

A 3D wireframe architectural rendering of a concert hall, viewed from an elevated perspective. The structure is composed of white lines on a black background. The interior is filled with a dense field of small orange dots, representing a particle simulation or acoustic field. The text is overlaid on the upper part of the hall.

Kraakhuis: De hospital a música,
rehabilitación y acústica variable

Carlos Serrano Berral

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE MADRID



TRABAJO FIN DE GRADO

Carlos Serrano Berral

KRAAKHUIS. DE HOSPITAL A MÚSICA, REHABILITACIÓN Y ACÚSTICA VARIABLE.

KRAAKHUIS. DE HOSPITAL A MÚSICA, REHABILITACIÓN Y ACÚSTICA VARIABLE.

Estudiante:

Carlos Serrano Berral

02569049H

19363

Tutor:

María Teresa Carrascal García

Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas.

Aula 8:

Coordinador: Martínez Navarro, Héctor

Adjunto: Moreno Pérez, Enrique

30.05.2024

Universidad Politécnica de Madrid

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Índice

Resumen.....	6
Palabras clave	6
Introducción.....	8
Motivación.....	8
Objetivos	9
Metodología	9
1. Marco teórico.....	12
Fundamentos del sonido.....	12
Principios esenciales del comportamiento del sonido	12
2. Elementos de acústica variable	20
Modificación de la absorción acústica	21
Modificación del volumen	23
Cámaras reverberantes.....	25
3. Espacios rehabilitados para la música	28
Introducción y contexto	28
Edificios susceptibles de rehabilitación musical	29
Diagnóstico	32
4. Caso de estudio: KRAAKHUIS.....	34
Contexto histórico	34
Análisis técnico	35
Simulación acústica.....	44
Conclusiones	56
Bibliografía	62
Leyenda de Figuras.....	64

Resumen

Este trabajo explora la importancia de la rehabilitación de edificios existentes para el uso de salas de conciertos, centrándose en el papel clave de la acústica variable como herramienta para adaptar acústicamente espacios que no fueron concebidos originalmente para la música.

A lo largo del estudio se analizan los principales parámetros acústicos, entre ellos los diferentes sistemas de acústica variable y cómo estos pueden aplicarse respetando la arquitectura del edificio. La investigación parte del contexto actual, donde la demanda de música en directo no para de crecer, pero faltan espacios adecuados dentro del marco urbano. También se analiza como reutilizar edificios en desuso se plantea como una solución sostenible y culturalmente valiosa.

El estudio se completa con un análisis técnico y una simulación acústica del Kraakhuis, un antiguo hospital en Gante, Bélgica, hoy reconvertido en sala de conciertos multifuncional gracias a la incorporación de una cortina acústica variable. A través de la simulación se evalúa cómo diferentes configuraciones de la cortina afectan a parámetros como el tiempo de reverberación o la claridad musical, demostrando la eficacia de este tipo de intervenciones.

El trabajo pone en valor la acústica variable como herramienta para crear espacios flexibles, cómodos y acústicamente eficientes sin renunciar al carácter arquitectónico original.

Palabras clave

Acústica variable, acústica de salas, rehabilitación, Kraakhuis, música, salas.

INTRODUCCIÓN

Introducción

Motivación

En la actualidad, el número de artistas y grupos musicales en activo no deja de crecer, lo que ha generado una mayor demanda por parte del público de vivir la música en directo. Asistir a conciertos, ha pasado de ser un entretenimiento para ver a algunos de tus artistas favoritos, a una necesidad social para el público.

Esto se ve reflejado en la encuesta de Hábitos y Prácticas Culturales en España del Ministerio de cultura donde se dice que la asistencia a conciertos de música actual aumenta respecto a los resultados de 2018-2019. (División de Estadística y Estudios, Secretaría General Técnica, Ministerio de cultura, 2024). También se ve reflejado en el anuario SGAE 2024 que la demanda de actos en vivo no para de aumentar desde el fin de las restricciones del COVID. (Fundación SGAE, 2024)

Esta creciente demanda hace que se necesiten nuevos espacios adecuados para albergar estos espectáculos musicales. Para artistas de renombre, que atraen una audiencia bastante alta, generalmente se recurre a grandes recintos, especialmente deportivos, los cuales escasean dentro del marco urbano y pueden llegar a ser insuficientes. Además, las salas de conciertos de tamaño medio también se encuentran al límite para poder satisfacer la demanda. Los festivales, por su parte, se celebran en grandes superficies al aire libre en la periferia y han resurgido como algo que va más allá de simplemente hacer y escuchar música, por lo que no son equiparables a un concierto simplemente al uso.

Ante esta falta de espacios para la música en los núcleos urbanos, se opta por construir en la periferia, lo que obliga a la gente a desplazarse en coche, generando mayor impacto medioambiental y una pérdida de comodidad para el público. Por este motivo, la reutilización de espacios ya existentes dentro de la ciudad, especialmente aquellos que quedan obsoletos o en desuso, se plantean como una solución lógica y sostenible.

El reto surge cuando las intervenciones en estos espacios no tienen en cuenta el carácter original del lugar, convirtiéndose, en muchos casos, en simples cajas de zapatos negras, sin identidad arquitectónica. Frente esta práctica, el uso de elementos puntuales de acondicionamiento acústico, como los sistemas de acústica variable, permitiría adaptar acústicamente estos espacios respetando al máximo posible la arquitectura y estética que le precede.

Objetivos

Se busca poner en valor las rehabilitaciones acústicas en espacios existentes como alternativa a la construcción de nuevos edificios tanto dentro como fuera del contexto urbano. Reutilizar espacios ya construidos no solo ayuda a mantener en el tiempo ese edificio, sino que es una solución más sostenible con los principios de economía circular aplicados al ámbito arquitectónico y una forma de mantener vivo el interior de las ciudades.

El objetivo principal de este trabajo es estudiar el papel que juegan los elementos de acústica variable en estas intervenciones. Se pretende demostrar cómo la incorporación de estos elementos puede mejorar significativamente las condiciones acústicas de edificios preexistentes, permitiendo una mayor flexibilidad acústica y respetando la arquitectura original del lugar.

Finalmente, para demostrar lo analizado y ejemplificar el estudio, se analizará el caso de Kraakhuis, un edificio rehabilitado que implementa elementos de acústica variable en su interior. Este análisis permitirá ver como estos elementos de acústica variable pueden ser aplicados en la práctica, evaluando tanto sus beneficios acústicos como su impacto en la conservación del edificio.

Metodología

Este trabajo se estructura en varias fases con el fin de abordar el tema de una manera clara y ordenada.

En primer lugar, se empiezan estudiando los parámetros más importantes de la acústica en términos de acústica de salas y acústica variable para posteriormente utilizarlos en la simulación acústica. Como pueden ser el tiempo de reverberación, la claridad musical o los niveles de presión sonora.

En un segundo bloque, se hace un estudio detalle sobre el concepto de acústica variable, tipos y elementos. Enfocado en estudiar su aplicación en auditorios y como el uso de esta acústica puede ayudar a mejorar considerablemente las condiciones sonoras de ese recinto.

Siguiendo a este punto se realiza una minuciosa investigación de rehabilitaciones musicales, para conocer con que frecuencia se hacen, como se llevan a cabo y en general como de útil o necesario puede ser incrementar esta práctica.

Por último, con todos estos conceptos claros, se analiza a fondo a fondo el caso de estudio de la sala Kraakhuis a través de una simulación acústica para acabar poniendo en valor la intervención que se llevó a cabo en este edificio.

Kraakhuis: de hospital a música, rehabilitación y acústica variable.

1. MARCO TEÓRICO

1. Marco teórico

Para entender los diferentes parámetros acústicos que se dan a lo largo de esta investigación, es importante dejar claro conceptos asociados al sonido o la acústica de salas. A continuación, se explicarán los principios clave que permitirán interpretar adecuadamente el contenido del proyecto.

Fundamentos del sonido

El sonido, desde un punto de vista físico, se define como una onda mecánica que se propaga a través de medios elásticos como el aire, el agua o sólidos. Estas ondas son generadas por fuentes sonoras como por ejemplo la voz, instrumentos musicales o máquinas. Se transmiten mediante compresiones y expansiones sucesivas. La intensidad con la que se percibe el sonido depende de la amplitud de dichas ondas.

La audición humana ocurre cuando estas ondas alcanzan el tímpano y lo hacen vibrar, generando una serie de reacciones fisiológicas y neurológicas que permiten interpretar el sonido. Las propiedades fundamentales del sonido incluyen la frecuencia, la duración y la amplitud, las cuales influyen directamente en cómo lo percibimos y usamos en distintos contextos.

Principios esenciales del comportamiento del sonido

- Frecuencia (f)

La frecuencia se refiere a la cantidad de oscilaciones por segundo que produce una onda sonora. Se mide en Hertzios (Hz) y determina el tono del sonido. Las frecuencias altas generan sonidos agudos, mientras que las bajas se traducen en tonos graves (véase figura 1). Esta frecuencia ha de coincidir con la vibración producida por la fuente emisora.

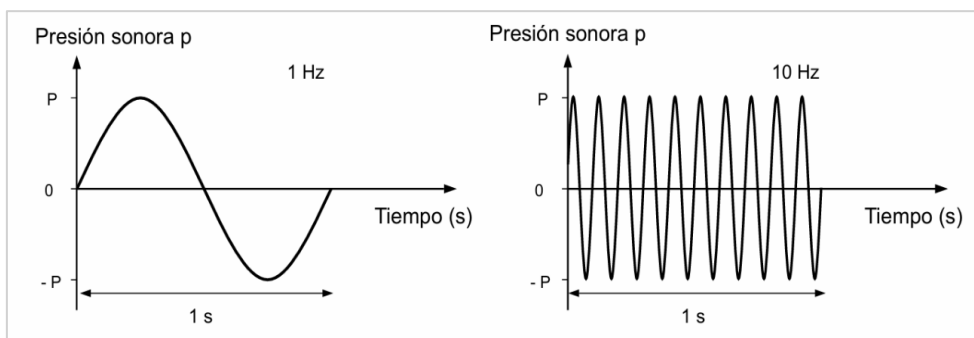


Figura 1. Ejemplos de oscilaciones y frecuencias 1 Hz y 10 Hz. Sonidos graves y agudos respectivamente. Fuente: (Carrión Isbert, 1998), Diseño acústico de espacios arquitectónicos.

- Nivel de presión sonora (SPL)

El SPL representa la magnitud de una onda sonora comparada con la presión atmosférica de referencia. Se calcula como la diferencia entre la presión provocada por una onda sonora y la presión atmosférica estática. Las unidades más habituales son pascuales (Pa), newtons por metro cuadrado (N/m²) o decibelios de presión sonora (dB SPL).

La fórmula para determinar el SPL en decibelios es:

$$Lp = 20 \log \left(\frac{p_1}{p_0} \right)$$

Donde:

- P1 es la presión sonora eficaz.
- P0 es la presión de referencia correspondiente al umbral de audición.

Dado que el oído humano responde logarítmicamente a los cambios de intensidad, esta escala permite representar de forma práctica una amplia gama de presiones. El umbral auditivo se sitúa en 0 dB (no equivalente a ausencia de sonido), mientras que el umbral del dolor está en torno a los 135 dB. Se considera que un cambio de 1 dB es apenas perceptible, mientras que uno de 5 dB es claramente identificable. La tabla 1 muestra el SPL de diferentes fuentes sonoras típicas, además de una valoración subjetiva del nivel.

FUENTE SONORA	NIVEL DE PRESIÓN SONORA SPL (dB)	VALORACIÓN SUBJETIVA DEL NIVEL
Despegue avión (a 60 m)	120	Muy elevado
Edificio en construcción	110	Elevado
Martillo neumático	100	
Camión pesado (a 15 m)	90	
Calle (ciudad)	80	Moderado
Interior automóvil	70	
Conversación normal (a 1 m)	60	
Oficina, aula	50	Bajo
Sala de estar	40	
Dormitorio (noche)	30	
Estudio de radiodifusión	20	

Tabla 1. Niveles de presión sonora correspondientes a sonidos y ruidos típicos, y valoración subjetiva asociada. Fuente: (Carrión Isbert, 1998), *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*.

- Ruido de fondo y curvas NC

El ruido de fondo engloba aquellos sonidos no deseados que están presentes en un entorno, como el tráfico, las conversaciones ajenas o el uso de maquinaria. Para valorar estos sonidos se emplean las curvas NC (Noise Criteria), que permiten clasificar el ruido en espacios interiores. Estas curvas se basan en mediciones de SPL en bandas de frecuencia que oscilan entre los 63 Hz y los 8.000 Hz. Un espacio se considera aceptable acústicamente si los niveles de ruido registrados no sobrepasan la curva NC recomendada para su uso específico. La tabla 2 muestra las curvas NC recomendadas para diferentes recintos.

Kraakhuis: de hospital a música, rehabilitación y acústica variable.

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

Tabla 2. Curvas NC recomendadas y niveles de ruido de fondo equivalentes (en dBA). Fuente: (Carrión Isbert, 1998), Diseño acústico de espacios arquitectónicos.

- Tiempo de reverberación (RT)

El tiempo de reverberación es el periodo necesario para que el sonido disminuya 60 dB una vez que la fuente sonora se detiene. Se calcula con la fórmula de Sabine:

$$RT = 0,161 \frac{v}{A_{Tot}}$$

Donde:

- RT es el tiempo de reverberación (en segundos).
- V representa el volumen del espacio (en m³).
- A_{tot} es la absorción total del recinto.

La capacidad de absorción de un material se mide con el coeficiente α , que toma valores entre 0 (totalmente reflectante) y 1 (totalmente absorbente). Este valor depende de la naturaleza del material y la frecuencia.

Los valores óptimos de RT varían en función del uso del espacio. Las salas dedicadas a la palabra necesitan un RT bajo, mientras que los auditorios para música suelen requerir un RT mayor. Siendo RT_{mid} la media de los tiempos de reverberación a 500 y 100 Hz. En la tabla 3 se ven diferentes rangos de RT_{mid} asociados a tipos de salas.

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 3. Márgenes de valores recomendados de RT_{mid} en función del tipo de sala (recintos ocupados). (Carrión Isbert, 1998), Diseño acústico de espacios arquitectónicos.

- Claridad musical (C80)

La claridad se refiere a la proporción entre la energía que llega en los primeros 80 milisegundos tras el sonido directo, y la energía que llega posteriormente. Valores altos indican claridad y definición sonora, adecuados para salas de concierto; mientras que los valores bajos resultan apropiados para espacios con acústica envolvente, como iglesias.

$$C80 = \frac{\text{Energía sonora} < 80ms}{\text{Energía sonora} > 80ms}$$

Los C80 no son valores independientes, sino que están muy relacionados con el tiempo de reverberación (RT). En la figura se observa valores de C80 para salas de conciertos vacías y valores RT para salas llenas, apreciándose que son inversamente proporcionales, a mayor RT menor C80.

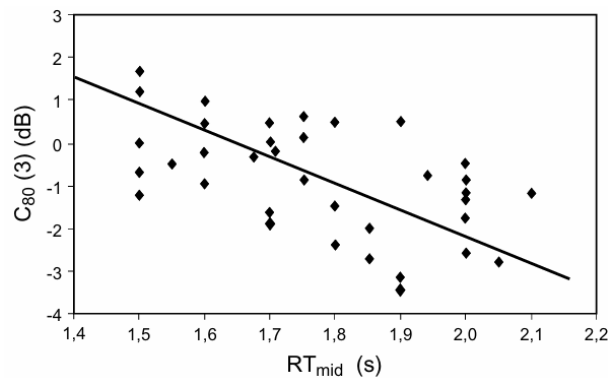


Figura 2. Valores C80 (sala vacía) y RT (sala llena) (según Beranek). Fuente: (Carrión Isbert, 1998); Diseño acústico de espacios arquitectónicos.

El valor recomendado varía según el autor, pero puede tomarse el margen válido para música sinfónica de:

$$-2dB \leq C80 \leq 2dB \quad \text{Sala ocupada}$$

$$-4dB \leq C80 \leq 0dB \quad \text{Sala vacía}$$

Algunos autores aceptan valores de hasta +4dB.

La claridad musical depende de la reverberación de la sala, del patrón de reflexiones que llega al receptor, y de la interpretación y calidad de los músicos.

- Inteligibilidad del habla (STI)

El STI mide la comprensión del habla en un espacio. Su valor oscila entre 0 (incomprensible) y 1 (perfectamente inteligible). Está condicionado por el tiempo de reverberación, el ruido de fondo y la relación entre consonantes y frecuencias altas. Para que el STI no se vea alterado, el ruido debe estar al menos 12 dB por debajo del SPL general.

Tabla 4. Relación entre %ALCons, STI/RASTI y la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad. Fuente: (Carrión Isbert, 1998), Diseño acústico de espacios arquitectónicos.

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

La relación entre STI y la pérdida de articulación (%ALCons) permite clasificar la inteligibilidad en escalas subjetivas de calidad.

- Propagación, reflexión y reverberación

Cuando una fuente emite sonido dentro de un espacio cerrado, se produce una onda que se propaga en todas direcciones. El oyente percibe tanto el sonido directo como el reflejado. Este último depende de las características del recinto y de las superficies. La reflexión depende de la textura, forma y dureza del material, así como del ángulo de incidencia.

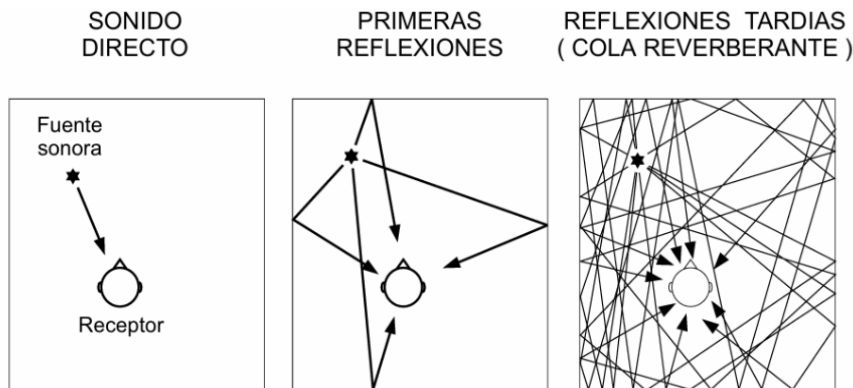


Figura 3. Esquemas reflexión del sonido en diferentes fases. Fuente: (Carrión Isbert, 1998), Diseño acústico de espacios arquitectónicos.

