
Intervención Acústica en la antigua Iglesia de la Beneficencia. Simulación por trazado de rayos.

04 jul. 15

AUTOR:

MARTA FUENTES TORRESANO

TUTOR ACADÉMICO:

Ignacio Guillén Guillamón Física Aplicada

Salvadora Reig García-San Pedro Física Aplicada



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR
ENGINYERIA
D'EDIFICACIÓ

ETS d'Enginyeria d'Edificació
Universitat Politècnica de València

Resumen/Abstract

El proyecto se centra en un edificio patrimonial que en el proceso de rehabilitación sufre un cambio de uso y analiza las implicaciones acústicas de las decisiones tomadas en proyecto. Una vez analizadas las implicaciones acústicas, se dan soluciones tanto de diseño geométrico como de acondicionamiento y aislamiento acústico de cara a alcanzar los niveles de calidad definidos en función de los usos de los recintos. De cara a la evaluación de las medidas tomadas se utilizan tanto cálculos analíticos como distintas herramientas de simulación.

Palabras clave: Acondicionamiento acústico, acústica arquitectónica, música, patrimonio, simulación

The project focuses on a heritage building in the rehabilitation process undergoes a change of use and analyzes the acoustic implications of decisions made in the project. When the acoustic implications will be analyzed, both geometric design solutions and conditioning and soundproofing towards reaching the quality levels defined in terms of the uses of the sites are given. Facing the evaluation of measures taken both analytical calculations as different simulation tools are used.

Keywords: Acoustic conditioning, architectural acoustics, music, heritage, simulation

Agradecimientos

Para todas esas personas que confiaron en mí, especialmente, para aquellas que me ayudaron a que ésto saliera adelante. Gracias, además, a las personas que aún negándome a su ayuda, siguieron con su apoyo.

Y, por supuesto, a vosotras que era imposible creer que fuerais a aportarme tanto de todo.

Acrónimos utilizados

Br: Brillo acústico.

BR: Calidez acústica.

C₈₀: Claridad musical.

CAD: Computer Aided Design / Diseño Asistido por Ordenador.

D₅₀: Definición.

EDT: Early Decay Time.

LF₈₀: Eficiencia lateral.

NC: Curvas “Noise Criteria”

STI: Speech Transmission Index.

Tr: Tiempo de reverberación.

Tr_{mid}: Tiempo de reverberación medio.

T_s: Tiempo central.

Índice

Resumen/Abstract	I
Agradecimientos	III
Acrónimos utilizados	V
Índice	VII
Capítulo 1. Introducción	1
1. Desarrollo y objetivos	1
2. Antecedentes	2
Capítulo 2. Acústica de salas	3
1. Introducción	3
1.1 Generalidades	3
1.2 Factores de modificación acústica	3
1.3 Conceptos básicos de acústica arquitectónica	4
2. El sonido en un recinto cerrado	7
2.1 Sonido reflejado	8
2.2 Tiempo de reverberación	9
3. Parámetros acústicos de calidad de recintos	11
4. Simulación acústica	17
4.1 Fundamentos básicos del software “ODEON”	18
4.2 Parámetros simulados por “ODEON”	19
Capítulo 3. Estudio del caso	23
1. Iglesia de la Beneficencia	23
1.1 Ubicación	23
1.2 La Casa de la Beneficencia	24
1.3 Historia de la Iglesia de la Beneficencia	26
2. Método de simulación del recinto	28
2.1 Realización del modelo geométrico	28
2.2 Validación del modelo	30
2.3 Características de las simulaciones	31
2.4 Definición de los escenarios	32
3. Resultados de la simulación y su análisis	34
3.1 Introducción	34
3.2 Parámetros a estudio	35
3.3 Mapas de los parámetros acústicos	51
Capítulo 4. Conclusiones	55
Capítulo 5. Índice de figuras	57
Capítulo 6. Índice de tablas	59

Capítulo 7. Bibliografía	61
ANEXOS	A
Anexo I. Planos de la Iglesia de la Beneficencia	A
Anexo II. Mediciones del tiempo de reverberación “in situ”	E
Anexo III. Mapas de parámetros acústicos (1000 Hz)	H

Capítulo 1.

Introducción

1. Desarrollo y objetivos.

El presente proyecto está desarrollado dentro de la modalidad de Trabajo de Fin de Grado de *Desarrollo de Proyectos Técnicos de Construcción*, siendo el área temática *Conservación del patrimonio arquitectónico y arquitectura tradicional*.

Este trabajo parte de la necesidad de un estudio acústico de la sala a estudio, además de una solución para una posible intervención.

Primeramente, necesitábamos conocer los parámetros acústicos y el acondicionamiento acústico de la Iglesia de la Beneficencia, objeto de nuestra investigación. Y posteriormente, tendremos que realizar un estudio para averiguar si los datos obtenidos con esta actuación son adecuados para la posible audición musical dentro del recinto de la iglesia, con la intención de poder utilizar ésta como sala para la realización de conciertos.

Por ese motivo, se explicará a continuación, de manera más concreta los pasos a seguir en dicho estudio:

- Conseguir un modelo geométrico válido para poder realizar las simulaciones.
- Una vez validado este modelo, realizar varias simulaciones con nuestra intervención acústica en la iglesia, con público y sin él.
- Obtención de los parámetros acústicos necesarios a través de las simulaciones.
- Y finalmente, corroborar la idoneidad de los datos obtenidos para que pueda ser utilizada como sala de conciertos.

2. Antecedentes.

Hoy en día estamos acostumbrados a la realización de cambios de uso en edificios históricos, principalmente de edificios eclesiásticos que, por un motivo o por otro, frecuentemente por encontrarse en desuso, es necesario su cambio además de numerosas reformas.

A la hora de reformar estos edificios, normalmente, ya se tiene en cuenta su futuro uso, por lo que se evita que se cierre nuevamente y que, a la larga, con motivo de su abandono, se deteriore otra vez. Claro que, para que esto ocurra se les debe dar usos diferentes de aquellos para los que fueron concebidos. Aunque no es un cambio total, hay que tener en cuenta que son edificios que pueden ser históricos y que determinados detalles arquitectónicos no los podemos cambiar, como tampoco podemos cambiar elementos decorativos intrínsecos de estos edificios.

Los nuevos usos más frecuentes que se les suele dar a estos edificios eclesiásticos son principalmente dos: como espacio escénico o como sala de conciertos. Nosotros nos centraremos en el segundo caso.

Para el uso del recinto como sala de audición musical el principal tema a tratar es la acústica del edificio, ya que son necesarias unas características especiales y que los parámetros acústicos estén dentro de un determinado rango, que se definen dependiendo del uso específico que se le vaya a dar a la sala.

Volviendo al tema de la arquitectura de la sala, al ser como hemos dicho anteriormente, una iglesia, tiene como principal característica un elevado volumen en relación a su ocupación en planta, además de estar revestida con materiales con alto poder reflectante acústico que pueden causar, en un alto porcentaje de recintos, problemas de tiempos de reverberación excesivos y, consecuentemente, una claridad musical insuficiente además de una deficiente inteligibilidad de la palabra.

A causa de todo esto, el acondicionamiento acústico de estos edificios es difícil de realizar con garantías de que pueda funcionar perfectamente.

Capítulo 2.

Acústica de salas

1. Introducción.

1.1 Generalidades.

La acústica de salas es una rama de la ciencia que ha ido evolucionando de la mano de la Física, aún sigue siendo una rama muy joven comparada con otras ciencias y, por eso, sigue en proceso de estudio y crecimiento.

Se puede decir que en los últimos años ha habido una evolución considerable de la electrónica aplicada al sonido pero sigue sin darse importancia a los elementos específicos para que una sala se pueda considerar buena acústicamente, por lo que los avances tecnológicos quedan mermados por la parte arquitectónica. Debemos pensar en la sala como un elemento acústico más del sistema, ya que es el único canal por el que viaja el sonido desde el lugar de la emisión hasta nuestros oídos.

Debido a esto, una sala mal acondicionada o sin acondicionamiento puede distorsionar el sonido de tal manera que empiece a existir una mala comunicación o una posible incomunicación entre emisor y receptor.

A continuación veremos algunos de los factores que modifican las cualidades acústicas de una sala y, por supuesto, la definición de los conceptos básicos de acústica arquitectónica que hemos utilizado para realizar este trabajo.

1.2 Factores de modificación acústica.

Debido a que esta ciencia también tiene que ver con la percepción que los seres humanos tengamos del sonido, los factores los podemos diferenciar en dos grupos: factores objetivos y factores subjetivos.

Factores objetivos.

Estos factores se basan en conceptos medibles. Son los siguientes:

- Reflexión de las ondas sonoras en paredes y techos. Al ser un recinto cerrado, los muros o tabiques que hacen de cierre tienen gran cantidad de superficie que permite la reflexión de multitud de ondas. Para reducirlas es habitual colocar materiales absorbentes que evitan valores altos en los tiempos de reverberación.
- Distribución uniforme del sonido. Este factor requiere un acertado diseño del auditorio o sala, además de los materiales interiores elegidos.

