una distancia entre soportes de 8,40 y 9,60 metros¹¹.

Segunda fase

Durante esta segunda fase se construyen las dos salas más importantes del conjunto. El diseño de la sala principal tiene un ancho de 18 metros en la parte del escenario y aproximadamente 70 metros en la pared trasera, una longitud de 55 metros y una altura libre de 19 metros. La cubierta del salón está formada por una superficie de techo sin soportes que abarca 2500 m².

Para conseguir esto, la estructura del techo se compone de diez cerchas radiales de 3,50 metros de altura, con luces que oscilan entre 29 y 46 metros y voladizos de hasta 6 metros. También se construyen dos vigas de cercha con una altura de 5,50 metros y una distancia de soporte de 35 metros cada una. Las vigas principales se sitúan en la parte externa del edificio y soportan las cargas que se distribuyen hacia las paredes laterales y la parte central de la sala.



Figura 4.22

4.22. Cerchas empleadas en la construcción

El suelo del auditorio fue diseñado como un suelo doble para permitir la ventilación de la sala y facilitar la instalación de las conducciones de servicios. Se trata de un suelo inclinado y presenta una diferencia de altura de 13,5 metros a lo largo de 37 metros.

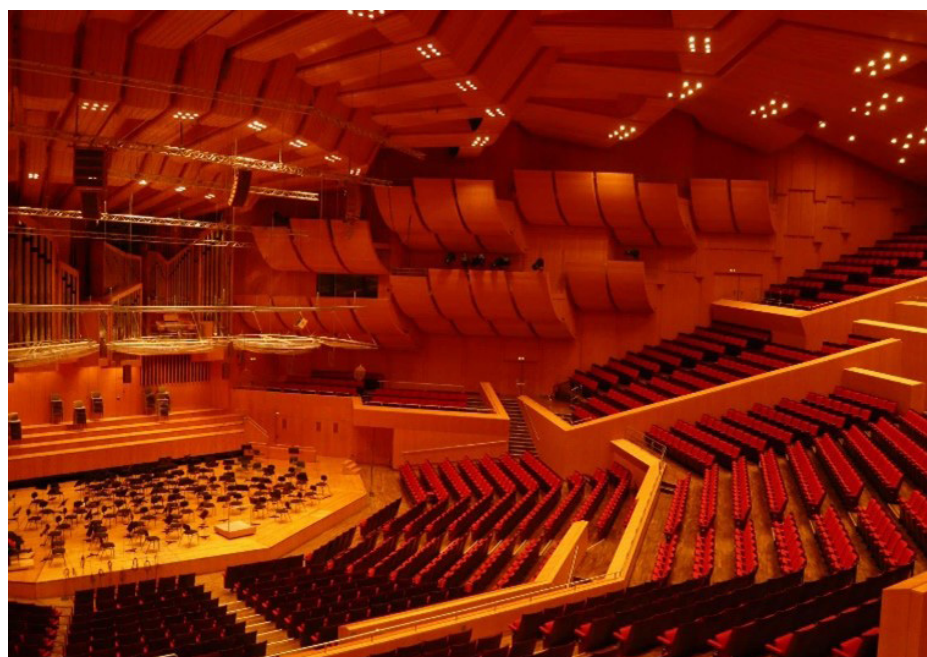
Debajo del auditorio, se encuentran dos niveles de vestíbulos que están diseñados como losas de nervio de hormigón visibles, tensadas entre las

11. Allgemeine Kommunal Leasing, ed., *Gasteig Kulturzentrum Broschuere* (Gasteig Kulturzentrum, 1985).

columnas perimetrales. La estructura de acero de la fachada de vidrio, que alcanza una altura máxima de 21 metros, se sitúa entre la cota o del edificio y la parte superior del auditorio, de forma independiente de las losas de los vestíbulos.

Interior

En el interior, el techo es de madera con acabados en roble rojo americano, creando un contraste visual atractivo con los asientos tapizados en rojo. Las paredes están revestidas con hormigón, cubiertas por tableros de madera y chapadas en roble rojo, manteniendo la coherencia en el diseño de materiales.



4.23. Vista interior de la sala principal

Figura 4.23

El suelo es de madera, asentado sobre finas placas prefabricadas de hormigón. Los asientos cuentan con respaldos de madera contrachapada moldeada: la parte inferior de los asientos es de madera perforada, mientras que los respaldos y la parte superior están tapizados para mayor comodidad. Los brazos de los asientos también son de madera. El escenario, con un suelo de madera, está elevado 75 cm.

Renovación

Una particularidad de este auditorio es que fue objeto de una renovación general en 2017, dirigida por el Ayuntamiento, debido a las constantes críticas recibidas tanto por la acústica como por el estado del local. Entre los críticos destacados se encuentra Leonard Bernstein, un renombrado compositor y director de orquesta, que señaló problemas significativos en la acústica de la sala tras escribir «Burn it (quémenlo)» en el libro de visitas¹².

12. George Loomis, "Munich's Music Lovers Wrestle Over a Controversial New Hall," The New York Times, 2009.

La geometría de la sala, con su planta en abanico y techo elevado, generaba una concentración de sonido en áreas específicas, dejando desatendidos los sectores delanteros. Para corregir esta deficiencia acústica, se optó por una solución que incluyó la instalación de reflectores de Plexiglás en las paredes laterales y en el techo suspendido. Esta combinación de elementos permitió optimizar la distribución del sonido y asegurar una experiencia auditiva más homogénea para todos los oyentes.



Figura 4.24

4.24. Paneles de plexiglás colocados encima del escenario

A pesar de la renovación de 2017, en 2018, se decide someter al edificio a una profunda transformación liderada por HENN y en colaboración con Yasuhisa Toyota. El proyecto, que busca abrir el edificio hacia la ciudad, introduce un contraste entre lo histórico y lo contemporáneo. La incorporación de un volumen de vidrio en forma de puente, que conecta las diversas funciones del conjunto, no solo establece un diálogo visual con el entorno urbano, sino que también aprovecha la posición elevada del edificio para convertirlo en un mirador urbano. Esta estructura de cristal, que se proyecta hacia la ciudad, funciona como un nexo entre los espacios interiores, y contrasta con el carácter monolítico y compartimentado del edificio original. Según las previsiones, deberá abrirse como tarde en 2028. Durante este tiempo, todas las actividades que se llevaban a cabo en el Gasteig se han trasladado a un edificio provisional, el Gasteig HP8, ubicado en Sendling, un barrio cercano.

De cara a la renovación acústica, el proyecto está en manos de Yasuhisa Toyota (Nagata Acoustics), reconocido acústico que ha trabajado en otras salas de renombre como pueden ser la *Elbphilharmonie* de Hamburgo o el *Bard College Performing Arts Center* de Nueva York. Su propuesta principal es el desplazamiento del escenario de forma que quede lo más central posible, para así, mejorar la acústica del recinto.

4.25. *Imagen exterior
del nuevo Gasteig*



Figura 4.25

4.26. *Propuesta de modificación
del interior de la sala principal*



Figura 4.26

5

Parámetros acústicos

Para comprender y analizar la evolución del sonido en un recinto, tanto en su componente directa como reflejada, se recurre al estudio de diversos parámetros acústicos. Estos parámetros permiten evaluar de forma objetiva y cuantitativa la calidad sonora del espacio, lo que es fundamental para garantizar una experiencia auditiva óptima en diversos entornos, desde salas de conciertos hasta aulas y oficinas.

Sonido reflejado

El análisis temporal del sonido reflejado en un punto específico de un recinto revela dos regiones acústicas diferenciadas. La primera región comprende las reflexiones que siguen inmediatamente al sonido directo, denominadas primeras reflexiones o reflexiones tempranas. La segunda región está compuesta por las reflexiones tardías, que conforman la denominada cola reverberante.

Se considera que las primeras reflexiones ocurren dentro de los primeros 100 milisegundos posteriores al sonido directo. Aunque es un valor de referencia, puede ajustarse según las características acústicas específicas de cada recinto, su volumen y su geometría.

5.1. Reflexiones generadas por una fuente sonora hasta llegar al receptor

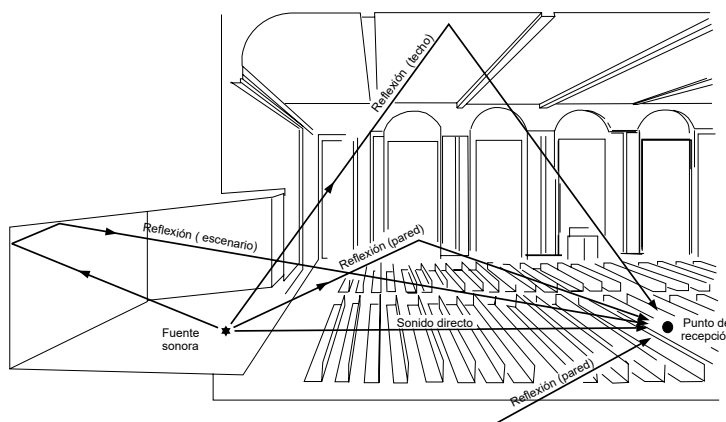


Figura 5.1

Tiempo de reverberación (RT)

El tiempo de reverberación representa el tiempo que tarda un sonido en atenuarse 60 dB en un recinto, a partir del momento en que cesa la emisión sonora.

El tiempo de reverberación varía según la frecuencia, y disminuye a medida que esta aumenta. Esto da lugar a recintos “vivos” (con un RT grande) y recintos “apagados” (cuando el RT es pequeño). El tiempo de reverberación óptimo varía según el tamaño y uso de un espacio. Estos valores recomendados se pueden consultar en tablas para diferentes tipos de salas. En la Tabla 2 se presentan los intervalos de valores recomendados, asociados al volumen que tenga el espacio, para salas ocupadas.

2. Márgenes de valores recomendados de RT_{mid} en función del tipo de sala (recintos ocupados)

TIPO DE SALA	RT_{mid} , SALA OCUPADA (EN s)
Sala de conferencias	0,7 – 1,0
Cine	1,0 – 1,2
Sala polivalente	1,2 – 1,5
Teatro de ópera	1,2 – 1,5
Sala de conciertos (música de cámara)	1,3 – 1,7
Sala de conciertos (música sinfónica)	1,8 – 2,0
Iglesia/catedral (órgano y canto coral)	2,0 – 3,0
Locutorio de radio	0,2 – 0,4

Tabla 2

Cálculo del RT

La fórmula de Sabine es el método más utilizado para calcular de forma aproximada el tiempo de reverberación de un recinto. Establece una relación directa entre el volumen de la sala y su absorción.

Higini Arau, físico catalán, desarrolló fórmulas más avanzadas para cal-

$$RT = 0.161 \frac{V}{A_{tot}}$$

cular el tiempo de reverberación en recintos. Su aproximación se destaca por considerar la distribución no uniforme de la absorción en las salas, lo que la hace más precisa que la fórmula de Sabine.

$$T_{max} = 0.600 (V^{0.1325})$$

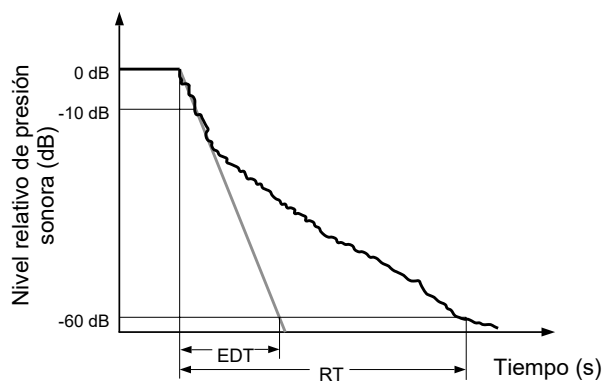
$$T_{min} = 0.4245 (V^{0.1331})$$

Early Decay Time (EDT)

El EDT se define como seis veces el tiempo que pasa desde que la fuente emisora deja de emitir hasta que el nivel de presión sonora desciende 10 dB. Este parámetro se utiliza para evaluar la calidad acústica de un espacio, especialmente en entornos donde se presenta música.

Al igual que el tiempo de reverberación (RT), el EDT también varía según la frecuencia.

Suele relacionarse con cómo la audiencia percibe la viveza acústica de una sala, siendo mejor que el tiempo de reverberación. No obstante, en salas con difusión uniforme del sonido el EDT y el TR deberían ser similares. Diferencias importantes indicarían una distribución no uniforme de la absorción o geometrías complejas en la sala.



5.2. Relación entre EDT y RT

Figura 5.2

Calidez acústica (BR) y brillo (Br)

Se considera que una sala tiene calidez acústica cuando muestra una buena respuesta en las frecuencias bajas, lo que refleja una abundancia de graves, aportando suavidad y una sensación envolvente al sonido en ese espacio.

El BR (Bass Ratio) se define como la relación entre la suma de los tiempos de reverberación (RT) en las frecuencias bajas (125 y 250 Hz) y la suma

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

de los RT en las frecuencias medias (500 y 1000 Hz).

Los valores recomendados de BR para salas de concierto son:

$$1,10 \leq BR \leq 1,25 \text{ (si } RT_{\text{mid}} = 2,2\text{s)}$$

$$1,10 \leq BR \leq 1,45 \text{ (si } RT_{\text{mid}} = 1,8\text{s),}$$

siendo

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

El brillo, por el contrario, está asociado a los agudos, las altas frecuencias. Un sonido con brillo tiene un carácter claro, nítido y detallado, lo que permite percibir con precisión los matices y las texturas de los instrumentos o voces. En términos de frecuencia, el brillo se asocia generalmente con frecuencias por encima de los 2 kHz.

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

Un sonido brillante se percibe como claro, vivo y rico en armónicos y que permite distinguir más claramente los diferentes instrumentos y notas musicales.

Claridad musical C80

El C80 cuantifica la proporción de energía sonora directa que llega al oyente en los primeros 80 milisegundos tras la emisión del sonido, en comparación con la energía sonora total.

$$C80 = \frac{\text{Energía hasta 80 ms}}{\text{Energía a partir de 80 ms}} \text{ (en dB)}$$

La selección del intervalo temporal de 80 ms se debe a que, en el caso de la música, las reflexiones que llegan al oyente dentro de ese periodo son percibidas por el oído como parte del sonido directo, lo que ayuda a mejorar la claridad musical. Estas reflexiones se conocen como primeras reflexiones.

Este parámetro está relacionado con el tiempo de reverberación RT. A medida que el RTmid aumenta, el C80 disminuye. Los valores óptimos de este parámetro son aquellos que se encuentran entre -2 y 2 dB.

Sonoridad (G)

Se describe como la diferencia entre el nivel medio de presión sonora generado en un recinto por un intérprete ubicado en el escenario y un nivel de referencia de 39 dB. Este nivel de referencia corresponde al valor promedio de presión sonora que la misma persona produciría en un espacio al aire libre, a una distancia de 10 metros.

Describe el grado de amplificación del sonido que proporciona el recinto en comparación con el mismo sonido en campo abierto. Es muy importante para determinar si una sala proporciona suficiente nivel sonoro, especialmente en música no amplificada. No se recomienda que los valores de Smid sean menores de 0 dB.

Tiempo central (Ts)

El tiempo central es el parámetro que mide el tiempo medio en el que la energía sonora se distribuye en una sala.

Describe la distribución temporal de la energía sonora. Un T_s bajo indica que la energía sonora se concentra al principio y alto sugiere que la energía está más distribuida en el tiempo. Para la música se recomiendan valores entre 70 y 150 ms y se utiliza para evaluar la claridad y definición del sonido.

Eficiencia lateral (LF)

La eficiencia lateral LF (*Lateral Energy Fraction*) se define como la relación entre la energía que llega al oyente desde los laterales dentro de los primeros 80 ms tras la llegada del sonido directo (excluyendo el sonido directo) y la energía total recibida en todas las direcciones durante ese mismo intervalo de tiempo.

$$LF = \frac{\text{Energía lateral hasta 80 ms (excluyendo sonido directo)}}{\text{Energía total hasta 80 ms}}$$

La eficiencia lateral es relevante porque contribuye a la sensación de espacialidad y amplitud sonora recibida por el oyente. Se expresa como un valor entre 0 y 1 o como un porcentaje. Un valor alto es deseable en salas de concierto ya que mejora la sensación de envolvimiento acústico del sonido por parte de la audiencia. Se recomiendan valores mayores a 0,19 ms.

Índice de difusión (SDI)

El SDI (*“Surface Diffusivity Index”*) se establece mediante una inspección visual del espacio con el fin de evaluar el grado de irregularidades en las paredes laterales y el techo. Se denomina «grado de difusión» a la cantidad de irregularidades en estas superficies y se asignan distintos pesos a cada una de ellas.

El valor del SDI oscila entre 0 y 1; siendo el 1 las superficies con mucho artesonado (difusión total) y 0 las superficies lisas (difusión nula).

En resumen, este índice es una medida de la capacidad de una sala para dispersar el sonido de manera uniforme. Se considera que el grado de difusión de paredes laterales y techo es un factor clave que distingue las salas acústicamente excelentes de las buenas.

La siguiente tabla resume los valores recomendados para los parámetros acústicos más relevantes en el diseño de recintos. Emplear estos parámetros como guía permite a los profesionales diseñar espacios que cumplan con las necesidades acústicas requeridas¹³:

PARÁMETRO ACÚSTICO	VALOR RECOMENDADO	VALORACIÓN SUBJETIVA
Tiempo de reverberación medio RT_{mid} (500 Hz – 1 kHz), sala ocupada	$1,8 \leq RT_{mid} \leq 2$ s	Grado de viveza de la sala
Calidez acústica BR, sala ocupada	$1,10 \leq BR \leq 1,25$ (si $RT_{mid} = 2,2$ s) ^(*) $1,10 \leq BR \leq 1,45$ (si $RT_{mid} = 1,8$ s) ^(*)	Riqueza en sonidos graves, melosidad y suavidad de la música
Brillo Br, sala ocupada	$Br \geq 0,87$	Riqueza en sonidos agudos
“Early Decay Time” medio EDT_{mid} (500 Hz – 1 kHz), sala ocupada	$EDT_{mid} \approx RT_{mid}$	Grado de viveza de la sala
Sonoridad media G_{mid} (500 Hz – 1 kHz), sala vacía	$4 \leq G_{mid} \leq 5,5$ dB	Grado de amplificación producido por la sala
Claridad musical media (“music average”) $C_{80}(3)$ (500 Hz – 2 kHz)	$-4 \leq C_{80}(3) \leq 0$ dB, sala vacía $-2 \leq C_{80}(3) \leq +2$ dB, sala ocupada	Grado de separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical
Eficiencia lateral media LF_{E4} (125 Hz – 1 kHz), sala vacía	$LF_{E4} \geq 0,19$	Impresión espacial del sonido (amplitud aparente de la fuente sonora)
Índice de difusión SDI	$SDI \rightarrow 1$	Impresión espacial del sonido (sensación de envolvente)
Soporte objetivo medio $ST1_{mid}$, (250 Hz – 2 kHz), sala vacía y escenario sin músicos, pero con los elementos que le son propios	$-14 \leq ST1_{mid} \leq -12,5$ dB	Capacidad de los músicos de escucharse a sí mismos y al resto de componentes de la orquesta

3. Valores recomendados de los parámetros acústicos asociados a salas de conciertos y correspondiente valoración subjetiva

Tabla 3

13. Antoni Carrión Isbert, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Edicions UPC (Edicions UPC, Universitat Politècnica de Catalunya, 1998).

6

Metología para el análisis y comparación de casos de estudio

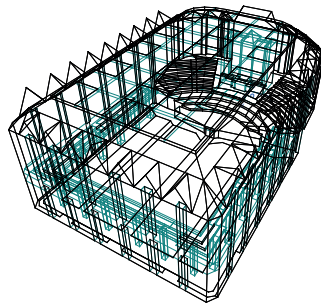
Para el análisis de los casos de estudio se empleará el software de acústica Odeon¹⁴. Odeon es un software avanzado de simulación acústica diseñado para predecir, analizar y optimizar las propiedades acústicas de espacios interiores y exteriores. El proceso de diseño comienza con la creación de un modelo tridimensional del espacio, que puede importarse desde un software CAD o generarse directamente en Odeon. Posteriormente, el usuario asigna los coeficientes de absorción acústica a los materiales que revisten las superficies interiores del recinto, establece fuentes sonoras y receptores, y ajusta los parámetros de simulación. Odeon calcula con precisión los parámetros acústicos descritos en la sección anterior en las posiciones de receptor seleccionadas por el usuario. Además, para facilitar la interpretación de estos datos, el software ofrece herramientas de visualización avanzadas, incluyendo mapas de color, gráficos detallados y audios que permiten, no solo ver, sino también escuchar la acústica simulada del espacio.

Basados en esta herramienta de simulación podemos realizar un estudio exhaustivo de las características acústicas de los espacios seleccionados. El programa Odeon incluye los modelos geométricos de los dos espacios seleccionados como casos de estudios. Estos modelos están validados y se han escogido para llevar a cabo el análisis propuesto. Esto quiere decir que dichos modelos han sido diseñados y ajustado para garantizar una representación fiel de las condiciones acústicas reales. Gracias a esta validación, los resultados obtenidos permiten evaluar con confianza parámetros clave como el tiempo de reverberación, la claridad del sonido y la distribución espacial de la energía acústica, asegurando que las conclusiones del análisis sean fiables y útiles para el estudio que se ha planteado. No obstante, es importante tener en cuenta que los modelos presentan ciertas simplificaciones con respecto a los auditorios originales, aunque estas no comprometen la validez del estudio. Por ejemplo, en el modelo del Concertgebouw, el artesonado del techo se simplifica ligeramente, y el análisis se realiza considerando una audiencia uniforme.