Un ecograma es la representación gráfica de estas reflexiones, ordenadas por su SPL. Se distinguen tres zonas: sonido directo, primeras reflexiones y reflexiones tardías (cola reverberante).

En espacios abiertos o semiabiertos, predomina el sonido directo, ya que no existen muchas superficies que provoquen reflexiones. En estos casos, la presión sonora disminuye 6 dB cada vez que se duplica la distancia a la fuente.

- Absorción del sonido

La absorción del sonido es el fenómeno mediante el cual parte de la energía acústica de una onda sonora se disipa al incidir sobre una superficie, en lugar de reflejarse. Esta energía absorbida se transforma en otras formas, como calor, contribuyendo así a reducir la reverberación dentro de un recinto.

En espacios cerrados, este proceso es fundamental para mejorar la calidad acústica, ya que permite controlar el tiempo de reverberación y evitar fenómenos indeseados como ecos flotantes o acumulaciones de energía en determinadas frecuencias.

La capacidad de absorción de un material o elemento se mide mediante un coeficiente de absorción, que varía entre 0 (superficie totalmente reflectante) y 1 (superficie totalmente absorbente). Este coeficiente se determina en condiciones controladas en cámara reverberante siguiendo la norma (UNE-EN ISO 354, 2004) y evaluados conforme a la norma (UNE-EN ISO 11654, 1998). Para la determinación de la absorción acústica para incidencia normal en muestras más pequeñas puede usarse el tubo de Kundt o de impedancia conforme a las normas (UNE-EN ISO 10534-1, 2002) (UNE-EN ISO 10534-2, 2024).

Es importante distinguir que la absorción no depende únicamente del tipo de material, sino también de su forma, grosor, porosidad, tortuosidad, de la forma de anclaje a los paramentos, de la existencia o no de una cámara en su trasdós y del espesor de ésta. Además, elementos como el público, las butacas o incluso el aire pueden aportar también efectos absorbentes, dependiendo de sus características.

En la figura 4 se observa el proceso de disipación de la energía en un material poroso, la representación es gráfica y simplificada.

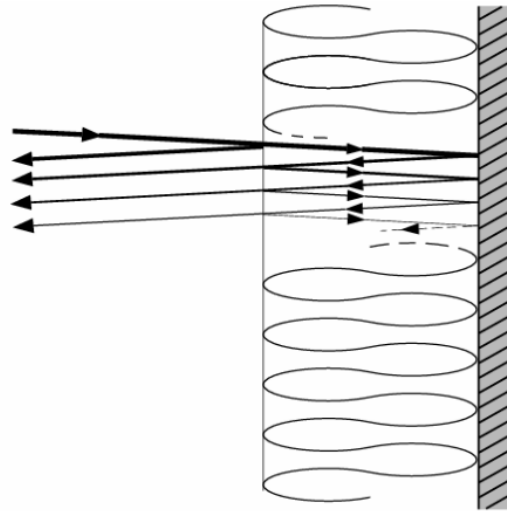


Figura 4. Proceso de disipación de la energía en el interior de un material poroso frente a una pared rígida. Fuente: (Carrión Isbert, 1998), Diseño acústico de espacios arquitectónicos.

Reflexión y difusión del sonido

Para calcular el ecograma de un punto se suele considerar una reflexión especular del sonido, similar a la luz. Para que esta sea significativa, la superficie debe ser grande, lisa y poco absorbente.

Si la superficie es demasiado pequeña respecto a la longitud de onda, el sonido la rodea mediante difracción. Si, por el contrario, presenta irregularidades proporcionales a la longitud de onda, se produce una difusión que dispersa el sonido en varias direcciones.

Los programas de simulación acústica tienen en cuenta estos fenómenos para representar fielmente el comportamiento del sonido en los espacios arquitectónicos.

Kraakhuis: de hospital a música, rehabilitación y acústica variable.

2. ELEMENTOS DE ACÚSTICA VARIABLE

2. Elementos de acústica variable

Los elementos de acústica variable son aquellos se colocan en un recinto con el fin de modificar sus propiedades acústicas. A diferencia de una sala diseñada con una acústica fija, los espacios con elementos de acústica variable pueden configurar el mismo lugar para que pueda ofrecer características sonoras diferentes según las necesidades del momento.

La acústica variable favorece la versatilidad que es especialmente valiosa en espacios polivalentes como auditorios, teatros, salas de conciertos, centros, donde los actos pueden ir desde música hasta teatro hablado, pasando por conferencias.

A lo largo de los siglos, la acústica de los recintos ha experimentado una evolución significativa, impulsada inicialmente por la observación empírica. Desde la antigüedad, arquitectos y constructores han ido afinando las condiciones acústicas de los espacios, muchas veces sin conocer en profundidad los principios físicos que intervenían, ya que en algunos teatros de la antigüedad y del Renacimiento se realizaban cambios físicos como cortinas, tapices y decoraciones móviles, aunque sin una comprensión técnica profunda, ni una intención claramente analítica.

Es importante recalcar que la acústica es una ciencia joven que nace a mediados del siglo XIX, cuando Wallace Clement Sabine (1868–1919), un físico estadounidense, llevó a cabo investigaciones pioneras sobre el comportamiento del sonido en recintos cerrados en la Universidad de Harvard. Desde entonces, el desarrollo de la física acústica y las matemáticas ha permitido comprender y modelar el comportamiento del sonido en los espacios arquitectónicos.

Durante las décadas de 1950–1960 nace la acústica variable moderna y se realizan las primeras implementaciones intencionadas y diseñadas. La idea de usar elementos de acústica variable se consolida en los años 1970 y 80. En la actualidad en el diseño de salas polivalentes, salas de conciertos, teatros y auditorios, se busca una alta flexibilidad acústica sin comprometer la calidad sonora para usos específicos. Los elementos típicos de acústica variable son: Se materiales absorbentes móviles, reflectores acústicos ajustables, cámaras reverberantes y tecnología electroacústica de refuerzo y simulación sonora.

Donde se profundizará en este trabajo será en el contexto de la rehabilitación arquitectónica, los elementos de acústica variable adquieren importancia. Muchos edificios históricos que se reutilizan para la música u otras artes escénicas no fueron concebidos con las exigencias acústicas necesarias. Por lo tanto, su adaptación si requiere ser lo más respetuosa posible con la arquitectura del lugar, deberá contar con soluciones discretas, reversibles y respetuosas. En estos casos, los sistemas de acústica variable permiten intervenir sobre la respuesta sonora del espacio sin necesidad de alterar sustancialmente su arquitectura.

Existen diferentes elementos, ahora se expondrán los más utilizados y relevantes para este trabajo, ya que, pueden utilizarse con facilidad en rehabilitaciones. Destacan 3 medidas:

1. Medidas destinadas a modificar la absorción acústica de la sala
2. Medidas destinadas a modificar el volumen de la sala
3. Uso de cámaras reverberantes en la sala

Este trabajo no va a centrarse en los sistemas electrónicos de acústica variable.

Modificación de la absorción acústica

- Paneles absorbentes

Los paneles acústicos móviles son superficies rígidas que principalmente se usan para reducir la reflexión del sonido, disminuyendo si el tiempo de reverberación y mejorando la claridad.

Se suelen fabricar con diferentes materiales porosos como lana mineral, espuma acústica o tejidos tensados. Estos materiales se integran en paneles que recogerse o desplegarse en función de si se desea aumentar la absorción para reducir la reverberación o mantener el carácter reflectante de las superficies para conseguir llevar el sonido a toda la sala.

Un ejemplo de este tipo de soluciones es el Auditorio Calzedonia, situado en la sede de la empresa en Dossobuono di Villafranca, Italia. Fue diseñado como un espacio multifuncional, este auditorio fue concebido para acoger desde conciertos o representaciones teatrales hasta proyecciones de cine o desfiles de moda, lo que exigía una gran versatilidad acústica.

Como respuesta a esta exigencia, el proyecto incorporó múltiples soluciones de acústica variable, entre ellas paneles pivotantes motorizados distribuidos en las paredes de la sala (véase en la figura 5). Estos paneles están formados por lamas giratorias con una cara reflectante y otra absorbente, lo que permite modificar la respuesta acústica del espacio de forma rápida y silenciosa, incluso durante un evento.



Figura 5. Detalle de los paneles y fotografía interior Auditorio Calzedonia. Fuente revista (Cairolí, 2018).

Kraakhuis: de hospital a música, rehabilitación y acústica variable.

Además de los paneles, el auditorio cuenta con otros sistemas como cortinas motorizadas, asientos móviles acolchados diseñados para simular la presencia del público, aunque la sala este vacía, y revestimientos absorbentes fijos en, con coeficientes de absorción que varían entre 0.20 y 0.98. Todos estos elementos logran llegar a tiempos de reverberación entre 0.9 y 1.6 segundos según la configuración. Estos datos se ven reflejados en La tabla 4 es la de ALcons y STI. Si haces referencia a una tabla de un artículo de Applied acoustics, pon Estos datos se ven reflejados en la tabla 4 del artículo de Cairoli et al, publicado en 2018 en la revista Applied Acoustics (Cairoli, 2018, pág. 174).

- Cortinas y tejidos

Uno de los sistemas más habituales es el uso de cortinas fabricadas con materiales absorbentes o reflectantes que se colocan en los perímetros de la sala o entre estructuras verticales. Pueden recogerse o desplegarse según se desee, aumentando la absorción y así reduciendo la reverberación o mantener el carácter reflectante de las superficies y que el sonido llegue a diferentes puntos de la sala.

Este recurso es especialmente útil en salas donde se alternan eventos hablados con conciertos musicales. Además, tiene la ventaja de ser económico, discreto y reversible, algo esencial en espacios rehabilitados.

Un ejemplo claro de esta práctica sería el caso práctico que se analizará posteriormente en este trabajo, este es Kraakhuis. En resumen, es antiguo hospital rehabilitado en sala de conciertos cuenta con una bóveda de gran altura, esto genera mucha reverberación ya que el sonido se queda muerto en la parte superior. Como se observa en la figura 6.

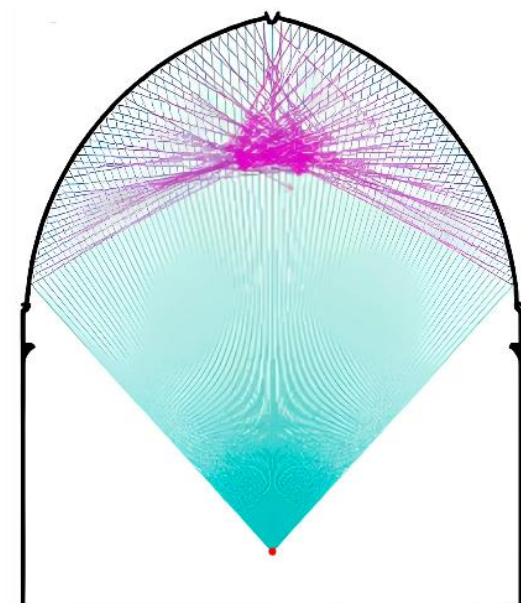


Figura 6. Sección de una simulación acústica de la sala Kraakhuis 2008. Fuente: Artículo de Academia.eu, Creative Possibilities and Limitations of Curved Surfaces in the Acoustic Design of Contempo, (Wulfrank, 2017, pág. 8).

Figura 7. Imagen interior de la sala Kraakhuis. Fuente: (Kahle Acoustics, s.f.)

Se optó como solución incorporar una cortina (figura 7) que colgase desde la punta de la bóveda con hasta 6 metros de longitud, así absorbiendo ese sonido y reduciendo la reverberación. A su vez, pudiendo modificar la altura para contar la reverberación deseada.

- Sillas y butacas

En las salas de espectáculos, las butacas juegan un papel importante en la acústica del recinto, especialmente en relación con el tiempo de reverberación. Para evitar que las condiciones acústicas cambien drásticamente entre un aforo lleno y una sala vacía, muchas butacas se diseñan con materiales que aumentan la absorción, incluso cuando no están ocupadas.

Este tipo de mobiliario suele incorporar espumas, tapizados porosos o cámaras de aire que permiten mantener una buena absorción. En algunas salas, incluso se instalan asientos que se ocultan y aparecen para controlar los niveles de acústica según se necesite.

Este enfoque permite garantizar una buena respuesta sonora en ensayos, grabaciones, funciones de aforo reducido o representaciones completas, sin necesidad de modificar otros elementos arquitectónicos.

Modificación del volumen

- Techos móviles

Una de las estrategias más eficaces en acústica variable consiste en modificar el volumen del recinto para alterar su comportamiento sonoro. El volumen de una sala está relacionado con el tiempo de reverberación (RT), a mayor volumen, mayor capacidad del espacio para almacenar energía sonora, por tanto, mayor reverberación. Reducir o aumentar el volumen útil de la sala permite ajustar este parámetro clave sin necesidad de modificar de forma permanente la arquitectura.

Esto se consigue a través de techos móviles, suelen consistir en plataformas motorizadas, paneles suspendidos o estructuras modulares que cambian la altura total de la sala. De esta manera se puede aumentar o disminuir la altura de la sala según se desee, controlando la acústica.

Un ejemplo destacado en este sentido es el IRCAM (Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique), situado bajo el Centro Pompidou en París, proyectado por Renzo Piano y Richard Rogers, fue concebido como un laboratorio acústico multifuncional. Ubicado en la planta sótano como se ve en la figura 8.

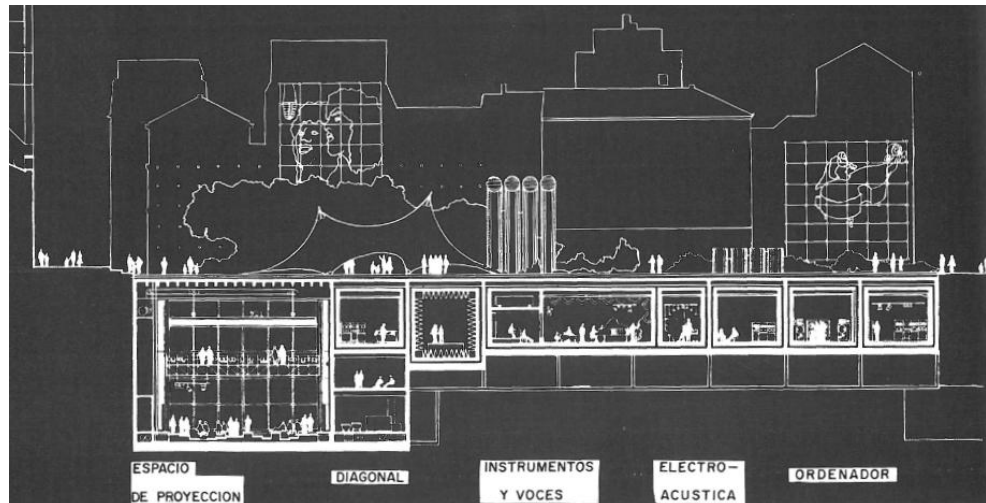


Figura 8. Sección sala Ircam, Centro Pompidou, Piano y Rogers. Fuente: Artículo revista. Ircam, Centro Pompidou París - Francia. (CSIC, 1979, pág. 10)

La sala IRCAM, como se puede ver en la figura 9, incorpora un conjunto de elementos móviles en el techo, combinados con cortinas y paneles rotatorios de sección triangular en paredes. El volumen del recinto varía al desplegar o retraer masas suspendidas en el techo. En el artículo *-Variable Acoustics in performance venues-* se afirma *"The reverberation times of this facility could be extended up to 4 s along with its*

Kraakhuis: de hospital a música, rehabilitación y acústica variable.

variability in room volume and shortened below 1 second" (Hyon & Jeong, 2021, pág. 628). Es decir, la reverberación es ajustable entre 4 y 1 segundos ofreciendo una acústica controlada y adaptable para cualquier actuación en vivo.

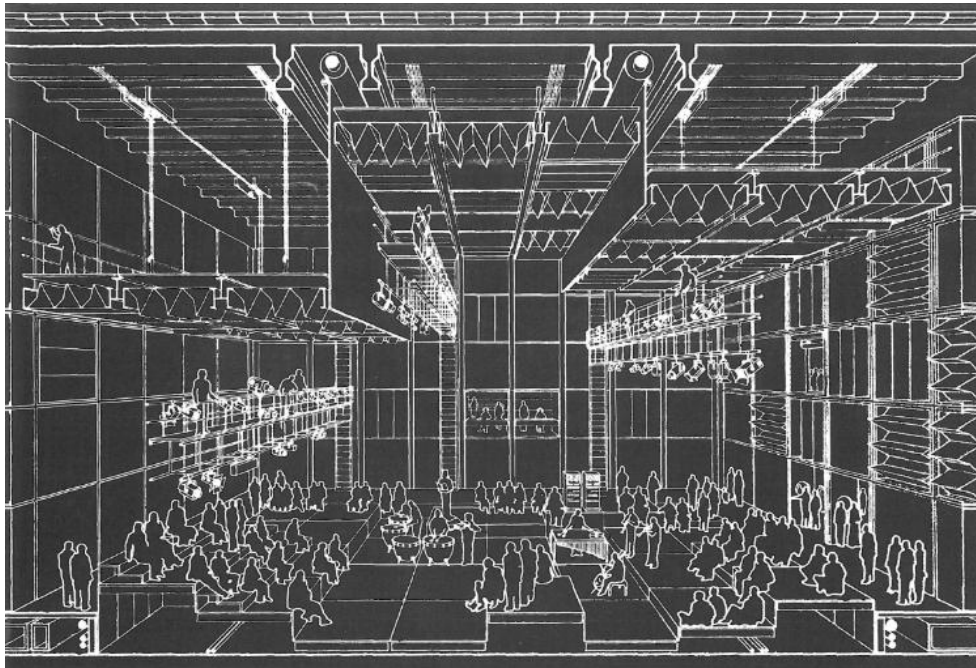


Figura 9. Dibujo en perspectiva sala Ircam, Centro Pompidou, Piano y Rogers. Fuente: Artículo revista. Ircam, Centro Pompidou Paris - Francia (CSIC, 1979, pág. 10).

También es de destacar los paneles de absorción de sección triangular que hay cubriendo toda la sala. Estas rotaciones se realizan mediante motores silenciosos, lo que permite modificar la reflexión del sonido incluso durante una actuación sin generar ruidos mecánicos. En la figura 10 se aprecia como la posición de estos paneles afecta en la difusión del sonido.