- Intensidad sonora suficiente en toda la sala. La intensidad sonora producida en el escenario debe adecuarse a la geometría de la sala. Con poca intensidad habrá zonas donde no se escuche nada o se escuche mal y con mucha intensidad puede llegar a haber una saturación acústica.
- Eliminación de ruidos no deseados. Para ello debemos aislar debidamente la sala tanto exterior como interiormente.

Factores subjetivos.

Son factores más intangibles, como son:

- Intimidad. Es el intervalo de tiempo entre la llegada del sonido directo y del primer sonido reflejado.
- Dirección de la que llega el sonido reflejado. Los oyentes pueden situar espacialmente la fuente sonora si el sonido reflejado proviene de las paredes de la sala, es decir, si el sonido es diferente en cada oído, sin embargo, si viene del techo el oyente no podrá situarlo. Por este motivo es preferible las salas con menos ancho que largo.

1.3 Conceptos básicos de acústica arquitectónica.

En este apartado comentaremos los conceptos más importantes relacionados con la acústica arquitectónica que hemos utilizado para realizar este trabajo.

Sonido.

Desde un punto de vista físico, el sonido es una vibración que se propaga en un medio elástico (sólido, líquido o gaseoso), generalmente el aire. Otra definición para el sonido podría ser la sensación producida en el oído por la vibración de las partículas que se desplazan (en forma de onda sonora) a través de un medio elástico que las propaga.

Para que se produzca un sonido se requiere la existencia de un cuerpo vibrante llamado "foco" (una cuerda tensa, una varilla, una lengüeta...) y del medio elástico transmisor de esas vibraciones, las cuales se propagan a su través constituyendo la onda sonora.

En referencia a este punto, la velocidad del sonido es en función del medio donde transmite, por ejemplo: en el aire recorre una distancia de 340 metros por segundos, en el agua es de 1500 metros por segundos y, por último, en los sólidos es desde 2500 metros hasta 6000 metros por segundos.

Presión sonora.

Cuando se produce un sonido, la presión del aire que nos rodea cambia levemente según avanza la onda de propagación, aumentando y disminuyendo en pequeñas fracciones de segundo.

Esta diferencia instantánea de presión debida a la onda sonora se llama presión sonora.

La presión sonora tolerable es muy pequeña comparada con la presión atmosférica. Una presión sonora mil veces menor que la atmosférica nos provocará dolor en los oídos e incluso riesgo de pérdida auditiva.

Periodo.

Es el tiempo que tarda en producirse un ciclo completo de la onda sonora. Su unidad es el segundo.

Frecuencia de un sonido.

Es el número de ciclos que se realizan por segundo. Por tanto es la inversa del periodo. Se mide en Hz.

$$f = \frac{1}{T}$$

Ecuación 1.

Longitud de onda del sonido (λ).

Es la distancia entre puntos análogos en dos ondas sucesivas, se mide en metros. La longitud de onda está relacionada con la velocidad del sonido, frecuencia y periodo.

Bandas de frecuencia.

Los ruidos se pueden descomponer en una superposición de sonidos puros de frecuencias diferentes. La repartición de la energía sonora en función de cada una de estas frecuencias define el espectro de frecuencias de ruido. El conocimiento del espectro permite establecer si el ruido contiene frecuencias bajas (graves), medias o altas (agudas). Este es un fenómeno importante de la investigación, ya que el oído humano reacciona de manera diferente según las frecuencias, y la propagación del ruido en el aire y a través de los obstáculos depende asimismo del espectro de frecuencias del ruido.

El dominio audible de frecuencias se sitúa aproximadamente en el intervalo 20-20.000 Hz. Para realizar un análisis de frecuencias- análisis espectral- se descompone este intervalo en bandas, y se determina el nivel de presión sonora correspondiente a cada una de las bandas.

El análisis espectral realizado en tercios de octava es más fino que en octavas. Los niveles obtenidos para una octava son superiores a los obtenidos para un tercio de octava, ya que cada uno de los primeros resulta de la suma energética de los niveles de los tres tercios de octava que contienen.

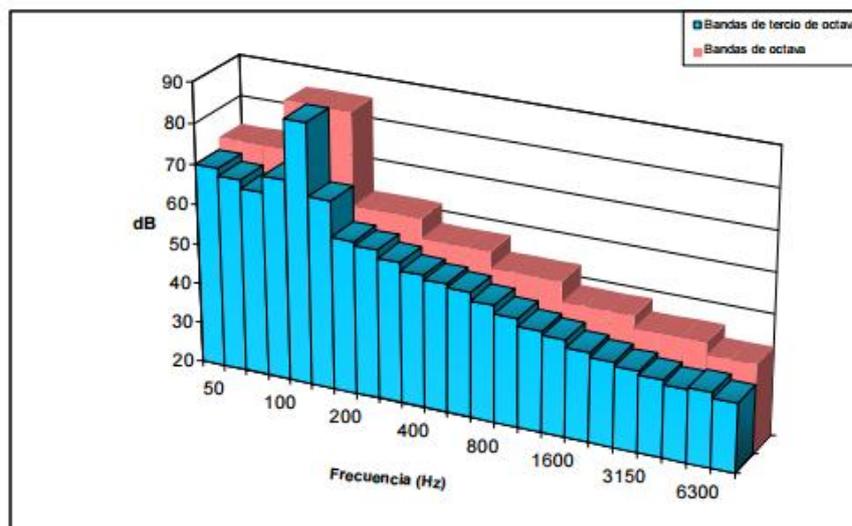


Figura 1. Comparación octavas y 1/3 de octava.

Fuente: www.magrama.gob.es

OCTAVAS en Hz	1/3 OCTAVAS en Hz
	16
	20
	25
31.5	31.5
	40
	50
63	63
	80
	100
125	125
	160
	200
250	250
	315
	400
500	500
	630
	800
1000	1000
	1250
	1600
2000	2000
	2500
	3150
4000	4000
	5000
	6300
8000	8000
	10000
	12500
16000	16000
	20000

Tabla 1. Representación octavas y 1/3 de octava.

Fuente: www.magrama.gob.es

Decibelio lineal (dB) y decibelio ponderado A (dBA).

El decibelio (dB) es una unidad que se utiliza para medir la intensidad del sonido y otras magnitudes físicas. Un decibelio es la décima parte de un belio (B), unidad que recibe su nombre por Graham Bell, el inventor del teléfono.

La escala de decibelios es logarítmica, por lo que un aumento de tres decibelios en el nivel de sonido ya representa una duplicación de la intensidad del ruido. Por ejemplo, una conversación normal puede ser de aproximadamente 65 dB y, por lo general, un grito es de 80 dB. La diferencia es de tan sólo 15 dB, pero el grito es 30 veces más intenso.

El oído humano, dependiendo en que frecuencia se emita el sonido, tiene una sensibilidad u otra, por lo que la escala lineal no es un buen método a la hora de intentar medir la sonoridad. Para podernos acercar más a esta sonoridad real, se utiliza una escala ponderada, llamada A. Los niveles de presión sonora medidos con esta escala se expresarán en dBA o dB(A).

Nivel de presión sonora (Lp o NPS).

Para el rango de los sonidos audibles, la presión sonora varía entre valores extremadamente pequeños ($0,00002 \text{ Pa} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}$) hasta valores que si bien todavía pequeños, son un millón de veces más grandes que los anteriores (20 Pa). Estas cifras son poco prácticas de manejar, por lo cual se ha introducido otra escala que comprime este rango: la escala de decibelios. Para expresar una presión sonora en decibelios, se define primero una presión de referencia, que es la mínima presión sonora audible, $0,00002 \text{ Pa}$.

Entonces se define el nivel de presión sonora, L_p o NPS (en inglés se utiliza la sigla SPL, sound pressure level), mediante la siguiente fórmula:

$$\text{NPS} = 20 \log_{10} \frac{P}{P_{\text{ref}}} \quad [\text{dB}] .$$

Ecuación 2.

A continuación se muestra una conversión entre presión sonora y nivel de presión sonora.

NPS [dB]	P [Pa]
120	20,0
110	6,3
105	3,6
100	2,0
95	1,1
90	0,63
85	0,36
80	0,20
75	0,11
70	0,063
60	0,020
50	0,0063
40	0,0020
30	0,00063
20	0,00020
10	0,000063
0	0,000020

Tabla 2. Comparación presión sonora – nivel de presión sonora.

Fuente: <http://datateca.unad.edu.co/>

2. El sonido en un recinto cerrado.

Cuando un foco sonoro emite energía acústica, las ondas sonoras se propagan a partir de él en forma de onda esférica si no encuentran ningún obstáculo en su camino. Al chocar contra algún obstáculo se reflejan cambiando su dirección. Si la superficie reflectante fuese completamente impermeable al aire y perfectamente rígida no habría pérdida de energía en cada reflexión. Sin embargo, en la realidad no existe un reflector perfecto, ya que éste entrará en vibración por efecto de la onda incidente, o permitirá la propagación de las ondas sonoras en el interior del material, si éste tiene estructura porosa. Como consecuencia de cualquiera de estos dos procesos, las ondas reflejadas tendrán menos energía acústica que los incidentes, diciéndose que parte de la energía acústica ha sido absorbida por la superficie.