En el caso del Gasteig, tanto el techo como las paredes se han simplificado, y se omite un reflector ubicado justo encima del escenario, cerca de los músicos. Esto se debe a que este elemento está diseñado para mejorar la percepción acústica de los intérpretes, no del público, que es el enfoque principal de este estudio.

14. <https://odeon.dk>

6.1. Modelo tridimensional
empleado para el estudio
del Concertgebouw



6.2. Modelo tridimensional
utilizado para el
análisis de Gasteig

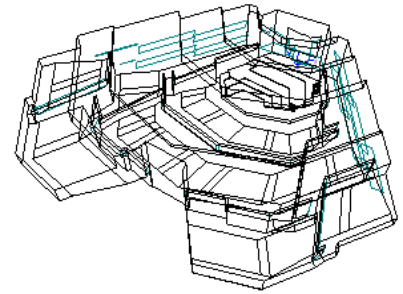


Figura 6.1

Figura 6.2

Para comparar las características acústicas de los dos casos seleccionados, se realizará un análisis que abarcará varios aspectos. Se examinarán los materiales que revisten las superficies de cada espacio, evaluando sus coeficientes de absorción. También se estudiarán distintos parámetros acústicos. Estos parámetros se analizarán en función de la posición del receptor dentro del espacio, realizando simulaciones en distintos puntos de las salas. Los resultados se compararán con los valores recomendados para estos parámetros y se complementarán con evaluaciones subjetivas a través de la auralización.

Para los análisis se seguirá el siguiente esquema:

1. Caso 1: Concertgebouw, Ámsterdam
2. Caso 2: Gasteig, Múnic
3. Comparación entre ambos casos

Es decir, primero se estudiarán ambos casos de manera individual, y posteriormente se realizará una comparación entre ellos.

7

Comparativa de casos

[7.1]

Materiales

Para la comparación de materiales en los casos de estudio, se consideran todos los materiales empleados en los modelos desarrollados en el software Odeon y se analizan sus propiedades acústicas.

El coeficiente de absorción de los materiales (α) varía según la frecuencia, por lo que para facilitar una comparación más sencilla y directa se utiliza el NRC (*Noise Reduction Coefficient*). El NRC es un valor único que permite describir el rendimiento promedio que tiene un material como absorbente acústico. Este coeficiente se calcula como el promedio de los coeficientes de absorción obtenidos en las bandas de octava comprendidas entre 250 y 2000 Hz tal y como se indica en la siguiente fórmula:

$$NRC = \frac{\alpha(250 \text{ Hz}) + \alpha(500 \text{ Hz}) + \alpha(1 \text{ kHz}) + \alpha(2 \text{ kHz})}{4}$$

Estos resultados se muestran en forma de tabla, en las cuales se presenta información detallada sobre los materiales utilizados, incluyendo el código numérico asignado en Odeon, la superficie total de dicho material en el recinto, su lugar de aplicación, el NRC obtenido y el porcentaje de absorción en relación con el total. Para simplificar la interpretación, las tablas están organizadas según la absorción correspondiente a cada zona del espacio (escenario, paredes, etc.), ordenadas de mayor a menor. Los valores de los coeficientes de absorción en bandas de octava a partir de los que se ha calculado el coeficiente NRC para todos los materiales se han incluido en el Anexo I.

Se presenta también una gráfica que muestra la distribución del área de absorción acústica en relación con diferentes materiales y frecuencias. En el eje horizontal se especifican las frecuencias en Hz (desde 63 Hz hasta 8000 Hz), mientras que en el eje vertical se muestra el área de absorción acústica en metros cuadrados. Cada barra correspondiente a una frecuencia está dividida según los materiales empleados, los cuales se encuentran detallados en la leyenda ubicada a la derecha. Cada color representa un material específico, lo que facilita la identificación y comparación de su aporte a la absorción acústica.

Caso 1. Concertgebouw, Ámsterdam

CONCERTGEBOUW	Material	NRC	Superficie	Aportación
<i>Audiencia</i>	No se asigna un material concreto, sino que se considera una superficie de público (11059)	0,612	895,9 m ²	49%
<i>Paredes</i>	Pared de ladrillo con enlucido (4004)	0,047	810,6 m ²	3%
	40% de cortinas de tejido de 80 mm y 60% de enlucido (15003)	0,280	235,2 m ²	6%
	Pared enlucida (4039)	0,075	166,2 m ²	15%
	Yeso o cal, acabado rugoso sobre listón (4035)	0,062	901,4 m ²	5%
<i>Techo</i>	Yeso o cal, acabado rugoso sobre listón (4035)			
	Capa porosa de 100 mm (15002)	0,140	207,7 m ²	3%
<i>Suelo</i>	Madera hueca (3000)	0,205	467,7 m ²	9%
<i>Órgano</i>	Madera de 16 mm sobre montantes de 40 mm (3064)	0,097	191,9 m ²	2%
	Láminas metálicas (5004)	0,922	66,4 m ²	5%
<i>Escenario</i>	Madera, 25 mm con cámara de aire (3065)	0,087	330,1 m ²	3%
<i>Escaleras</i>				
<i>Ventanas</i>	Vidrio común (10006)	0,155	100,6 m ²	1%

Tabla 4

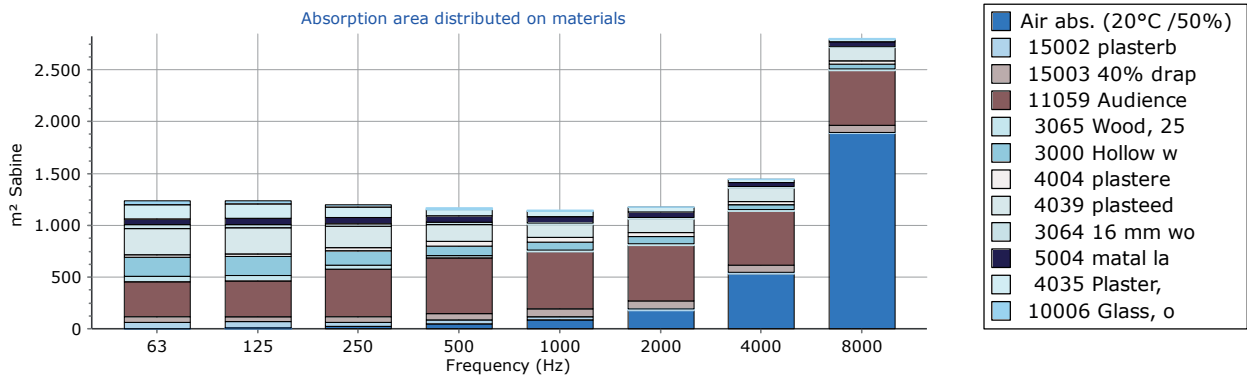


Figura 7.1

7.1. Distribución del área de absorción acústica en relación con diferentes materiales y frecuencias en el caso de Ámsterdam

De la tabla 4 y el gráfico de la Figura 7.1 se deduce que la mayor contribución a la absorción del recinto, un 49 %, proviene de la zona de la audiencia. Por otro lado, a pesar de su coeficiente de absorción relativamente bajo (0,075), el enlucido de las paredes se destaca como uno de los materiales que más mas contribuye a la absorción total del espacio. Su amplia superficie (2216,8 m²) compensa su baja capacidad de absorción, convirtiéndolo en un elemento clave en la reverberación del recinto.

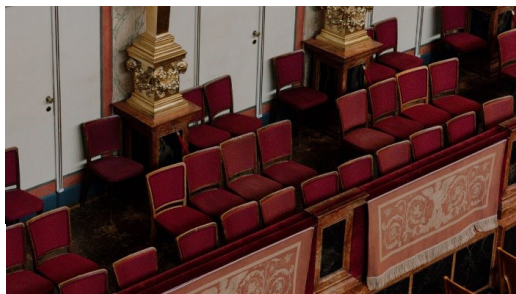


Figura 7.2



Figura 7.3

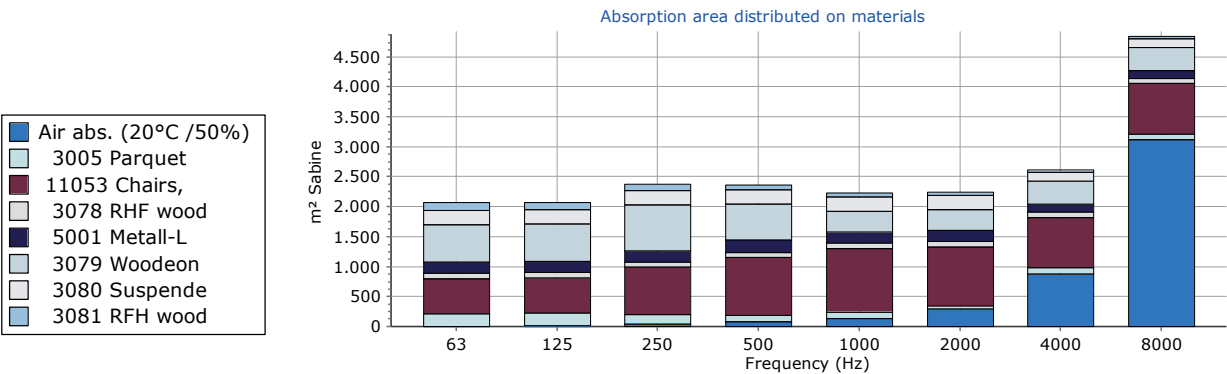
7.2. Sillas utilizadas en los palcos

7.3. Paredes laterales con enlucido de yeso

Caso 2. Gasteig, Múnich

GASTEIG	Material	NRC	Superficie	Aportación
Asientos	Sillas vacías con tapizado de tela de grosor medio (11053)	0,790	1203,7 m²	48%
Paredes	Paneles de madera (3079)	0,147	3388,8 m²	25%
Techo	Elementos suspendidos (3080)	0,080	3006,5 m²	12%
Escaleras	Parqué (3005)	0,100	1036,6 m²	5%
Suelo				
Escenario	Tablas de madera RFH (3081)	0,225	370,5 m²	4%
Órgano	Láminas metálicas (5001)	0,687	106,4 m²	4%
Reflectores	Tablas de madera RHF (3078)	0,100	426,8 m²	2%

Tabla 5



7.4. Distribución del área de absorción acústica en relación con diferentes materiales y frecuencias en el caso de Múnich

Figura 7.4

En este caso, la mayor superficie corresponde a las paredes, con 3388,8 m². No obstante, las sillas generan casi el doble de absorción a pesar de ocupar una superficie significativamente menor, aproximadamente un tercio de la de las paredes. Esto se debe a que las sillas tapizadas son uno de los elementos que más contribuyen a la absorción acústica.

7.5. Sillas utilizadas en la sala principal

7.6. Interior de la sala, con paredes de madera y reflectores



Figura 7.5



Figura 7.6

Comparación

Si examinamos las gráficas obtenidas de la simulación, podemos notar que, en ambos casos, aproximadamente la mitad de la absorción proviene de la audiencia, seguida por las paredes (de yeso en Ámsterdam y de madera en Gasteig). Aunque la madera y el yeso son materiales muy distintos, muestran una absorción similar debido a su alta reflectancia. En estas mismas gráficas podemos apreciar también como, en frecuencias altas, el aire contribuye a la absorción del sonido de forma similar en ambos casos. También resulta destacable la contribución del metal del órgano en ambos escenarios.

En el acondicionamiento acústico de una sala de conciertos, es fundamental entender que la mayor parte de la absorción del sonido proviene de la audiencia. Por ello, el resto de las superficies de la sala deben ser principalmente reflectantes para generar reflexiones útiles que lleguen rápidamente a los oyentes. Esto ayuda a crear un sonido envolvente y claro. Es importante ajustar el tiempo de reverberación según el tamaño de la sala y el tipo de música, asegurar una distribución uniforme del sonido en todo el espacio, y controlar el ruido de fondo. La forma y los materiales de la sala deben diseñarse cuidadosamente para evitar ecos molestos y favorecer las reflexiones laterales que mejoran la sensación de inmersión sonora. Además, se debe considerar un amplio rango de frecuencias para reproducir fielmente todos los matices de la música, desde los graves profundos hasta los agudos más brillantes.

Por lo tanto, en ambas salas se aplican los principios de acondicionamiento acústico característicos de las grandes salas. En ambos casos, la mayor absorción sonora se concentra en la audiencia, mientras que el resto de las superficies son predominantemente reflectantes. Sin embargo, existe una diferencia clave entre los recintos: el diseño y tratamiento del techo.

En el caso del Concertgebouw, el techo es plano y artesonado, como se aprecia en la Figura 7.7. En contraste, en la sala del Gasteig Kulturzentrum,

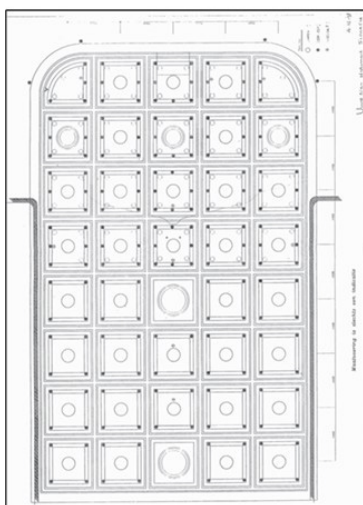


Figura 7.7

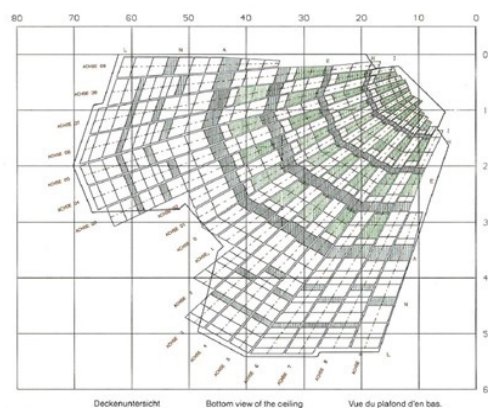


Figura 7.8

7.7. Plano de techo del Concertgebouw

7.8. Plano de techo del Gasteig

construida más recientemente, las superficies reflectantes del techo han sido orientadas estratégicamente para que las reflexiones útiles lleguen lo más pronto posible y se distribuyan de manera dirigida por todo el espacio

[7.2]

Influencia de la posición del oyente en los parámetros acústicos

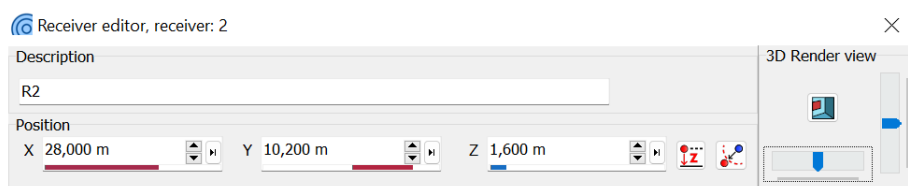
Una vez analizado el tipo de materiales que revisten las superficies y se disponen en el interior de los espacios, es importante analizar cómo afectan estos a la forma en la que el sonido es percibido por los espectadores en distintas ubicaciones. Para hacer este estudio nos basamos en el cálculo de los parámetros acústicos que nos permite simular Odeon. Para este análisis, se utilizará un emisor o fuente sonora ubicada en el escenario de cada espacio estudiado. Se dispondrán receptores en posiciones estratégicas, variando sus distancias y alturas respecto a la fuente emisora. Este enfoque permitirá identificar las diferencias perceptuales en cada ubicación del espectador y detectar posibles puntos problemáticos en la acústica del recinto.

En este análisis se evaluarán los parámetros acústicos previamente explicados en el capítulo 5, examinando cómo varían según la posición de los receptores y las características del espacio estudiado:

- Tiempo de Reverberación (RT)
- Tiempo Inicial de Decaimiento (EDT)
- Claridad musical (C80)
- Sonoridad (G)
- Tiempo central (Ts)
- Eficiencia Lateral (LF)
- Calidez acústica (BR)
- Brillo (Br)

Para llevar a cabo este análisis, el primer paso consiste en ubicar los receptores deseados dentro del modelo tridimensional del espacio e incluido en el programa de simulación acústica. Se utilizará una fuente sonora como emisor (Fuente 1) centrada en el escenario. El procedimiento se ilustra con un solo caso, el Caso 1, pero será el mismo en los dos.

Mediante las herramientas “Source Receiver List” y “New Receiver”, se ubican los receptores en las posiciones deseadas dentro del modelo tridimensional del espacio de la simulación. En esta parte del programa podemos colocar las fuentes y los emisores según unos ejes X, Y y Z.



7.9. Configuración de receptores

Figura 7.9

7.10. Configuración de emisores o fuentes

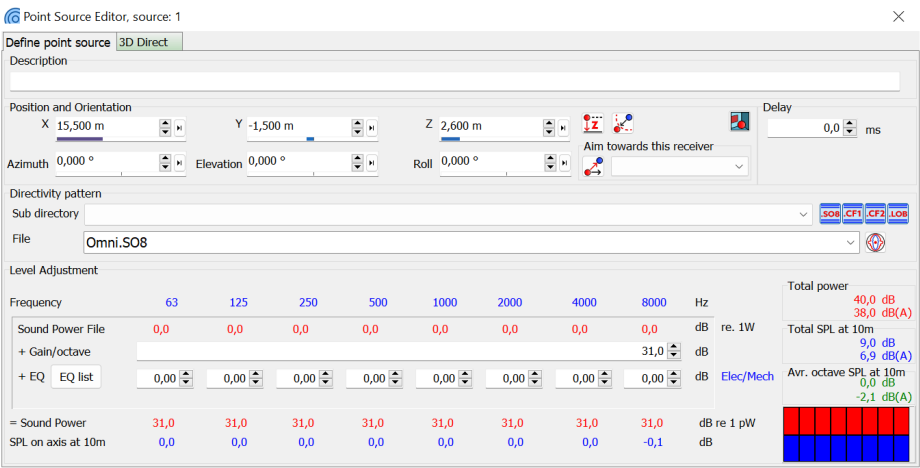


Figura 7.10

El resultado es el que se muestra en la Figura 7.11, donde se puede apreciar el emisor en rojo colocado en el escenario y en azul posiciones de emisor ubicadas en distintas posiciones dentro del espacio de audiencia.

7.11. Resultado de colocar emisores y receptores

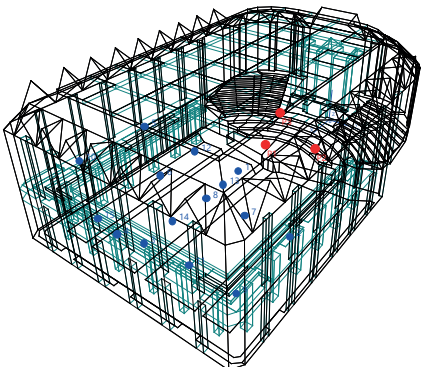


Figura 7.11

El siguiente paso es generar una simulación para obtener los valores de los parámetros deseados. Para realizar este análisis se utiliza la herramienta MultiJobs, donde nos aparecerán los emisores y receptores colocados anteriormente, nos permite seleccionar hacia qué punto estar dirigidos los receptores y las fuentes ubicadas dentro del espacio. Para realizar el trabajo y obtener los datos, se selecciona la columna Multi, ya que esta opción permite analizar todos los receptores simultáneamente. Es importante especificar la fuente que se desea utilizar en cada caso. En este caso específico, el análisis corresponde al Job 1, el cual se realiza tomando como referencia la Fuente 1 (Source 1). Se pueden realizar simultáneamente tantos trabajos como se desee, y es posible especificar tanto las fuentes como los recepto-

Job	Job description	Receiver pointing towards source	☒ Grid	☒ Multi	☒ Single point response receiver
1	S1-Rx	P1 S1 - Point source at: (x,y,z) = (-3,200	☒	☒	(none)
2	S2-Rx	P2 S2 - Point source at: (x,y,z) = (-4,700	☐	☐	(none)
3	S3-Rx	P3 S3 - Point source at: (x,y,z) = (-8,400	☐	☐	(none)

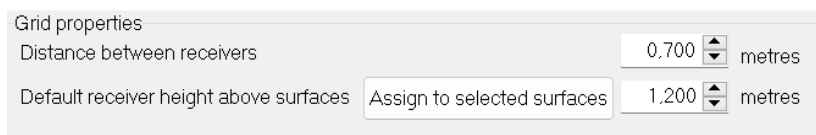
7.12. Interfaz de la herramienta MultiJobs

Figura 7.12

res que se quieran considerar. La simulación realizada nos proporciona los parámetros acústicos para cada posición de receptor y una posición de fuente o emisor.

El programa Odeon ofrece también la opción Grid. Esta función genera una representación gráfica continua, o "*grid*", que muestra la distribución de los valores de los parámetros acústicos sobre una superficie determinada. Esta opción "Grid" proporciona los valores de los parámetros acústicos por frecuencias o con los valores globales. En este tipo de representación el usuario puede definir la resolución con la que se lleva a cabo la simulación mediante la definición del tamaño de la cuadrícula o distancia entre receptores. Es importante tener en cuenta que, a mayor número de cuadrados, mayor será el tiempo de cálculo que necesite el programa.

Para realizar esto, en "*Define Grid*", se nos abrirá una pestaña nueva y en la parte inferior podemos ver "*Grid Properties*". Ahí podremos configurar nuestra cuadrícula.



7.13. Configuración del Grid

Figura 7.13

En este caso se ha establecido una distancia de 0,7 m entre receptores para definir la cuadrícula. Es decir, cuadrados de 70x70 cm. Si pulsamos "*Show Grid*", el programa nos representa como se distribuye la cuadrícula que hemos definido sobre las superficies escogidas para simular.