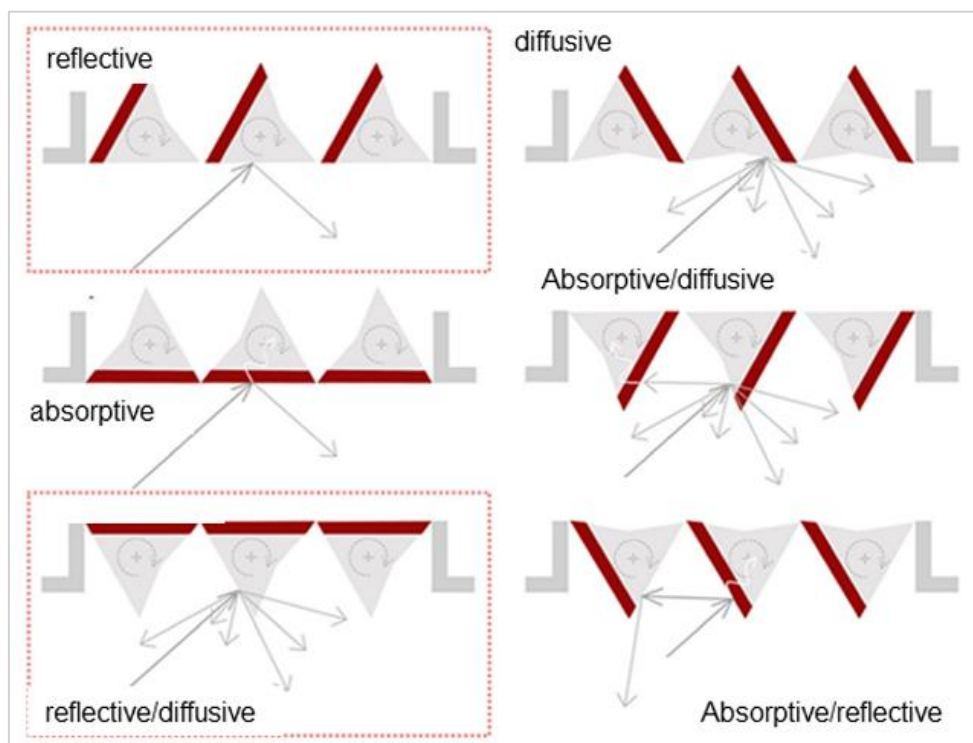


Figura 10. Dibujo de las diferentes posiciones de un panel de la sala IRCAM. Fuente *Variable Acoustics in performance venues- A review* (Hyon & Jeong, 2021, pág. 629).

Cámaras reverberantes

Las cámaras reverberantes son volúmenes arquitectónicos anexos a una sala principal, que pueden acoplarse o desacoplarse acústicamente mediante elementos móviles como compuertas o paneles. Su función es modificar las condiciones acústicas de una sala, principalmente el tiempo de reverberación, sin alterar la geometría ni los materiales de la sala principal.

El principio acústico de las cámaras reverberantes se basa en el concepto de volumen acoplado. Cuando estas cámaras están abiertas, permiten que parte de la energía sonora generada en la sala principal penetre y se refleje dentro de ellas, aumentando así el tiempo de reverberación global del espacio. Cuando están cerradas, la sala mantiene un carácter acústico más seco y controlado. Esto permite ajustar la acústica del recinto para diferentes usos como conciertos sinfónicos, música de cámara, ópera o palabra hablada, sin modificar físicamente el espacio principal.

La eficiencia de este sistema depende de la relación entre el volumen de la sala principal y el de la cámara, del grado de absorción que presentan ambos espacios, así como del tamaño y la cantidad de aperturas que los conectan.

Existen un número creciente de salas que utilizan este concepto entre ellas el Symphony Hall, Birmingham, Reino Unido. Alberga actuaciones de música de cámara hasta interpretaciones de órgano. Dispone de una cámara en forma de U que rodea la parte trasera del escenario y se extiende verticalmente por los laterales. El tamaño de la cámara es considerable, como se afirma en *-Variable Acoustics in performance venues-* *"which amounts to 50 % of the hall's volume [...] The U-shaped reverberation chamber area has a volume of 12,700 m³."* (Hyon & Jeong, 2021, pág. 633). Es decir, ocupa un 50 % del auditorio con 12.700 m³ de volumen.

Esto permite una variación significativa del tiempo de reverberación. Las compuertas que las comunican con la sala principal pueden abrirse o cerrarse remotamente, permitiendo adaptar la acústica a diferentes géneros musicales. Se aprecia en la figura 11 en los huecos que hay en la parte superior del escenario.



Figura 11. Fotografía interior y cámara de reverberación escenario Symphony Hall. Birmingham, Reino Unido. Fuente: revista *Variable Acoustics in performance venues* (Hyon & Jeong, 2021, pág. 633)

Kraakhuis: de hospital a música, rehabilitación y acústica variable.

Además, se combina con otros elementos móviles como un dosel acústico sobre el escenario y paneles absorbentes móviles como se ve en la figura 12, logrando una gran versatilidad sin comprometer la estética ni la funcionalidad del espacio.

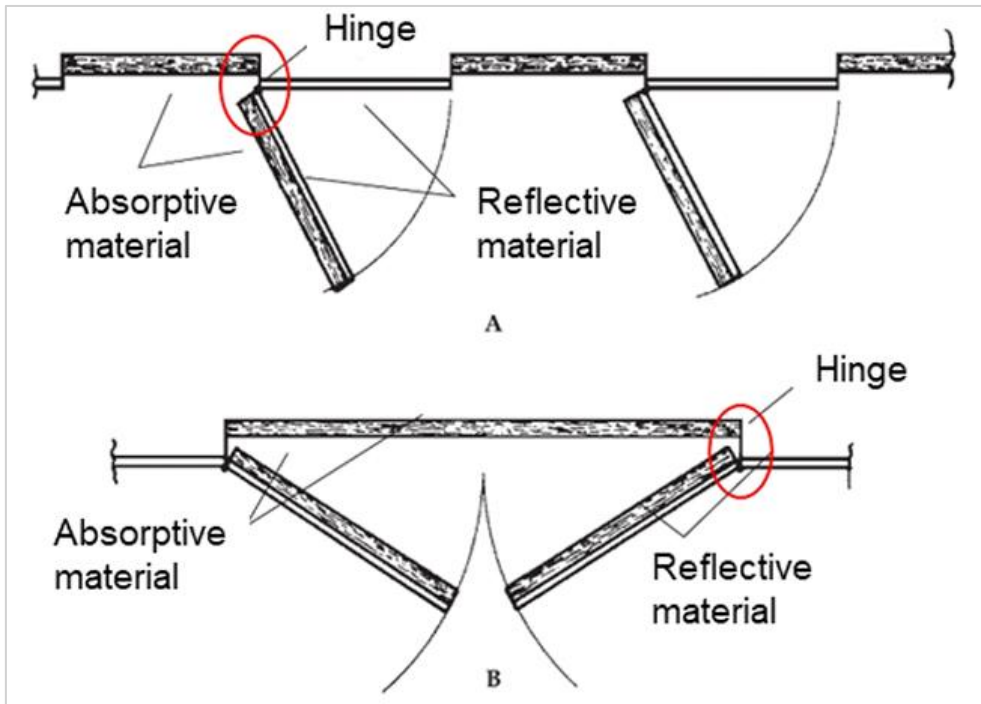


Figura 12. Detalle paneles de absorción del Symphony Hall. Birmingham, Reino Unido. Fuente: revista *Variable Acoustics in performance venues* (Hyon & Jeong, 2021, pág. 629)

3. ESPACIOS REHABILITADOS PARA LA MÚSICA

3. Espacios rehabilitados para la música

Introducción y contexto

Como se comentó al principio del trabajo, en la actualidad, el número de artistas y grupos musicales en activo no deja de crecer, lo que ha generado una mayor demanda por parte del público de vivir la música en directo. Asistir a conciertos, ha pasado de ser un entretenimiento para ver a algunos de tus artistas favoritos, a una necesidad social para el público.

Sin embargo, este aumento en la demanda contrasta con una oferta limitada de espacios adecuados para la música en vivo, especialmente en lo que respecta a salas de tamaño medio, tan necesarios para artistas emergentes, giras independientes o formatos más íntimos. En el artículo “Barcelona: alerta conciertos” de la Vanguardia (Lozano, 2023), se ve que ciudades como Barcelona han evidenciado una escasez de este tipo de infraestructuras, lo que dificulta la programación de conciertos y afecta negativamente al desarrollo de artistas emergentes.

Ante esta situación, la rehabilitación de espacios existentes para uso musical se presenta como una solución necesaria y sostenible. Intervenir dentro del marco urbano dando una segunda vida a edificios en desuso no solo responde a la creciente demanda de música en directo, sino que también contribuye a la revitalización de barrios y al fortalecimiento del tejido cultural local.

En este escenario, España tiene por delante el reto de implementar estrategias más decididas y valientes para facilitar estas rehabilitaciones. No se trata solo de imitar modelos de fuera, sino de adaptarlos a nuestro contexto, a nuestra manera de vivir y de hacer ciudad.

Se quiere tratar el tema de la música porque es el arte más demandado actualmente de la sociedad, pero es importante recalcar que hoy en día un auditorio no solo acoge conciertos, también se convierte en escenario para conferencias, funciones de teatro, cine o encuentros comunitarios. Se busca un espacio polivalente ya sea por motivaciones económica o por una cuestión cultural para abarcar los gustos de la sociedad.

Edificios susceptibles de rehabilitación musical

Transformar un edificio en desuso en un lugar donde suene la música, donde la gente se junte a compartir emociones, no es solo una buena idea: es una necesidad que se siente urgente. La verdad es que reconvertir espacios ya construidos no solo ayuda a reducir el impacto ambiental, también nos permite darles una segunda vida a rincones de la ciudad que, por momentos, parecían olvidados. Ahora bien, no todo edificio es apto para convertirse en sala de conciertos. Elegir bien cuál rehabilitar implica mirar diversos factores arquitectónicos y urbanísticos como su forma, su historia o su entorno entre otros.

- Naves industriales y fábricas

Estos espacios suelen ofrecer metros cuadrados de sobra y techos generosos, lo que se agradece cuando se quiere montar un escenario, un graderío, o simplemente dejar que el sonido respire.

Sin embargo, como a la mayor parte de estos edificios tendrán problemas acústicos, grandes reverberaciones, distribución desigual del sonido y más que probable un mal acondicionamiento acústico que en edificios diseñados desde su origen para la música, esto puede llegar a ser un serio problema.

Un ejemplo es Kraftwerk, Berlín, Alemania. Una antigua fábrica industrial construida entre los años 1960 y 1964 que servía de motor térmico de los ciudadanos Berlineses. En el 2005 el edificio se renovó donde se realizan exposiciones y eventos. Y como otros lugares de Berlín donde es muy común esta práctica se utiliza este espacio para música tecno (figura 14), el espacio industrial (figura 13), oscuro va muy ligado con esta cultura.

Figura 13. Fotografía interior, sala vacía, Kraftwerk, Berlín, Alemania. Fuente: visit Berlin. (Visit Berlin, s.f.).



Figura 14. Fotografía interior sala llena, Kraftwerk, Berlín, Alemania. Fuente: visit Berlin. (Visit Berlin, s.f.).



Kraakhuis: de hospital a música, rehabilitación y acústica variable.

- Iglesias o centros religiosos

Estos espacios como las naves industriales generalmente ofrecen grandes superficies y alturas para albergar a personas, a esto se le suma una acústica natural impresionante que favorece a ciertos estilos musicales que cierta reverberación les beneficia como es la música clásica. A parte que la arquitectura se estos lugares suelen ser muy interesante y favorece la experiencia a disfrutar.

Aunque esta reverberación pueda ser buena para unos géneros musicales, para otros puede generar una mala claridad musical y para eventos hablados mucha reverberación.

Un ejemplo cercano es el Bilborock, una antigua iglesia jesuita desacralizada (figura 15) situada en el corazón de San Francisco y Bilbo Zaharra, y mirando a la ría. En 1997 se inaugura un espacio para la cultura (figura 16) que se ha convertido en un pilar de las artes en Bilbao, donde jóvenes artistas tienen la oportunidad de crecer. Y todo esto es posible gracias a revivir un lugar que había quedado muerto en el centro de la ciudad y transformarlo en un lugar para la música.



Figura 15. Fotografía exterior Bilborock, Bilbao, España. Fuente: elaboración propia, 21/02/2024.

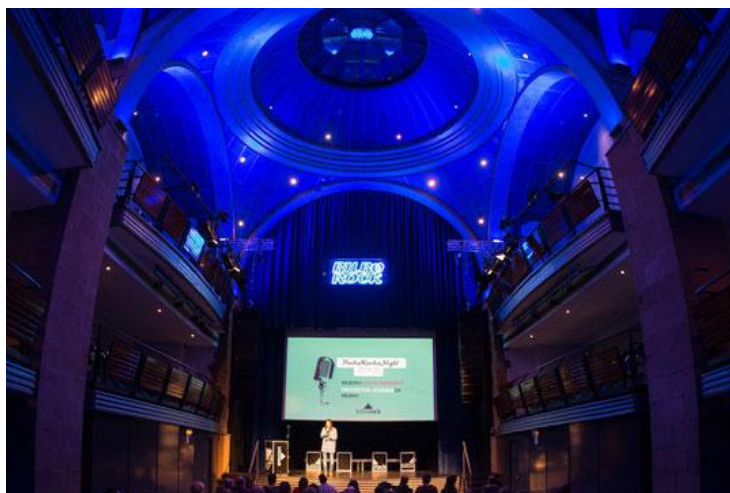


Figura 16. Fotografía interior Bilborock, Bilbao, España. Fuente: kulturklik (kulturklik, 2022).

- Mercados y grandes almacenes

Estos espacios al igual de los anteriores tienen una gran superficie diáfanas, techos altos y estructuras sólidas que permiten albergar a mucha gente. El punto a favor de estos edificios es que guardan más relación con un espacio musical que los otros, ya que son lugares de ocio y seguirán siéndolo, se seguirán juntando gente por voluntad.

Un ejemplo podría ser la sala Zentral, Pamplona, Navarra, una parte del Mercado de Santo domingo de Pamplona. Un mercado del 1876 conformado por cuatro espacios con dos plantas dejan en el entro un gran patio central cuadrado con un lucernario (figura 17), pues en uno de estos espacios laterales se elimina una planta y se deja un espacio de doble altura para albergar eventos musicales.

Además, este edificio este situado en el centro de Pamplona y es el mercado de la ciudad siendo uno de los lugares más frecuentados durante el día. Por lo que añadir una sala de conciertos en este lugar hace que se mantenga la ciudad viva día y noche.



Figura 17. Fotografía interior Mercado de Santo Domingo. Fuente: Atrapa el norte (Atrapa el Norte, s.f.).



Figura 18. Fotografía interior de la sala Zentral. Fuente: elaboración propia 20/02/2025.

Pero hay que puntualizar que esta intervención no es la más interesante (figura 18), viendo la arquitectura llamativa del mercado, entrar en esa sala la cual se convierte una caja de zapatos negra, se siente más como una discoteca que un mercado rehabilitado.

Kraakhuis: de hospital a música, rehabilitación y acústica variable.

Diagnóstico

A través de esta parte del trabajo se han enseñado diferentes casos que confirman de la posibilidad y efectividad hacer rehabilitaciones musicales en edificios en el marco urbano. A su vez se ha observado que por su forma arquitectónica puede ser beneficioso para la acústica, pero a su vez perjudicial Como en el caso de la Sala Zentran donde recurrieron a una solución en la que modifican la arquitectura, empeorando el edificio existente.

Por ello la incorporación de elementos de acústica variable puede mejorar significativamente las condiciones acústicas de edificios preexistentes, permitiendo una mayor flexibilidad acústica y respetando la arquitectura original del lugar.

Habiendo detectado esta última solución como la más favorable se ha determinado un caso de estudio con estas características, un edificio que es capaz de intervenir en un edificio, mejorando significativamente la acústica y respetando la arquitectura inicial.

4. CASO DE ESTUDIO: KRAAKHUIS

4. Caso de estudio: KRAAKHUIS

Un antiguo hospital rehabilitado en sala de conciertos. Kraakhuis es una sala perteneciente al complejo de conciertos Bijloke, Gante, Bélgica. Alberga conciertos de de todo tipo gracias a su versatilidad acústica, con una geometría sencilla pero interesante, una bóveda de 10,20 metros de ancho y 12 metros de alto que se prolonga 24,80 metros de longitud, datos sacados de (De Bijloke Muziekcentrum, 2024, pág. 6).

Contexto histórico

De Bijloke se construyó a principios del siglo XIII como un pequeño hospital (figura 19) en el centro de Gante. Solo contaba con una sala llamada “la abadía” (figura 20) la cual no daba abasto para abastecer a toda la ciudad de Gante por lo que en 1228 se hizo una gran ampliación.



Figura 19. Dibujo De Bijloke. Fuente: (De Bijloke Congress & events, s.f.)

Figura 20. Fotografía interior sala de la Abadía, Bijloke. Fuente: (De Bijloke Congress & events, s.f.)

Esta ampliación posicionó a De Bijloke como el hospital más grande de Europa en su momento. El edificio principal sería el que ahora corresponde al escenario principal, conocido como el Concert Hall, pero en su época albergaba cientos de enfermos bajo esa gigante estructura de madera como se ve en la figura 21. Más tarde en 1511 se construye una segunda enfermería especializada para enfermos muy graves, en la figura 22 se ve una imagen de cuando el hospital seguía en uso.

Figura 22. Fotografía interior Concert Hall cuando aún era hospital.
Fuente: (De Bijloke Congress & events, s.f.).

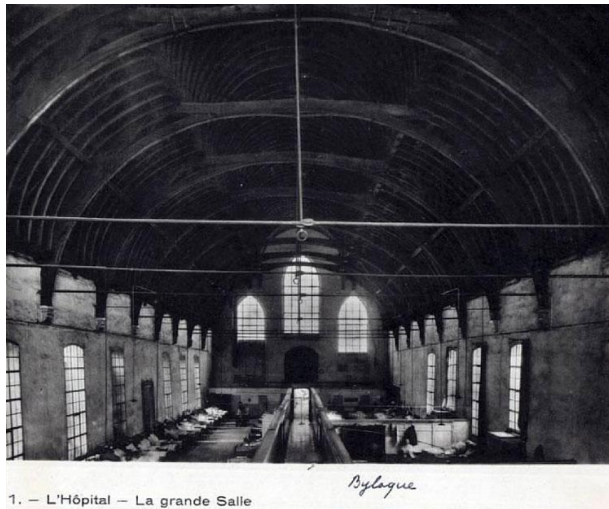


Figura 21. Fotografía interior Kraakhuis cuando aún era hospital.
Fuente: (De Bijloke Congress & events, s.f.).