La energía emitida por una fuente sonora en un recinto cerrado alcanza al oyente de dos formas:

- Sonido directo: aquel que recorre la trayectoria en línea recta existente entre la fuente sonora y el oyente.
- Sonido reflejado: aquel que alcanza al oyente, después de realizar una o más reflexiones sobre las superficies de la sala.

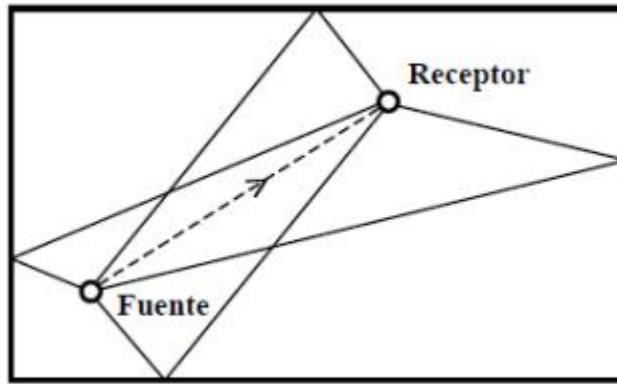


Figura 2. Línea de puntos: sonido directo, línea continua: sonido reflejado

Fuente: www.magrama.gob.es

Si tomamos como referencia el punto de escucha, el nivel sonoro recibido del sonido directo depende de la distancia a la fuente, mientras que el nivel sonoro obtenido del sonido reflejado, depende tanto de los diferentes caminos recorridos por los rayos sonoros como del coeficiente de absorción de los materiales de las superficies que definen la sala.

2.1 Sonido reflejado.

Al analizar la evolución temporal del sonido reflejado en un punto cualquiera de la sala, se identificarán básicamente dos zonas: una primera zona que engloba todas aquellas reflexiones que llegan inmediatamente después del sonido directo, y que reciben el nombre de primeras reflexiones o reflexiones tempranas (los primeros “rebotes” en paredes, suelo y techo), y una segunda formada por las siguientes reflexiones que constituyen la denominada cola reverberante.

Si bien la llegada de reflexiones al punto de escucha se produce de forma continua, y por tanto sin cambios bruscos, también es cierto que las primeras reflexiones llegan de forma más discretizada que las tardías.

La representación gráfica medida en tiempo, normalmente en milisegundos, de la llegada de las reflexiones y su nivel de presión sonora, medido en dB, se llama ecograma o reflectograma. En la parte inferior de la figura 3 tenemos un ejemplo de ello.

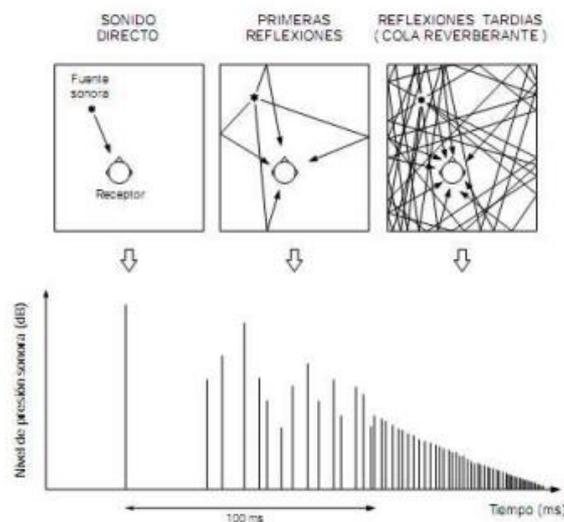


Figura 3. Sonido directo y reflexiones.

Fuente: (Isbert, 1998)

En general, las primeras reflexiones presentan un nivel energético mayor que las correspondientes a la cola reverberante, ya que en las reflexiones parte del sonido se va atenuando. Además, como las primeras reflexiones dependen directamente de las formas geométricas de la sala, son específicas de cada punto y, por tanto, determinan las características acústicas propias de la sala en esa posición de escucha, juntamente con el sonido directo.

En resumen podemos encontrarnos tres formas diferentes por las que el oyente en una sala recibe el sonido: Sonido Directo, Primeras Reflexiones y la Cola Reverberante, que ésta última llega después de las primeras reflexiones y está más distorsionado que ellas respecto al sonido emitido. Es un sonido difuso, suave y uniforme en todo el recinto.

2.2 Tiempo de reverberación.

La reverberación es un fenómeno derivado de la reflexión del sonido. Consiste en una ligera prolongación del sonido una vez que se ha extinguido el original, debido a las ondas reflejadas. Estas ondas reflejadas sufrirán un retardo no superior a 50 ms, que es el valor de la persistencia acústica. Cuando el retardo es mayor ya no hablamos de reverberación, sino de eco.

En un recinto pequeño la reverberación puede resultar inapreciable, pero cuanto mayor es el recinto, mejor percibe el oído este retardo o ligera prolongación del sonido. Para determinar cómo es la reverberación en un determinado recinto se utiliza una serie de parámetros físicos, uno de ellos es conocido como tiempo de reverberación.

El tiempo de reverberación es el tiempo que transcurre en un determinado recinto, desde que se produce un determinado sonido, hasta que la intensidad de ese sonido disminuye a una millonésima de su valor original. Al tiempo de reverberación también le llamamos TR60, al ser el tiempo transcurrido (medido en segundos) en decrecer 60 dB la energía que recibe el receptor, al parar bruscamente la fuente sonora.

El tiempo de reverberación es uno de los principales parámetros indicadores de la calidad acústica de una sala. Su valor depende de numerosos factores: el coeficiente de absorción de los materiales de la sala, el volumen, superficie, y el dimensionado de ésta entre otros.

El físico Wallace Clement Sabine desarrolló una fórmula para calcular el tiempo de reverberación (TR) de un recinto en el que el material absorbente está distribuido de forma uniforme. Consiste en relacionar el volumen de la sala (V) y la absorción total (A) con el tiempo que tarda el sonido en disminuir 60 dB en intensidad, a partir de que se apaga la fuente sonora.

$$RT = \frac{0,162V}{A} = \frac{0,162V}{S \cdot \alpha}$$

Ecuación 3.

El tiempo de reverberación es, como podemos deducir de la fórmula anterior, proporcional al volumen de la sala e inversamente proporcional a su absorción.

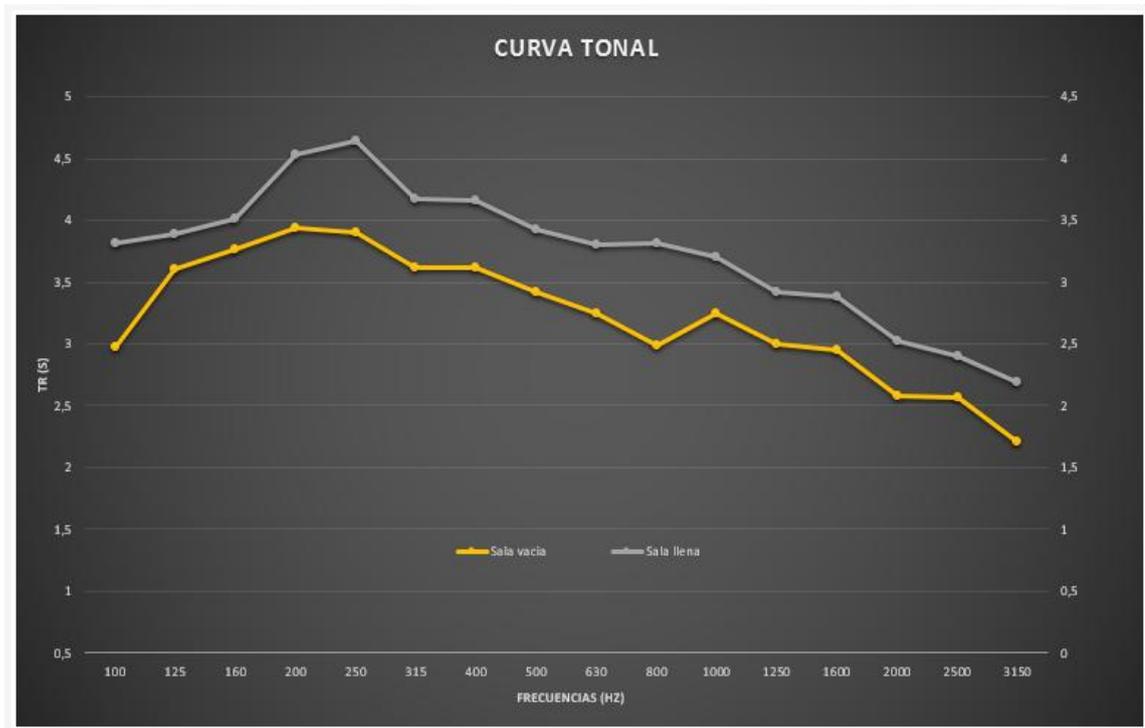


Figura 4. Ejemplo curva tonal.
Fuente: Propia.