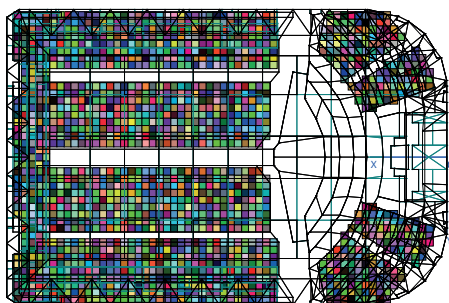


Figura 7.14

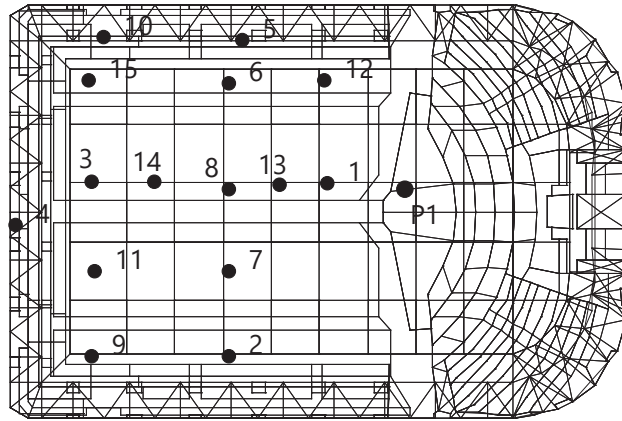
7.14. Tamaño de cuadrícula en el Grid

Se han llevado a cabo estos tipos de simulaciones para los dos casos de estudio. En los siguientes apartados se presentan y analizan los resultados obtenidos.

En el caso de los parámetros Calidez Acústica (BR) y Brillo (Br), no se obtienen a través de la simulación, sino que se calculan de forma independiente a través de las fórmulas mencionadas en el capítulo de parámetros acústicos.

Caso 1. Concertgebouw, Ámsterdam

En el caso de Ámsterdam, como se muestra en la Figura 7.15, los receptores se distribuyen para abarcar la mayor parte del espacio y generar diversas situaciones de análisis. Se colocan a diferentes distancias entre el emisor y la pared opuesta al escenario, así como en posiciones variadas respecto a las paredes laterales.



7.15. Receptores del Caso 1

Figura 7.15

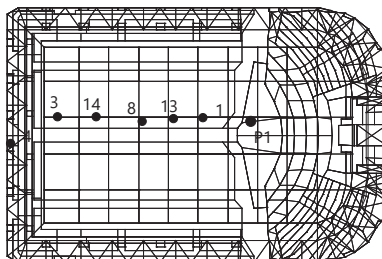
Para analizar el efecto de las paredes y la distancia respecto al emisor se han agrupado las posiciones de receptor en tres grupos:

- Grupo 1: Receptores en línea con el emisor y ubicados a distintas distancias de este (R₁, R₁₃, R₈, R₁₄, R₃ y R₄)
- Grupo 2: Parte central, de izquierda a derecha, a diferentes distancias de las paredes de la sala (R₂, R₇, R₈, R₆, R₅)
- Grupo 3: Zona posterior de la sala, de izquierda a derecha, a diferentes distancias de las paredes de la sala (R₉, R₁₁, R₃, R₁₀)

El programa genera en la simulación los valores de los parámetros acústicos en bandas de octava y promedio. Los valores en bandas de octava se presentan en el Anexo II. Aquí, para cada grupo de mediciones, y para facilitar la interpretación se analizan los valores medios calculados como el promedio de los valores obtenidos en las bandas de 500 y 1000 Hz.

Grupo 1. Receptores R1, R13, R8, R14, R3, R4

Este primer grupo de receptores constituyen una recta desde el emisor hasta el final de la sala (a 35 metros) que nos permitirá observar la variación de los parámetros en función de la distancia al foco sonoro. También se incluye dentro de este grupo un oyente localizado en un palco en la pared posterior de la sala, a 8 metros de altura.



7.16. Receptores pertenecientes al Grupo 1

Figura 7.16

En la Tabla 6 se presentan los valores numéricos. Para cada posición se especifica la distancia respecto del emisor y se especifica también el receptor ubicado en el palco:

Parámetros	R1 (12,8m)	R13 (16,1m)	R8 (19,7m)	R14 (24,8m)	R3 (29,2m)	R4 - palco (34,9m)
EDT(s)	2,70	2,51	2,29	2,63	2,40	2,35
T20(s)	2,63	2,59	2,52	2,59	2,49	2,49
G (dB)	8,1	7,1	7,1	4,7	5,1	4,5
C80 (dB)	2,0	1,1	0,8	-1,9	-0,3	1,5
Ts (ms)	105	130	133	175	157	142
LF	0,01	0,14	0,31	0,07	0,24	0,12
BR	0,97	1,00	0,99	0,96	0,94	0,96
Br	0,92	0,93	0,92	0,92	0,91	0,88

Tabla 6

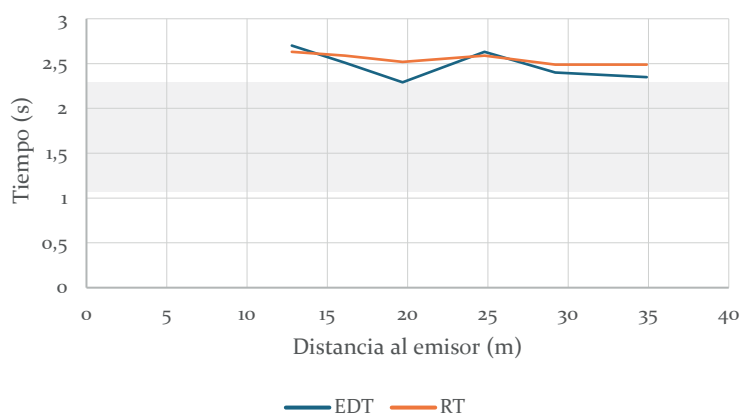
6. Valores correspondientes al Grupo 1 (Caso 1)

Las tablas se acompañan de gráficas de los parámetros acústicos en función de la distancia al emisor para una más fácil interpretación visual de su evolución. Para alguno de los parámetros acústicos además se ha generado el grid. Dentro de las gráficas y para una fácil comparación se han incluido en sombreado los intervalos recomendados de los parámetros acústicos¹⁵.

15. Antoni Carrión Isbert, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Edicions UPC (Edicions UPC, Universitat Politècnica de Catalunya, 1998).

EDT y RT

El tiempo de reverberación aconsejado en una sala de conciertos debe ser entre 1,8 y 2s. Sin embargo, para realizar la comparativa de forma más precisa, se calculan los mínimos y máximos del RT de forma más precisa en función del volumen de la sala (22099 m²) mediante la fórmula de Higini Arau, obteniendo un tiempo de reverberación óptimo entre 1,06 y 2,26 segundos, quedando por debajo de los simulados en este grupo de receptores.



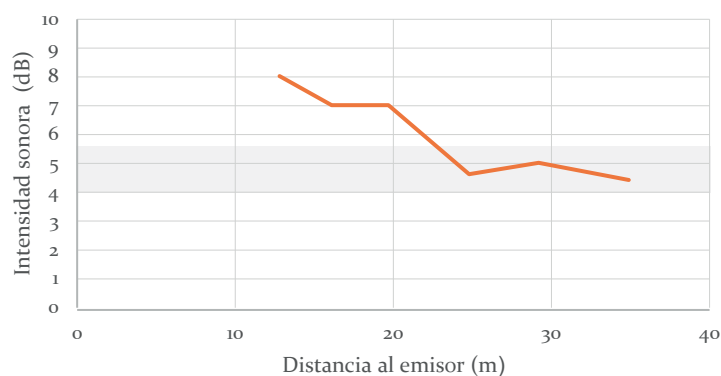
7.17. Parámetros EDT y RT

Figura 7.17

Las diferencias entre el EDT y el RT son pequeñas para todos los puntos de oyente incluyendo el ubicado en el palco. Esto y la uniformidad en los valores de EDT y RT a lo largo del espacio es un indicador, en principio, de una buena difusión del sonido en la sala. Las superficies de la sala reflejan el sonido de manera uniforme, sin crear zonas con excesiva o escasa reverberación.

Sonoridad (G)

La sonoridad disminuye de manera natural a medida que los receptores se alejan de la fuente emisora. Esta reducción es progresiva hasta alcanzar una distancia de 20 metros, punto a partir del cual la sonoridad se estabiliza, man-



7.18. Parámetro G

Figura 7.18

teniéndose uniforme y dentro de los rangos recomendados incluso para el oyente situado en el palco de la pared final.

Se ha generado también el *grid* de los valores de *G* para la planta del espacio que muestra claramente estas dos áreas distintas en la audiencia. Tanto en este *grid* como en los siguientes, las áreas que permanecen en blanco, sin sombrear, corresponden a pasillos y zonas que no están destinadas a la ocupación de la audiencia.

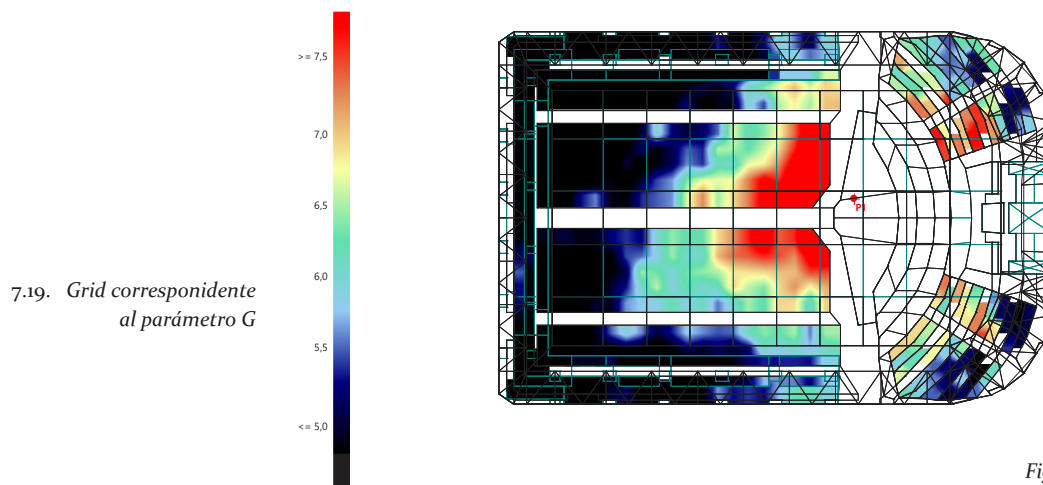


Figura 7.19

En la Figura 7.19 se observa que la región central, especialmente cerca del escenario, exhibe los valores más altos de sonoridad. Esto indica que las posiciones próximas al emisor reciben una mayor cantidad de energía sonora directa. Conforme nos desplazamos hacia el fondo de la audiencia, los valores disminuyen, aunque se mantienen bastante uniformes en las áreas centrales, lo que refleja una buena propagación del sonido en la sala. En las áreas laterales, el valor de *G* disminuye más rápidamente con la distancia en comparación con la zona central. Esto indica una peor acústica en los palcos laterales, incluso en aquellos cercanos al emisor debido posiblemente a una menor contribución del campo sonoro directo. Además, la experiencia se vería posiblemente afectada por una visión limitada del escenario.

Claridad musical *C80*

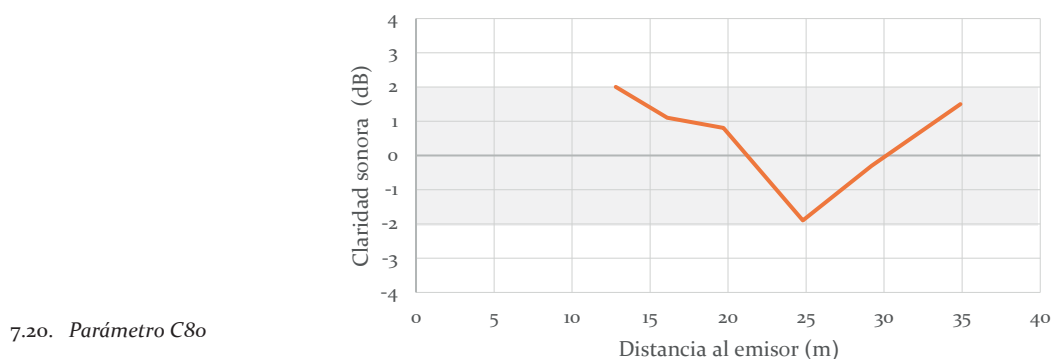


Figura 7.20

Tanto los valores numéricos, positivos y negativos, recogidos en la Tabla 6 como la representación de la Figura 7.20 muestran que este parámetro no es uniforme en la sala, aunque se mantiene siempre dentro de los valores recomendados.

Los valores positivos del parámetro C80, relacionado con la percepción subjetiva de la claridad musical, indicaría mayor claridad y predominio del sonido directo y las primeras reflexiones y valores negativos el predominio de las reflexiones tardías, y por tanto menor nitidez. Este comportamiento queda descrito gráficamente en el *grid* que se ha generado para este parámetro.

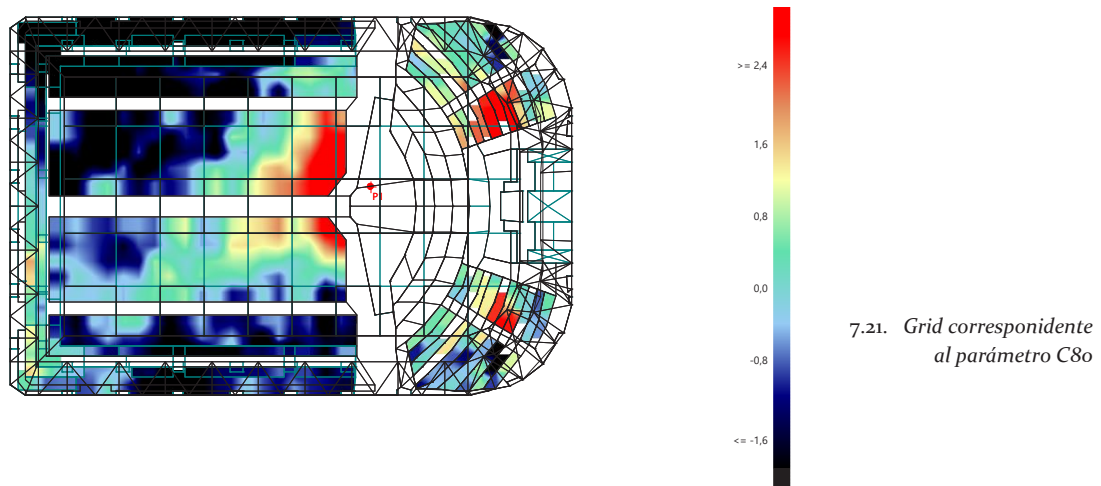
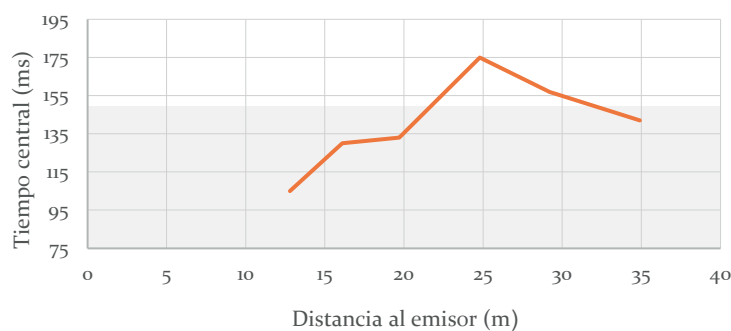


Figura 7.21

Tiempo central (T_s)



7.22. Parámetro T_s

Figura 7.22

El tiempo central muestra un comportamiento variable en el espacio. A una distancia de aproximadamente 25 metros del emisor, los valores superan los niveles recomendados, lo que indica una mayor persistencia del sonido y mayor reverberación puede afectar negativamente la claridad musical.

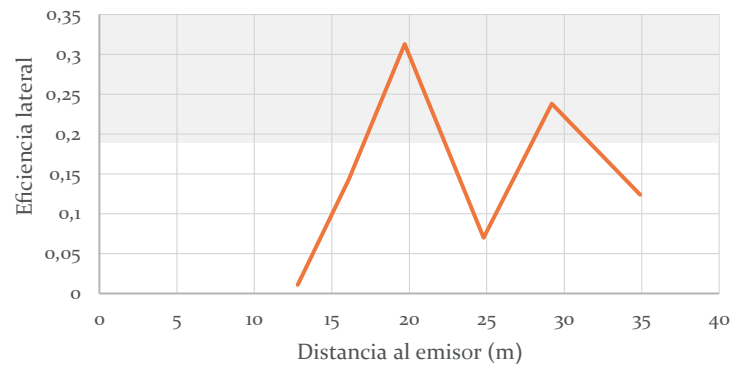
*Eficiencia lateral (LF)*7.23. *Parámetro LF*

Figura 7.23

En el caso de la eficiencia lateral, el comportamiento “oscilante” de este parámetro en función de la distancia indica que los valores se encuentran por debajo de los niveles recomendados en las áreas cercanas al emisor, donde predomina el sonido directo. Asimismo, en las zonas centrales de la sala, la contribución de las reflexiones laterales es menor en comparación con las áreas laterales y las cercanas al final de la sala.

Este comportamiento puede verificarse en el *grid*. En la zona de la audiencia, a partir de las primeras filas, los valores son bastante homogéneos salvo en ciertos puntos, con ciertas diferencias en los palcos. El palco ubicado al fondo de la sala muestra una buena presencia de reflexiones laterales, mientras que algunos de los palcos laterales presentan algunas deficiencias en este aspecto, que puede explicarse por la posición no centrada del emisor.

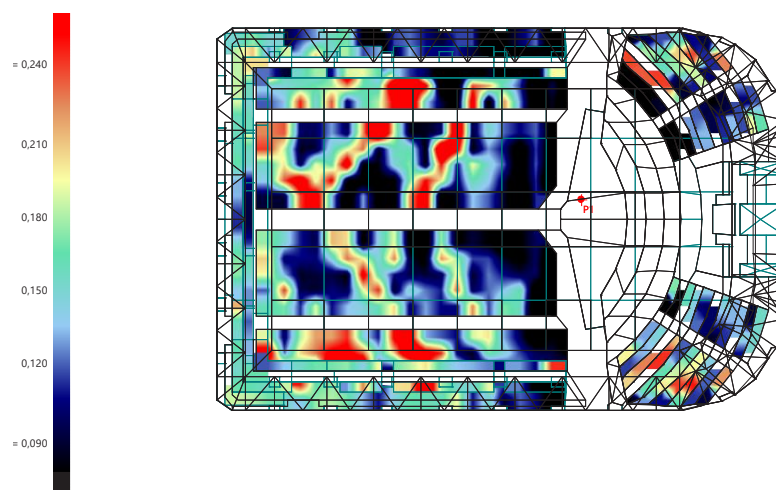
7.24. *Grid correspondiente al parámetro LF*

Figura 7.24

Grupo 2. Receptores R2, R7, R8, R6 y R5

El objetivo de los grupos 2 y 3 es investigar cómo la ubicación del oyente en relación con la pared afecta a los parámetros acústicos y a la percepción del sonido. Cada grupo está constituido por un conjunto de receptores organizados a lo largo de una línea situada distancia más o menos fija desde el emisor.

Los receptores del Grupo 2 se disponen como se muestra en la Figura 7.25 a distancias entre 19 y 24 metros del emisor. Los valores que se obtienen para los parámetros acústicos se presentan en la Tabla 7.

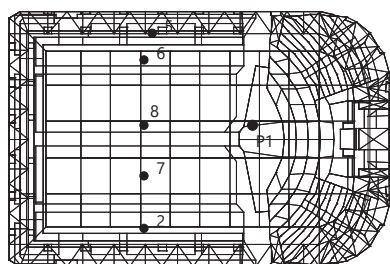


Figura 7.25

7.25. Receptores pertenecientes al Grupo 2

Parámetros	R2 (23,9m)	R7 (21,1m)	R8 (19,7m)	R6 (20,2m)	R5-palco (20,5m)
EDT(s)	2,55	2,30	2,29	2,72	2,74
T20(s)	2,41	2,53	2,52	2,49	2,54
G (dB)	4,8	6,6	7,1	4,3	4,2
C80 (dB)	-1,7	0,1	0,8	-3,0	-3,9
Ts (ms)	174	139	133	196	197
LF	0,19	0,09	0,31	0,14	0,09
BR	1,00	0,98	0,99	1,02	0,97
Br	0,92	0,92	0,92	0,93	0,90

7. Tabla de valores correspondiente al Grupo 2

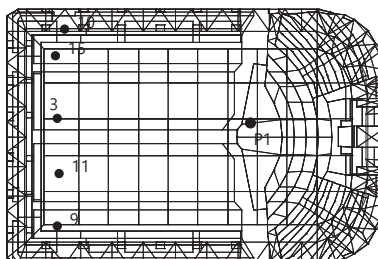
Tabla 7

El C80 presenta peores valores en los laterales. Esto indica un retraso en la llegada de la energía sonora a esos puntos por encima de los 80 ms. Esto se traduce en valor altos del Ts, Tiempo central, y en una reducción en la claridad.

En cuanto a la sonoridad (G), los valores son peores en las zonas más alejadas del centro, pero se mantienen positivos en todos los casos. A excepción del punto central, que supera los valores recomendados, los valores de sonoridad permanecen dentro de los rangos sugeridos.

Grupo 3. Receptores R9, R11, R3, R15 y R10 (en palco)

El tercer grupo de receptores se ubica paralelo al grupo 2, pero más cerca de la pared final, como se muestra en la figura 7.26. En la Tabla 8 se indican los valores obtenidos.