En la segunda mitad del siglo XX, el sector sanitario se profesionalizó por completo en Bélgica, por lo que los antiguos edificios dejaron de ser aptos para su función. La universidad construyó un nuevo hospital y albergó allí el departamento de formación médica y las restantes funciones y asistencias médicas fueron trasladadas, perdiendo así De Bijloke toda función funcional e intelectual.

Finalmente, tras años en desuso a finales de los años 90 se empezó la restauración del complejo en un museo, sala de conciertos y centro de eventos. Siendo hoy en día uno de los edificios históricos de la ciudad de Gante que más oferta cultural ofrece a la población.

Análisis técnico

- Descripción del edificio

Como se ha mencionado anteriormente la sala Kraakhuis pertenece al Centro de Conciertos de Bijloke y este pertenece a su vez a un conjunto de edificios de carácter cultural que enriquecen a la ciudad de Gante. Entre estos edificios podemos encontrar edificios universitarios, un museo o una biblioteca, todo esto se ve en la figura 23 que muestra una vista aérea de todo el complejo quedando marcado de rojo la sala Kraakhuis.

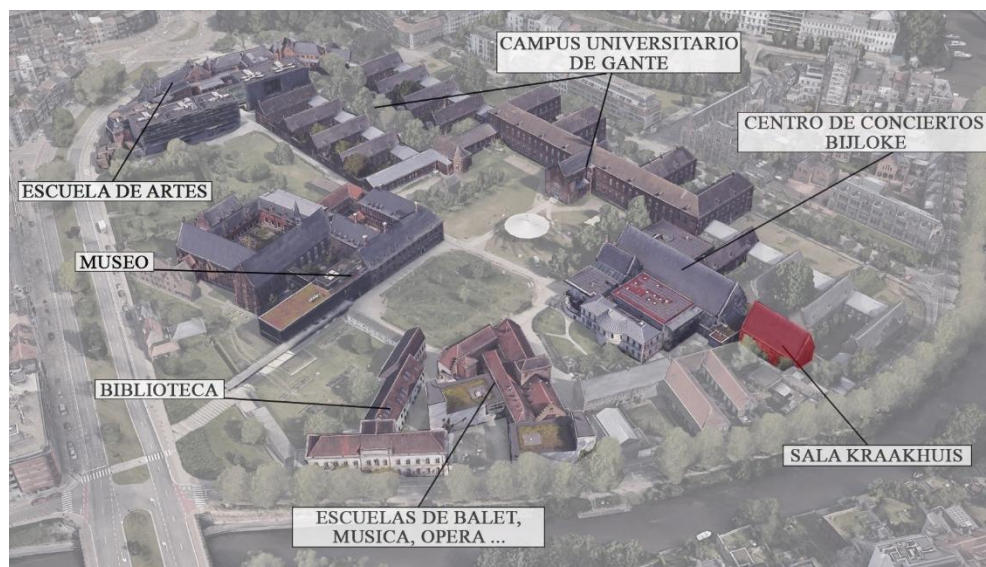


Figura 23. Imagen aérea conjunto de edificios que rodean Kraakhuis.
Fuente: elaboración propia.

Kraakhuis: de hospital a música, rehabilitación y acústica variable.

Como se comentó anteriormente, este edificio se construyó más tarde que el resto, por ello queda como un apéndice separado en la parte trasera. A continuación, se aprecia en rojo en la figura 24. Dentro del complejo de conciertos hay otras salas con diferentes usos como son la sala principal de conciertos, el gabinete o cafetería y un pequeño teatro (figura 24).

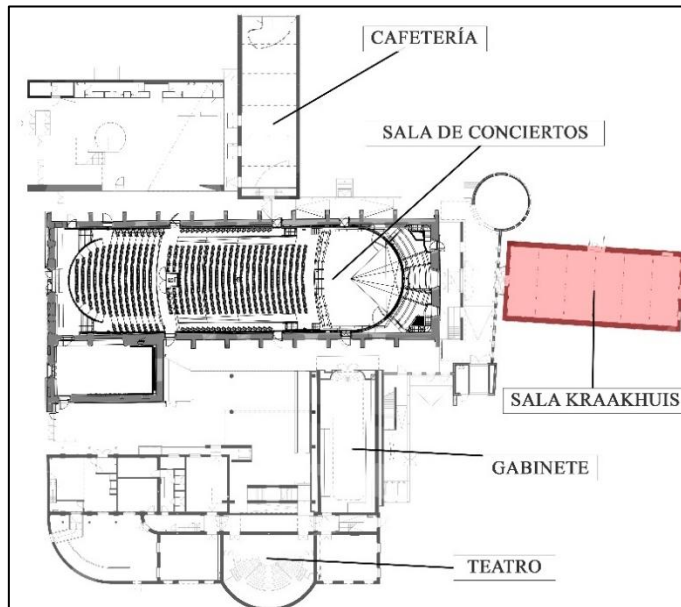


Figura 24. Planta del complejo de conciertos Bijloke, Gante, Bélgica. Marcado en rojo sala Kraakhuis. Fuente: archivo cad proporcionado administración Bijloke. Anotaciones elaboración propia.

Aunque le rehabilitación del complejo comenzase a finales de los años 90, hasta el año 2006 no comenzaron las obras en la sala Kraakhuis (figura 25). El proyecto de arquitectura se le encargó a Oswald Van De Sompe, un arquitecto local, finalizando la rehabilitación en 2008 quedando un proyecto sencillo donde la configuración de sala es diferente a la que hay actualmente como se ve en la figura 26.



Figura 25. Fotografía interior sala Kraakhuis en rehabilitación, 2006. Fuente: (Kahle Acoustics, s.f.)



Figura 26. fotografía interior sala Kraakhuis, 2008. Fuente: (Kahle Acoustics, s.f.)

Pero el trabajo importante vino por parte de la consultora Kahle Acoustics. Prácticamente desde 2006 ya empezaron a plantear el proyecto, Bijloke tenía el deseo de convertirlo en una sala de conciertos, pero no en una cualquiera sino una sala multifuncional. Eso requería un programa muy flexible, y solo se podía lograr eso con la acústica variable. Uno de los aspectos más importantes era, por supuesto, cómo integrar soluciones de acústica variable en un espacio tan histórico. Pero se debía tener en cuenta que es un monumento protegido, lo cual significa que no se puede intervenir de cualquier manera.

Como se ha comentado en este trabajo, la forma tan peculiar de este edificio, una bóveda de gran altura, trae problemas de reverberación, en una superficie cóncava siempre se forma un punto focal. Eso quiere decir que el sonido se refleja y se concentra en un determinado punto. Se realizaron análisis por parte de la consultora, con fuentes sonoras cercanas al suelo, donde vieron que todo el sonido se focalizaba en la parte superior de la zona central de la bóveda del techo. Por lo tanto, se decidió colocar ahí elementos de absorción acústica variable.

Primero se optó por cambiar la distribución de escenario que se ve en la figura 26, ya que, en un espacio alargado el sonido llega más tarde al final de la sala, esta distribución desigual del sonido genera una mala experiencia. Por lo que se optó por situar el escenario en el centro y disponer el graderío en forma de U, como se ve en la figura 27, reduciendo la distancia media y favoreciendo así en gran medida la distribución del sonido. También esto mejora las líneas de visión y una mayor intimidad escénica.



Figura 27. Fotografía interior Kraakhuis, distribución interior, 2011 Fuente: (Kahle Acoustics, s.f.).

El segundo paso fue colocar el elemento de acústica variable. Se instalaron cortinas, que mediante un mecanismo electrónico con un botón se baja automáticamente y permite, en menos de 30 segundos, ajustar el tiempo de reverberación de 1.8-1.9 segundos a 1.3-1.4 segundos. Es decir, medio segundo de margen de adaptación, lo que es una cifra significativamente alta y da idea de la flexibilidad que se puede conseguir con esta medida, ya que permite adaptar este espacio a diferentes tipos de música. Todos estos datos son del video de la web (Acoucou, s.f.). Colocando la cortina justo en la línea central donde está el punto focal, concentrando la absorción acústica en el punto donde se producían las focalizaciones de sonido y de esta manera se consiguió el efecto acústico deseado usando un menor número de metros cuadrados de material absorbente de los que se habrían sido necesarios en otro caso.

Kraakhuis: de hospital a música, rehabilitación y acústica variable.

La cortina se puede ajustar en la posición que se desee, permitiendo así, que la sala se adapte a distinto tipo de eventos. No muy bajada hay una reverberación idónea para música clásica, más abajo lo hace idóneo para actuaciones musicales de todo tipo y bajada del todo es perfecto para la inteligibilidad de la voz y así poder hacer conferencias.



Figura 28. Fotografía cortina extendida de la sala Kraakhuis. Fuente: (Kahle Acoustics, s.f.)

La cortina a su vez juega un papel crucial, consigue integrarse perfectamente en el espacio y no desentona. En la posición que se coloca favorece la dirección longitudinal en la que se distribuye la sala y además se decidió convertirla en una obra de arte. Se le encargó a la artista Ara Stark el diseño (figura 29), no podía pintar directamente sobre la cortina ya que con la pintara tapanía los poros y empeoraría la absorción del material, por lo que se pintó en un lienzo aparte, posteriormente se escanearía la pintura y se imprimiría con impresoras de inyección de tinta de última generación, sobre el terciopelo acústico. Como dato curioso, al tratarse de una sola pieza de tela, se necesitó la impresora más grande del mundo, que está en Dubái.

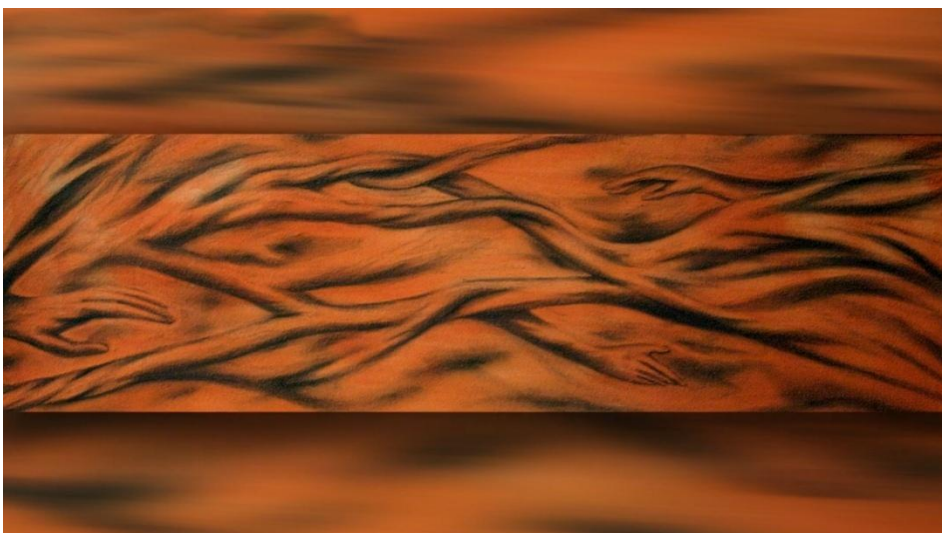


Figura 29. Imagen ilustración cortina de la sala Kraakhuis, diseño de Ara Stark. Fuente: video Kraakhuis (Acoucou, s.f.) (4:11).

Una de las claves en esta rehabilitación el respeto a la arquitectura que precedía. El mecanismo de la cortina tuvo que colocarse encima de la bóveda e integrarse entre toda la estructura de madera como se ve en la figura 30. También se tuvo cuidado con las luces, posándolas sobre una subestructura al principio de la bóveda en vez de incrustarlas en las paredes o el techo. Esto se puede apreciar en la figura 31 en el resultado final de la intervención.

Figura 30. Fotografía del mecanismo motorizado que mueve la cortina. Fuente: video Kraakhuis (Acoucou, s.f.) (5:22).



Figura 31. Imagen interior sala Kraakhuis, 2011. Fuente: (Kahle Acoustics, s.f.)



- Obtención de datos

Para el modelado 3d de la sala para su posterior simulación acústica primero hubo que descubrir que información se tenía disponible. La información era relativamente escasa en lo que planimetría se refiere, ya que, el edificio que más atención se le da es el gran escenario principal con su increíble estructura de madera del techo.

Por ello se tomó la decisión de contactar con el centro de conciertos de Bijloke, quienes sin ningún impedimento proporcionaron el meterail que tenían disponible, que consistía concretamente en un archivo CAD con planimetría de todo el centro de Bijloke como se ve en la figura 32, pero solo plantas, ya que, era un archivo de plantas de evacuación, y la definición de la sala Kraakhuis era muy escasa.

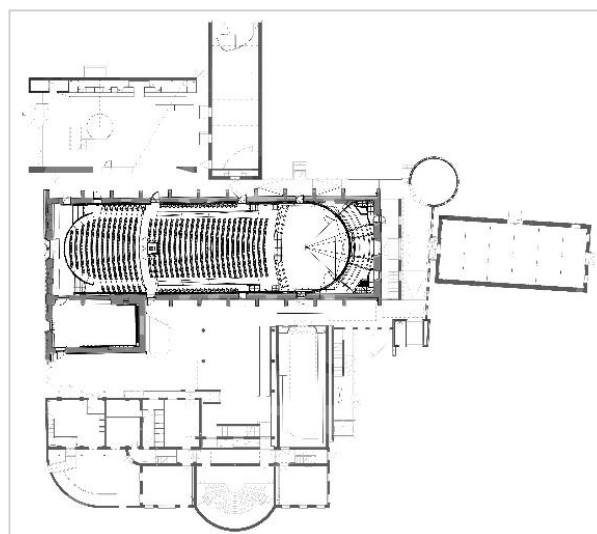


Figura 32. Planta del centro de conciertos de Bijlok. Fuente: archivo cad proporcionado administración Bijloke.

Kraakhuis: de hospital a música, rehabilitación y acústica variable.

Otro archivo que se proporcionó fue una evaluación acústica de 2013 realizado por la consultora acústica que realizó la intervención: Kahle Acoustics (figura 33). Esta evaluación muestra datos sobre la mejor configuración de los asientos para mejorar la acústica de la sala. Lo interesante de este estudio era que había una planta detallada de la sala (Kahle Acoustics, 2013, pág. 7) (figura 34), que se pudo escalar a la planta del archivo CAD y empezar a trabajar.



Figura 33. Portada informe acústico Kraakhuis. Fuente: (Kahle Acoustics, 2013)

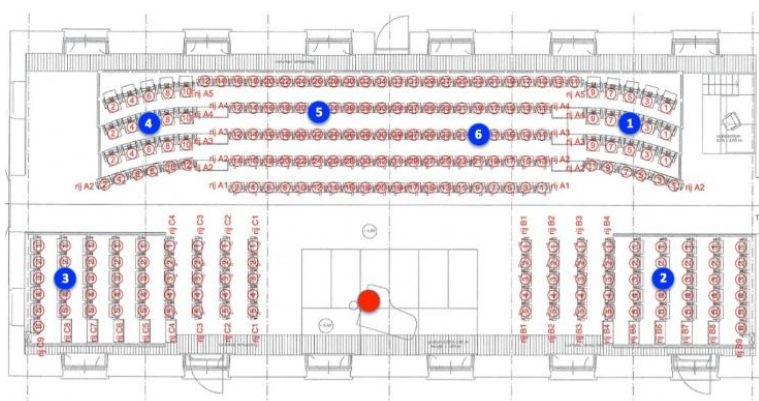


Figura 34. Planta sala Kraakhuis. Fuente: (Kahle Acoustics, 2013, pág. 7)

Por último, gracias a una sección encontrada en artículo “Creative Possibilities and Limitations of Curved Surfaces in the Acoustic Design of Contempo” (Wulfrank, 2017, pág. 8) (figura 35), más la información de la altura de la sala en la ficha técnica de Kraakhuis (De Bijloke Muziekcentrum, 2024, pág. 1), donde se indicaba que la altura libre es de 6 metros porque solo considera altura hasta donde se descuelga la cortina, midiendo en los planos vemos que la altura de la bóveda es la misma distancia y la altura total es de 12 metros. Con estos datos se pudo determinar las dimensiones en todos los ejes de la sala y empezar a hacer el modelado 3d.

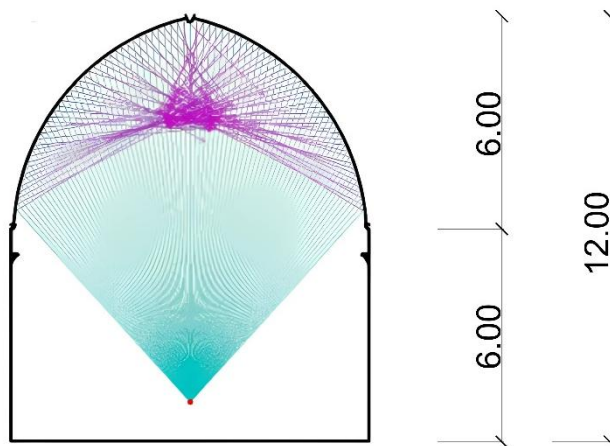


Figura 35. Sección de una simulación acústica de la sala Kraakhuis 2008. Fuente: Artículo de Academia.eu, Creative Possibilities and Limitations of Curved Surfaces in the Acoustic Design of Contempo (Wulfrank, 2017, pág. 8). Anotaciones de las cotas elaboración propia.

- Modelo 3D

El modelo 3d se hizo a través del software Rhinoceros para posteriormente hacer el análisis acústico a través del plugin visual “Grasshopper” y el plugin acústico “Pachyderm”. Por ello muchas de las decisiones se hicieron con perspectiva para una vez comenzadas las simulaciones, modificar lo menos posible el modelo. Se trato de ir generando cada volumen del modelo con una capa diferente, debido a que en Pachyderm hay que asociar cada capa a un material, ya que, cada material tiene un coeficiente de absorción diferente.

También se tomó una decisión sobre los huecos, hay catorce ventanas, 2 puertas y dos huecos cóncavos en las paredes, al ser muros gruesos de alrededor de medio metro y las ventanas centradas en el muro, se creaban una serie de superficies cóncavas alrededor del modelo que, aunque no fuese mucho, es posible que algo afectase en la acústica. Esto lo podemos ver en la figura 36 en la vista axonométrica seccionada por plano horizontal.

Respectos a los asientos, se colocaron exactamente el número que hay como se pueden ver en las figuras 37, 38, 39. Se trato de que los asientos influenciaran como lo harían una persona, por ello cada uno tiene opción abierta con el material absorbente (rojo) para simular a la persona y el asiento cerrado para simular la sala vacía. Como se ve en la figura 41.