Antoni Carrión [Carrión Isbert, 1998] diferencia a los recintos dependiendo de su tiempo de reverberación en recintos vivos cuando éste es alto (naves industriales, iglesias, etc.) y recintos apagados o sordos cuando el R_t es bajo (locutorio, estudio de grabación, etc.).

La gráfica que representa el tiempo de reverberación de una sala, en función de su frecuencia, se denomina curva tonal y es el principal criterio para clasificar la calidad de una sala de audición.

Podemos observar en la Figura 4 que a medida que la frecuencia va aumentando, el tiempo de reverberación tiende a ir bajando, esto es muy común en la mayoría de representaciones de este tipo debido a que los materiales más utilizados como revestimiento tienen coeficientes de absorción más altos a altas frecuencias.

3. Parámetros acústicos de calidad de recintos.

Una vez explicado como funciona el sonido en un recinto cerrado, además de los conceptos básicos de la acústica de salas, veremos los parámetros acústicos que se utilizan para determinar en qué nivel de calidad estará nuestra sala a estudio.

Tiempo de reverberación.

Como hemos visto anteriormente, podemos decir que el Tr es el tiempo que pasa desde que un sonido es emitido por una fuente hasta que el nivel de presión sonora cae 60 dB, este parámetro depende de la frecuencia.

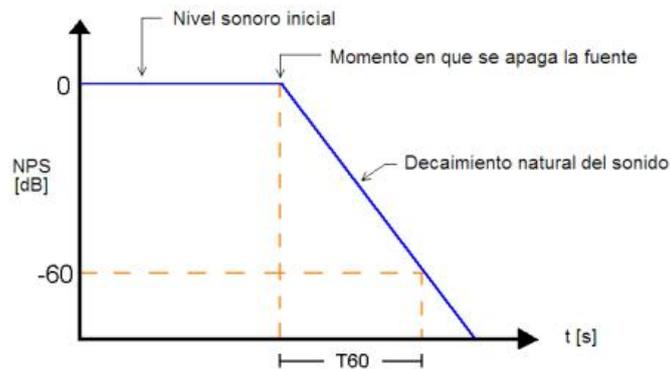


Figura 5. Tiempo de reverberación.

Fuente: Aulestia Valencia, 2010

En la tabla 3 vemos los tiempos de reverberación medios óptimos para cada tipo de sala, se puede definir este Tr_{mid} como la media aritmética de Tr en la frecuencia de 500 Hz y Tr en la frecuencia de 1000 Hz.

$$Tr_{mid} = \frac{Tr_{500Hz} + Tr_{1000Hz}}{2}$$

Ecuación 4.

Según Leo Beranek [Beranek, 1996], una sala destinada a conciertos, completamente llena y con un uso principalmente de música sinfónica, tiene que tener un Tr_{mid} comprendido en el rango de 1,8 y 2 segundos.

Sala	TR (medio 1KHz y 500Hz) Sala Ocupada
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	2.0-3.0
Locutorio de radio	0.2-0.4

Tabla 3. Tiempo reverberación medio para cada tipo de sala.

Fuente: <http://www.noisess.com>

Evaluación del ruido de fondo.

Para determinar el grado de molestia que sufre un oyente en una sala acústica por ruido ambiental, se hará una comparación de los niveles de ruido que hay en el recinto en cada banda de octava con un conjunto de curvas de referencia, llamadas “Noise Criteria”, NC.

Estas curvas también sirven para llevar un control y que no se sobrepasen determinados niveles de ruido máximos recomendables en diferentes tipos de salas, según su función. Si decimos que un recinto cumple, por ejemplo, la NC-30, sabemos que los niveles de ruido en cada banda de octava estarán por debajo de la curva NC indicada.

En la gráfica de estas curvas se puede observar que en bandas de octava de frecuencias inferiores se permiten niveles de presión sonora superiores, esto es debido a que el oído es menos sensible en frecuencias bajas (graves) que en frecuencias altas (agudos).

En la figura 5 observamos las curvas NC recomendadas dependiendo del tipo de recinto que vayamos a estudiar y su equivalente en decibelios.

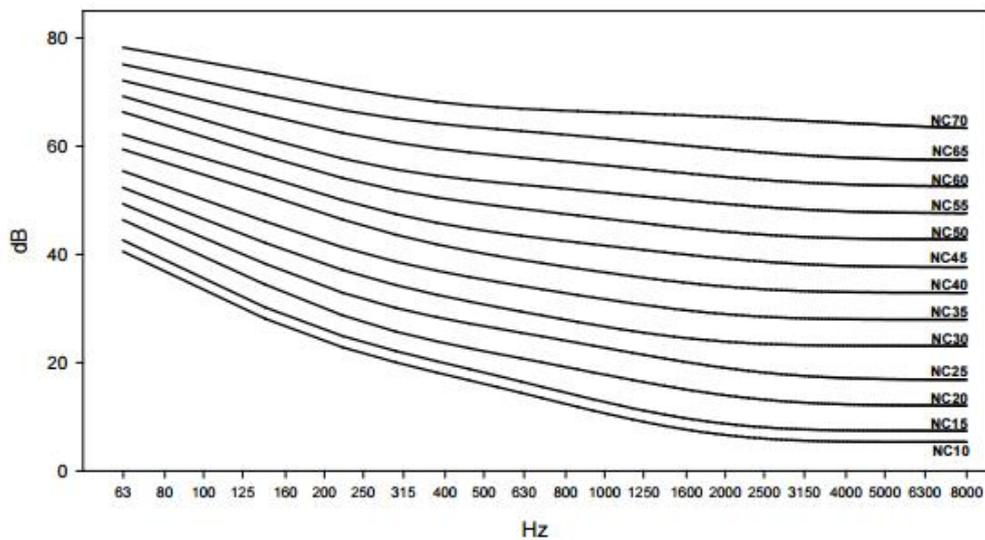


Figura 6. Curvas NC
Fuente: García García, 2013

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	dBA
NC15	47	36	29	22	17	14	12	11	27,08
NC20	51	40	33	26	22	19	17	16	31,32
NC25	54	44	37	31	27	24	22	21	35,57
NC30	57	48	41	35	31	29	28	27	39,73
NC35	60	52	45	40	36	34	33	32	44,19
NC40	64	57	50	45	41	39	38	37	49,10
NC45	67	60	54	49	46	44	43	42	53,38
NC50	71	64	58	54	51	49	48	47	58,08
NC55	74	67	62	58	56	54	53	52	62,54
NC60	77	71	67	63	61	59	58	57	67,42
NC65	80	75	71	68	66	64	63	62	72,23
NC70	83	79	75	72	71	70	69	68	77,38

Tabla 4. Nivel de presión sonora máximo en cada banda.
Fuente: García García, 2013

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

Tabla 5. Curvas NC recomendadas.
Fuente: Carrión Isbert, 1998

Brillo (Br) y calidez (BR) acústica.

Estos dos parámetros en la mayoría de las ocasiones los encontramos juntos ya que ambos utilizan el tiempo de reverberación como dato principal para hallar su valor.

La calidez acústica está relacionada con los sonidos graves; además representa la suavidad del sonido que se percibe dentro de la sala. Es decir, podemos definir la calidez como la respuesta de la sala cuando la fuente emite frecuencias bajas.

Se obtiene sumando los tiempos de reverberación de frecuencias bajas, exactamente en la banda de frecuencia de 125 Hz y de 250 Hz, y dividiendo este resultado entre la suma de los tiempos de reverberación de frecuencias medias, 500 Hz y 1000 Hz.

$$BR = \frac{Tr_{125} + Tr_{250}}{Tr_{500} + Tr_{1000}}$$

Ecuación 5.

Según Leo Beranek [Beranek, 1996] este parámetro debe estar comprendido dentro de los siguientes rangos:

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

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

Por otro lado, el brillo acústico está relacionado con los sonidos agudos, el sonido es brillante cuando es claro y rico en armónicos.

Se obtiene sumando los tiempos de reverberación de frecuencias altas, exactamente en la banda de frecuencia de 2 kHz y 4kHz, y se divide entre la suma de los tiempos de reverberación en bandas de frecuencia media, 500 Hz y 1000 Hz.

$$Br = \frac{Tr_{2000} + Tr_{4000}}{Tr_{500} + Tr_{1000}}$$

Ecuación 6.

Leo Beranek recomienda que el valor del brillo acústico sea menor de 0,87 en salas completamente ocupadas. No obstante, es conveniente que no supere el valor de 1.

“Early Decay Time” (EDT).

Se podría definir como seis veces el valor del tiempo que tarda en bajar el nivel de presión sonora 10 dB, desde que deja de emitir la fuente sonora.

Este parámetro también está relacionado con el tiempo de reverberación, y como le pasa a éste en cada frecuencia tendrá un valor diferente. Su principal diferencia es que el EDT es un parámetro subjetivo porque mide la reverberación percibida y el Tr es un parámetro objetivo ya que mide la reverberación real. Todo esto significa que cuando en un punto de la sala el EDT es significativamente menor que el Tr, la sala estará subjetivamente más apagada de lo que deduciríamos del valor de su tiempo de reverberación.