7.26. Receptores del Grupo 3

Figura 7.26

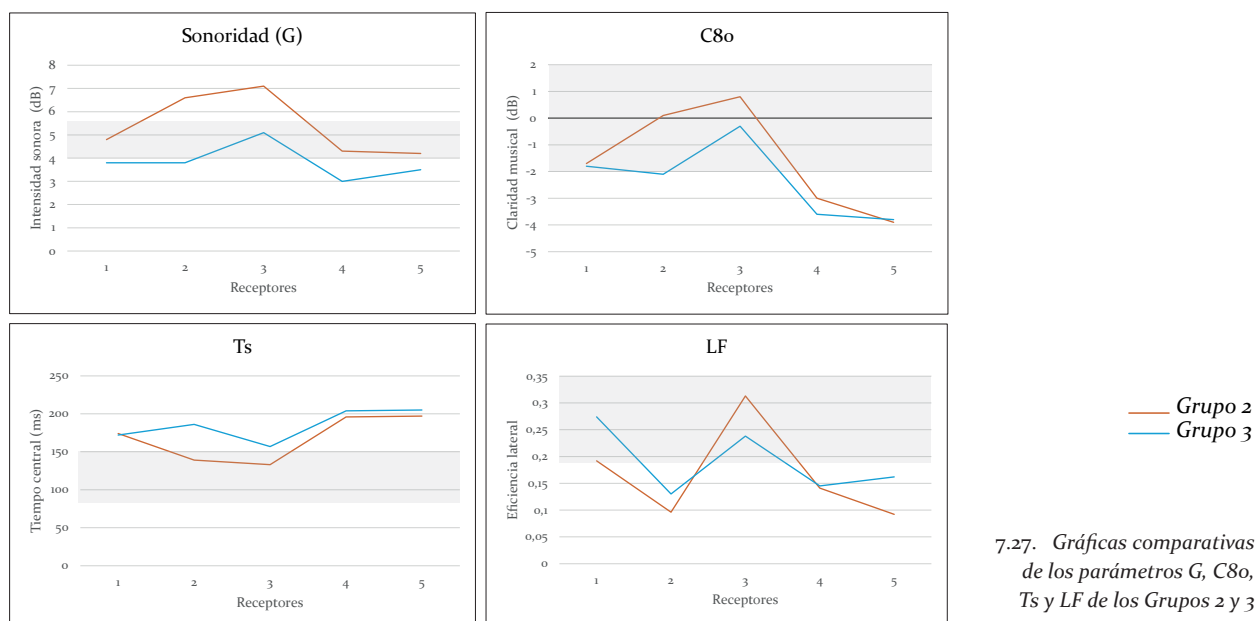
Parámetros	R9 (32,2m)	R11 (30,0m)	R3 (29,2m)	R15 (23,7m)	R10-palco (29,7m)
EDT(s)	2,52	2,57	2,40	2,70	2,85
T20(s)	2,44	2,55	2,49	2,34	2,39
G (dB)	3,8	3,8	5,1	3,0	3,5
C80 (dB)	-1,8	-2,1	-0,3	-3,6	-3,8
Ts (ms)	172	186	157	204	205
LF	0,27	0,13	0,24	0,14	0,16
BR	1,02	1,00	0,94	0,96	0,98
Br	0,93	0,92	0,91	0,92	0,92

8. Valores obtenidos
del Grupo 3

Tabla 8

El comportamiento es similar al del grupo 2, y parámetros como el EDT o el RT son muy parecidos. En algunas posiciones tanto los valores de Ts como del C80 no se encuentran dentro de los valores recomendados. Estos resultados implican un retraso de la energía sonora en estas ubicaciones, más reflexiones tardías y una menor definición y claridad musical.

Para comparar el Grupo 2 y el Grupo 3, se elaboran gráficas que, a diferencia de las anteriores, no están organizadas según la distancia al emisor. Cada gráfica representa un parámetro específico. En el eje horizontal se colocan los cinco receptores de cada grupo, ordenados de izquierda a derecha desde la perspectiva del emisor y asignándoles los números del 1 al 5. Los valores correspondientes al Grupo 2 se representan en color naranja, mientras que los del Grupo 3 se muestran en azul.



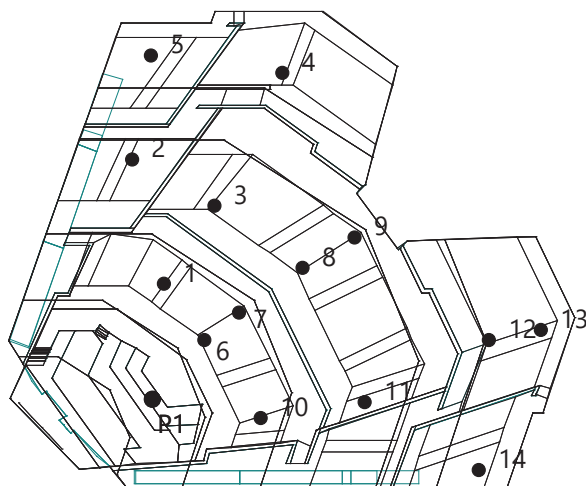
7.27. Gráficas comparativas de los parámetros G, C8o, Ts y LF de los Grupos 2 y 3

Figura 7.27

En resumen, los resultados de las simulaciones para obtener los parámetros acústicos en distintos puntos de la sala de Ámsterdam revelan que, si bien la viveza acústica de la sala es consistente en todas sus áreas, la percepción subjetiva del sonido varía según la ubicación del oyente. Tanto los valores de los parámetros acústicos, que se han comparado con los valores recomendados, como el gráfico tipo *grid* han mostrado que las zonas centrales y más cercanas al emisor ofrecen una mejor experiencia auditiva. En contraste, las áreas laterales y los palcos presentan valores de parámetros acústicos que se desvían de los rangos recomendados, lo que la empobrece calidad de la escucha en estas ubicaciones.

Caso 2. Gasteig, Múnich

Dada la forma de esta sala y para analizar cómo la posición de oyente afecta a la escucha se han escogido las posiciones de receptor que se indican en la figura 7.28.

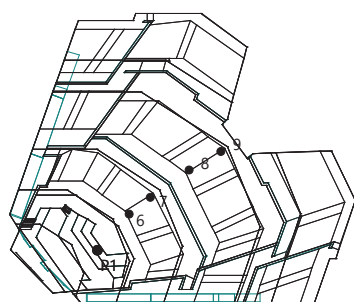


7.28. Receptores utilizados para la simulación del Caso 2

Figura 7.28

Grupo 1. Receptores R6, R7, R8 y R9

Este primer grupo está formado por de receptores que se alejan del emisor en línea recta hasta el final, lo que nos permitirá observar la variación de los parámetros en función de la distancia al foco sonoro.



7.29. Oyentes pertenecientes al Grupo 1

Figura 7.29

Se muestran gráficos que ilustran estos valores donde los receptores se colocan en el eje horizontal, organizados según su distancia al emisor. Los valores de los parámetros acústicos obtenidos se muestran en la Tabla 9

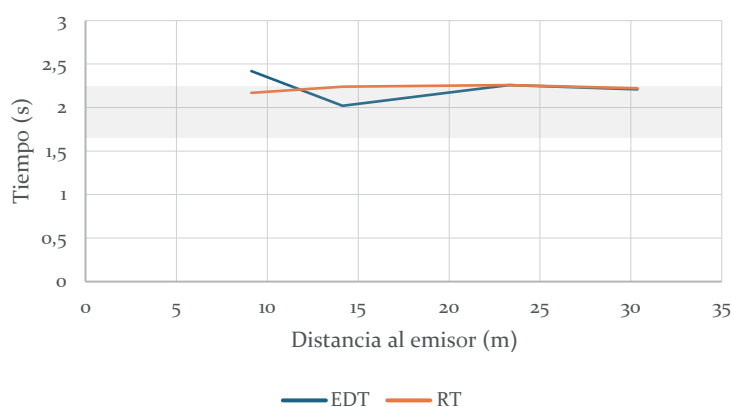
8. Valores de los parámetros acústicos obtenidos del Grupo 1

Parámetros	R6 (9,2m)	R7 (14,1m)	R8 (23,3m)	R9 (30,4m)
EDT(s)	2,42	2,02	2,26	2,21
T20 (s)	2,17	2,24	2,26	2,22
G (dB)	4,7	4,8	0,7	0,7
C80 (dB)	1,1	2,3	-3,4	-3,1
Ts (ms)	116	115	182	181
LF (ms)	0,02	0,13	0,11	0,22
BR	1,02	1,02	1,02	1,02
Br	0,98	0,96	0,96	0,96

Tabla 9

EDT y RT

Paralelamente al caso anterior, se calcula el tiempo de reverberación específico para el volumen de esta sala (29800 m³) mediante las fórmulas de Higini Arau y se obtiene un valor óptimo de tiempo de reverberación entre 1,67 y 2,35 segundos. Tras observar los valores calculados en la simulación y como podemos comprobar en la gráfica, el RT se ajusta de forma precisa a estos mínimo y máximos. El EDT y el RT tienden a ser más parecidos a medida que nos alejamos del emisor.

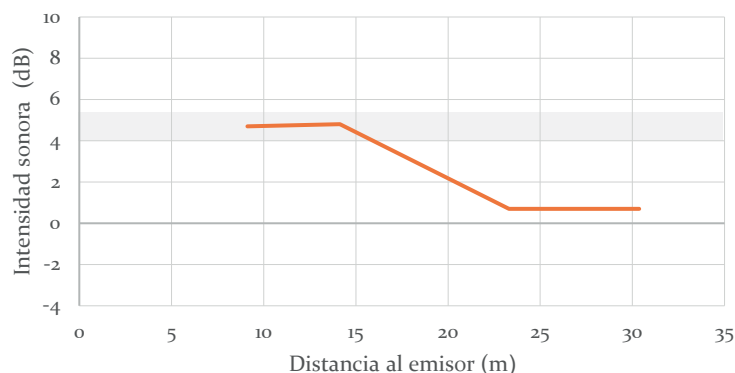


7.30. Parámetros EDT y RT

Figura 7.30

Sonoridad (G)

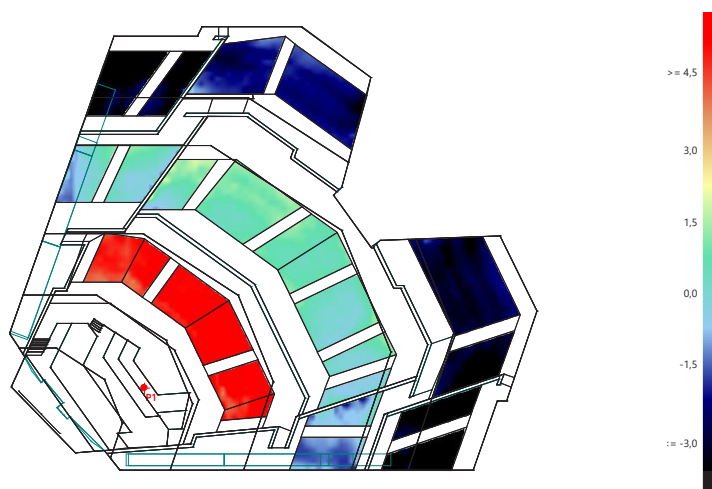
En la sonoridad hay un claro descenso de la a medida que nos alejamos del emisor, con un cambio muy brusco entre 15 y 25 metros, lo que indica que la sala está amplificando muy poco a partir de estas distancias.



7.31. Parámetro G

Figura 7.31

Este resultado indica que la sonoridad depende fundamentalmente de la distancia al emisor. Las reflexiones en las paredes y en los reflectores del techo parecen tener una influencia mínima. Es cierto que se percibe una ligera variación en las zonas de los balcones laterales más cercanas a las paredes, pero esta no resulta determinante. Este aspecto será analizado en otras ubicaciones.



7.32. Grid relativo al parámetro G

Figura 7.32

Claridad musical (C80)

El parámetro C80, al igual que la sonoridad, disminuye a medida que el receptor se aleja de la fuente sonora. Esto se traduce en que a partir de esta distancia al oyente le llegan principalmente reflexiones tardías y, por tanto, pérdida de nitidez musical.

Sin embargo, al analizar la Figura 7.34, se evidencia que en este caso la disminución no es tan uniforme y sí está influenciada por la proximidad a las paredes. Tanto en la parte delantera como en la central, los valores se encuentran en los límites de las recomendaciones, mientras que en los balcones y las zonas posteriores esta variación es mucho más marcada dependiendo de la ubicación.

7.33. Parámetro C80

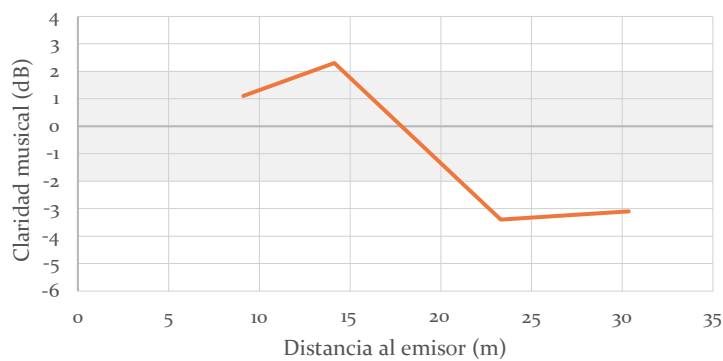


Figura 7.33

7.34. Grid relativo al parámetro C80

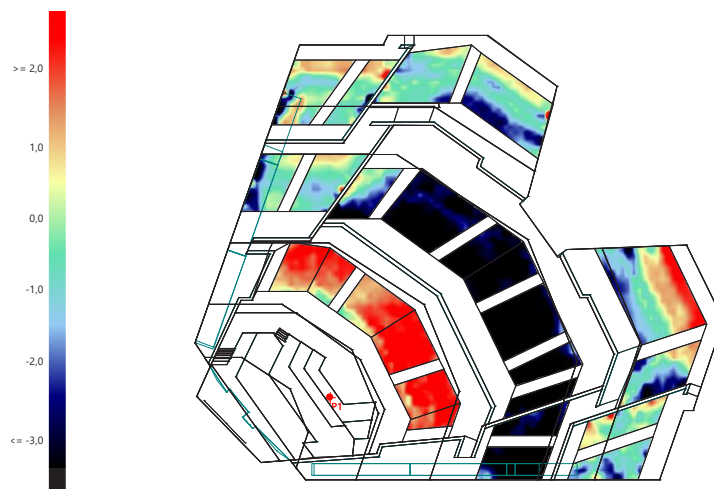


Figura 7.34

Tiempo central (T_s)

En el caso del tiempo central, a medida que nos alejamos del emisor, este valor aumenta. A partir de 15 metros el T_s se incrementa considerablemente lo que indica que la energía acústica tarda en llegar al oyente y una reducción del parámetro C80.

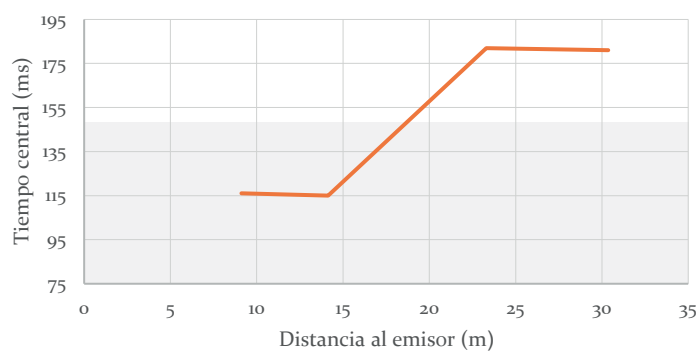
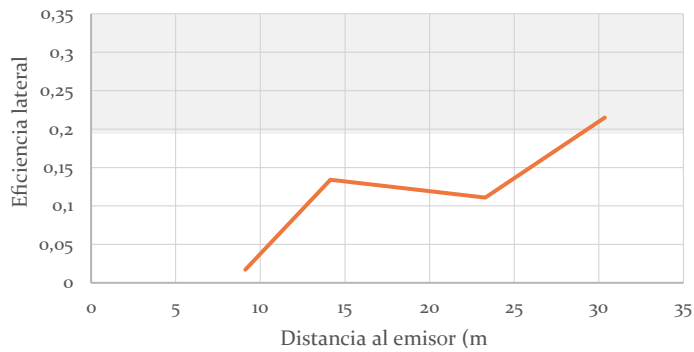
7.35. Parámetro T_s 

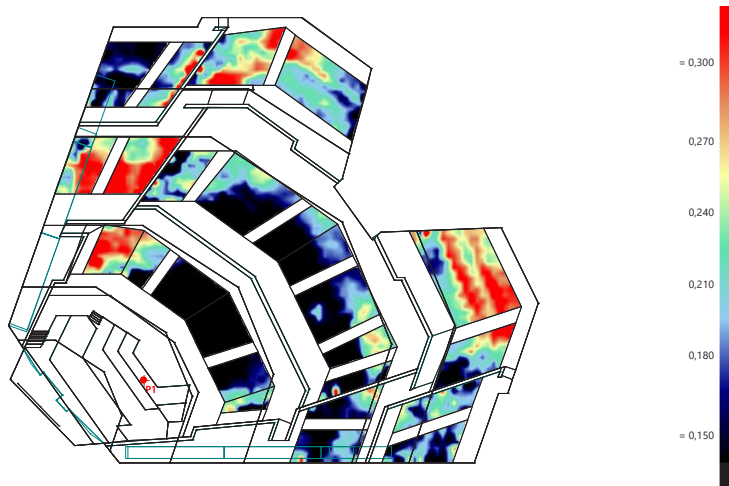
Figura 7.35

Eficiencia lateral (LF)

7.36. Parámetro LF

Figura 7.36

Tanto la gráfica de la Figura 7.36 como el *grid* que se presentan a continuación muestran que este parámetro no es uniforme debido a la geometría de la sala. En la gráfica, los receptores situados en la zona central permanecen constantes, ya que están ubicados en áreas alejadas de las paredes, pero a medida que nos acercamos a ellas, el valor aumenta. La representación de LF en función de la distancia al emisor y el *grid* indican valores de LF por debajo de los recomendados y, por tanto, ausencia de reflexiones laterales en la zona central lo que afecta a la percepción espacial de la música. La eficiencia lateral se aproxima a los valores recomendados solo para los receptores más alejados del emisor debido a la cercanía de las superficies posteriores.



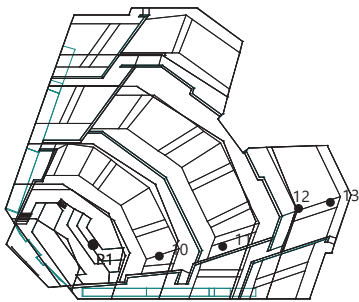
7.37. Grid relativo al parámetro LF

Figura 7.37

La representación *grid* confirma ese resultado mostrando una zona central con poca contribución de reflexiones laterales y mayor en las zonas del espacio más próximas a las superficies.

Grupo 2. Receptores R10, R11, R12, R13

Debido a la geometría del espacio, se hacen dos grupos más de receptores. Este grupo presenta una idea similar a la del Grupo 1, con unos receptores que se alejan de forma lineal. Dadas las dimensiones que tiene el recinto, con este grupo se pretende evaluar el efecto de la distancia en uno de los laterales del recinto. Al tratarse de receptores que se alejan del emisor en línea, se vuelven a representar las gráficas con el eje horizontal en función de la distancia entre emisor y receptor.



7.38. Receptores pertenecientes al Grupo 2

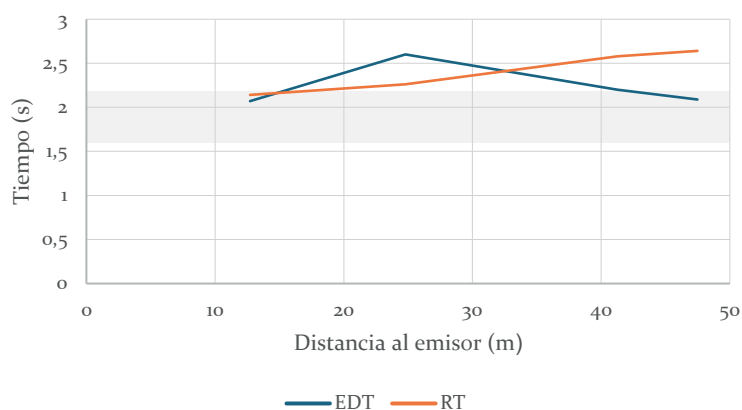
Figura 7.38

En la tabla se indican los valores obtenidos.

Parámetros	R10 (12,7m)	R11 (24,8m)	R12 (41,3m)	R13 (47,5m)
EDT(s)	2,07	2,60	2,20	2,09
T20 (s)	2,14	2,26	2,58	2,64
G (dB)	4,9	-0,8	-2,7	-2,4
C8o (dB)	2,3	-4,7	-1,3	2,5
Ts (ms)	110	216	152	111
LF	0,22	0,12	0,19	0,29
BR	1,03	0,98	0,97	0,95
Br	0,97	0,97	0,95	0,96

10. Valores obtenidos para los oyentes del Grupo 2

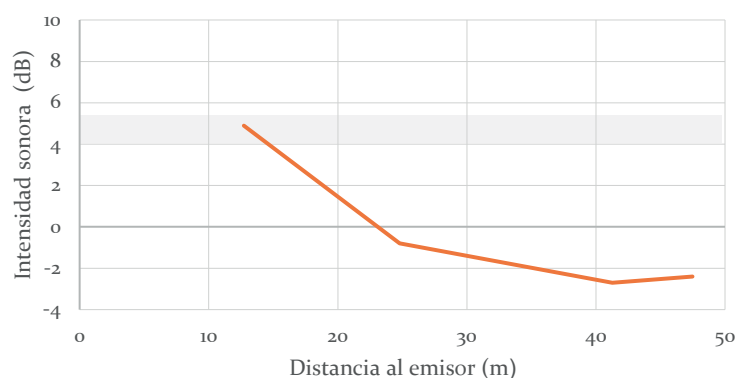
Tabla 10

EDT y RT

7.39. Parámetros EDT y RT

Figura 7.39

El EDT y el tiempo de reverberación presentan más diferencias entre ellos que en el Grupo 1, y esta diferencia aumenta a medida que nos alejamos del emisor, apuntando a una propagación menos uniforme del sonido en esta parte de la sala.