Respecto al elemento más relevante, la cortina, se crearon diferentes posibilidades de longitudes para luego en la simulación analizar que altura es más conveniente y hasta qué punto de práctico es ajustar su altura. Como se ve en la figura 40.

Por último, el hecho de recubrir el edificio y conservar la cubierta a dos aguas del proyecto es una decisión puramente estética, ya que esto no afectaría a la simulación.

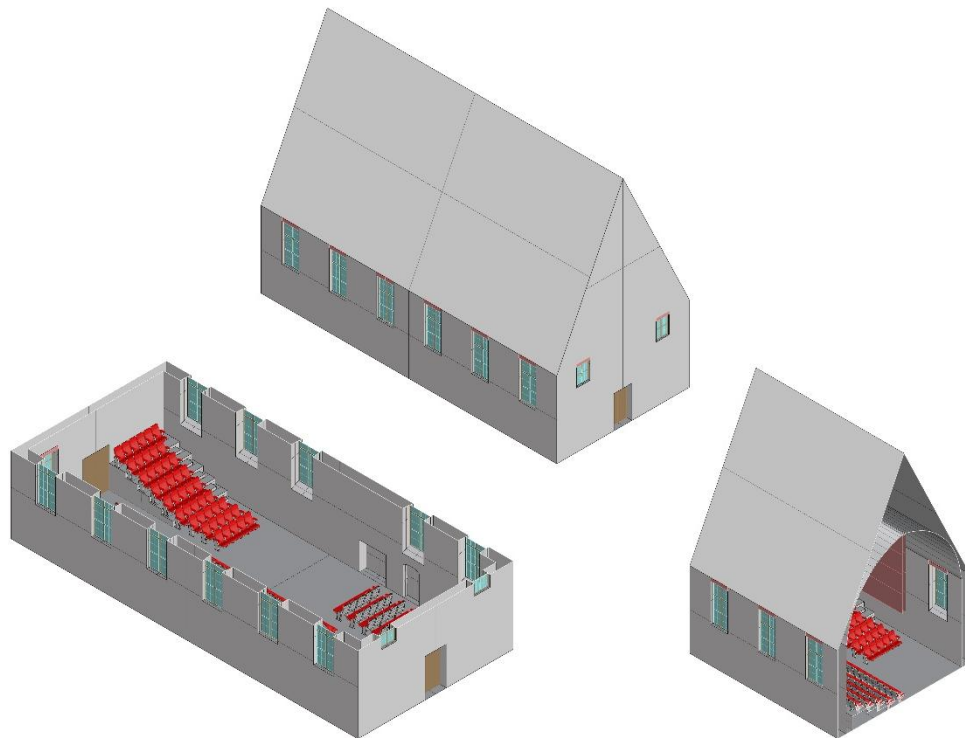


Figura 36. Vistas en axonometría del modelo de la sala Kraakhuis, vista completa, sección plano horizontal y sección plano vertical. Fuente: elaboración propia.

Kraakhuis: de hospital a música, rehabilitación y acústica variable.



Figura 37. Vista interior en perspectiva del modelo de la sala Kraakhuis. Fuente: elaboración propia.



Figura 38. Vista interior en perspectiva del modelo de la sala Kraakhuis. Fuente: elaboración propia.



Figura 39. Vista interior en perspectiva del modelo de la sala Kraakhuis. Fuente: elaboración propia.

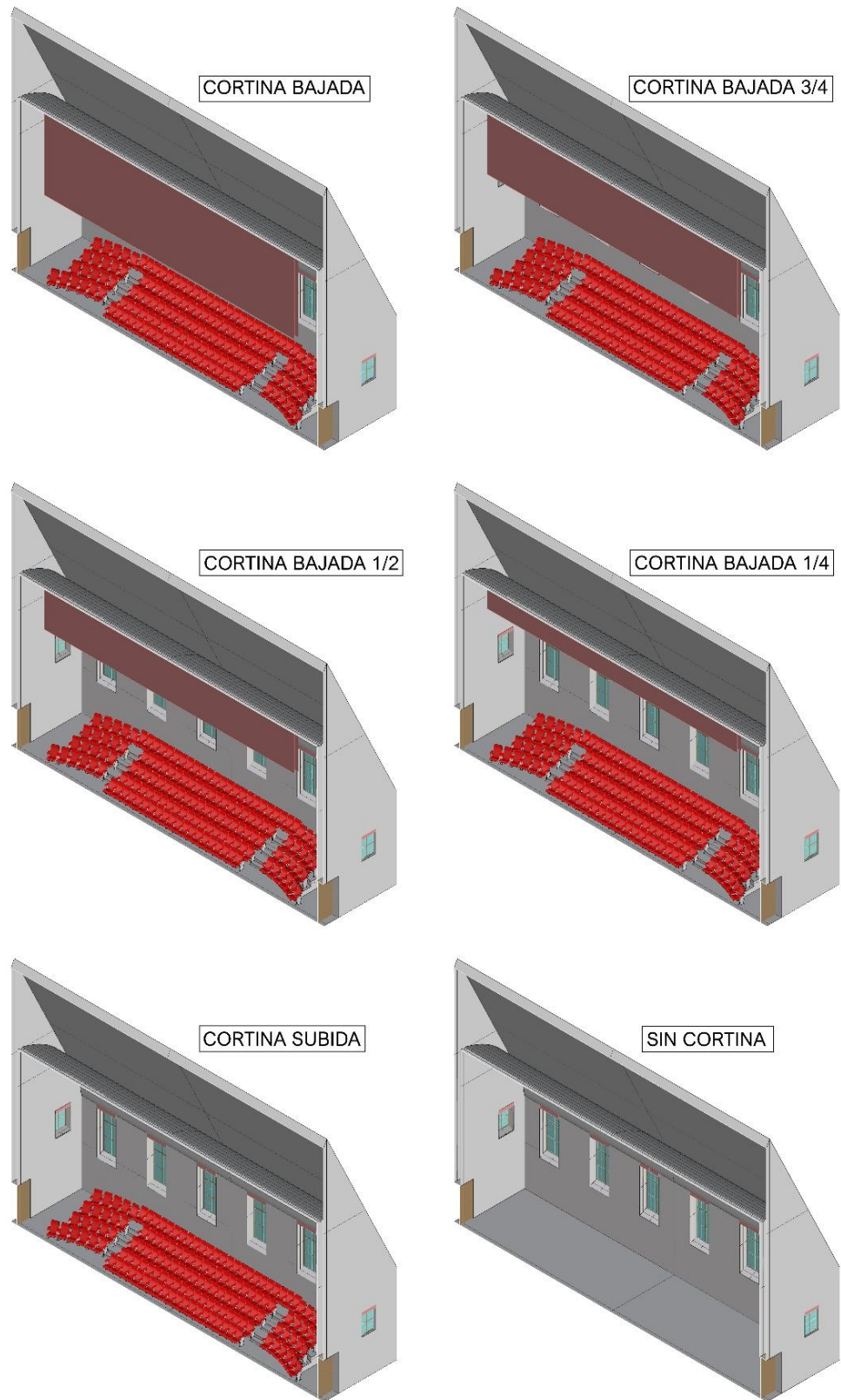


Figura 40. Serie de vistas en axonometría del modelo de la sala Kraakhuis, mostrando las diferentes configuraciones de la cortina y el interior. Fuente: elaboración propia.

Kraakhuis: de hospital a música, rehabilitación y acústica variable.



Figura 41. Diferente configuración de las buracas del modelo de la sala Kraakhuis. Fuente: elaboración propia.

Simulación acústica

Como se ha comentado antes, la simulación acústica se hecho a través de Grasshopper y Pachyderm, plugins de Rhinoceros, programa con el que se ha hecho el modelo 3D.

- Proceso

El primer paso para la simulación fue asociar coeficientes de absorción a cada material, para esto se abre la pestaña de Pachyderm en Rhinoceros, se selecciona la opción "Materials" se escogen los coeficientes base del programa, que ofrecen la variedad necesaria para este proyecto. En la figura 42 se observa como a la capa "Pared" se le asigna el material "Plaster" (yeso) y en la figura 43 los coeficientes de absorción según el sonido (de más agudo a más grave).

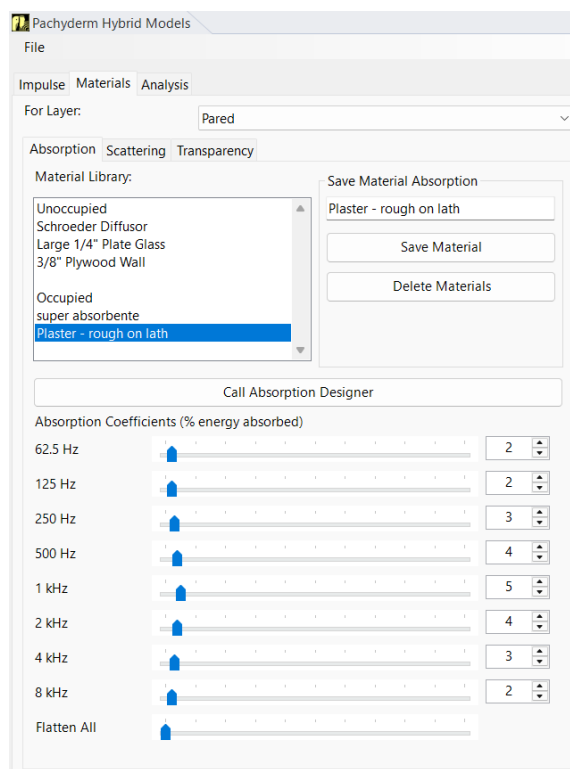


Figura 42. Ventana Pachyderm elección materiales. Fuente: Rhinoceros

Una vez asignados los materiales se opta por realizar la simulación acústica con la intención de conocer cuál es la distribución del sonido en la sala. Esto se hizo sobre todo para conocer que posiciones de la cortina son las más efectivas.

Para realizar la simulación se pasa al programa Grasshopper el cual tiene integrados paneles y componentes de Pachyderm. La primera parte del código se ve reflejada en la figura 43. En morado se asocia a "Poly Scene" la superficie de la sala, siendo el resto de los componentes añadidos para que se detecte correctamente. En la parte verde consiste en definir el punto emisor de sonido "Pt", convirtiéndolo en una nube de vectores y definiendo una dirección. Una vez definidos superficie y emisor, se pasa a definir los parámetros del "PatchVisRays" el cual se encarga de generar la simulación, por lo tanto, se añade la sala (Room), el emisor (origin, Src), la dirección (definida en los vectores) y el número de rebotes (siete en este caso).

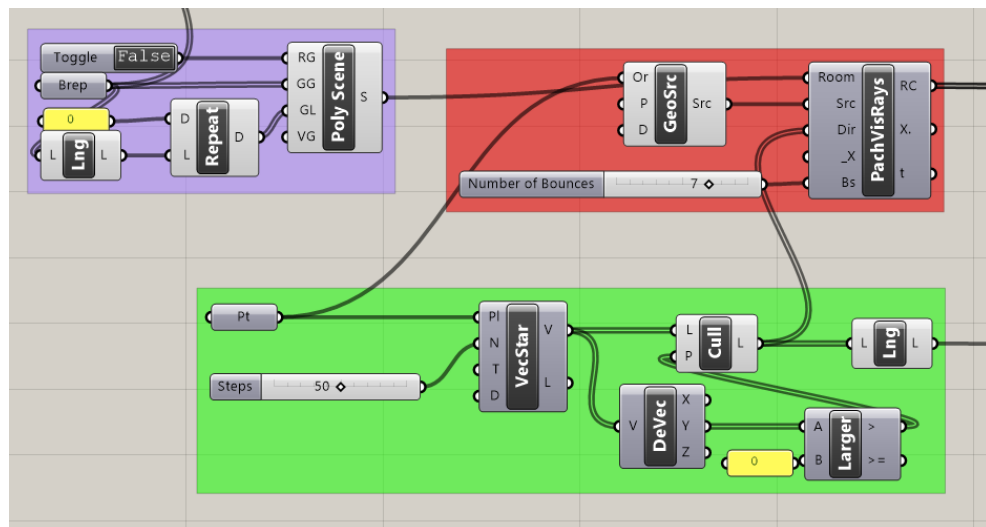


Figura 43. Primera captura código Grasshopper para la simulación acústica. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se programa para poder "ilustrar" la simulación, la segunda parte del código se ve reflejada en la figura 44. En el recuadro amarillo se consigue que la emisión de partículas de "PatchVisRays" se convierta en una animación. Por otro lado, el recuadro azul consiste en transformar las partículas en una nube de puntos "Cloud" al que se le asocia una gama de colores de rojo (inicio) a azul (final simulación) pasando por el amarillo.

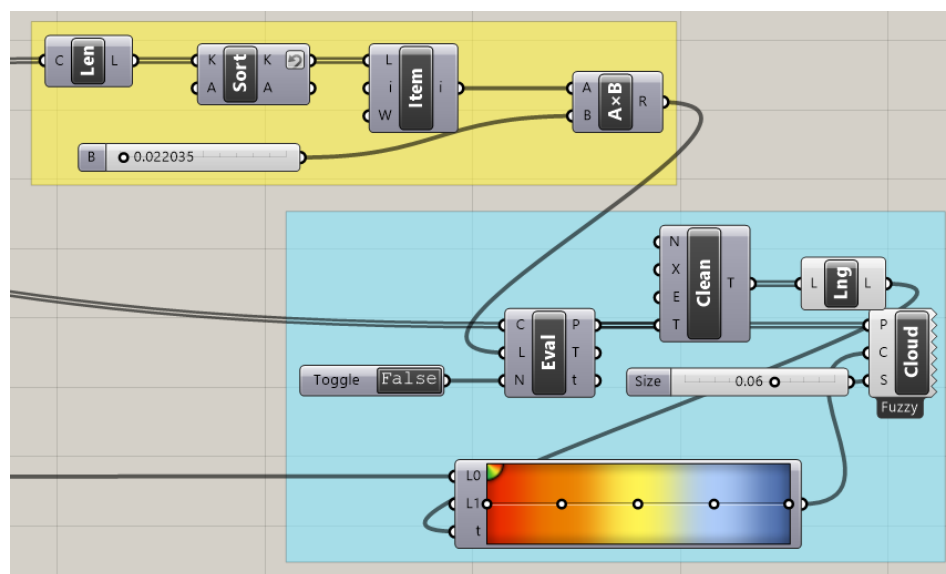


Figura 44. Segunda captura código Grasshopper para la simulación acústica. Fuente: elaboración propia.

Kraakhuis: de hospital a música, rehabilitación y acústica variable.

Para medir los parámetros del sonido hay que crear otro código nuevo de Grasshopper, la primera parte se ve reflejada en la figura 45. El rectángulo azul oscuro consiste en definir el componente que dará los parámetros "StartRec", al que se le añade el punto emisor (el que definimos antes), la superficie (Room, la misma de antes también) y el punto receptor del sonido. Siguiendo con el cuadro rosa, consiste en definir una serie de componentes que Pachyderm necesita para definir el componente de la figura 46, a estos tres componentes en resumen se les asigna el volumen de la sala (Room), el origen (Src) y el receptor (Rec).

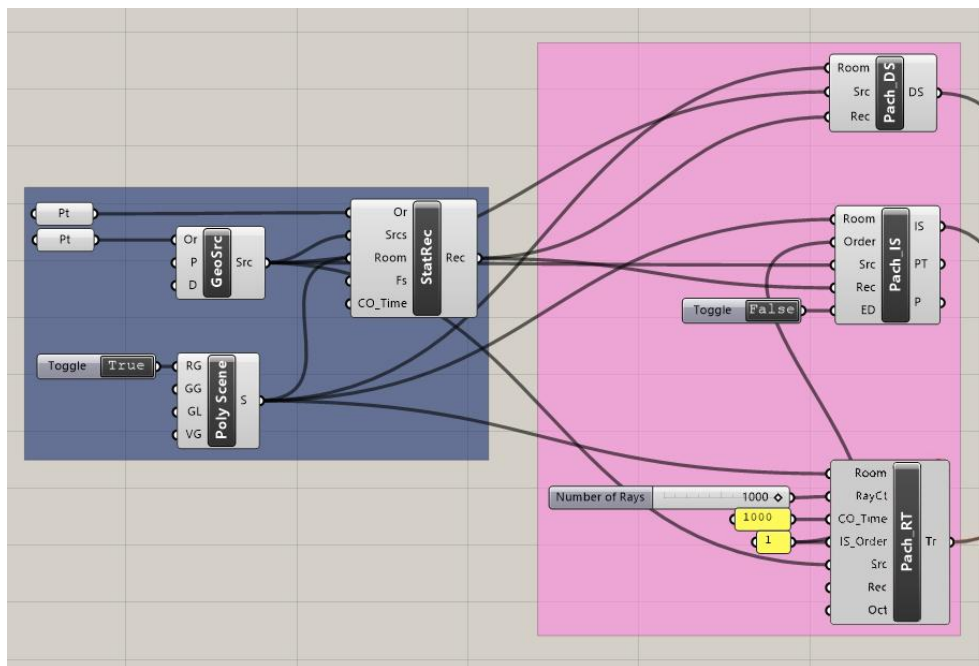


Figura 45. Primera captura código Grasshopper para los parámetros acústicos. Fuente: elaboración propia.

En la figura 46 se ve la última parte de este segundo código, se ve el componente "Energy-Time Curve" (ETC) que se ha definido gracias los componentes anteriores. Este parámetro es el que luego nos permite obtener valores de Claridad musical (C80), Tiempo de Reverberación (RT) y Nivel de Presión Sonora (SPL).

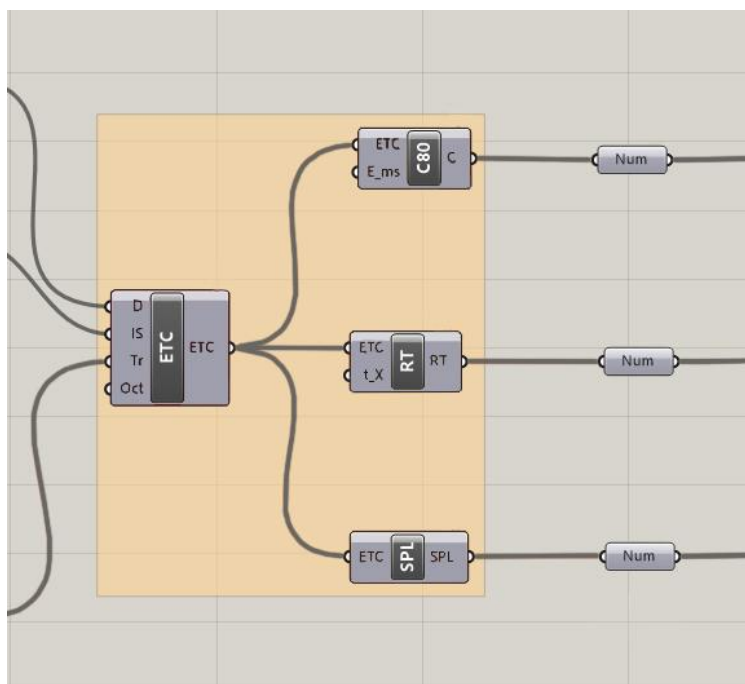


Figura 46. Segunda captura código Grasshopper para los parámetros acústicos. Fuente: elaboración propia.