Como en el caso del tiempo de reverberación y para poder compararlo con éste, hallaremos el EDT_{mid} utilizando las bandas de frecuencia de 500 Hz y 1000Hz.

$$EDT_{mid} = \frac{EDT_{500Hz} + EDT_{1000Hz}}{2}$$

Ecuación 7.

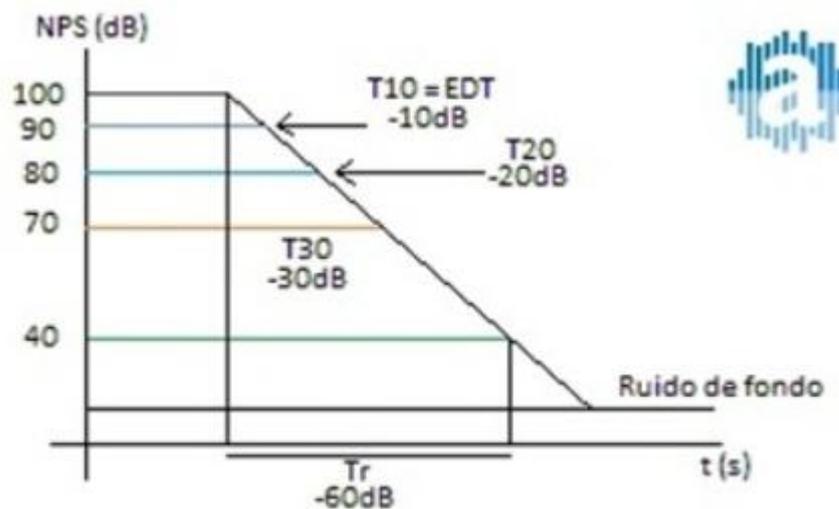


Figura 7. Diferencia entre EDT y Tr.
Fuente: www.ingenieriacusticafacil.com

Claridad musical (C_{80}).

El actual parámetro solo se utiliza en salas destinadas a sede musical, sea del tipo que sea. Se puede definir como el cociente entre la energía sonora que llega al público durante los primeros 80 ms después de la llegada del sonido directo y la energía sonora que llega después, se calcula en cada banda de frecuencia desde los 125 Hz hasta los 4kHz.

$$C_{80} = \frac{\text{Energía asta 80 ms}}{\text{Energía después de 80 ms}} \text{ (en dB)}$$

Ecuación 8.

Beranek recomienda que en salas vacías el valor medio de claridad musical en las bandas de 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz (llamado "music average") esté dentro del rango siguiente:

$$-4 \leq C_{80}(\text{mid}) \leq 0 \text{ dB}$$

Por otro lado, L.G. Marshall [Marshall, 1994] recomienda utilizar el siguiente rango en salas ocupadas:

$$-2 \leq C_{80}(\text{mid}) \leq +2 \text{ dB}$$

Definición (D_{50}).

Se puede definir como la relación de energía reflejada recibida durante los primeros 50 ms y el sonido directo respecto a la energía total recibida. Se calcula en cada banda de frecuencia desde los 125 Hz hasta los 4 kHz y se suele expresar en porcentaje.

Es recomendable que su valor sea superior al 50% ya que hay una relación con la inteligibilidad de la palabra, cuanto mayor sea el valor del índice de definición mayor será la claridad.

Sonoridad (G).

Definimos sonoridad como el grado de amplificación producido por la sala. Este parámetro depende de la distancia del receptor a la fuente sonora, de la reverberación, de la energía de las primeras reflexiones y de la superficie ocupada por el público.

Es la diferencia entre el nivel total de presión sonora producida por una fuente omnidireccional en un punto de la sala y el nivel de presión sonora producido por la fuente situada en campo libre y medido a una distancia de 10 metros.

Ambos niveles se miden en bandas de frecuencia de octavas, entre 125 Hz y 4 kHz, y aplicando la misma potencia a la fuente.

Beranek recomienda que el valor G para la sala vacía, obtenido como media aritmética de las bandas de frecuencia de 500 Hz y 1000 Hz, esté entre los siguientes valores:

$$3 \leq G_{\text{mid}} \leq 5,5 \text{ dB}$$

Eficiencia lateral (LF₈₀).

Podemos definir la eficiencia lateral como la relación de energía que llega lateralmente al oyente en los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo y la energía recibida por el oyente en todas las direcciones durante el mismo intervalo de tiempo.

Cuando mayor sea este parámetro, el grado de espaciabilidad del sonido también será mayor, por lo que se dice que la eficiencia lateral es utilizada para medir la espaciabilidad del sonido.

$$LF = \frac{\text{Energía lateral asta 80 ms}}{\text{Energía total asta 80 ms}}$$

Ecuación 9.

Normalmente, para que se pueda comparar más fácilmente, se utiliza el valor medio de la eficiencia lateral que se corresponde con las bandas frecuencias de octavas comprendidas entre 125 Hz y 1000 Hz.

$$LF_{mid} = \frac{LF \ 125 \ Hz + LF \ 250 \ Hz + LF \ 500 \ Hz + LF \ (1000Hz)}{4}$$

Ecuación 10.

Se recomienda un valor mayor o igual a 0,19 para LF_{mid} cuando el recinto esté vacío.

STI / RASTI y %ALCons.

Estos dos parámetros están muy relacionados con la inteligibilidad de la palabra y se utilizan, sobretodo, en salas donde el uso de la palabra sea muy importante, como es el caso de salas de conferencias o de reuniones.

El STI o “Speech Transmission Index” se calcula con unos métodos muy complejos y laboriosos. A raíz de este motivo, surge otro método, el llamado RASTI o “Rapid Speech Transmission Index”; el cual surge como simplificación del método STI, reduciendo el número de frecuencias moduladoras y portadoras.

%ALCons	STI/RASTI	Inteligibilidad
0% – 1.4%	0.88 – 1	Excelente
1.6% – 4.8%	0.66 – 0.86	Buena
5.3% – 11.4%	0.5 – 0.64	Aceptable
12% – 24.2%	0.36 – 0.49	Pobre
27%1 – 46.5%	0.29 – 0.34	Mala

Tabla 6. Relación entre %ALCons, STI/RASTI y el grado de inteligibilidad.

Fuente: Carrión Isbert, 1998

En la tabla anterior vemos también un parámetro denominado “%ALCons” que representa las siglas de “Articulation Loss of Consonants”, es decir, es el porcentaje de pérdida de la articulación de las consonantes.

Cuanto mayor sea este valor, menor será la inteligibilidad de la palabra. Es un término definido por el investigador holandés V.M.A. Peutz, que obtuvo una serie de informes de distintas salas, basados en encuestas realizadas a un conjunto de espectadores; éstos debían escuchar una lista de “logatomos” (consonante-vocal-consonante) y escribir lo que habían entendido. De acuerdo con los resultados, se podía deducir el porcentaje de aciertos y, por tanto, como era la inteligibilidad de la palabra en la sala.

Con los resultados de todas sus encuestas y con ayuda de la estadística, relacionó el tiempo de reverberación con la inteligibilidad de la palabra en una fórmula matemática más sencilla que los cálculos mediante STI o RASTI. Normalmente se calcula con la banda de octava de 2000 Hz ya que es la que más relacionada está con la inteligibilidad.

Tiempo central (Ts).

Este parámetro se puede utilizar en cualquier tipo de sala y se define como el primer momento del área que queda debajo de la curva de energía-tiempo, según Kurer [Kurer, 1971].

$$T_s = \frac{\int_0^{\infty} t p^2(t) dt}{\int_{0,005}^{\infty} p^2(t) dt} \text{ (en ms)}$$

Ecuación 11.

Mide el grado de nitidez del sonido, un aumento de Ts supone un aumento de la nitidez percibida en la posición de cálculo. Es recomendable que su valor sea inferior a 140 ms.

4. Simulación acústica.

Recientemente, desde que la informática pasó a ser una herramienta común en todos los campos de trabajo, se empezó a utilizar la simulación acústica como método rápido y bastante fiable, ya que nos basamos en un supuesto, de conocer las particularidades de las salas que queremos estudiar.

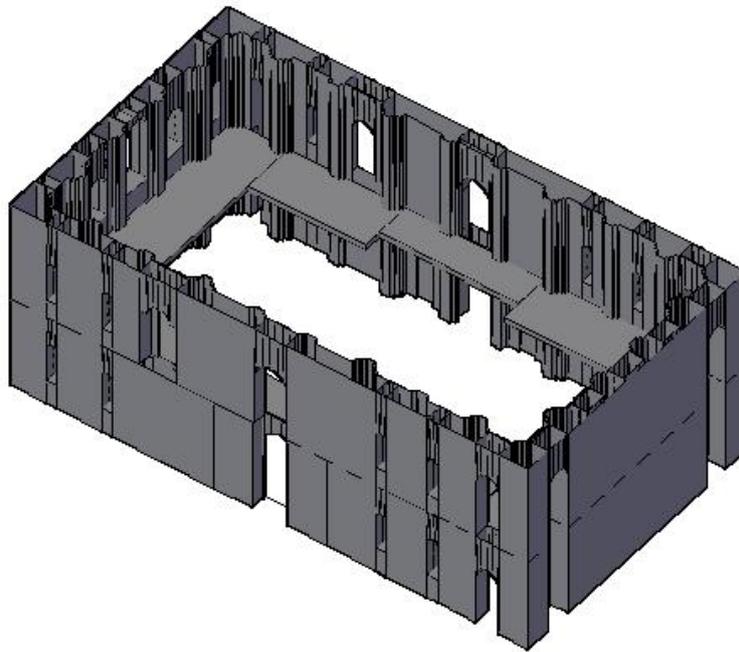
Una simulación acústica consiste en un modelo tridimensional, diseñado con la máxima exactitud, el cual lo podemos utilizar para averiguar los fenómenos acústicos que se desarrollan en el interior de la sala en la que estamos trabajando.