Sonoridad (G)

7.40. Parámetro G

Figura 7.40

Al igual que en el grupo de receptores del grupo 1, la sonoridad disminuye progresivamente conforme nos alejamos del emisor. No obstante, en este caso se observa que en los receptores situados más al fondo la sonoridad tiende a incrementarse ligeramente. Los valores negativos reflejan que en estos puntos la energía sonora es muy reducida. Esto se debe, por un lado, a la distancia y ubicación, que limitan la llegada de sonido directo, y, por otro, a la escasez de reflexiones, salvo en los dos últimos puntos donde las paredes laterales finales del espacio contribuyen a incrementar las reflexiones.

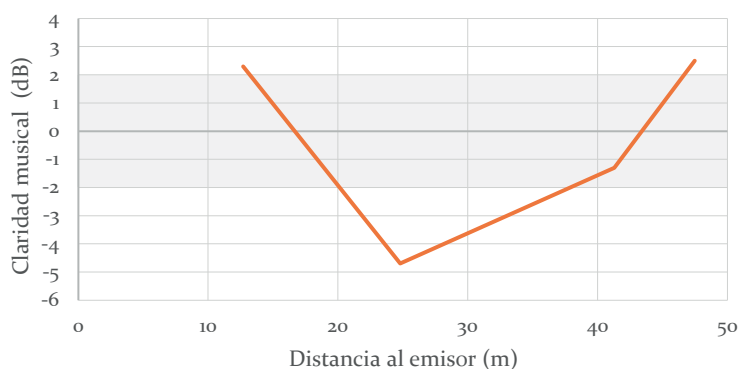
*Claridad musical (C8o)*7.41. *Parámetro C8o*

Figura 7.41

El patrón de variación de este parámetro es distinto al del Grupo 1. Hay un decaimiento al alejarse del emisor con valores fuera del rango recomendado e indicando una disminución de la claridad musical. La presencia de las paredes laterales, y posiblemente los reflectores del techo, favorecen la llegada de reflexiones a los dos últimos receptores aumentando el valor del C8o y mejorando levemente a pesar de la distancia la percepción sonora.

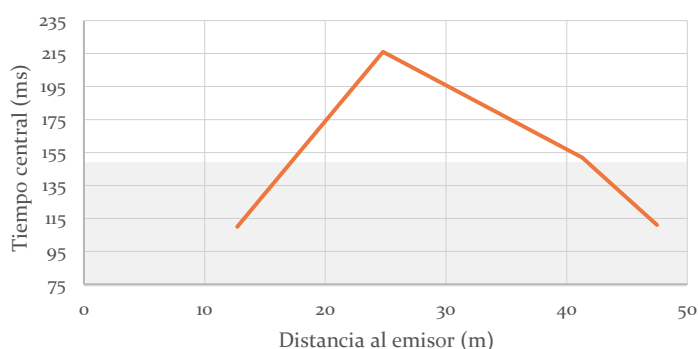
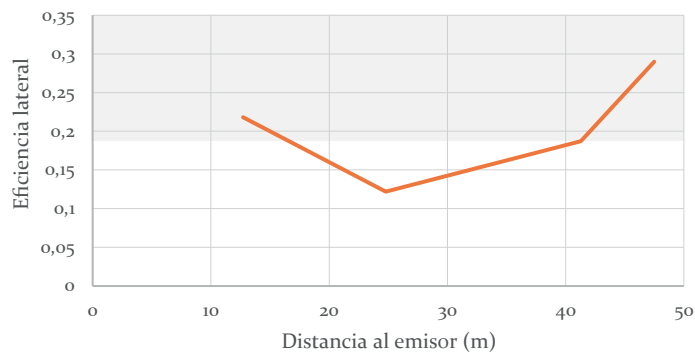
*Tiempo central (Ts)*7.41. *Parámetro Ts*

Figura 7.42

La gráfica muestra que el Tiempo central (Ts) pasa por valores mayores y menores que los recomendados indicando variaciones en las características acústicas del espacio a medida que nos alejamos del emisor. En las posiciones más cercanas predomina el sonido directo. En las intermedias, los valores altos de Tiempo central indican una mayor presencia de reflexiones tardías, y en las dos posiciones finales la disminución de Ts indica una mayor presencia de primeras reflexiones. En general, este comportamiento apunta a una distribución no uniforme del sonido con zonas donde se concentran las reflexiones más que en otras relacionado con la forma del espacio y posiblemente la disposición de los reflectores.

Eficiencia lateral (LF)

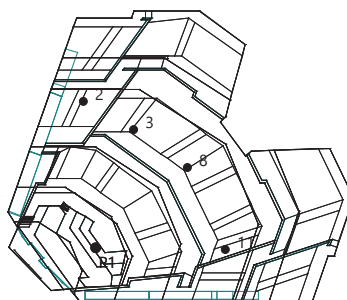
7.41. Parámetro LF

Figura 7.43

A medida que aumenta la distancia hay variaciones en los valores de LF, apuntando de nuevo a diferencias en la percepción sonora del oyente según su posición. Hay una disminución inicial, un ligero incremento posterior y un aumento más pronunciado hacia el final, debido a la geometría del espacio.

Grupo 3. Receptores R₂, R₃, R₈, R₁₁

Estos receptores están ubicados en la parte central del escenario, a distancias similares del emisor y por encima de los 20 metros según lo ilustrado en la Figura 7.44. Los valores obtenidos para los parámetros acústicos se detallan en la Tabla 12.



7.44. Receptores del Grupo 3

Figura 7.44

	R₂ (28,28m)	R₃ (23,7m)	R₈ (23,3m)	R₁₁ (24,79m)
EDT(s)	2,46	2,27	2,26	2,6
T ₂₀ (s)	2,20	2,20	2,26	2,26
G (dB)	0,0	0,8	0,7	-0,8
C ₈₀ (dB)	-0,7	-3,0	-3,4	-4,7
T _s (ms)	157	183	182	216
LF	0,33	0,17	0,11	0,12
BR	1,05	1,03	1,02	0,98
Br	1,00	0,97	0,96	0,97

11. Valores obtenidos para los receptores del Grupo 3

Tabla 11

El EDT y el RT presentan valores muy similares en todos los puntos. Sin embargo, aunque las distancias al emisor son similares, el resto de los parámetros varían considerablemente. El C₈₀ nunca alcanza valores positivos, y existe una gran diferencia entre el R₂, ubicado en un extremo, y el R₁₁, situado en el lado opuesto. Esta diferencia puede ser debida a la forma en la que se ubican los reflectores en el techo ya que la forma del espacio es simétrica respecto al escenario.

Los valores, en la mayoría de los casos, están fuera de los valores recomendados. Al estudiar el efecto de la distancia al emisor ya se había comprobado que a partir de esta cierta distancia la calidad acústica de la sala se reducía considerablemente.

Comparación

En el Concertgebouw de Ámsterdam, la sala de planta rectangular representa el modelo de diseño acústico más convencional, caracterizado por una notable homogeneidad en sus parámetros físicos fundamentales. Los valores de los parámetros acústicos son uniformes y se mantienen cerca o dentro de los rangos recomendados. El Tiempo de Reverberación (RT) y el *Early Decay Time* (EDT) muestran una consistencia relativa en casi toda la sala, resultando en una distribución sonora uniforme. No obstante, la experiencia auditiva subjetiva presenta ciertos matices. Los parámetros de percepción subjetiva, como la Claridad (C80) y la Fracción de Energía Lateral (LF), experimentan variaciones en algunos casos significativas según la ubicación del oyente. La zona más próxima al escenario, dentro de los primeros 20 metros, ofrece una calidad sonora óptima, con una excelente definición musical. En contraste, las zonas más alejadas muestran una degradación gradual de la percepción sonora, y los palcos laterales son los espacios acústicamente más comprometidos, donde la geometría y la distancia generan condiciones de escucha menos favorables.

La sala Gasteig, de planta en abanico y concebida para albergar a un mayor volumen de público, presenta un comportamiento acústico más complejo. Su diseño arquitectónico, que incluye reflectores en el techo y una geometría expansiva, no consigue reducir la variabilidad acústica dependiendo de la posición del oyente. La zona central parece configurarse como el área en la que la disposición de los reflectores y la forma arquitectónica garantizan una experiencia auditiva satisfactoria. Sin embargo, la calidad de la escucha disminuye considerablemente más allá de los 20 metros. Además, se detecta una importante variabilidad en los parámetros acústicos según la ubicación del oyente, lo que sugiere que la calidad acústica varía notablemente, creando zonas de escucha distintas y dificultando la uniformidad de la experiencia auditiva en el recinto. Debido a las grandes dimensiones del recinto, la presencia de pasillos, necesarios para la circulación del público, no favorece la acústica, sino que introduce discontinuidades adicionales en el campo acústico. Este problema se contrasta con el diseño del Concertgebouw, donde toda la audiencia, excepto los palcos laterales, se encuentra en un único nivel, lo que reduce la necesidad de pasillos y favorece una distribución acústica más homogénea.

Auralizaciones

Para cerrar este capítulo, se presentan las auralizaciones realizadas en ambas salas. Una auralización consiste en la generación de un archivo de audio de cómo sonaría ese espacio en una posición específica del oyente. En la generación de una auralización se parte de una grabación anecoica, sin reverberación, y la simulación incorpora a esta señal las características acústicas del espacio modelado.

Se realiza una auralización binaural, es decir, se crean dos señales separadas, una para cada oído, que permiten simular la experiencia de cómo se escucharía el sonido en una posición específica dentro del espacio. Para ello, se seleccionan dos posiciones de oyente dentro de los modelos de cada una de las salas de concierto. Las posiciones se han elegido tras el análisis de los parámetros acústicos. Seleccionadas las dos posiciones de oyente para cada espacio se genera la auralización, que ofrece la experiencia auditiva de como varía la percepción del sonido en el espacio en función de la posición que ocupa el oyente¹⁶.

Caso 1. Concertgebouw, Ámsterdam

Las posiciones de oyente seleccionadas para el Concertgebouw son R13 y R10 (situado en palco) indicadas en las Figura 7.45. Las auralizaciones se pueden escuchar en los archivos que se descargan de los QR de las Figuras 7.46 y 7.47.

7.45. Receptores empleados en la auralización



Figura 7.46. Auralización R10



Figura 7.47. Auralización R13

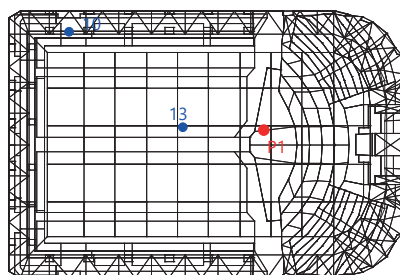


Figura 7.45

En el receptor R13, se logra una auralización nítida y clara gracias a la proximidad con el emisor. El elevado valor de C80 obtenido previamente indica la predominancia de la energía sonora directa que alcanza al oyente, lo que convierte esta posición en una óptima para la escucha. En contraste, al evaluar la posición del receptor R10, situado en una esquina, se percibe una mayor reverberación. Esto ocurre porque las reflexiones tardan más en llegar a esta área y tienden a atenuarse más lentamente. La configuración en forma de “L” de las paredes de la esquina propicia la persistencia de las reflexiones al rebotar entre ambas superficies.

Por lo tanto, aunque las condiciones en R10 son menos favorables en comparación con las de R13, la calidad de escucha sigue siendo aceptable a pesar de haber ciertas diferencias.

16. En caso de no ser posible acceder mediante los códigos QR, los archivos están disponibles en el siguiente enlace:

<https://n9.cl/sos6q>

Caso 2. Gasteig, Múnich

En el Gasteig se seleccionan las posiciones R6 y R12, como se muestra en la Figura 7.48. Las simulaciones se pueden escuchar en los archivos que muestran los QR de las figuras 7.49 y 7.50.

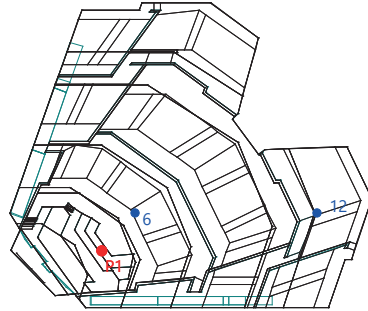


Figura 7.48

La posición del oyente 6 presenta las mejores características acústicas dentro del espacio. Es la ubicación con mayor claridad auditiva, donde los valores de G (sonoridad) y C80 (claridad) se equilibran. En este punto, el valor de G es elevado, lo que indica una amplificación del sonido, mientras que el C80 se mantiene dentro de los rangos recomendados. En cambio, en el oyente R12 tanto el valor de G como el C80 son negativos. Esto se traduce, como se puede escuchar, en una percepción sonora menos definida y con menor presencia de energía directa. Además, al estar situado próximo a las paredes, se percibe mayor reverberación, producto de las reflexiones tardías en esta ubicación. A pesar de tener unas condiciones desfavorables y no ser una escucha óptima, la cercanía con los reflectores ubicados en el techo contribuye a una experiencia auditiva aceptable, pero bastante diferente a aquella que percibe el oyente 6, donde la nitidez y el equilibrio predominan.

Comparación

Los casos del Concertgebouw en Ámsterdam y el Gasteig en Múnich presentan diferencias significativas en cuanto a las características acústicas generales y la influencia de la arquitectura en la percepción sonora. En el Concertgebouw, la acústica se caracteriza por una percepción relativamente uniforme entre las posiciones favorables y desfavorables, aunque no idéntica, lo que refleja una distribución más equilibrada de la energía sonora en el espacio.

En el Gasteig, por el contrario, las diferencias entre las posiciones analizadas son más evidentes. Los valores de los parámetros acústicos y la calidad de la escucha varían significativamente según la ubicación del receptor. Aunque la incorporación de reflectores en el techo tiene como objetivo mejorar la calidad auditiva en las zonas menos favorables, no llega a corregir las disparidades. Sin embargo, en las posiciones óptimas se alcanza un equilibrio excelente entre claridad y sonoridad, lo que evidencia un diseño acústico altamente efectivo en estas zonas.



Figura 7.49. Auralización R6



Figura 7.50. Auralización R12

En resumen, mientras que el Concertgebouw muestra una mayor homogeneidad acústica entre distintas ubicaciones, el Gasteig presenta diferencias más pronunciadas en la percepción sonora, aunque con una calidad sonora excelente en las zonas favorables.

[7.3]

Geometría y materiales. Simulación de rayos

Como se ha demostrado anteriormente, la geometría tiene un impacto fundamental en las propiedades acústicas de un auditorio, ya que define cómo se distribuyen y perciben las ondas sonoras en el espacio. El aspecto clave es el comportamiento de las reflexiones sonoras. Las primeras reflexiones contribuyen a la claridad del sonido, mientras que reflexiones tardías pueden generar efectos no deseados como ecos. Además, es esencial garantizar que el sonido se distribuya de manera uniforme en todo el recinto.

Para analizar estas reflexiones, se estudiarán ambos auditorios considerando tres emisores colocados estratégicamente en diferentes posiciones del escenario. Adicionalmente, se examinarán las reflexiones por una superficie dispuesta en el escenario, una pared lateral y el techo, para observar cómo interactúan las ondas sonoras con estas superficies. En el caso del auditorio Gasteig, la sala incluye reflectores laterales diseñados para dirigir el sonido hacia las zonas más alejadas. Por ello, además de analizar el techo, el escenario y la pared lateral, se estudiará de manera específica uno de estos reflectores rectangulares.

Para realizar esto, el software nos permite seleccionar tanto la posición del emisor como las superficies que queremos analizar. Una vez configuradas las superficies, el visor del programa permite observar las reflexiones generadas, ya sea de forma individual para cada superficie o en conjunto.

Para llevar a cabo este análisis, se utilizarán las herramientas "*Define Reflector Surface*" y "*3D Reflector Coverage*". La primera de ellas nos permitirá seleccionar una o varias superficies para su análisis. La herramienta Define Reflector Surface ofrece la opción de escoger, entre todas las superficies del modelo, aquellas que deseamos analizar.

Define Reflectors

Room surfaces			
Number	Description	Layer	Area < m² >
2	1F seat 1	Default_Layer	3.72
3	1F seat 2	Default_Layer	4.79
4	1F seat 3	Default_Layer	10.20
5	1F seat 4	Default_Layer	10.20
6	1F seat 5	Default_Layer	150.64
7	1F seat 6	Default_Layer	76.16
8	1F seat 7	Default_Layer	76.16
9	1F stage 6	Default_Layer	14.89
10	1F stage 6	Default_Layer	1.28
11	1F stage 6	Default_Layer	1.28
12	1F stage 7	Default_Layer	1.25
13	1F stage 7	Default_Layer	1.25
14	1F stage 8	Default_Layer	11.42
15	1F stage 8	Default_Layer	11.42

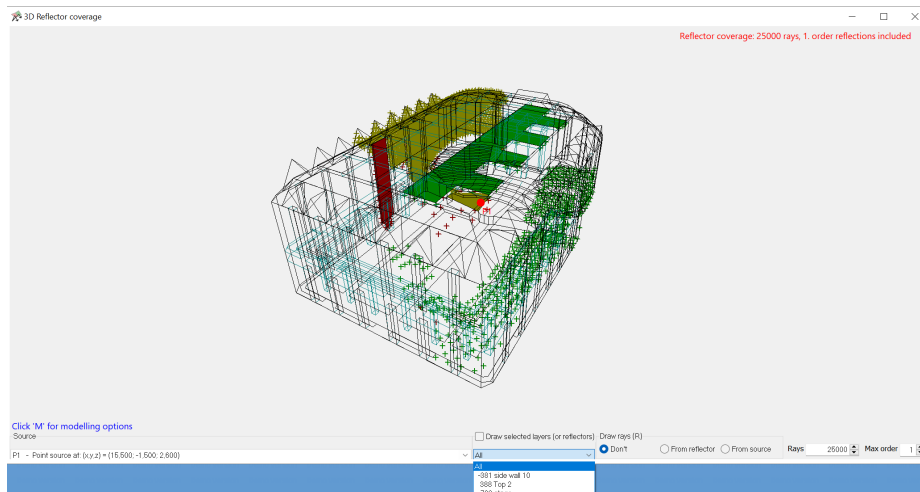
Selected surfaces			
Number	Description	Layer	Area < m² >
381	stage 10	Default_Layer	44.80
388	Top 2	Default_Layer	179.60
702	stage	Default_Layer	16.97

7.51. Herramienta Define Reflector Surface

Figura 7.51

Como se muestra en la figura 7.51, en la columna izquierda aparecen todas las superficies del modelo, mientras que en la columna derecha se encuentran las superficies seleccionadas. En la columna izquierda, se muestra el nombre de cada superficie (si tiene uno asignado) y el área correspondiente.

Tras seleccionar las superficies, en "*3D Reflector Coverage*" podremos observar cómo los rayos de sonido inciden en cada una de las superficies elegidas, tanto de manera individual como conjunta y cómo son reflejadas por ellas, siendo éste el objetivo de la simulación.



7.52. Herramienta *3D Reflector Coverage*

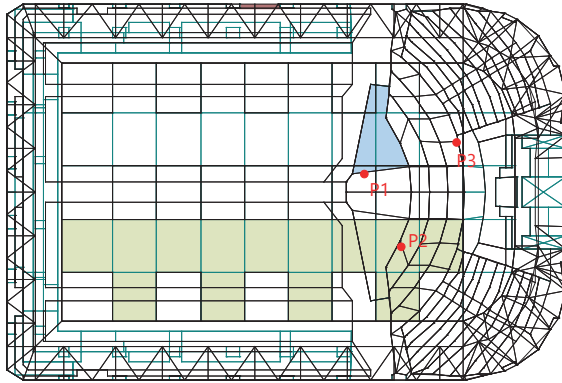
Figura 7.52

Se especifican el número de rayos utilizados para el análisis y otras opciones configurables, como el origen de los rayos y el orden de las reflexiones, que se pueden personalizar según las necesidades. Además, se destacan mediante sombreado las superficies sobre las que se llevará a cabo la simulación, que considera la forma y los materiales de la sala.

Caso 1. Concertgebouw, Ámsterdam

Los emisores se ubican estratégicamente de la siguiente manera: en el centro del escenario (emisor nº1), en un lateral (emisor nº2) y en el lado opuesto a una altura mayor (emisor nº3).

Las superficies a estudiar incluyen una sección de 16,97 m² correspondiente a la parte inferior del escenario, una franja longitudinal del techo que abarca 179,60 m² y una pared lateral de 44,80 m².



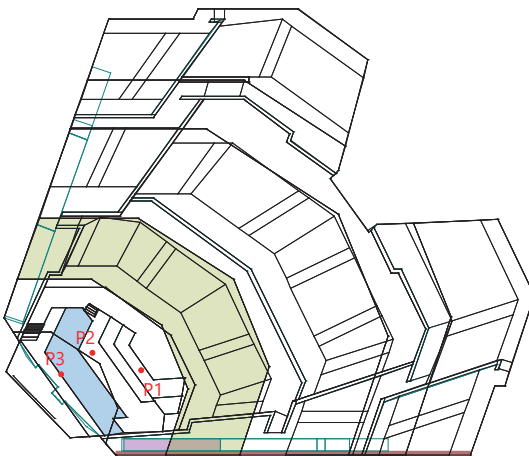
7.53. Emisores y superficies utilizados para la simulación del Caso 1

Figura 7.53

Caso 2. Gasteig, Múnich

Los emisores se ubican en distintas alturas dentro del escenario para analizar el comportamiento de las reflexiones. El emisor nº1 se coloca en el centro del escalón más bajo del escenario, el emisor nº2 se sitúa en un extremo del escalón superior, y el emisor nº3 se posiciona en la parte más alta del escenario.