Respecto a la posición del punto emisor y los receptores. Como se ve en la figura 48, el punto emisor queda situado en el centro del escenario y a una altura de 1,5 m (figura 47), esta altura se estimó como una media entre la altura de diferentes instrumentos, que se interpretan sentados o de pie como el piano o la guitarra o la cabeza de una persona reflejando la voz de alguien y sumándole que actualmente la sala cuenta con un altillo de alrededor de 50 cm de altura. En cuanto a los receptores he seleccionado dos puntos de la sala que considero como los más críticos en cuanto a calidad de sonido

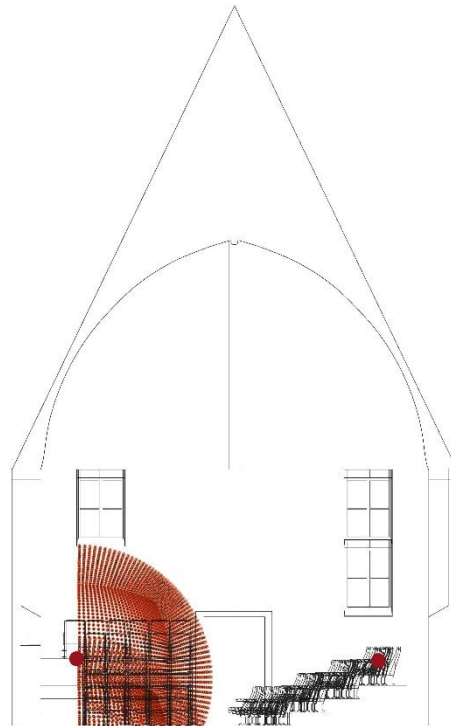


Figura 47. Sección sala Kraakhuis indicando emisor y receptor de la simulación. Fuente: elaboración propia.

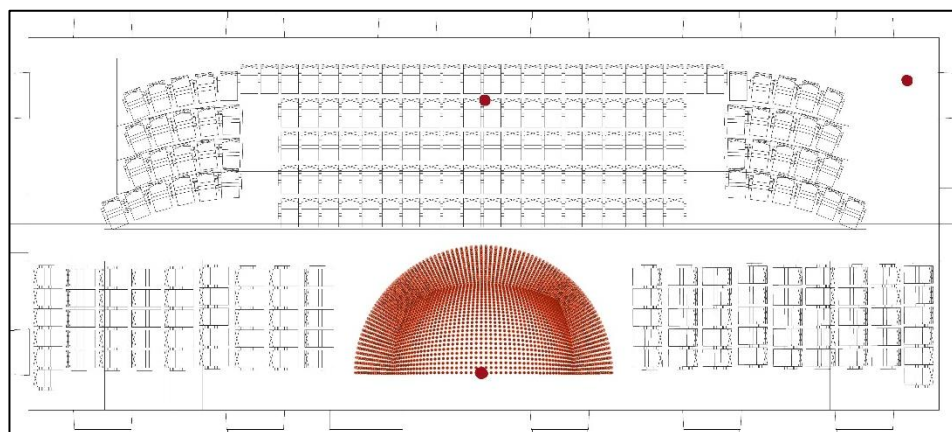


Figura 48. Planta sala Kraakhuis indicando emisor y receptor de la simulación acústica. Fuente: elaboración propia.

Este foco emisor y dos receptores son los que se aplicaran en las simulaciones de los casos 1, 2, 3, 4.

Kraakhuis: de hospital a música, rehabilitación y acústica variable.

Por otro lado, la última simulación, caso 5, hace referencia a la antigua distribución que tuvo la sala Kraakhuis entre los años 2008 y 2011, hasta que se hizo la intervención analizada en este trabajo. Con esta simulación el foco emisor queda en un lateral y centrado y los dos receptores a mitad de la sala uno y el otro al final. Las alturas de los puntos coinciden con en la otra simulación.

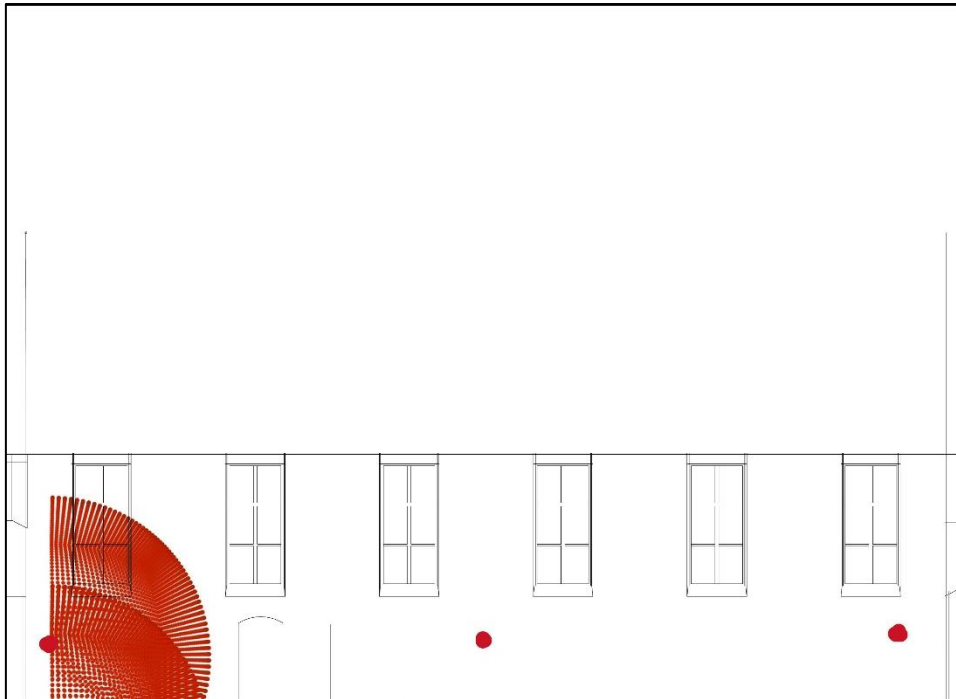


Figura 49. Sección sala Kraakhuis indicando emisor y receptor de la simulación acústica. Fuente: elaboración propia.

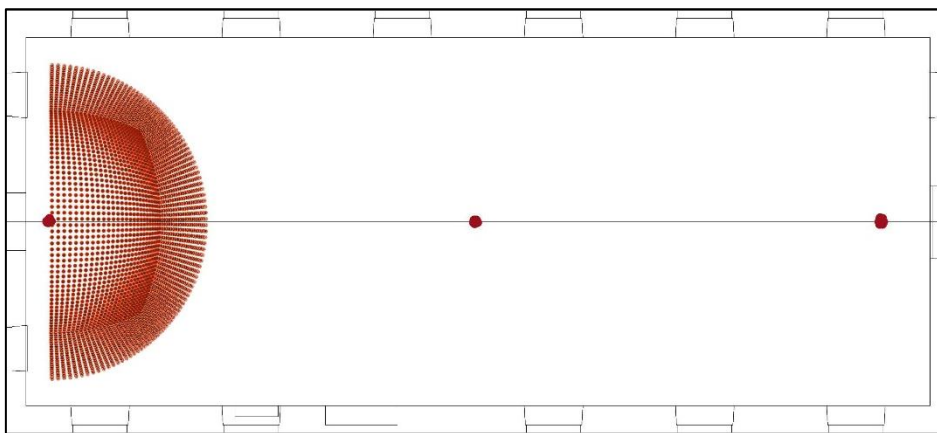


Figura 50. Planta sala Kraakhuis indicando emisor y receptor de la simulación acústica. Fuente: elaboración propia.

- CASO 1 (Cortina desplegada del todo)

En esta simulación se analiza la distribución del sonido dentro de la sala, teniendo en cuenta que la cortina está desplegada del todo, también influirán los huecos o las butacas.

Vemos en la figura 52 tres secciones que indican tres momentos diferentes de la simulación acústica, rojo el más temprano y amarillo el más tardío. Vemos en la sección roja como el sonido choca con la cortina absorbiendo gran parte. En la sección naranja como muchas partículas de sonido de la parte superior se han disipado. En la sección amarilla como las partículas de sonido son uniformes a lo largo de toda la sala.

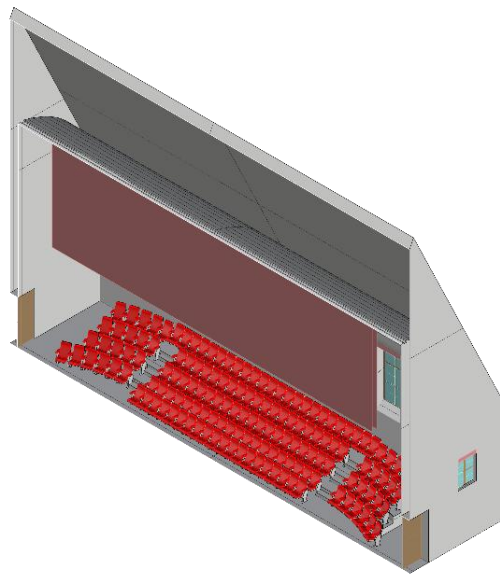


Figura 51. Vista en axonometría seccionada sala Kraakhuis, CASO 1. Fuente elaboración propia.

Por otro lado, el sonido se mide a través de dos receptores colocados en las posiciones mencionadas anteriormente, los siguientes tres parámetros del sonido como son la claridad musical (C80), el tiempo de reverberación (RT) y el nivel de presión sonora (SPL). Lo datos se reflejan en la tabla 5.



Figura 52. Serie de secciones extraídas de la simulación acústica CASO 1. Fuente: elaboración propia.

Los valores de 0-7 se refieren a frecuencias 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000.

	RECEPTOR 1								
	0	1	2	3	4	5	6	7	Media
C80	1,56	1,87	1,4	2,12	1,8	2,58	2,29	2,44	1,93
RT	1,33	1,34	1,32	1,31	1,33	1,37	1,32	1,31	1,33
SPL	100,02	99,83	99,53	99,15	98,82	98,92	99,06	98,96	99,28

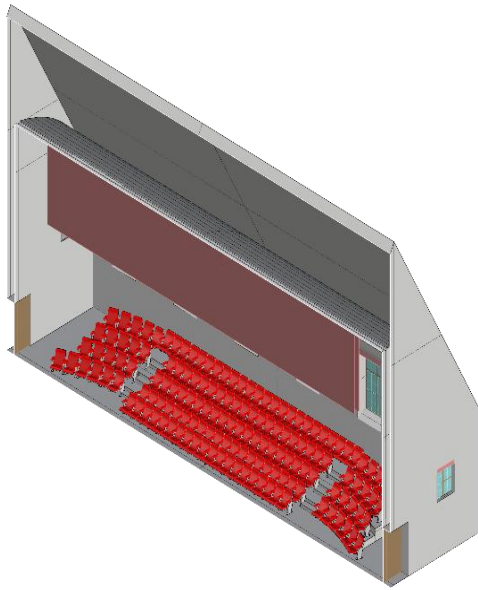
Tabla 5. Resultados simulación acústica CASO 1. Fuente: elaboración propia.

	RECEPTOR 2								
	0	1	2	3	4	5	6	7	Media
C80	1,32	1,74	1,42	2,41	2,4	2,13	2,67	2,73	1,96
RT	1,32	1,39	1,39	1,38	1,36	1,31	1,37	1,31	1,35
SPL	98,19	97,92	97,48	96,91	96,41	96,59	96,81	96,71	97,12

Los datos de las tablas muestran unos valores similares por parte de ambos receptores, dejando una claridad musical de 1,94, un tiempo de reverberación de 1,34 y unos niveles de presión sonora de 98.

Kraakhuis: de hospital a música, rehabilitación y acústica variable.

- CASO 2 (Cortina desplegada $\frac{3}{4}$ de su longitud total)



En esta simulación se analiza la distribución del sonido dentro de la sala, teniendo en cuenta que la cortina está desplegada $\frac{3}{4}$ de su longitud, también influirán los huecos o las butacas.

Vemos en la figura 54 tres secciones que indican tres momentos diferentes de la simulación acústica, rojo el más temprano y amarillo el más tardío. Vemos en la sección roja como el sonido choca con la cortina, aunque esta haya reducido su longitud. En la sección naranja no hay tantas partículas de sonido en la parte superior por lo tanto, se puede decir que se han disipado. En la sección amarilla como las partículas de sonido son uniformes a lo largo de toda la sala.

Figura 53. Vista en axonometría seccionada sala Kraakhuis, CASO 2. Fuente elaboración propia.

Por otro lado, el sonido se mide a través de dos receptores colocados en las posiciones mencionadas anteriormente, los siguientes tres parámetros del sonido como son la claridad musical (C80), el tiempo de reverberación (RT) y el nivel de presión sonora (SPL). Lo datos se reflejan en la tabla 6.

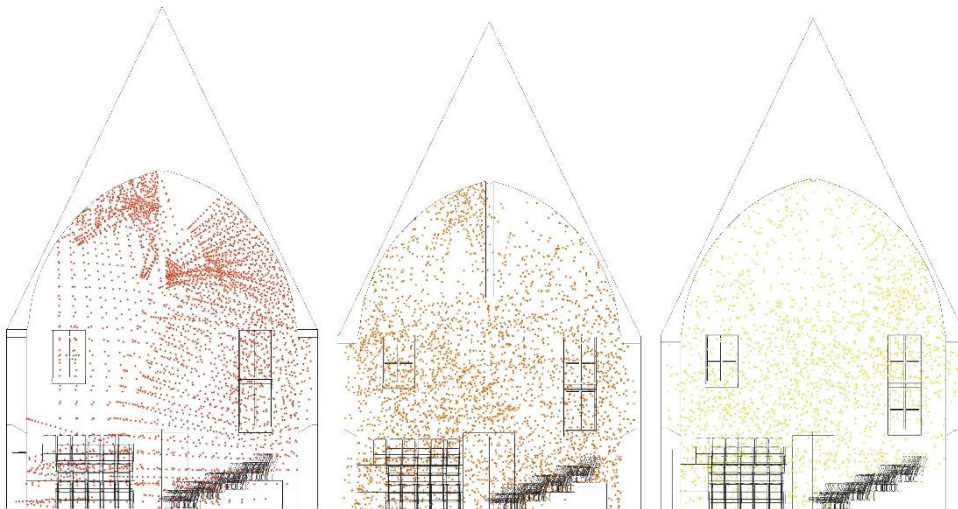


Figura 54. Serie de secciones extraídas de la simulación acústica CASO 2. Fuente: elaboración propia.

	RECEPTOR 1								Media
	0	1	2	3	4	5	6	7	
C80	1,49	1,4	1,44	1,49	1,45	1,43	1,31	1,26	1,40
RT	1,47	1,48	1,53	1,5	1,55	1,51	1,46	1,47	1,50
SPL	100,02	99,83	99,53	99,15	98,82	98,92	99,06	98,96	99,28

	RECEPTOR 2								Media
	0	1	2	3	4	5	6	7	
C80	1,37	1,37	1,47	1,48	1,4	1,37	1,33	1,39	1,40
RT	1,42	1,44	1,5	1,59	1,54	1,51	1,56	1,53	1,51
SPL	103,58	103,21	102,61	101,85	101,21	101,4	101,69	101,6	102,14

Tabla 6. Resultados simulación acústica CASO 2. Fuente: elaboración propia.

Los datos de las tablas muestran unos valores similares por parte de ambos receptores, dejando una claridad musical de 1,40, un tiempo de reverberación de 1,50 y unos niveles de presión sonora de 100.

- CASO 3 (Cortina desplegada 1/2 de su longitud total)

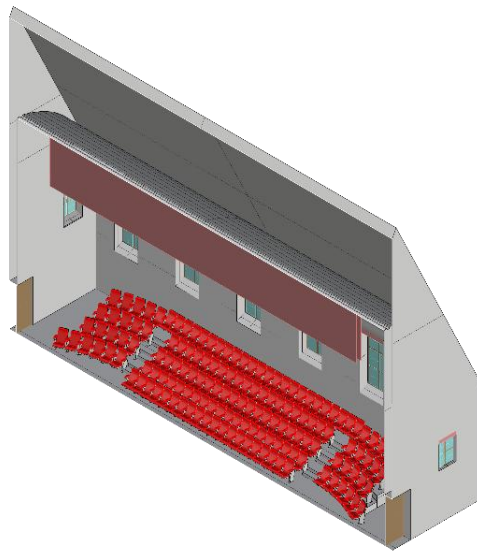


Figura 55. Vista en axonometría seccionada sala Kraakhuis, CASO 3. Fuente elaboración propia.

En esta simulación se analiza la distribución del sonido dentro de la sala, teniendo en cuenta que la cortina está desplegada 1/2 de su longitud, también influirán los huecos o las butacas.

Vemos en la figura 56 tres secciones que indican tres momentos diferentes de la simulación acústica, rojo el más temprano y amarillo el más tardío. Vemos en la sección roja como el sonido ya no choca apenas con la cortina. En la sección naranja se han disipado algunas partículas, pero no tantas como antes. En la sección amarilla como las partículas de sonido son uniformes a lo largo de

toda la sala.

Por otro lado, el sonido se mide a través de dos receptores colocados en las posiciones mencionadas anteriormente, los siguientes tres parámetros del sonido como son la claridad musical (C80), el tiempo de reverberación (RT) y el nivel de presión sonora (SPL). Lo datos se reflejan en la tabla 7.