Primeramente, lo que se debe hacer es un estudio de los planos de la sala para conseguir pasar estos datos con la mayor aproximación posible a un programa de dibujo en el cual, además, haremos un modelo en 3D. En nuestro caso, hemos utilizado el software “AutoCAD 2014” para diseñarlo, ayudándonos de su herramienta “3DCARA” para el diseño tridimensional.

Una vez conseguida nuestra sala virtual la exportaremos al programa de simulación acústica que vayamos a utilizar, en nuestro caso el “Odeon”.

Con la ayuda del sistema de “capas” del programa “AutoCAD 2014”, haremos tantas capas como materiales diferentes tengamos y añadiremos cada superficie a su capa correspondiente. Esto se hace para que, a la hora de tener el diseño en el software “Odeon”, podamos asignarle a cada material su diferente coeficiente de absorción.

Llegados a este punto nos encontramos con un problema, ya que al ser un edificio ya construido no podemos saber ni podemos medir los valores que corresponden a los revestimientos interiores existentes en los edificios. En muchos casos se utilizan variedad de bibliotecas en las cuales aparecen las características acústicas de diferentes materiales de construcción, pero sigue siendo difícil aproximarse a los valores exactos.



*Figura 8. Modelo tridimensional realizado para el estudio.
Fuente: Propia.*

Una de las soluciones, que es la que nosotros hemos elegido, consiste en comparar los datos reales del tiempo de reverberación medidos “in situ” con los datos obtenidos en la simulación e ir ajustando los datos simulados hasta que la diferencia entre los tiempos de reverberación, virtual y real, sea la mínima posible, así podemos decir que la diferencia es despreciable.

Cuando hayamos conseguido el ajuste anterior, diremos que nuestro modelo está validado y procederemos a calcular los parámetros necesarios de estudio.

4.1 Fundamentos básicos del software “ODEON”.

El nombre completo del programa que hemos elegido para simular la acústica de nuestra sala es “Odeon Room Acoustics Software”. Este programa fue desarrollado en cooperación entre el departamento de “Tecnología Acústica” de la Universidad Técnica de Dinamarca y un grupo de empresas en 1984.

El propósito de esta cooperación era conseguir un software fácil de usar para predecir las características básicas de recintos acústicos. En su primera versión resolvía problemas de diseño acústico en salas de conciertos y de ópera. Hoy en día, se suele utilizar en muchas ramas de aplicaciones.

“Odeon Room Acoustics Software” se basa en el desarrollo de algoritmos contruidos sobre el trazado de rayos (“Ray tracing”) y del método origen de la imagen (“Image source method”).

“Ray tracing”.

Este método de trazado de rayos funciona considerando cada rayo como portador de energía acústica que viajan a lo largo de la sala y en todas direcciones a la velocidad del sonido, después de cada reflexión esta energía acústica se reduce proporcionalmente en función del valor del coeficiente de absorción del material de la superficie con la cual refleje. Este método tiene en cuenta la posición de la fuente, el material de construcción o de revestimiento de cada superficie y, por tanto, su coeficiente de absorción, además del grado de dispersión. Sin embargo, no hay punto de recepción, la decadencia de la energía se calcula en todo el volumen de la sala.

“Image source method”.

En el método de las Imágenes de Origen, las reflexiones especulares se pueden construir geométricamente utilizando fuentes de imagen. El modelado con fuentes de imagen, es beneficioso para describir la dirección de la energía al principio, en una habitación con poca dispersión en la superficie. Sin embargo para las reflexiones de orden superior este método es excesivamente preciso geométricamente, es decir, se podrían calcular las reflexiones de orden superior pero se requeriría una cantidad excesiva de tiempo para ser calculadas y no podríamos tener en cuenta la longitud de onda del sonido.

4.2 Parámetros simulados por “Odeon”.

Los parámetros acústicos que calcula Odeon para evaluar la calidad de un recinto son los siguientes:

Tiempo de reverberación.

Este software tiene dos maneras de calcular el tiempo de reverberación, una es “Quick Estimate” que es un método rápido de prueba que permite evaluar los efectos del cambio de materiales. La otra forma de cálculo es “Global Estimate” que es un método más preciso que permite una alta calidad en los resultados.

En “Global Estimate” se calculan dos valores mas fiables del tiempo de reverberacion: T_{30} y T_{20} . Se calculan para cada banda de frecuencia, a partir de la curva de decaimiento energético correspondiente. Puesto que no se dispone de un rango dinámico de 60 dB, que es lo que se precisaría para calcular el tiempo de reverberación, lo que se hace es medir los tiempos para una caída de 20 y 30 dB y luego estimar RT, suponiendo que la pendiente no varia.

Early Decay Time (EDT).

El EDT, como ya sabemos, caracteriza las primeras reflexiones. Como el RT, varía con la frecuencia, por lo que tenemos un valor para cada banda de frecuencia. Se calcula como el tiempo que tarda en caer la energía sonora 10 dB, multiplicado por 6.

Definición (D_{50}).

Este parámetro también estudia el comportamiento de las primeras reflexiones. Y se utiliza para evaluar la inteligibilidad y sonoridad de la sala.

Claridad musical (C_{80}).

También relacionado con las primeras reflexiones, mide la relación entre la energía recibida dentro de los primeros 80 ms y la que llega después. El programa estima la energía en estos dos periodos de tiempo a partir de las curvas energía-tiempo.

Eficiencia lateral (LF_{80}).

Como vimos anteriormente la eficiencia lateral es la relación entre la energía que llega lateralmente al oyente dentro de los primeros 80ms desde la llegada del sonido directo.

Odeon utiliza una directividad cosenoidal respecto a la presión sonora para simular la fuente. Esto permite comparar los resultados de la simulación con las medidas, ya que los micrófonos reales siguen este patrón de directividad. Por tanto, recurre a una fórmula modificada, en lugar de regirse por la original, que se define para micrófonos ideales, con directividad cosenoidal respecto a la energía sonora.

Nivel de presión sonora (SPL).

El programa nos proporciona tres valores relacionados con este parámetro:

“Sound Pressure Level” (SPL): nivel de presión sonora.

“A-weighted Sound Pressure Level” (SPLA): nivel de presión sonora ponderado por la ley A. Consiguiendo una relación directa entre la variación de presión sonora y la correspondiente sensación de sonoridad.

“A-weighted Late Lateral Sound Pressure Level” (LLSPLA): nivel de presión sonora lateral de las reflexiones tardías, ponderada con la ley A. Se obtiene de sumar los niveles laterales de las reflexiones tardías, presentes en un receptor dado, y corregirlos según la ley A para las 8 bandas de octava simuladas.

Índice rápido de transmisión de la palabra (RASTI).

El programa ofrece el cálculo de la versión simplificada del STI, el RASTI, permitiendo cuantificar la inteligibilidad de la palabra en el interior de un recinto.

Variación espacial.

La variación espacial, es la disminución de la energía sonora en la distancia. Odeon nos proporciona principalmente dos valores relacionados con este parámetro calculados según la norma ISO 14257, para todos los receptores definidos, dentro de la respuesta puntual múltiple, cuando solo hay una fuente puntual activa y los receptores están a diferentes distancias de la fuente:

“Rate of Spatial Decay”, que es el índice de decaimiento espacial.

“A-weighted Rate of Spatial Decay”, que es el índice de decaimiento espacial pero corregido según la ley de ponderación A.

Tiempo central (Ts).

Este parámetro es el momento de primer orden del área de la curva de decaimiento energético. Su valor es inversamente proporcional a la nitidez del sonido.

Parámetros de escenarios (ST_{early} , ST_{late} , ST_{total}).

Estos parámetros, Odeon los calcula cuando solo hay una fuente activa, la cual debe ser puntual y un receptor está situado aproximadamente a 1 m (de 0,9 a 1,1 m) de ella.

“Early Support” (ST_{early}). Mide la capacidad de cada músico de escucharse a si mismo y a los demás. De ahí que se centre en el análisis de las primeras reflexiones, recomendándose que su valor supere los – 13 dB.

“Late Support” (ST_{late}). Mide la reverberación, evaluando la energía recibida después de los primeros 100 milisegundos.

“Total Support” (ST_{total}). Mide la influencia de la sala en los músicos. Y su valor debería ser superior a –12 dB.

Capítulo 3.