En este caso las superficies a analizar son 60,55 m² del escenario, una banda central del techo de 391,11 m² y 460 m² de una pared lateral.

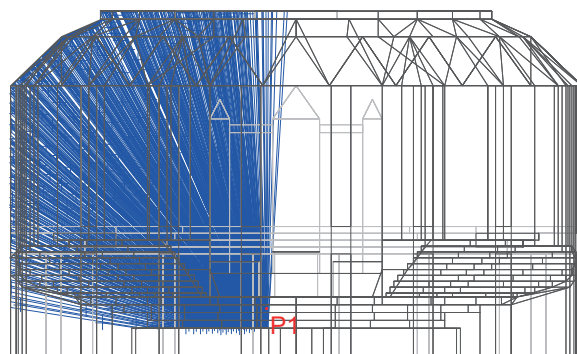
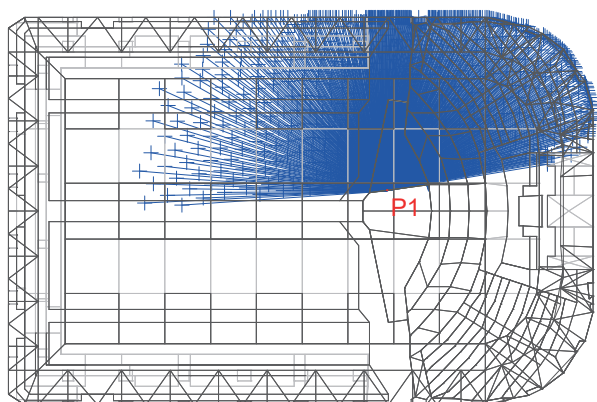


7.54. Emisores y superficies utilizados para la simulación del Caso 2

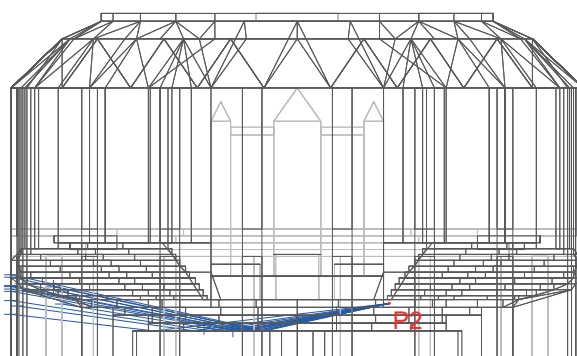
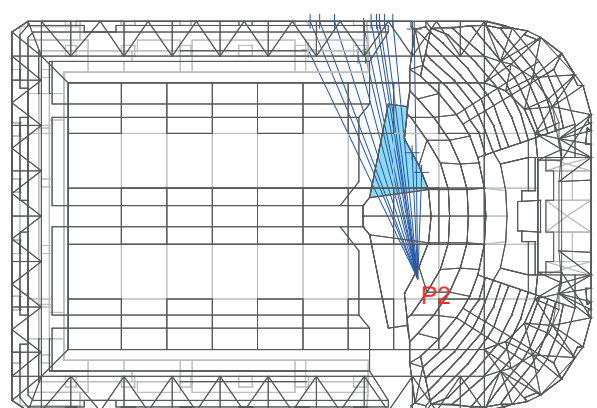
Figura 7.54

CONCERTGEBOUW, Ámsterdam

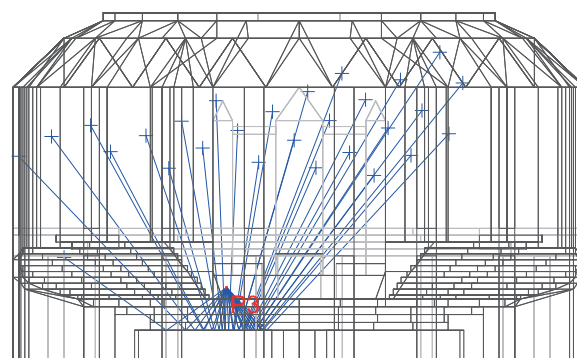
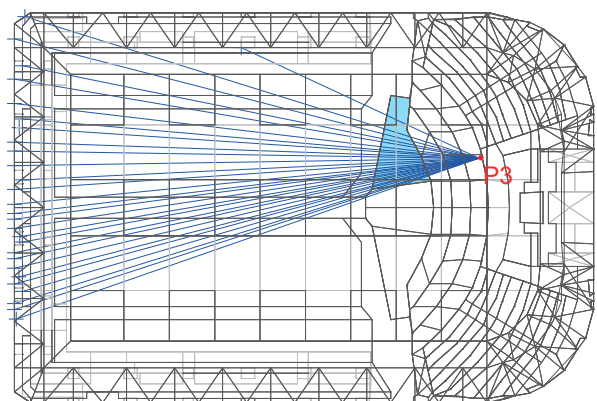
REFLEXIONES EN UN ÁREA DEL ESCENARIO



Emisor 1



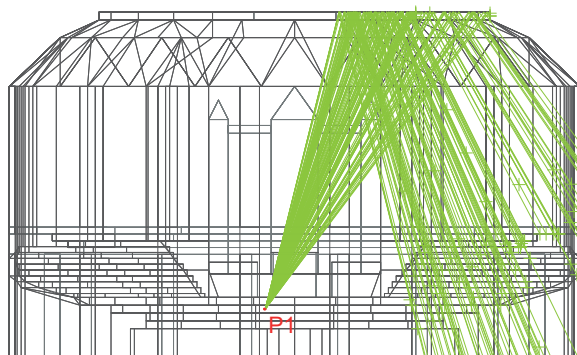
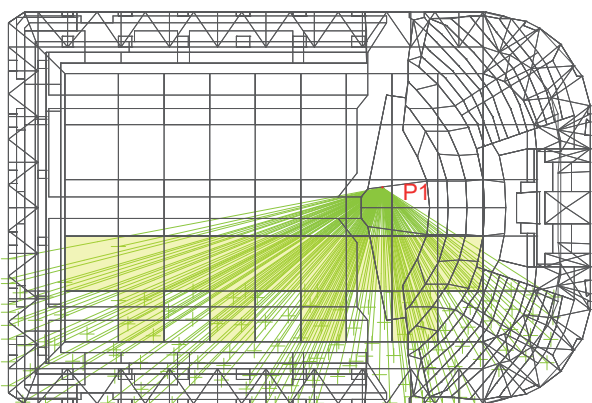
Emisor 2



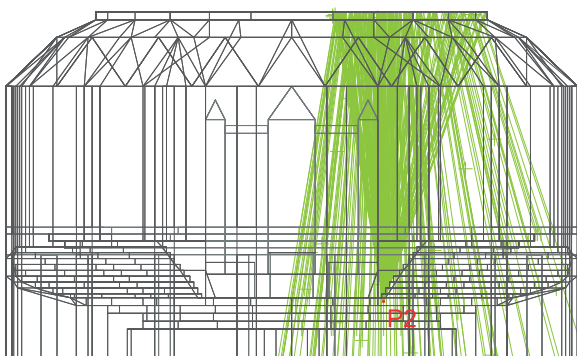
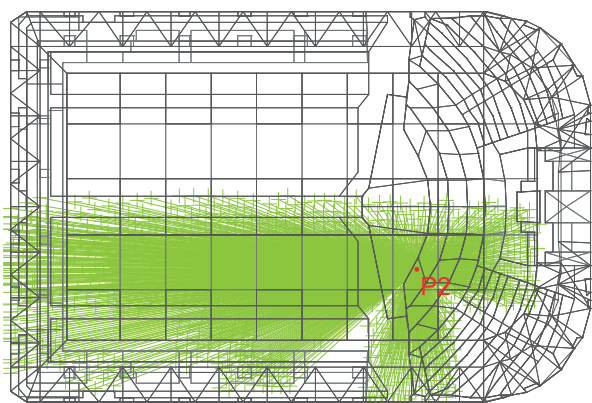
Emisor 3

CONCERTGEBOUW, Ámsterdam

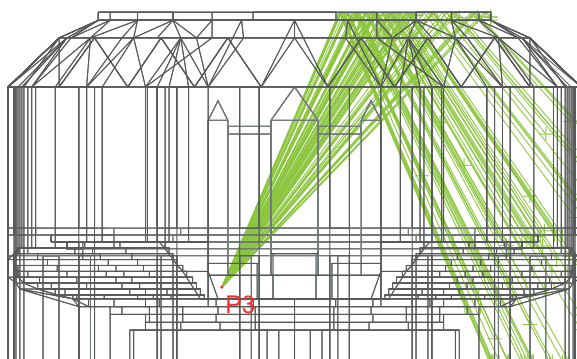
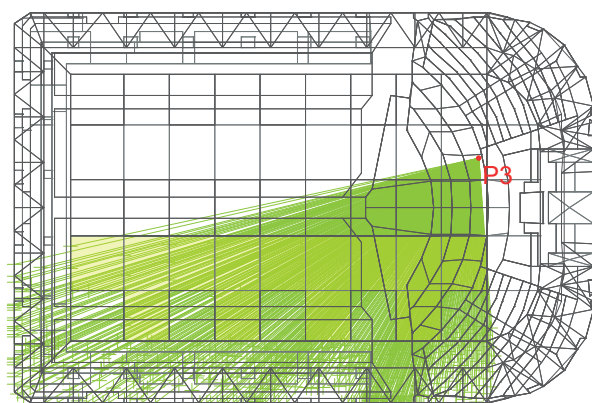
REFLEXIONES EN UN ÁREA DEL TECHO



Emisor 1



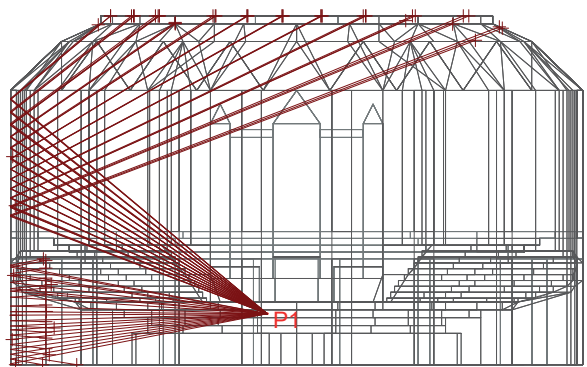
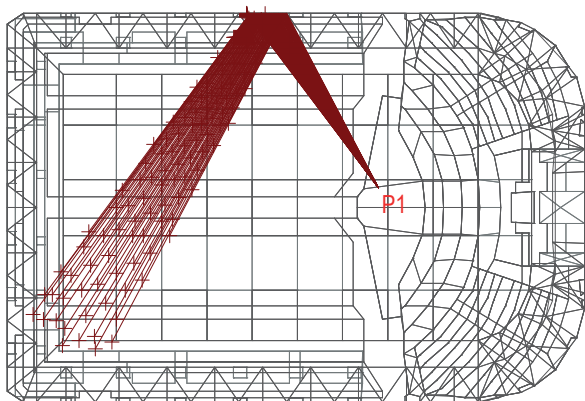
Emisor 2



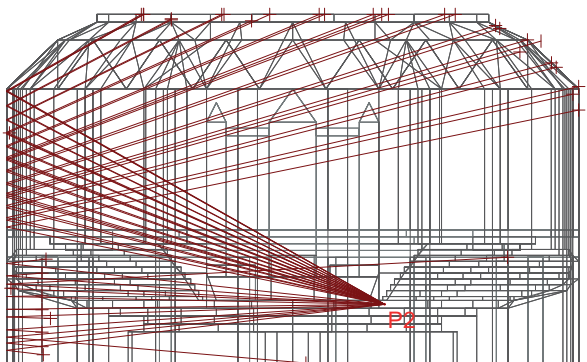
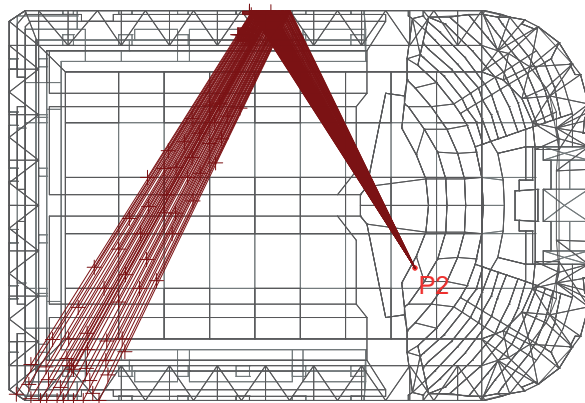
Emisor 3

CONCERTGEBOUW, Ámsterdam

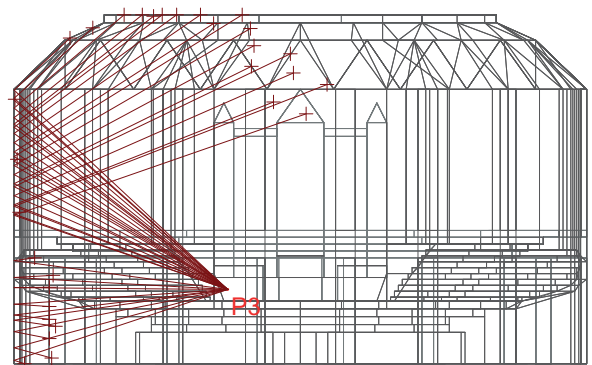
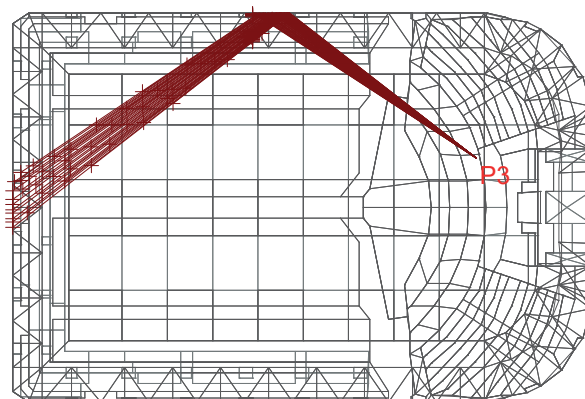
REFLEXIONES EN UN ÁREA DE LA PARED LATERAL



Emisor 1



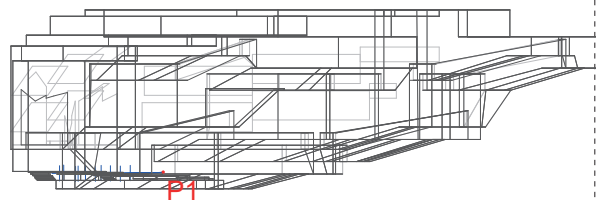
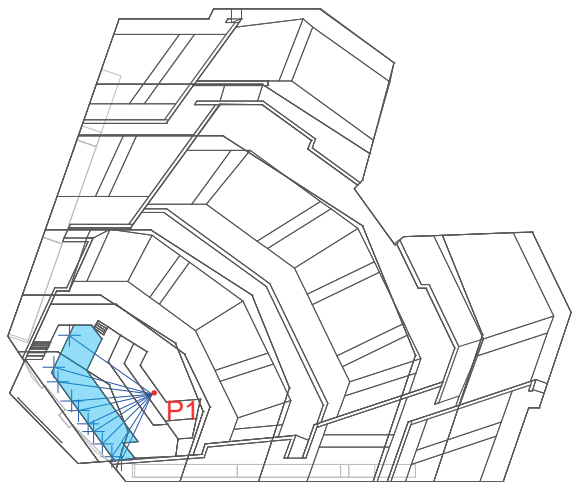
Emisor 2



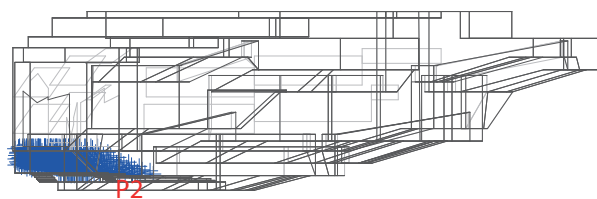
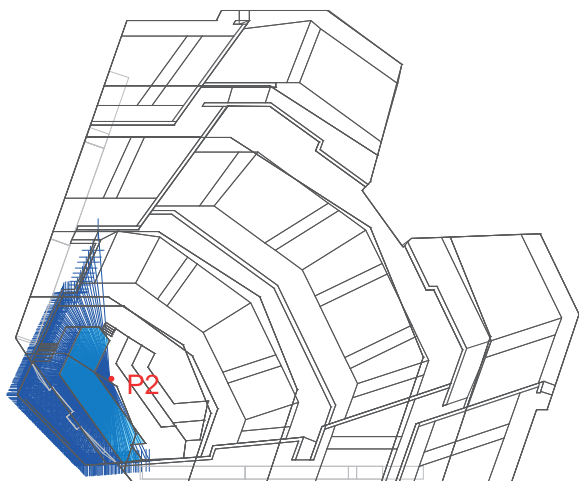
Emisor 3

GASTEIG, Múnich

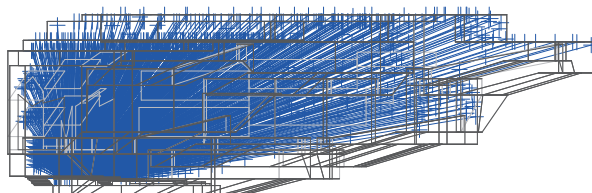
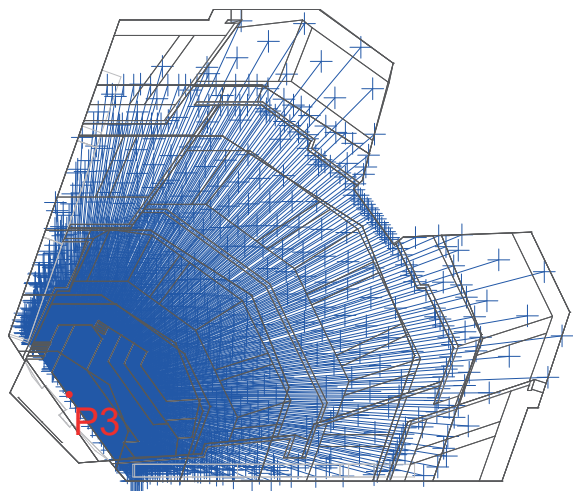
REFLEXIONES EN UN ÁREA DEL ESCENARIO



Emisor 1



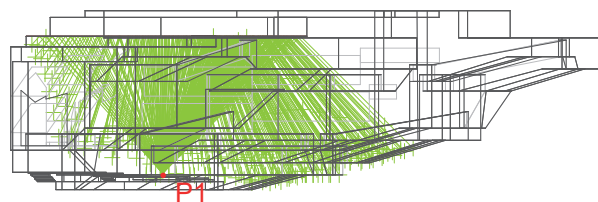
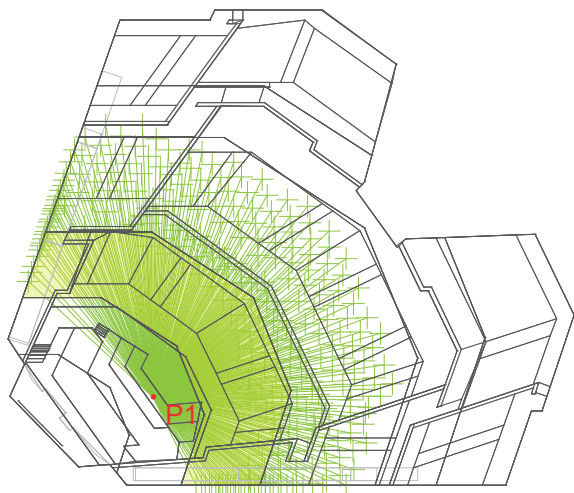
Emisor 2



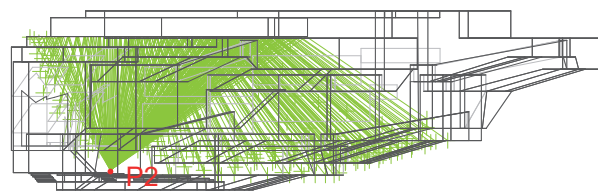
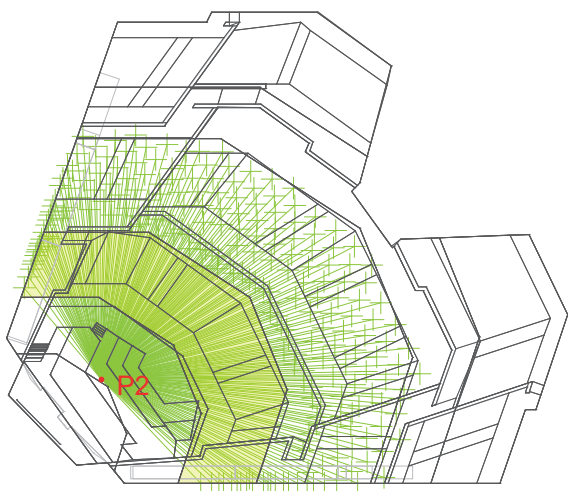
Emisor 3