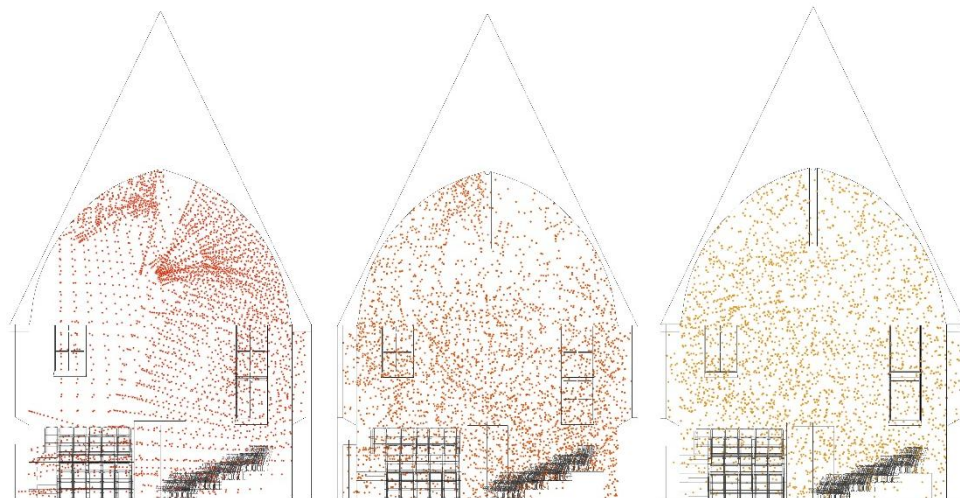


Figura 56. Serie de secciones extraídas de la simulación acústica CASO 3. Fuente: elaboración propia.

	RECEPTOR 1								
	0	1	2	3	4	5	6	7	Media
C80	1,11	1,16	1,1	1,24	1,29	1,27	1,14	1,14	1,18
RT	1,54	1,54	1,61	1,64	1,66	1,63	1,54	1,59	1,59
SPL	102,66	102,3	101,84	101,26	100,8	100,91	101,13	101,11	101,50

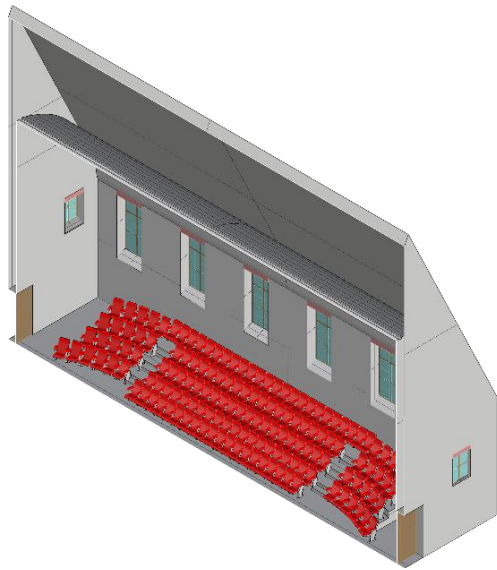
Tabla 7. Resultados simulación acústica CASO 3. Fuente: elaboración propia.

	RECEPTOR 2								
	0	1	2	3	4	5	6	7	Media
C80	1,03	1,05	1,1	1,16	1,12	1,06	1,08	1,04	1,08
RT	1,53	1,52	1,63	1,61	1,66	1,63	1,64	1,54	1,59
SPL	101,32	101,87	101,34	100,59	99,95	100,07	100,37	100,39	100,73

Los datos de las tablas muestran unos valores similares por parte de ambos receptores, dejando una claridad musical de 1,13, un tiempo de reverberación de 1,60 y unos niveles de presión sonora de 100.

Kraakhuis: de hospital a música, rehabilitación y acústica variable.

- CASO 4 (Cortina recogida)



En esta simulación se analiza la distribución del sonido dentro de la sala, teniendo en cuenta que la cortina recogida del todo, también influirán los huecos o las butacas.

Vemos en la figura 58 tres secciones que indican tres momentos diferentes de la simulación acústica, rojo el más temprano y amarillo el más tardío. Vemos en la sección roja como el sonido ya no choca con la cortina, acumulándose el sonido en la parte superior derecha de la sala. En la sección naranja mucha concentración de partículas en toda la sala. En la sección amarilla vemos como sigue habiendo gran cantidad

de partículas de sonido, es decir, apenas se han disipado, acumulando muchas más partículas en la parte superior en comparación con los casos anteriores.

Por otro lado, el sonido se mide a través de dos receptores colocados en las posiciones mencionadas anteriormente, los siguientes tres parámetros del sonido como son la claridad musical (C80), el tiempo de reverberación (RT) y el nivel de presión sonora (SPL). Lo datos se reflejan en la tabla 8.

Figura 57. Vista en axonometría seccionada sala Kraakhuis, CASO 4. Fuente elaboración propia.

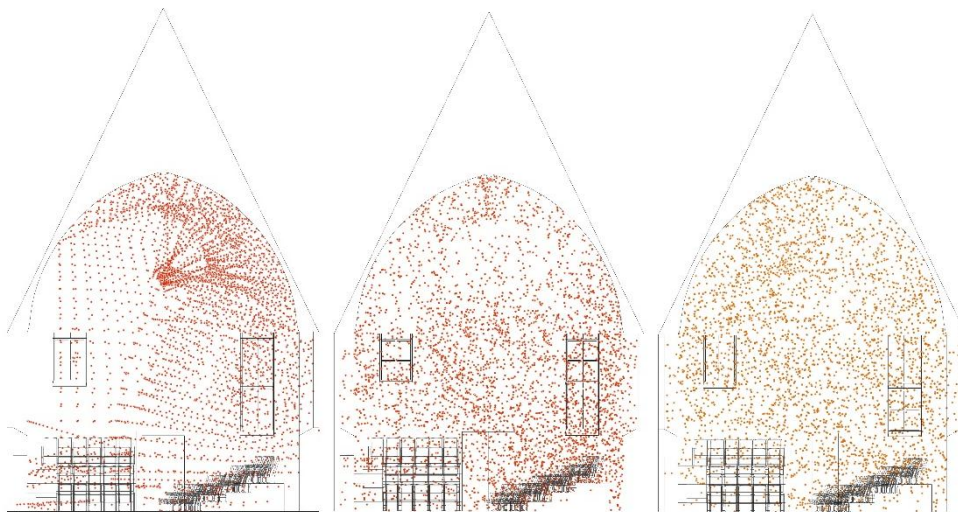


Figura 58. Serie de secciones extraídas de la simulación acústica CASO 4. Fuente: elaboración propia.

		RECEPTOR 1								
		0	1	2	3	4	5	6	7	Media
C80		-0,54	-0,61	-0,69	-0,74	-0,7	-0,68	-0,67	-0,62	-0,65
RT		1,74	1,72	1,77	1,77	1,77	1,82	1,76	1,72	1,76
SPL		104,47	104,12	103,55	102,84	102,24	102,43	102,7	102,59	103,11

		RECEPTOR 2								
		0	1	2	3	4	5	6	7	Media
C80		-0,6	-0,63	-0,72	-0,83	-0,84	-0,72	-0,7	-0,66	-0,70
RT		1,76	1,74	1,79	1,86	1,78	1,81	1,84	1,87	1,81
SPL		106,39	106,39	105,53	104,77	104,09	104,67	105,12	104,78	105,21

Tabla 8. Resultados simulación acústica CASO 4. Fuente: elaboración propia.

Los datos de las tablas muestran unos valores similares por parte de ambos receptores, dejando una claridad musical de -0,67, un tiempo de reverberación de 1,80 y unos niveles de presión sonora de 105.

• CASO 5 (Distribución antigua)

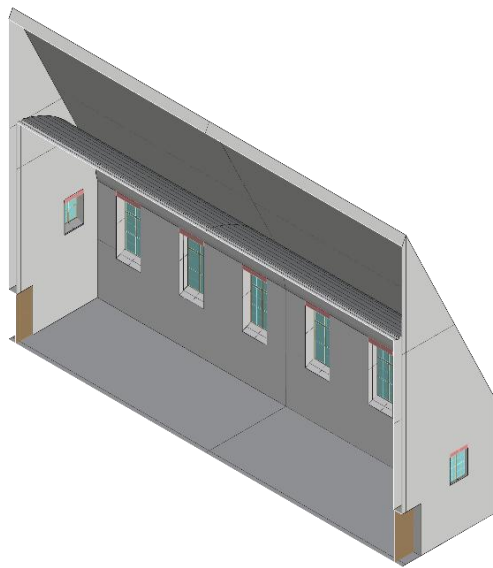


Figura 59. Vista en axonometría seccionada sala Kraakhuis, CASO 5. Fuente elaboración propia.

En esta simulación se analiza la distribución del sonido dentro de la sala, teniendo en cuenta la distribución de la sala antes de la intervención, siendo el emisor y los receptores los de las figuras 49, 50.

Vemos en la figura 60 tres secciones que indican tres momentos diferentes de la simulación acústica, rojo el más temprano y amarillo el más tardío. Vemos en la sección roja como el sonido se concentra de manera masiva en el centro de la bóveda. En la sección naranja excesiva concentración de partículas, es decir no se disipa nada de sonido. En la sección amarilla muchas en el techo.

Por otro lado, el sonido se mide a través de dos receptores colocados en las posiciones mencionadas anteriormente, los siguientes tres parámetros del sonido como son la claridad musical (C80), el tiempo de reverberación (RT) y el nivel de presión sonora (SPL). Lo datos se reflejan en la tabla 8.

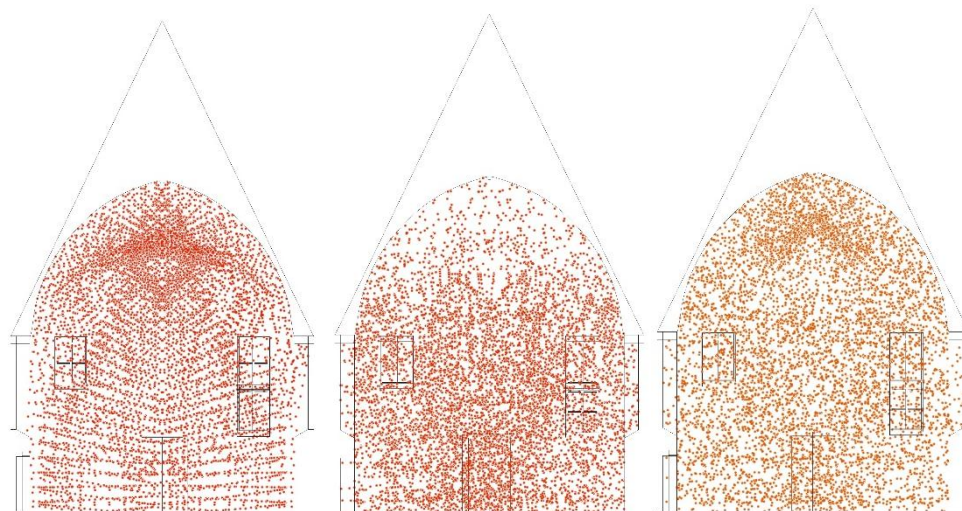


Figura 60. Serie de secciones extraídas de la simulación acústica CASO 5. Fuente: elaboración propia.

	RECEPTOR 1								
	0	1	2	3	4	5	6	7	Media
C80	-1,77	-1,64	-1,78	-1,89	-1,84	-1,78	-1,7	-1,62	-1,75
RT	2,32	2,29	2,19	2,08	1,96	2,01	2,07	2,01	2,11
SPL	104,47	104,12	103,55	102,84	102,24	102,43	102,7	102,59	103,11

Tabla 9. Resultados simulación acústica CASO 5. Fuente: elaboración propia.

	RECEPTOR 2								
	0	1	2	3	4	5	6	7	Media
C80	-1,87	-1,78	-2,05	-2,06	-1,81	-1,88	-1,75	-1,77	-1,86
RT	2,33	2,34	2,32	2,21	2,13	2,17	2,22	2,11	2,23
SPL	106,39	106,39	105,53	104,77	104,09	104,67	105,12	104,78	105,21

Los datos de las tablas muestran unos valores similares por parte de ambos receptores, dejando una claridad musical de -1,80, un tiempo de reverberación de 2,20 y unos niveles de presión sonora de 105.

Kraakhuis: de hospital a música, rehabilitación y acústica variable.

Para observar los videos de la simulaciones escanee este código QR:



<https://youtu.be/IJUoMkmK-Y8?si=w-dnDY1jbkA9X4n5>

- Diagnóstico de las simulaciones

Analizando los datos obtenidos, podemos llegar a la conclusión que el caso 1 y el caso 2 son los escenarios más eficaces para realizar cualquier tipo de actuación, con tiempos de reverberación óptimos, de entre 1,3 y 1,5 que, si nos fijamos en la tabla 3 (pag. 16) "*Márgenes de valores recomendados de RTmid en función del tipo de sala*" se ve que cubre un amplio cupo de posibilidades de eventos distintos. Los únicos problemas quizás se podrías encontrar en el caso de las conferencias donde quizás encontremos un poco de reverberación pero sin llegar a ser algo molesto.

Para el caso 3 vemos que ya no frena tanto el sonido, pero sigue siendo efectivo ya que el rango de tiempo de reverberación es de 1,60 segundos, rango de RT considerable para música clásica o música de cámara que busque un poco más de reverberación.

Una de las cosas más interesantes es la comparación entre los casos 4 y 5, ambos comparten que la cortina no está, peros simplemente varia la distribución de la sala pasando de unos tiempos de reverberación de 1,80 a 2,20 segundos. Confirmando así, que el estudio realizado por la consultora Kahle Acoustics y su impulso por modificar la distribución del espacio fue un gran acierto para mejorar la calidad del espacio.

También es interesante como la claridad musical mejorar notablemente de -1,8 a 2 esto es crucial actuaciones ya que hacen una mejor experiencia.

Llegamos a la conclusión de que la cortina es un elemento imprescindible pero que la decisión de redistribución de la sala también es esencial para mejorar las condiciones sonoras.

Todos los datos que se encuentran recopilados en las tablas de las fichas de los distintas casos están sacados de los datos obtenido por el programa Grasshopper que podemos encontrar en el "*anejo: recopilación de datos*" que se encuentra al final del trabajo.

CONCLUSIONES

Conclusiones

El motivo de esta investigación era demostrar que el uso de elementos de acústica variable aplicada a espacios rehabilitados para usos musicales era la mejor opción posible, debido a que de esta manera se respetaría lo máximo posible la arquitectura que precede. Además de analizar una intervención excelente que lleva a cabo todo esto mencionado.

Esto se ha demostrado paso a paso a lo largo del proyecto, se han analizado los parámetros fundamentales de la acústica de salas, y se ha evidenciado cómo la incorporación de elementos de control acústico variable puede transformar por completo la experiencia sonora en espacios con grandes problemas de inicio.

Además, el análisis de diferentes casos de rehabilitación arquitectónica ha mostrado que este tipo de intervenciones no solo responden a una necesidad funcional ante la escasez de salas en entornos urbanos, sino que también ofrecen una oportunidad real de revitalización cultural y sostenibilidad urbana, al reutilizar edificios obsoletos y dotarlos de nuevos significados sociales.

El estudio del Kraakhuis ha demostrado que es posible compatibilizar la conservación del valor patrimonial de un edificio con la creación de un espacio escénico moderno y versátil. La intervención técnica, basada en un elemento acústico como una cortina absorbente integrada en una gran bóveda, permite adaptar el tiempo de reverberación sin alterar la esencia espacial del conjunto.

El uso de simulaciones acústicas mediante el software Pachyderm y Grasshopper ha facilitado la comprensión del comportamiento sonoro de la sala en distintos escenarios, porque se han corroborado los pocos datos que se tenía sobre la acústica de este edificio y se han mostrado otros muchos resultados que confirman la gran actuación que es.

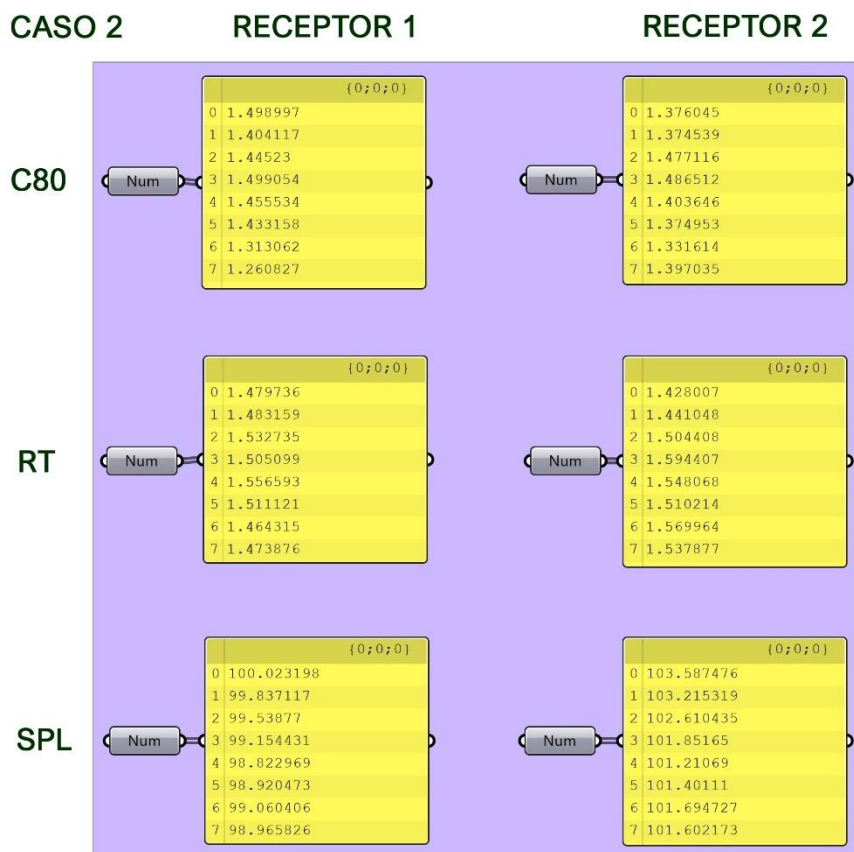
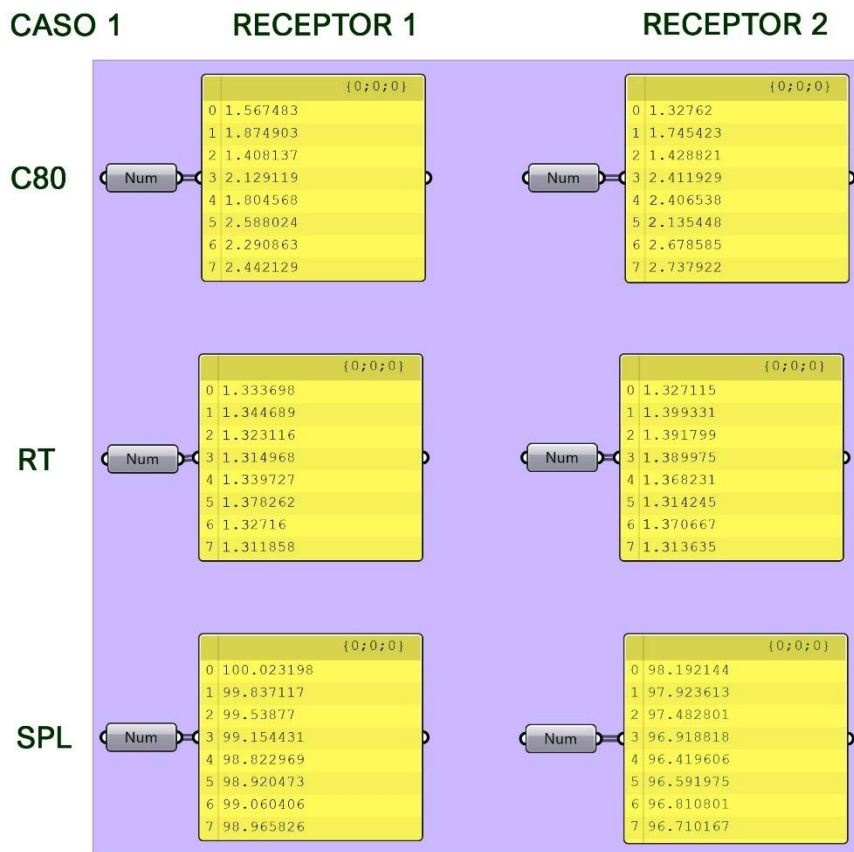
Así que, si podemos decir que siempre que un lugar rehabilitado para la música o artes escénicas necesite mejorar sus condiciones acústicas, en vez de recurrir a crear una caja de zapatos negra, se estudie la posibilidad de incorporar de manera inteligente elementos de acústica variable, porque seguro que será un acierto.