Estudio del caso

Una vez vistos los conceptos de acústica arquitectónica necesarios para abordar este trabajo, los objetivos y el material que hemos utilizado para realizarlo, es tiempo de pasar a describir nuestra sala objeto de estudio y el proceso por el cual hemos conseguido los resultados de nuestro proyecto.

1. Iglesia de la Beneficencia.

El presente estudio acústico analiza las cualidades acústicas de la Iglesia de la Beneficencia, ubicada dentro del recinto de la Casa de la Beneficencia. A continuación se ubicará espacialmente su localización y se explicará una breve reseña histórica, en primer lugar de la Casa de la Beneficencia y seguidamente de la Iglesia con el mismo nombre.

1.1 Ubicación.

La Casa de la Beneficencia se encuentra en la parte noroeste del centro histórico de la ciudad de Valencia. A la puerta principal de este centro se accede por la calle Corona, perpendicular a una calle muy frecuentada por los ciudadanos, la calle Guillem de Castro y muy próxima a una de las grandes vías de circulación, el Paseo de la Pechina.



Figura 9. Ubicación de la Casa de la Beneficencia, sede del Museo de Prehistoria de Valencia.

Fuente: www.google.es/maps

1.2 La Casa de la Beneficencia.

“Para socorrer y extinguir á los mendigos [...] se les ha de adoctrinar en la teoría de su profesión, [...] para que en el decurso de un año ó 18 meses se ponga en estado de ganar la vida con el trabajo de sus manos”

Eso era lo que hacía falta, según un informe de 1800, para atajar de raíz el rampante problema de la pobreza y la mendicidad. Y esa es la idea motriz agazapada en los orígenes sociales y arquitectónicos de la Casa de la Beneficencia. Una institución que nació de la confluencia de tres factores: la iniciativa del general Javier Elío de patrocinar, en 1815, la creación de un establecimiento asistencial; la promulgación de la Ley de Beneficencia de 1822 y, ya en 1835, la desamortización eclesiástica propiciada por Mendizábal.

En origen, el edificio de La Beneficencia fue un convento de agustinos, fundado en 1520 y ocupado posteriormente por religiosos franciscanos, dedicados a la veneración de la corona de espinas, de ahí el nombre de la calle Corona. En 1873 el edificio se ensanchó y reformó estructuralmente gracias al proyecto de Joaquín María Belda Ibáñez, en el que se ofrecían soluciones arquitectónicas consonantes con las nuevas ideas de control social e higienismo.

En resumen el “Centre Cultural La Beneficència” es un edificio que ha tenido diferentes usos a lo largo de su historia: empezó siendo un convento a principios del siglo XVI y fue Casa de la Beneficencia desde mediados del siglo XIX, que socorría y preparaba para el mundo laboral a huérfanos y mendigos.

Con la llegada de la democracia es, desde 1981, un Centro Cultural que alberga dos de los más importantes museos de la ciudad: el Museu de Prehistòria de València (fundado en 1927) y el Museu Valencià d'Etnologia (creado en 1983). En él también se localizan otras instituciones de la Diputació de València, en especial la Institució Alfons el Magnànim o el Servei d'Assistència i Recursos Culturals (SARC).



Figura 10. Imagen esquina del Centro Cultural la Beneficencia

Fuente: www.ayto-valencia.es



Figura 11. Imagen de la fachada del Centro Cultural la Beneficencia

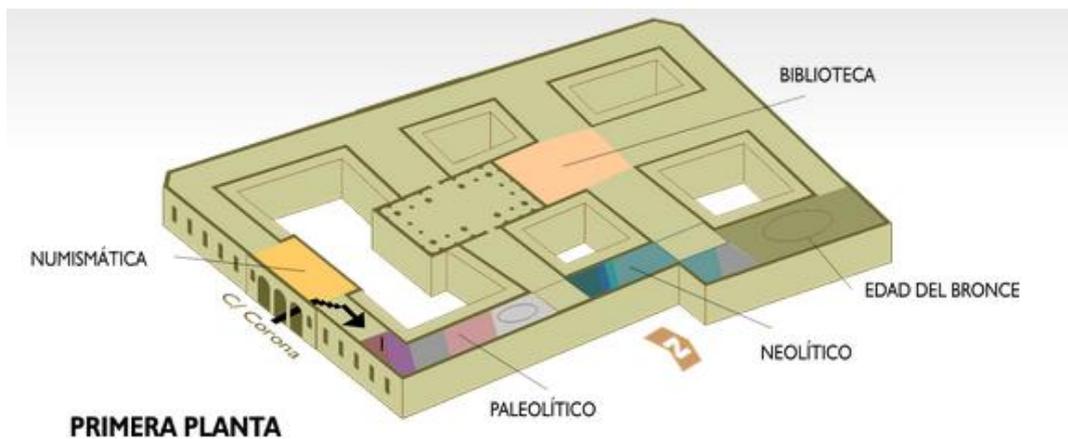
Fuente: www.ayto-valencia.es

A continuación vemos varias imágenes de cómo está estructurado a día de hoy el edificio de la Casa de la Beneficencia convertido en Museo de Prehistoria.



PLANTA BAJA

Figura 12. Dibujo planta baja del Museo de Prehistoria.
Fuente: www.museuprehistoriavalencia.es



PRIMERA PLANTA

Figura 13. Dibujo planta primera del Museo de Prehistoria.
Fuente: www.museuprehistoriavalencia.es



SEGUNDA PLANTA

Figura 14. Dibujo planta segunda del Museo de Prehistoria.
Fuente: www.museuprehistoriavalencia.es

1.3 Historia de la Iglesia de la Beneficencia.

En el proyecto de reforma de 1873 destacaba, y sigue destacando, la construcción de la Iglesia de la Beneficencia, que adoptó y adaptó una decoración ecléctica (elementos neogriegos, neorrománicos, etc.) de estilo bizantino, muy de acuerdo con el nuevo arte religioso promulgado desde Francia por Théophile Gautier y llevado a la práctica por Léon Vaudoyer en la catedral neobizantina de Marsella (1856-1893).

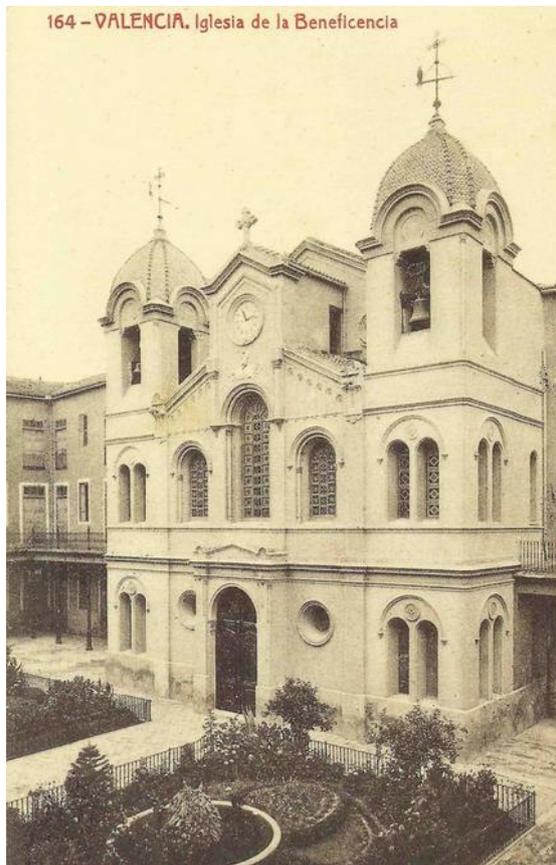


Figura 15. Postal antigua de la Iglesia de la Beneficencia.
Fuente: postalesdevalencia.blogspot.com

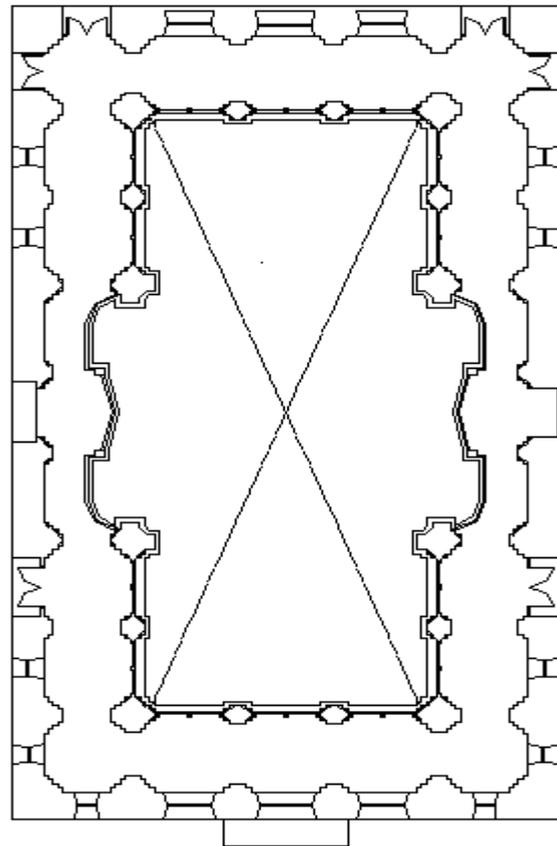


Figura 16. Planta de la iglesia.
Fuente: Propia

El suelo y los pilares de la iglesia son de piedra y las paredes están enlucidas, estos materiales son los que nosotros utilizaremos para calcular los diferentes parámetros.