GASTEIG, Munich

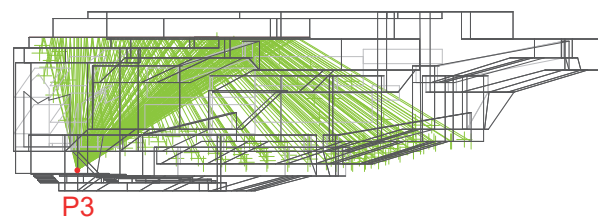
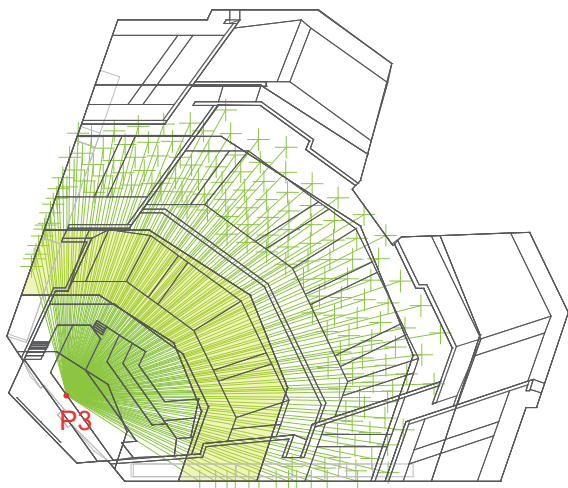
REFLEXIONES EN UN ÁREA DEL TECHO



Emisor 1



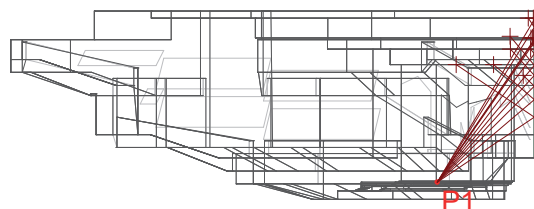
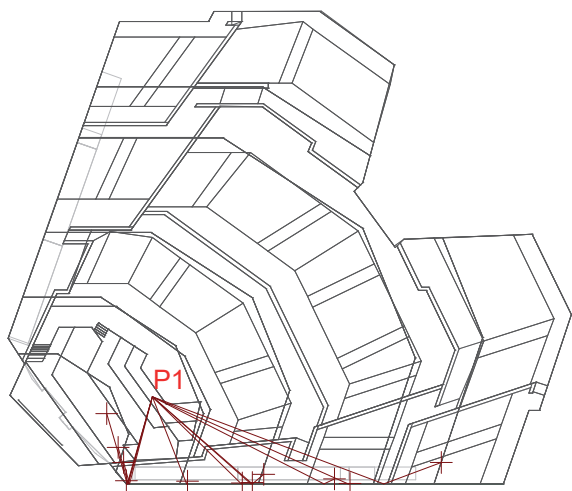
Emisor 2



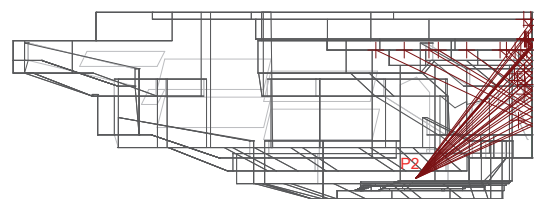
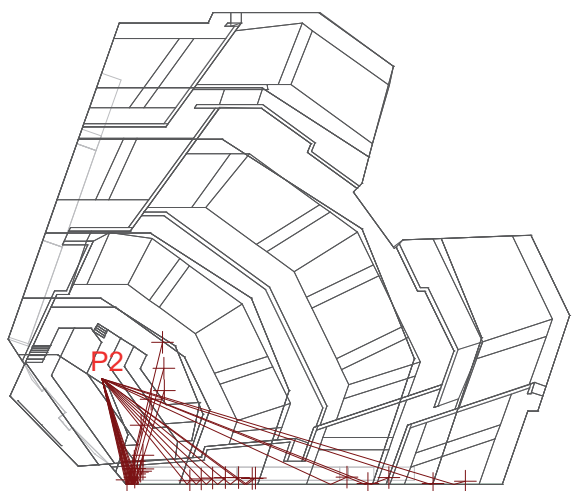
Emisor 3

GASTEIG, Munich

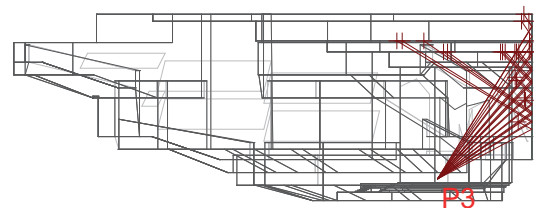
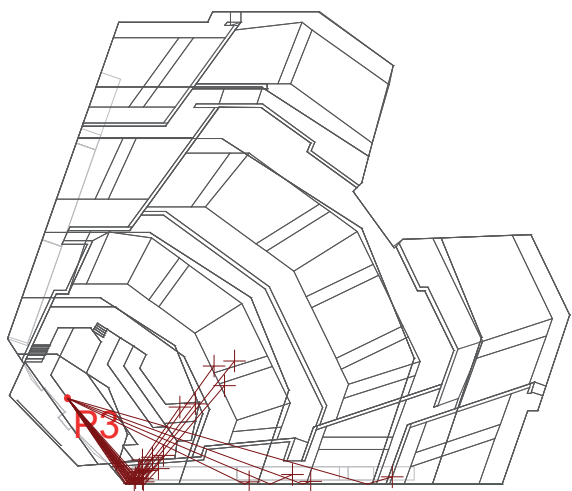
REFLEXIONES EN UN ÁREA DE LA PARED LATERAL



Emisor 1

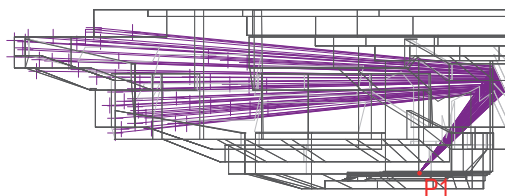
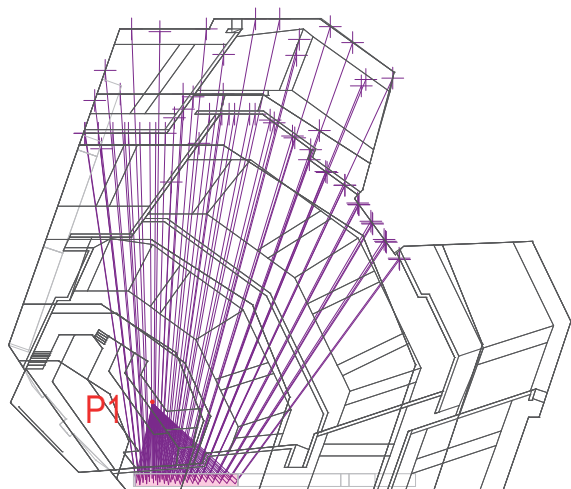


Emisor 2

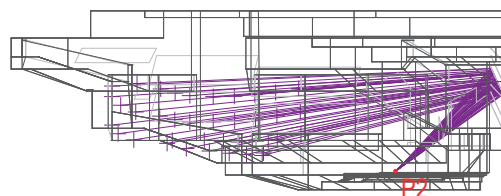
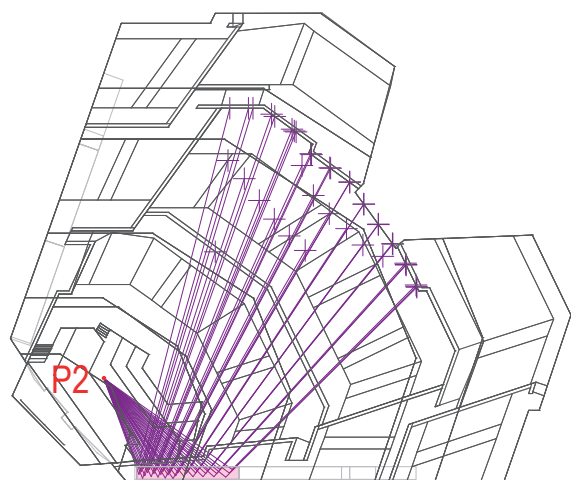


Emisor 3

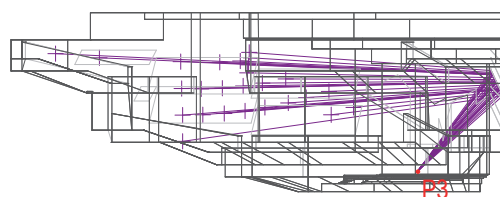
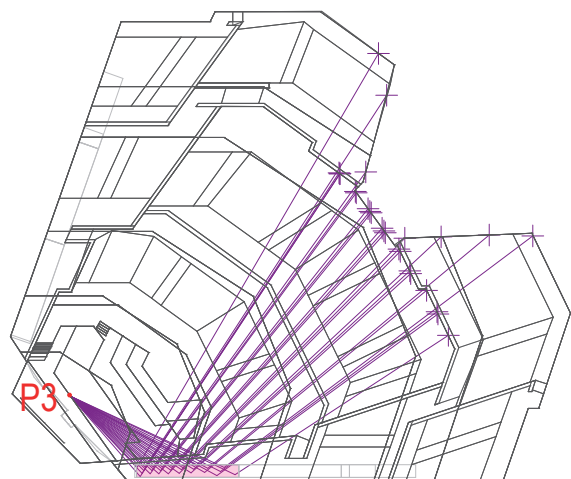
REFLEXIONES EN UN REFLECTOR



Emisor 1



Emisor 2



Emisor 3

Caso 1. Concertgebouw, Ámsterdam

En el escenario no hay una alta generación de reflexiones, ya que el sonido no se proyecta directamente hacia el suelo. Sí es cierto, la ubicación del emisor afecta significativamente la propagación y el alcance del sonido en la sala. En el caso del Emisor 1 (P_1), el sonido se dispersa ampliamente, cubriendo gran parte de la sala con reflexiones efectivas hacia el fondo, alcanzando zonas más lejanas gracias a su dirección principal hacia las áreas superiores. Por otro lado, el Emisor 2 (P_2) muestra una dispersión más focalizada y con menor alcance, limitándose principalmente a áreas medias cercanas al escenario, con una menor cantidad de reflexiones dirigidas hacia el fondo de la sala. Finalmente, el Emisor 3 (P_3) concentra la mayoría de sus reflexiones cerca del escenario, con un alcance muy reducido hacia el resto de la sala y reflexiones mayormente dirigidas hacia el techo, lo que genera una dispersión mucho más limitada y focalizada. Aunque la forma en la que se propaga el sonido es influenciada por la posición del emisor, en una sala de concierto la disposición de los músicos en todo el escenario hace que actúen como una fuente sonora emitiendo en todas las direcciones.

El techo desempeña un papel crucial al generar una gran cantidad de reflexiones que se distribuyen de forma homogénea. Aunque la intensidad y distribución de las reflexiones procedentes del techo varían según la posición del emisor, se puede afirmar que, en general, mantienen una homogeneidad notable en todo el espacio.

Una situación similar se observa en las paredes laterales, que generan reflexiones uniformes capaces de alcanzar el extremo opuesto de la sala con facilidad. Esta distribución eficiente y uniforme de las reflexiones permite una experiencia acústica equilibrada en toda la sala, sin importar la ubicación del emisor.

En definitiva, esta disposición arquitectónica da lugar a una distribución muy homogénea de las reflexiones acústicas en todas las superficies. Las paredes y el techo se destacan como los elementos más reflectantes, desempeñando un papel crucial en la creación de una envolvente sensación acústica. Este comportamiento refleja y distribuye el sonido de manera equilibrada, lo que contribuye a una buena experiencia sonora.

Caso 2. Gasteig, Múnich

Al analizar el segundo caso, se observa que el escenario tiene la capacidad de generar importantes reflexiones dependiendo de la posición del emisor. En las situaciones en las que el emisor se encuentra ligeramente elevado, como en los escalones superiores, se pueden producir una cantidad significativa de reflexiones útiles, tal como se aprecia en el comportamiento de los emisores P₂ y P₃, siendo este último el que mayor reflexión produce, tanto en alcance como en intensidad.

Sin embargo, es importante considerar en ambos casos que, en la práctica, la mayoría de los músicos tienden a ubicarse en las zonas más bajas del escenario, lejos de los puntos elevados que favorecen la creación de reflexiones más notables. Esta ubicación implica que, en algunos casos, la mayoría de las reflexiones generadas no provendrán directamente del propio escenario, sino que estarán influenciadas por otras superficies de la sala. Por lo tanto, aunque la capacidad del escenario para generar reflexiones útiles es evidente, las condiciones reales del emplazamiento de los músicos son un factor determinante en la forma en que estas reflexiones se perciben y contribuyen a la experiencia acústica.

Por otro lado, el techo se presenta como el principal generador de reflexiones en la sala. Al igual que en el caso anterior, el techo constituye una superficie bastante amplia que refleja una gran parte del sonido. Sin embargo, debido a la menor altura de esta sala, la contribución del techo adquiere una relevancia más pronunciada en comparación con las paredes.

Aunque el techo genera reflexiones bastante uniformes, independientemente de la posición del emisor, las paredes laterales muestran un alcance limitado. Estas reflexiones apenas logran llegar al centro de la sala y no tienen una influencia significativa si se considera la totalidad del espacio. Al no ser suficientes las reflexiones laterales generadas por las propias paredes, en el caso del Gasteig hay una intención clara de mejorar la acústica con la colocación de reflectores colgados en las paredes laterales.

Como podemos observar, estos reflectores ayudan a generar un mayor número de reflexiones que alcanzan el “ala” de la sala en diagonal. Sin embargo, hay zonas en los extremos que no terminan de cubrirse.

Comparación

La acústica de los auditorios Ámsterdam y Gasteig presenta diferencias notables en cuanto a la generación y distribución de reflexiones sonoras.

En el Concertgebouw, el diseño arquitectónico favorece una acústica equilibrada. El techo y las paredes laterales, trabajando en conjunto, dispersan el sonido de manera uniforme por toda la sala, creando una experiencia envolvente sin necesidad de elementos adicionales.

Por su parte, Gasteig presenta una acústica más compleja. La forma de la sala y la ubicación de los músicos limitan la generación de reflexiones naturales, especialmente en las zonas laterales, pero esto se ve compensado por la colocación de reflectores orientados. La escasa generación de reflexiones útiles por parte de la pared lateral es especialmente relevante si comparamos la superficie, que es más del doble que la de Ámsterdam. Esto demuestra que esta sala se diseñó con conocimientos de acústica, lo que ha permitido detectar los defectos del espacio e intentar corregirlos. En Ámsterdam no se apoyan de ningún tipo de reflector añadido y todas las reflexiones laterales se generan a partir únicamente de la geometría. No obstante, en Gasteig, la cobertura acústica sigue siendo desigual, con zonas donde el sonido llega de forma menos uniforme.

En resumen, mientras que Ámsterdam ofrece una acústica natural y homogénea, Gasteig requiere de soluciones técnicas para optimizar la distribución del sonido. La elección entre una y otra solución dependerá de las prioridades acústicas de cada proyecto y de las limitaciones arquitectónicas existentes.

Conclusiones

Se ha llevado a cabo un estudio que profundiza en la acústica de dos auditorios, el Concertgebouw en Ámsterdam y el Gasteig en Múnich, analizando tres aspectos clave: la influencia de los materiales, los parámetros acústicos en distintas posiciones del público y la simulación del comportamiento del sonido en algunas superficies de los espacios mediante el software especializado Odeon.

El Concertgebouw en Ámsterdam y el Gasteig en Múnich son dos auditorios europeos muy conocidos con casi 100 años de diferencia. Esta diferencia temporal refleja distintas épocas arquitectónicas y tecnológicas. El primero marca la acústica del siglo XIX mientras que el segundo representa una visión más moderna. Esto explica sus diferentes enfoques en el diseño de salas y, consecuentemente, en el comportamiento del sonido en ellas.

No obstante, a pesar de sus diferencias temporales, los auditorios comparten algunas características acústicas, especialmente en el comportamiento de los materiales. En ambos auditorios, la audiencia contribuye significativamente a la absorción del sonido, y las paredes, aunque están revestidas con materiales distintos en cada auditorio reflejan el sonido de manera similar debido a que presentan propiedades acústicas semejantes.

En términos de diseño arquitectónico y disposición espacial del espectador, el Concertgebouw proporciona una distribución más uniforme de la energía sonora gracias a su geometría y diseño que favorecen la difusión del sonido, especialmente al mantener a la audiencia en un único nivel. No obstante, los valores de los parámetros acústicos experimentan variaciones con la distancia al emisor, decreciendo hasta que las reflexiones laterales compensan esta pérdida en ciertas áreas. En el Gasteig, las diferencias en la calidad de la escucha son más notorias, debido principalmente a su forma, a su mayor capacidad y a las variaciones en la altura de los pasillos, que afectan la uniformidad acústica. Aunque los reflectores en el techo mejoran las zonas desfavorables, no logran eliminar completamente estas desigualdades espaciales.

El acondicionamiento acústico en ambos espacios revela filosofías de diseño distintas. El Concertgebouw emplea un techo plano y artesonado que distribuye las reflexiones de manera uniforme, sin necesidad de elementos adicionales, lo que resalta su enfoque en una acústica natural. Por otro lado, el Gasteig se apoya en reflectores orientados en el techo para mejorar la distribución sonora en áreas desfavorables, reflejando una estrategia técnica más moderna.

Las auralizaciones han permitido comprobar las características de cada auditorio. El Concertgebouw se caracteriza por una mayor homogeneidad

en la calidad acústica entre distintas posiciones, aunque con variaciones sutiles en los parámetros acústicos subjetivos como el C80. El Gasteig muestra un panorama más complejo con mayores disparidades entre zonas. Áreas de acústica óptima coexisten con zonas de una calidad acústica más irregular y deficiente, especialmente en las áreas más alejadas, donde la ubicación del oyente determina la experiencia auditiva.

Por último, en la simulación de rayos sonoros, el Concertgebouw genera reflexiones exclusivamente a partir de su geometría, creando un ambiente sonoro equilibrado y envolvente sin necesidad de elementos adicionales. En cambio, el Gasteig debe recurrir a reflectores añadidos para corregir las limitaciones inherentes a su diseño arquitectónico. A pesar de esta solución más técnica, la cobertura acústica del auditorio es más heterogénea en comparación con el Concertgebouw, reflejando el desafío que representa una estructura moderna y a mayor escala.

En resumen, el Concertgebouw se distingue por una aproximación clásica donde se consigue una buena distribución de la energía sonora, una distribución homogénea lograda mediante un diseño arquitectónico tradicional que maximiza la generación de reflexiones en el espacio sin recurrir a elementos adicionales. El Gasteig, por su parte, simboliza la respuesta más contemporánea y utiliza soluciones técnicas modernas para mitigar las limitaciones de su arquitectura más compleja y mayor aforo, lo que mejora la calidad en zonas desfavorables, pero no elimina completamente las disparidades acústicas. Ambos auditorios ilustran enfoques diferentes en la optimización acústica, ofreciendo soluciones diferentes para conseguir la integración de diseño arquitectónico, materiales y tecnología.

Los dos auditorios analizados ejemplifican distintos paradigmas del diseño acústico. La consecución de una acústica óptima es un problema complejo, especialmente en espacios construidos para albergar grandes audiencias. La excelencia acústica resulta de un minucioso diálogo, y también un reto entre diseño arquitectónico, la selección de materiales y el manejo de la tecnología. Y en este Trabajo Fin de Grado se ha puesto de manifiesto que la solución propuesta en cada uno de los auditorios refleja un determinado contexto histórico y cultural.