Por último, hay que comentar que Kraakhuis nos demostró que la rehabilitación del edificio fue un proyecto de acústica, todas las decisiones para convertir a esta sala en un lugar más que interesante fue por mejorar la acústica y esto solo hace poner más en valor la importancia de la acústica en la arquitectura actual.

ANEJO: RECOPIACIÓN DE DATOS

Kraakhuis: de hospital a música, rehabilitación y acústica variable.

Los valores de 0-7 se refieren a frecuencias 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000



CASO 3

RECEPTOR 1

RECEPTOR 2

C80

Num

	{0;0;0}
0	1.110301
1	1.161459
2	1.102227
3	1.240203
4	1.292265
5	1.275526
6	1.149559
7	1.149207

Num

	{0;0;0}
0	1.032528
1	1.052119
2	1.108863
3	1.168997
4	1.129596
5	1.062362
6	1.081735
7	1.049061

RT

Num

	{0;0;0}
0	1.547528
1	1.547962
2	1.616214
3	1.642025
4	1.662259
5	1.635219
6	1.544495
7	1.596097

Num

	{0;0;0}
0	1.53091
1	1.524622
2	1.63529
3	1.610838
4	1.664639
5	1.635248
6	1.640837
7	1.540151

SPL

Num

	{0;0;0}
0	102.664328
1	102.309567
2	101.847649
3	101.26964
4	100.800023
5	100.914385
6	101.130272
7	101.112589

Num

	{0;0;0}
0	102.32226
1	101.879514
2	101.343347
3	100.596968
4	99.950439
5	100.072307
6	100.370593
7	100.394207

CASO 4

RECEPTOR 1

RECEPTOR 2

C80

Num

	{0;0;0}
0	-0.545835
1	-0.619828
2	-0.691991
3	-0.748426
4	-0.701189
5	-0.681833
6	-0.67887
7	-0.628934

Num

	{0;0;0}
0	-0.605954
1	-0.635388
2	-0.725244
3	-0.837249
4	-0.840783
5	-0.722123
6	-0.706996
7	-0.66691

RT

Num

	{0;0;0}
0	1.747078
1	1.723492
2	1.773581
3	1.776852
4	1.77341
5	1.8246
6	1.760685
7	1.729003

Num

	{0;0;0}
0	1.761799
1	1.742805
2	1.794768
3	1.866399
4	1.782516
5	1.819973
6	1.842929
7	1.875502

SPL

Num

	{0;0;0}
0	104.473292
1	104.121772
2	103.555036
3	102.844562
4	102.248006
5	102.4306
6	102.702193
7	102.596717

Num

	{0;0;0}
0	106.399872
1	106.396016
2	105.5367
3	104.777125
4	104.092611
5	104.67632
6	105.128929
7	104.788069

CASO 5

RECEPTOR 1

RECEPTOR 2

C80

Num

	{0;0;0}
0	-1.77483
1	-1.64903
2	-1.78137
3	-1.89119
4	-1.84568
5	-1.78024
6	-1.70863
7	-1.62129

Num

	{0;0;0}
0	-1.7762
1	-1.75423
2	-1.88821
3	-1.81929
4	-2.06538
5	-2.05448
6	-1.78585
7	-1.87922

RT

Num

	{0;0;0}
0	2.323698
1	2.294689
2	2.193116
3	2.084968
4	1.969727
5	2.018262
6	2.07716
7	2.011858

Num

	{0;0;0}
0	2.337115
1	2.349331
2	2.321799
3	2.219975
4	2.138231
5	2.174245
6	2.220667
7	2.113635

SPL

Num

	{0;0;0}
0	104.473292
1	104.121772
2	103.555036
3	102.844562
4	102.248006
5	102.4306
6	102.702193
7	102.596717

Num

	{0;0;0}
0	106.399872
1	106.396016
2	105.5367
3	104.777125
4	104.092611
5	104.67632
6	105.128929
7	104.788069

BIBLIOGRAFÍA Y FIGURAS

Bibliografía

- Robert McNeel & Associates. (2017). Rhinoceros, Pachyderm y Grasshopper software.
- Acoucou. (s.f.). *Kraakhuis*. Obtenido de Acoucou: <https://acoucou.org/architecture/ghent>
- Atrapa el Norte. (s.f.). *Mercado de Santo Domingo*. Obtenido de Atrapa el Norte: <https://www.atrapaelnorte.com/listing/mercado-de-santo-domingo/>
- Cairolì, M. (2018). Architectural customized design for variable acoustics in a Multipurpose. *Applied Acoustics*, 167-177.
- Carrión Isbert, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona: UPC.
- CSIC. (1979). Ircam, Centro Pompidou París - Francia. *Revista CSIC*, 7-13.
- De Bijloke Congress & events. (s.f.). *A brief History*. Obtenido de De Bijloke Congress & events: <https://bijlokeheritagevenue.be/heritage/a-brief-history/>
- De Bijloke Muziekcentrum. (2024). *TECHNISCHE FICHE KRAAKHUIS*. Gante.
- División de Estadística y Estudios, Secretaría General Técnica, Ministerio de cultura. (Diciembre de 2024). *Ministerio de cultura*. Obtenido de <https://www.cultura.gob.es/dam/jcr:e8e0b669-63e8-4592-bac2-aab81a12d5e2/encuesta-de-habitos-y-practicas-culturales-avance-de-resultados-2024.pdf>
- Fundación SGAE. (2024). *Fundación SGAE*. Obtenido de <https://fundacionsgae.org/publicacion/anuario-sgae-2024-de-las-artes-esenicas-musicales-y-audiovisuales/>
- Hyon, J., & Jeong, D. (2021). Variable Acoustics in performance venues- A review. *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, 626-648.
- Kahle Acoustics. (2013). *De Bijloke Muziekcentrum Kraakhuis eindrapport akoestiek*. Bruselas.
- Kahle Acoustics. (s.f.). *De Bijloke Muziekcentrum, Ghent*. Obtenido de Kahle Acoustics: <https://kahle.be/en/ref/muziekcentrumDeBijlokeGent-.html>

- kulturklik. (20 de junio de 2022). *Bilborock, 25 años impulsando la cultura con el foco puesto en los y las jóvenes*. Obtenido de euskadi.eus: <https://www.kulturklik.euskadi.eus/noticia/2022/06/20/bilborock-25-anos/webklik00-detalle/es/>
- Lozano, S. (22 de Octubre de 2023). Barcelona: alerta conciertos. *La Vanguardia*.
- The Plan. (s.f.). *Calzedonia Headquarters*. Obtenido de The Plan: <https://www.theplan.it/award-2017-Mixed-Use/-calzedonia-headquartes-1>
- UNE-EN ISO 10534-1. (29 de Julio de 2002). *UNE*. Obtenido de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0027449>
- UNE-EN ISO 10534-2. (24 de Abril de 2024). *UNE*. Obtenido de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0072850>
- UNE-EN ISO 11654. (20 de Febrero de 1998). *UNE*. Obtenido de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0014107>
- UNE-EN ISO 354. (6 de Febrero de 2004). *UNE*. Obtenido de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0030677>
- Visit Berlin. (s.f.). *Visit Berlin*. Obtenido de <https://convention.visitberlin.de/en/meetingguideberlin/locations/kraftwerk-berlin>
- Visit Berlin. (s.f.). *Visit Berlin*. Obtenido de <https://www.visitberlin.de/es/kraftwerk-berlin-en-la-antigua-central-termica-de-mitte>
- Wulfrank, T. (2017). *Academia .edu*. Obtenido de Creative Possibilities and Limitations of Curved Surfaces in the Acoustic Design of Contempo: https://www.academia.edu/72082973/Creative_Possibilities_and_Limitations_of_Curved_Surfaces_in_the_Acoustic_Design_of_Contempo

Leyenda de Figuras

Figura 1. Ejemplos de oscilaciones y frecuencias 1 Hz y 10 Hz. Sonidos graves y agudos respectivamente. Fuente: (Carrión Isbert, 1998), *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*.

Figura 2. Valores C80 (sala vacía) y RT (sala llena) (según Beranek). Fuente: (Carrión Isbert, 1998); *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*.

Figura 3. Esquemas reflexión del sonido en diferentes fases. Fuente: (Carrión Isbert, 1998), *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*.

Figura 4. Proceso de disipación de la energía en el interior de un material poroso frente a una pared rígida. Fuente: (Carrión Isbert, 1998), *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*.

Figura 5. Detalle de los paneles y fotografía interior Auditorio Calcedonia. Fuente revista (Cairolí, 2018).

Figura 6. Sección de una simulación acústica de la sala Kraakhuis 2008. Fuente: Artículo de Academia.eu, *Creative Possibilities and Limitations of Curved Surfaces in the Acoustic Design of Contempo*, (Wulfrank, 2017, pág. 8).

Figura 7. Imagen interior de la sala Kraakhuis. Fuente: (Kahle Acoustics, s.f.)

Figura 8. Sección sala Ircam, Centro Pompidou, Piano y Rogers. Fuente: Artículo revista. Ircam, Centro Pompidou París - Francia. (CSIC, 1979, pág. 10)

Figura 9. Dibujo en perspectiva sala Ircam, Centro Pompidou, Piano y Rogers. Fuente: Artículo revista. Ircam, Centro Pompidou París - Francia (CSIC, 1979, pág. 10).

Figura 10. Dibujo de las diferentes posiciones de un panel de la sala IRCAM. Fuente *Variable Acoustics in performance venues- A review* (Hyon & Jeong, 2021, pág. 629).

Figura 11. Fotografía interior y cámara de reverberación escenario Symphony Hall. Birmingham, Reino Unido. Fuente: revista *Variable Acoustics in performance venues* (Hyon & Jeong, 2021, pág. 633)

Figura 12. Detalle paneles de absorción del Symphony Hall. Birmingham, Reino Unido. Fuente: revista *Variable Acoustics in performance venues* (Hyon & Jeong, 2021, pág. 629)

Figura 13. Fotografía interior, sala vacía, Kraftwerk, Berlín, Alemania. Fuente: visit Berlin. (Visit Berlin, s.f.).

Figura 14. Fotografía interior sala llena, Kraftwerk, Berlín, Alemania. Fuente: visit Berlin. (Visit Berlin, s.f.).

Figura 15. Fotografía exterior Bilborock, Bilbao, España. Fuente: elaboración propia, 21/02/2024.

Figura 16. Fotografía interior Bilborock, Bilbao, España. Fuente: kulturklik (kulturklik, 2022).

Figura 17. Fotografía interior Mercado de Santo Domingo. Fuente: *Atrapa el norte* (Atrapa el Norte, s.f.).

Figura 18. Fotografía interior de la sala Zentral. Fuente: elaboración propia 20/02/2025.

Figura 19. Dibujo De Bijloke. Fuente: (De Bijloke Congress & events, s.f.)

Figura 20. Fotografía interior sala de la Abadía, Bijloke. Fuente: (De Bijloke Congress & events, s.f.)

Figura 21. Fotografía interior Kraakhuis cuando aún era hospital. Fuente: (De Bijloke Congress & events, s.f.).

Figura 22. Fotografía interior Concert Hall cuando aún era hospital. Fuente: (De Bijloke Congress & events, s.f.).

Figura 23. Imagen aérea conjunto de edificios que rodean Kraakhuis. Fuente: elaboración propia.

Figura 24. Planta del complejo de conciertos Bijloke, Gante, Bélgica. Marcado en rojo sala Kraakhuis. Fuente: archivo cad proporcionado administración Bijloke. Anotaciones elaboración propia.

Figura 25. Fotografía interior sala Kraakhuis en rehabilitación, 2006. Fuente: (Kahle Acoustics, s.f.)

- Figura 26.** fotografía interior sala Kraakhuis, 2008. Fuente: (Kahle Acoustics, s.f.)
- Figura 27.** Fotografía interior Kraakhuis, distribución interior, 2011 Fuente: (Kahle Acoustics, s.f.).
- Figura 28.** Fotografía cortina extendida de la sala Kraakhuis. Fuente: (Kahle Acoustics, s.f.)
- Figura 29.** Imagen ilustración cortina de la sala Kraakhuis, diseño de Ara Stark. Fuente: video Kraakhuis (Acoucou, s.f.) (4:11).
- Figura 30.** Fotografía del mecanismo motorizado que mueve la cortina. Fuente: video Kraakhuis (Acoucou, s.f.) (5:22).
- Figura 31.** Imagen interior sala Kraakhuis, 2011. Fuente: (Kahle Acoustics, s.f.)
- Figura 32.** Planta del centro de conciertos de Bijlok. Fuente: archivo cad proporcionado administración Bijloke.
- Figura 33.** Portada informe acústico Kraakhuis. Fuente: (Kahle Acoustics, 2013)
- Figura 34.** Planta sala Kraakhuis. Fuente: (Kahle Acoustics, 2013, pág. 7)
- Figura 35.** Sección de una simulación acústica de la sala Kraakhuis 2008. Fuente: Artículo de Academia.eu, Creative Possibilities and Limitations of Curved Surfaces in the Acoustic Design of Contempo (Wulfrank, 2017, pág. 8). Anotaciones de las cotas elaboración propia.
- Figura 36.** Vistas en axonometría del modelo de la sala Kraakhuis, vista completa, sección plano horizontal y sección plano vertical. Fuente: elaboración propia.
- Figura 37.** Vista interior en perspectiva del modelo de la sala Kraakhuis. Fuente: elaboración propia.
- Figura 38.** Vista interior en perspectiva del modelo de la sala Kraakhuis. Fuente: elaboración propia.
- Figura 39.** Vista interior en perspectiva del modelo de la sala Kraakhuis. Fuente: elaboración propia.
- Figura 40.** Serie de vistas en axonometría del modelo de la sala Kraakhuis, mostrando las diferentes configuraciones de la cortina y el interior. Fuente: elaboración propia.
- Figura 41.** Diferente configuración de las buracas del modelo de la sala Kraakhuis. Fuente: elaboración propia.
- Figura 42.** Ventana Pachyderm elección materiales. Fuente: Rhinoceros
- Figura 43.** Primera captura código Grasshopper para la simulación acústica. Fuente: elaboración propia.
- Figura 44.** Segunda captura código Grasshopper para la simulación acústica. Fuente: elaboración propia.
- Figura 45.** Primera captura código Grasshopper para los parámetros acústicos. Fuente: elaboración propia.
- Figura 46.** Segunda captura código Grasshopper para los parámetros acústicos. Fuente: elaboración propia.
- Figura 47.** Sección sala Kraakhuis indicando emisor y receptor de la simulación. Fuente: elaboración propia.
- Figura 48.** Planta sala Kraakhuis indicando emisor y receptor de la simulación acústica. Fuente: elaboración propia.
- Figura 49.** Sección sala Kraakhuis indicando emisor y receptor de la simulación acústica. Fuente: elaboración propia.
- Figura 50.** Planta sala Kraakhuis indicando emisor y receptor de la simulación acústica. Fuente: elaboración propia.
- Figura 51.** Vista en axonometría seccionada sala Kraakhuis, CASO 1. Fuente elaboración propia.
- Figura 52.** Serie de secciones extraídas de la simulación acústica CASO 1. Fuente: elaboración propia.
- Figura 53.** Vista en axonometría seccionada sala Kraakhuis, CASO 2. Fuente elaboración propia.
- Figura 54.** Serie de secciones extraídas de la simulación acústica CASO 2. Fuente: elaboración propia.
- Figura 55.** Vista en axonometría seccionada sala Kraakhuis, CASO 3. Fuente elaboración propia.

Kraakhuis: de hospital a música, rehabilitación y acústica variable.

Figura 56. Serie de secciones extraídas de la simulación acústica CASO 3. Fuente: elaboración propia.

Figura 57. Vista en axonometría seccionada sala Kraakhuis, CASO 4. Fuente elaboración propia.

Figura 58. Serie de secciones extraídas de la simulación acústica CASO 4. Fuente: elaboración propia.

Figura 59. Vista en axonometría seccionada sala Kraakhuis, CASO 5. Fuente elaboración propia.

Figura 60. Serie de secciones extraídas de la simulación acústica CASO 5. Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Niveles de presión sonora correspondientes a sonidos y ruidos típicos, y valoración subjetiva asociada. Fuente: (Carrión Isbert, 1998), *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*.

Tabla 2. Curvas NC recomendadas y niveles de ruido de fondo equivalentes (en dBA). Fuente: (Carrión Isbert, 1998), *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*.

Tabla 3. Márgenes de valores recomendados de RTmid en función del tipo de sala (recintos ocupados). (Carrión Isbert, 1998), *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*.

Tabla 4. Relación entre %ALCons, STI / RASTI y la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad. Fuente: (Carrión Isbert, 1998), *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*.

Tabla 5. Resultados simulación acústica CASO 1. Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Resultados simulación acústica CASO 2. Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Resultados simulación acústica CASO 3. Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Resultados simulación acústica CASO 4. Fuente: elaboración propia.

Tabla 9. Resultados simulación acústica CASO 5. Fuente: elaboración propia.