Anexo I

Concertgebouw, Ámsterdam

Odeon	Material	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	NRC
3065	Madera , 25 mm con cámara c	0,14	0,09	0,06	0,06	0,0875
3000	Madera hueca	0,3	0,2	0,17	0,15	0,205
3064	Madera de 16 mm sobre mont	0,12	0,1	0,09	0,08	0,0975
5004	Láminas metálicas (órgano)	0,9	0,95	0,94	0,9	0,9225
4004	Pared de ladrillo	0,04	0,05	0,05	0,05	0,0475
15003	Zonas acortinadas	0,22	0,27	0,32	0,31	0,28
4039	Pared enlucida	0,1	0,08	0,06	0,06	0,075
4035	Yeso o cal	0,1	0,06	0,05	0,04	0,0625
15002	Capa porosa de 100 mm	0,18	0,16	0,14	0,08	0,14
10006	Vidrio	0,25	0,18	0,12	0,07	0,155
11059	Audiencia	0,54	0,63	0,65	0,63	0,6125

Gasetig, Múnich

Odeon	Material	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	NRC
3081	Tablas de madera RFH	0,3	0,25	0,2	0,15	0,225
3005	Suelo de parqué	0,15	0,1	0,1	0,05	0,1
3079	Paredes de madera	0,22	0,17	0,1	0,1	0,1475
5001	Láminas metálicas (órgano)	0,89	0,1	0,88	0,88	0,6875
3080	Elementos suspendidos del te	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
3078	Tablas de madera RHF	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
11053	Sillas vacías tapizadas	0,66	0,8	0,88	0,82	0,79

Anexo II

Concertgebouw, Ámsterdam

EDT	(s)	Simulation							
Rec. no.\Banc		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1		2,68	2,76	2,68	2,68	2,71	2,62	2,23	1,53
2		2,52	2,53	2,49	2,53	2,57	2,53	2,1	1,22
3		2,32	2,44	2,37	2,39	2,42	2,36	1,95	1,06
4		2,07	2,13	2,13	2,31	2,39	2,29	1,78	0,93
5		2,64	2,68	2,67	2,71	2,76	2,7	2,29	1,41
6		2,71	2,71	2,69	2,7	2,74	2,7	2,42	1,74
7		2,11	2,27	2,2	2,28	2,31	2,22	1,79	0,95
8		2,14	2,32	2,22	2,25	2,33	2,29	1,85	0,97
9		2,43	2,54	2,47	2,49	2,55	2,53	2,17	1,28
10		2,81	2,84	2,81	2,85	2,85	2,82	2,44	1,41
11		2,42	2,49	2,5	2,54	2,6	2,54	2,16	1,29
12		2,43	2,47	2,4	2,45	2,5	2,47	2,19	1,31
13		2,43	2,55	2,46	2,49	2,53	2,44	1,96	1,02
14		2,5	2,65	2,61	2,61	2,65	2,57	2,14	1,24
15		2,64	2,72	2,7	2,67	2,72	2,67	2,31	1,46

T(20)	(s)	Simulation							
Rec. no.\Banc		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1		2,61	2,63	2,58	2,6	2,66	2,58	2,19	1,31
2		2,44	2,47	2,38	2,39	2,43	2,4	2,12	1,38
3		2,43	2,46	2,42	2,47	2,51	2,46	2,16	1,31
4		2,35	2,35	2,35	2,46	2,53	2,46	2,01	1,43
5		2,52	2,57	2,52	2,51	2,56	2,52	2,22	1,38
6		2,51	2,54	2,5	2,47	2,51	2,47	2,16	1,31
7		2,51	2,56	2,53	2,51	2,55	2,51	2,17	1,29
8		2,5	2,55	2,5	2,49	2,54	2,5	2,15	1,3
9		2,4	2,42	2,39	2,42	2,46	2,41	2,17	1,36
10		2,37	2,39	2,35	2,37	2,4	2,37	2,09	1,36
11		2,52	2,56	2,49	2,53	2,57	2,53	2,19	1,34
12		2,62	2,63	2,58	2,58	2,63	2,56	2,14	1,26
13		2,57	2,61	2,58	2,57	2,62	2,57	2,18	1,29
14		2,47	2,5	2,52	2,56	2,62	2,57	2,2	1,33
15		2,43	2,45	2,36	2,32	2,36	2,34	2,1	1,36

Ts	(ms)	Simulation							
Rec. no.\Banc		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1		87	89	92	102	108	106	81	31
2		170	167	165	172	176	174	147	81
3		149	158	150	156	158	155	131	75
4		132	128	130	139	145	143	117	71
5		180	183	185	194	200	195	162	86
6		187	182	184	192	200	198	167	84
7		130	140	135	138	139	135	111	60
8		123	128	124	131	135	134	111	59
9		170	175	169	170	174	171	143	77
10		202	205	202	204	206	202	170	96
11		179	186	181	185	188	185	157	89
12		123	125	126	135	142	142	115	54
13		115	119	118	128	132	129	104	50
14		167	175	170	174	177	172	142	76
15		193	198	195	202	207	203	173	98

G Rec. no.\Banc	(dB)	Simulation							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	8,7	8,6	8,4	8,1	8,1	8	7,5	5,8	
2	4,7	4,9	4,7	4,7	4,8	4,7	3,5	-0,3	
3	5,4	5,1	5,1	5,1	5,1	5	3,9	0,1	
4	5	5,1	4,8	4,6	4,5	4,3	3,5	-0,7	
5	4	4,1	4	4,1	4,3	4,1	2,9	-1	
6	4,3	4,6	4,3	4,3	4,4	4,2	3	-0,9	
7	7	6,6	6,5	6,5	6,6	6,6	5,8	2,9	
8	7,4	7,2	7,1	7,1	7,1	6,9	6	3,2	
9	4,1	4,1	4	3,8	3,8	3,7	2,5	-1,7	
10	2,8	2,9	3,1	3,3	3,6	3,5	2,2	-2,5	
11	4,2	4,1	3,9	3,7	3,8	3,7	2,5	-1,8	
12	6,8	6,8	6,7	6,6	6,5	6,3	5,5	2,9	
13	7,4	7,3	7,1	7,1	7,1	7	6,3	4	
14	5,1	4,9	4,6	4,7	4,8	4,7	3,7	0,1	
15	3	3	2,9	3	3,1	2,9	1,7	-3	

C(80)	(dB)	Simulation							
Rec. no.\Banc		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1		3,1	3,1	2,8	2,2	1,8	1,8	2,8	7
2		-1,5	-1,3	-1,3	-1,7	-1,8	-1,8	-0,9	2,5
3		0,3	-0,1	0,2	-0,3	-0,4	-0,3	0,5	3,9
4		2,1	2,4	2,1	1,6	1,3	1,4	2,9	6,4
5		-3,2	-3,2	-3,4	-3,8	-3,9	-3,7	-2,5	1,4
6		-2,2	-2	-2,2	-2,8	-3,2	-3,3	-2,2	2
7		0,5	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	1,1	4,4
8		1,3	1,2	1,4	0,9	0,6	0,5	1,4	4,9
9		-1,8	-2	-1,6	-1,7	-1,8	-1,7	-0,7	2,8
10		-3,7	-3,8	-3,8	-3,7	-3,8	-3,8	-2,8	0,6
11		-2,3	-2,5	-2,1	-2,1	-2,2	-2,2	-1,4	2,1
12		1,4	1,3	1,2	0,6	0,3	0,2	1,2	5,3
13		1,8	1,8	1,9	1,2	1	0,9	1,8	5,6
14		-1,7	-1,9	-1,6	-1,8	-1,9	-1,8	-0,8	2,8
15		-2,9	-3,1	-3	-3,5	-3,7	-3,7	-2,7	1

LF(80) Rec. no.\Banc	Simulation							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	0,008	0,009	0,01	0,012	0,014	0,015	0,015	0,012
2	0,206	0,18	0,186	0,198	0,203	0,204	0,196	0,163
3	0,235	0,232	0,243	0,241	0,236	0,229	0,219	0,203
4	0,12	0,121	0,123	0,126	0,126	0,129	0,121	0,122
5	0,08	0,081	0,089	0,098	0,101	0,099	0,095	0,078
6	0,15	0,126	0,134	0,147	0,155	0,157	0,15	0,118
7	0,104	0,09	0,093	0,098	0,101	0,103	0,102	0,089
8	0,31	0,306	0,323	0,317	0,305	0,285	0,264	0,235
9	0,273	0,274	0,265	0,274	0,281	0,301	0,316	0,315
10	0,158	0,155	0,161	0,167	0,165	0,165	0,166	0,151
11	0,138	0,132	0,125	0,13	0,134	0,136	0,135	0,121
12	0,177	0,186	0,206	0,234	0,243	0,243	0,24	0,214
13	0,117	0,124	0,149	0,151	0,148	0,141	0,13	0,103
14	0,088	0,066	0,068	0,072	0,076	0,078	0,078	0,07
15	0,151	0,145	0,131	0,148	0,155	0,158	0,16	0,145

Gasteig, Múnich

EDT	(s)	Simulation							
Rec. no.\Banc		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1		2,51	2,47	2,26	2,22	2,22	2,23	2,07	1,42
2		2,53	2,43	2,28	2,36	2,57	2,55	2,15	1,06
3		2,48	2,4	2,19	2,19	2,36	2,35	2,03	1,22
4		2,24	2,15	1,96	2,01	2,17	2,14	1,8	1,04
5		2,17	2,07	1,85	1,96	2,1	2,08	1,72	0,91
6		2,71	2,6	2,36	2,37	2,48	2,49	2,24	1,42
7		2,33	2,25	2,02	2	2,05	2,04	1,77	0,95
8		2,52	2,45	2,18	2,19	2,32	2,33	2,07	1,27
9		2,52	2,46	2,16	2,14	2,27	2,28	1,97	1,21
10		2,26	2,19	2,04	2,03	2,12	2,12	1,85	0,91
11		2,79	2,69	2,42	2,5	2,7	2,63	2,25	1,49
12		2,47	2,37	2,08	2,09	2,31	2,29	1,9	1,08
13		2,34	2,21	1,87	1,94	2,24	2,18	1,71	0,92
14		2,81	2,71	2,33	2,35	2,55	2,49	2,1	1,37

T(20)	(s)	Simulation							
Rec. no.\Banc		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1		2,36	2,3	2,21	2,42	2,42	2,39	2,26	1,19
2		2,47	2,41	2,2	2,15	2,26	2,28	2,15	1,36
3		2,44	2,37	2,15	2,15	2,24	2,23	2,03	1,33
4		2,46	2,38	2,12	2,18	2,53	2,48	2,07	1,32
5		2,5	2,44	2,19	2,12	2,22	2,23	2,08	1,37
6		2,41	2,34	2,1	2,11	2,24	2,23	2,02	1,28
7		2,39	2,36	2,2	2,2	2,29	2,29	2,04	1,24
8		2,48	2,41	2,18	2,19	2,32	2,29	2,04	1,3
9		2,45	2,38	2,14	2,17	2,27	2,23	2,03	1,29
10		2,44	2,36	2,08	2,08	2,21	2,2	1,94	1,26
11		2,34	2,3	2,14	2,21	2,31	2,29	2,11	1,35
12		2,66	2,58	2,4	2,5	2,66	2,62	2,26	1,32
13		2,65	2,58	2,43	2,53	2,75	2,76	2,32	1,3
14		2,49	2,45	2,19	2,17	2,16	2,2	2,06	1,31

Ts	(ms)	Simulation							
Rec. no.\Banc		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1		146	144	132	135	149	152	137	71
2		165	161	148	149	165	166	145	87
3		191	188	174	176	189	191	173	117
4		166	160	146	149	160	162	145	99
5		160	156	141	145	154	153	133	89
6		131	127	112	112	120	122	105	45
7		125	121	110	112	119	120	107	59
8		194	191	174	175	188	191	173	115
9		197	193	175	176	186	187	169	116
10		120	118	108	106	113	114	99	51
11		224	219	201	208	224	223	197	128
12		174	169	147	146	158	160	140	88
13		131	124	104	105	117	118	102	58
14		156	153	131	134	152	153	131	72

G Rec. no.\Banc	(dB)	Simulation						
		63	125	250	500	1000	2000	4000
1	5	5	4,8	4,7	4,9	4,9	4,2	0,9
2	1	0,9	-0,1	-0,1	0,1	0,1	-0,6	-5,2
3	1,7	1,5	0,9	0,8	0,8	0,8	-0,2	-5,2
4	-0,7	-0,9	-1,7	-2	-2	-2	-3,1	-8,7
5	-2,9	-3,1	-4,1	-4,6	-4,5	-4,4	-5,2	-10,6
6	4,8	4,8	4,6	4,6	4,8	4,8	4,3	2
7	5,2	5,3	4,8	4,6	4,9	4,9	4,3	1,4
8	1,5	1,4	0,8	0,6	0,8	0,7	-0,2	-5,1
9	1	0,9	0,4	0,5	0,9	0,8	-0,3	-5,7
10	5,1	5	4,7	4,8	5,1	5,1	4,4	1,8
11	0,1	0	-0,7	-0,9	-0,6	-0,6	-1,6	-7
12	-1,7	-1,9	-2,6	-2,7	-2,7	-2,7	-3,8	-9,2
13	-1,5	-1,6	-2,3	-2,4	-2,4	-2,5	-3,6	-8,7
14	-3,7	-3,9	-4,8	-5,3	-5,5	-5,5	-6,3	-11,4

C(80) Rec. no.\Banc	(dB)	Simulation							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1		-0,1	-0,1	0,3	-0,2	-1,1	-1,3	-0,9	2,9
2		-1,1	-1	-0,6	-0,4	-1,1	-1,2	-0,6	2,4
3		-2,9	-2,8	-2,3	-2,6	-3,4	-3,7	-3,2	-0,4
4		-2	-1,6	-0,9	-1	-1,4	-1,8	-1,5	0,9
5		-1,1	-0,9	-0,9	-1,2	-1,6	-1,7	-0,7	1,7
6		1,1	1,1	1,5	1,4	0,9	0,8	1,5	5,8
7		1,9	2,3	2,7	2,6	2	1,8	2,2	5,7
8		-3,5	-3,5	-2,9	-3,1	-3,7	-3,9	-3,3	-0,3
9		-3,5	-3,4	-3	-2,9	-3,4	-3,5	-2,9	-0,3
10		2,3	2,3	2,5	2,5	2,1	2	2,7	6,4
11		-4	-3,9	-3,6	-4,2	-5,2	-5,3	-4,4	-1,1
12		-2,3	-2,2	-1,3	-1,1	-1,5	-1,7	-1,1	1,7
13		1,2	1,5	2,5	2,7	2,3	2,1	2,5	5,7
14		-0,2	-0,2	0,6	0,3	-0,6	-0,6	0,2	3,8

LF(80) Rec. no.\Banc	Simulation							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	0,064	0,067	0,073	0,087	0,1	0,111	0,118	0,093
2	0,313	0,315	0,311	0,34	0,353	0,369	0,387	0,398
3	0,168	0,177	0,179	0,173	0,161	0,16	0,166	0,158
4	0,209	0,221	0,215	0,219	0,222	0,229	0,239	0,236
5	0,189	0,195	0,186	0,173	0,175	0,201	0,243	0,252
6	0,017	0,017	0,017	0,017	0,018	0,022	0,024	0,019
7	0,153	0,119	0,128	0,139	0,15	0,158	0,159	0,146
8	0,086	0,092	0,108	0,116	0,127	0,143	0,16	0,158
9	0,195	0,201	0,212	0,223	0,224	0,229	0,231	0,226
10	0,228	0,216	0,208	0,218	0,23	0,231	0,23	0,228
11	0,083	0,094	0,106	0,129	0,161	0,179	0,184	0,184
12	0,188	0,192	0,179	0,182	0,197	0,209	0,217	0,211
13	0,296	0,281	0,282	0,291	0,308	0,317	0,322	0,318
14	0,144	0,15	0,151	0,156	0,184	0,215	0,237	0,233

Bibliografía

- Allgemeine Kommunal Leasing (Ed.) (1985) *Gasteig Kulturzentrum Broschuere*. Gasteig Kulturzentrum.
- Arau, H. (2005). *Auditorios del siglo 21*.
- Avilés López, R., & Perera Martín, R. (2017). *Manual de acústica ambiental y arquitectónica* (1a edición). Paraninfo.
- Barron, M. (1993). *Auditorium Acoustics and Architectural Design* (Segunda Edición). Spoon Press.
- Barron, M. (2024). *Precedents in concert hall form. Acoustics, Architecture and Auditoria 1992*. <https://doi.org/10.25144/20709>
- Beranek, L. (2004). *Concert Halls and Opera Houses*.
- Berardi, U., Iannace, G., & Maffei, L. (2016). Virtual reconstruction of the historical acoustics of the Odeon of Pompeii. *Journal of Cultural Heritage*, 19, 555–566. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2015.12.004>
- Burkholder, J. P., Palisca, C. v., & Grout, D. J. (2015). *Historia de la música Occidental* (Octava Edición). Alianza Editorial.
- Cañonero, J. M. (2019). Arquitectura de la música. La influencia de la música en los espacios arquitectónicos. *AREA*, 25(1), pp. 1-20. https://www.area.fadu.uba.ar/wp-content/uploads/AREA2501/2501_canonero.pdf
- Carrión Isbert, Antoni. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos* (Edicions UPC). Edicions UPC, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Clements, P. A. (2002). The Acoustic Design of the Concertgebouw, Amsterdam, and resolution of the hall's early acoustical difficulties. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 24.
- Clements, P., & Vercammen, M. (2019). *Concertgebouw Amsterdam: History of the main hall and its acoustics Part 1: The early years: acoustic design and resolution of acoustic difficulties*. <https://www.isra2019.eu/sites/isra2019.eu/files/proceedings/articles/000117.pdf>
- Farina, M. A. (2020). Salas para música. Arquitectura y comportamiento acústico. *Revista Española de Acústica - SEA*, 51, 11–22.
- Hidaka, T., & Nishihara, N. (2015). Acoustical quality in concert halls as related to hall shape: Shoebox, surround, and other. *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain*, 25(3), 240–252. <https://doi.org/10.1037/pmu0000050>
- León Rodríguez, Á. L. (1998). La acústica de los teatros a través de la historia. *Segundo Congreso Nacional de Historia de La Construcción*.
- Loomis, George. "Munich's Music Lovers Wrestle Over a Controversial New Hall." *The New York Times*, 2009.
- Meyer, J. (2009). *Acoustics and the Performance of Music: Manual for Acousticians, Audio Engineers, Musicians, Architects and Musical Instrument Makers* (Quinta Edición). Springer.

Vercammen, M., Lautenbach, M., & Metkemeijer, R. (2019). Concertgebouw Amsterdam: History of the main hall and its acoustics; Part 2: Preserving the acoustics. *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics*.

Procedencia de las ilustraciones

Nota: Todas las figuras y tablas no incluidas en este listado han sido elaboradas por la autora.

Capítulo 1

Figura 1.1. Tomado de Virtual reconstruction of the historical acoustics of the Odeon of Pompeii <https://doi.org/10.1016/j.culher.2015.12.004>

Figura 1.2. Dibujo de Giuseppe Barberis

Figura 1.3. Tomado de https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%93pera_italiana

Figura 1.4. Tomado de <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4e/Hanover-Square-Rooms-concert.jpg>

Figura 1.5. The Boston Music Hall from then to now. A Timeline History of the original Home of the "Great Organ", Ed Sampson

Figura 1.6. Tomado de [Tomado de https://aulos.es/places/el-teatro-del-festival-de-bayreuth/](https://aulos.es/places/el-teatro-del-festival-de-bayreuth/)

Figura 1.7. Fotografía de Siegfried Lauterwasser

Figura 1.8. Tomado de <https://www.kursaal.eus/es/2019/03/fotografias-auditorio-kursaal/>

Figura 1.9. Tomado de <https://www.palcongrex.es/merida/espacios/auditorio-i>

Capítulo 2

Figuras 2.1, 2.2, 2.3. Tomado de Carrión Isbert, Antoni. (1998). Diseño acústico de espacios arquitectónicos (Edicions UPC), páginas 254, 252, 256,

Capítulo 3

Figuras 3.1 y 3.2. Tomado de Carrión Isbert, Antoni. (1998). Diseño acústico de espacios arquitectónicos (Edicions UPC), páginas 269, 192

Figura 3.3. Tomado de <https://woodandfirestudio.com/es/audio-mixing-guide/>

Figura 3.4. Meyer, J. (2009). Acoustics and the Performance of Music: Manual for Acousticians, Audio Engineers, Musicians, Architects and Musical Instrument Makers (Quinta Edición). Springer.

Figura 3.5. Beranek, L. (2004). Concert Halls and Opera Houses.

Capítulo 4

Figura 4.1. Tomado de <https://www.concertgebouw.nl/werken-bij-het-concertgebouw>

Figura 4.2. Tomado de <https://collectie.rijksmuseumtwenthe.nl/zoeken-in-de-collectie/detail/id/9fbf4ec-ed58-5ae7-8809-3e804c546856>

Figura 4.3. Tomado de <https://archief.amsterdam/beeldbank/detail/733747cf-3a46-e7f6-3488-e5dec62e29d3>

Figura 4.5. Tomado de <https://www.gewandhausorchester.de/en/gewandhaus/history/>

Figura 4.6. Clements Acoustic Design

Figura 4.7. Clements Acoustic Design

Figura 4.8. Vercammen, Martijn, Margriet Lautenbach, y Rob Metkemeijer. (2019) Concertgebouw Amsterdam: History of the Main Hall and Its Acoustics Part 2: Preserving the Acoustics, página 366

Figura 4.9. Tomado de <https://gimifun.com/wp-content/uploads/2020/12/Concertgebouw-Netherlands-Philharmonic-Orchestra-6.jpg>

Figura 4.10. Tomado de <https://uniquevenuesofamsterdam.com/venue/the-royal-concertgebouw/>

Figura 4.12. Tomado de <https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Gasteig.JPG>

Figuras 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17. Dibujo de los arquitectos, facilitado por el Gasteig Kulturzentrum

Figuras 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22. Facilitado por el Gasteig Kulturzentrum

Figura 4.23. Tomado de <https://www.peutz.de/projekte/philharmonie-am-gasteig>

Figura 4.24. Tomado de https://www.flickr.com/photos/traveller_40/25021528821

Figura 4.25. Tomado de <https://www.metalocus.es/es/noticias/el-mayor-centro-cultural-de-europa-centro-cultural-gasteig-por-henn>

Figura 4.26. Tomado de <https://www.henn.com/de/news/gasteig-der-dbz>

Capítulo 5

Figuras 5.1, 5.2. Tomado de Carrión Isbert, Antoni. (1998). Diseño acústico de espacios arquitectónicos (Edicions UPC), páginas 51 y 226w

Capítulo 7

Figuras 7.1.

Figura 7.2. Tomado de <https://image.volkskrant.nl/243703761/feature-crop/1200/675/afbeelding>

Figura 7.3. Tomado de <http://merk-x.nl/openbare-gebouwen/het-concertgebouw-amsterdam/>

Figura 7.4. Elaboración propia a partir del Software Odeon

Figura 7.5. Facilitado por el Gasteig Kulturzentrum

Figura 7.6. Facilitado por el Gasteig Kulturzentrum

Figura 7.7. Vercammen, Martijn, Margriet Lautenbach, y Rob Metkemeijer. (2019) Concertgebouw Amsterdam: History of the Main Hall and Its Acoustics Part 2: Preserving the Acoustics,

Figura 7.8. Facilitado por el Gasteig Kulturzentrum

Portada: Elaboración propia a partir de la imagen tomada de <https://www.shutterstock.com/image-photo/rows-empty-red-theatre-seats-600nw-1752962651.jpg>

Tablas

Tabla 2. Tomado de Carrión Isbert, Antoni. (1998). Diseño acústico de espacios arquitectónicos (Edicions UPC), página 64

Tabla 3. Tomado de Carrión Isbert, Antoni. (1998). Diseño acústico de espacios arquitectónicos (Edicions UPC), página 243