Figura 17. Imagen interior iglesia.
Fuente: Guillén Guillamón, Ignacio



Figura 18. Imagen interior de uno de los pasillos de la iglesia.
Fuente: Guillén Guillamón, Ignacio



Figura 19. Imagen de un lateral de la iglesia.
Fuente: Guillén Guillamón, Ignacio



Figura 20. Imagen del patio de butacas.
Fuente: Guillén Guillamón, Ignacio

2. Método de simulación del recinto.

El objetivo principal que buscamos con la realización de este trabajo es la idoneidad de la intervención propuesta. A continuación se describen los pasos necesarios para llevarlo a cabo.

2.1 Realización del modelo geométrico.

Lo primero que se hizo fue un modelo tridimensional de la Iglesia de la Beneficencia, que es nuestro objeto de estudio. Este modelo se realizó a partir de los planos que nos fueron proporcionados¹.

Para la realización de la simulación no es necesario un nivel de dibujo muy complejo ni detallado, sino un modelo que se ajuste a la geometría interior del recinto. La precisión en la descripción geométrica, no está acompañada de una mayor precisión en los resultados de los parámetros acústicos de la simulación. Sin embargo, es importante que se diseñen los materiales y sus características acústicas correctamente.

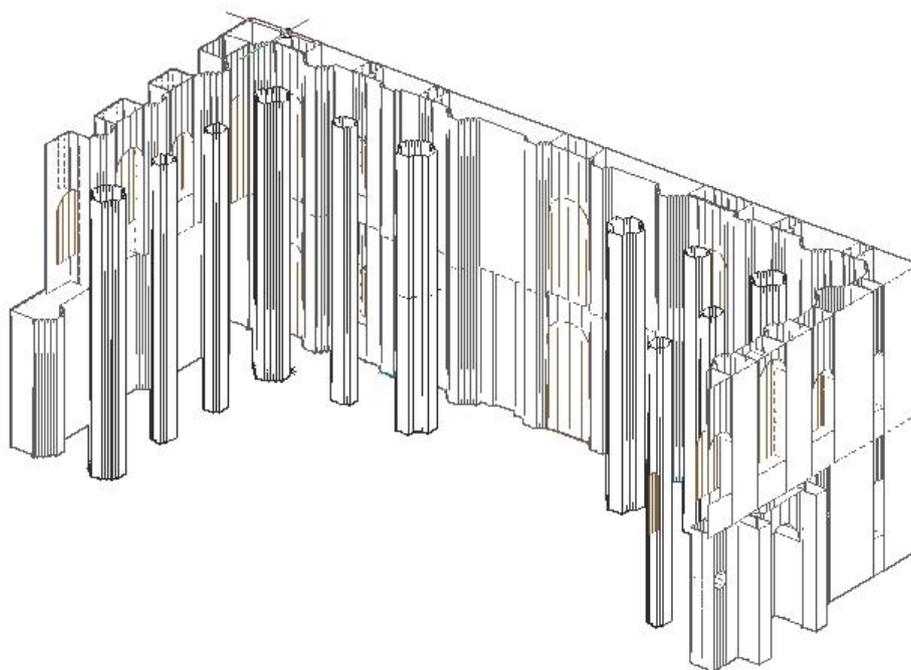


Figura 21. Modelo geométrico realizado. Sección.

Fuente: Propia.

Para poder utilizar este dibujo en el programa Odeon es necesario que tenga unas características adecuadas para que se pueda analizar su geometría sin dificultad. El Odeon permite realizar este modelo pero, en ocasiones donde la geometría es más compleja, se utilizan programas de CAD como apoyo al dibujo. En nuestro caso, hemos utilizado el programa AutoCAD 2014.

¹Los planos utilizados para el dibujo en 3D son los que se encuentran en el Anexo I.

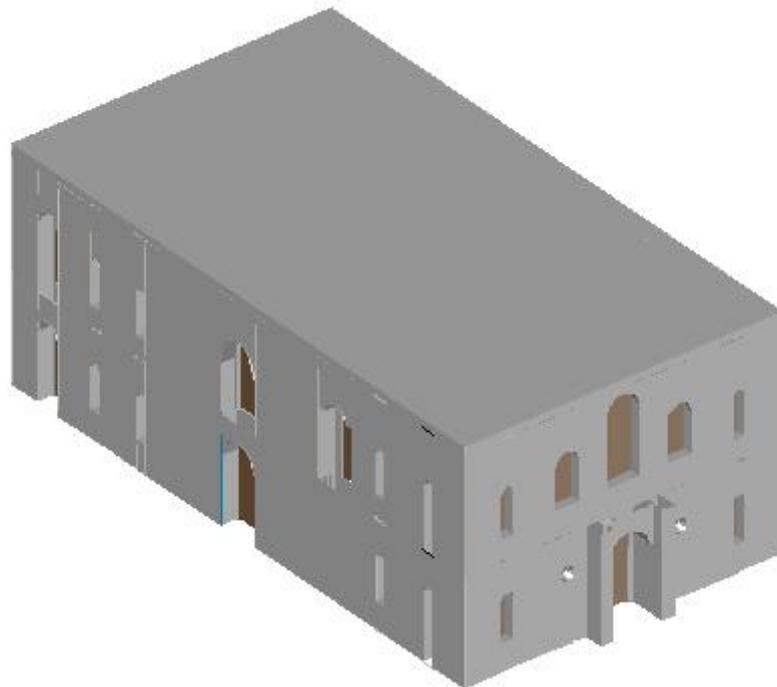
Una vez tenemos dibujados los planos de la iglesia de la Beneficencia, hay que pasarlos a un dibujo tridimensional ayudados con la herramienta de AutoCAD "3DCARA". Con ella se hacen todas las superficies de la iglesia una a una.

Hay que tener en cuenta que todas las superficies hechas con esta herramienta deben ser planas, por lo que las cúpulas, arcos y demás superficies curvas se descompusieron en superficies rectangulares o triangulares, dependiendo de su forma.

Para que posteriormente en el programa Odeon fuera más fácil la unión de cada superficie con su material de construcción o de revestimiento, se dibujó el modelo tridimensional con varias "capas" de AutoCAD, dependiendo de su revestimiento:

- La primera capa fue llamada "Enlucido sobre ladrillo" en la cual metimos todas las superficies de los muros y forjados.
- Otra fue llamada "Piedra" donde metimos los pilares y el escenario que había.
- La siguiente fue "Butacas", que era el espacio donde estaban colocadas las butacas para los oyentes.
- Y, por último, la capa "Cubierta" ya que no sabíamos que características acústicas tenía este material.

Una vez, colocadas todas las superficies dentro de las diferentes capas podemos exportar el dibujo al software de simulación Odeon. En la siguiente imagen se ve el modelo tridimensional terminado.



*Figura 22. Modelo geométrico realizado. Vista exterior.
Fuente: Propia.*

2.2 Validación del modelo.

Una vez tengamos el modelo en el programa Odeon, lo primero que haremos será definir los materiales de cada una de las superficies que componen el modelo geométrico. Para ello, el programa tiene una biblioteca de materiales donde podemos elegir entre un amplio abanico de posibilidades; también se pueden añadir nuevos materiales y modificar los ya existentes.

Los datos de absorción y difusión de cada material, se introducen o caracterizan por valores en cada una de las bandas de octava, normalmente las frecuencias utilizadas van desde los 125 Hz hasta los 4kHz.

Una vez tenemos los materiales asignados ya podemos hacer una primera simulación. En nuestro caso se realizó una simulación con las mismas características que en el momento en que se hicieron las mediciones in situ.

Los resultados de esta primera simulación no suelen ser del todo satisfactorios, a causa de las imperfecciones derivadas de la simplificación geométrica del modelo, y esencialmente por los coeficientes de absorción y difusión elegidos de cada material, ya que al ser un edificio ya construido, es prácticamente imposible saber o medir las características acústicas de cada una de las composiciones constructivas que forman la iglesia.

En nuestro caso, no sabíamos como se iba a comportar el material de revestimiento de la cubierta cuando los rayos reflejaran en él. Así que se hizo coincidir los resultados de los cálculos de la simulación con los datos obtenidos mediante mediciones realizadas “in situ”, se consiguió introduciendo modificaciones en los coeficientes de absorción del revestimiento de la cubierta ya que no teníamos datos de su comportamiento acústico.

Cuando conseguimos que el tiempo de reverberación medido in situ y el tiempo de reverberación calculado por la simulación fueran iguales o con diferencias despreciables (con una diferencia menor del 10%), el modelo estuvo validado.

Odeon, para realizar este ajuste del T_r , presenta la función “Quick Estimate Reverberation”, que no nos proporciona los valores finales de la simulación, sino una aproximación con rapidez de cálculo para la validación del modelo.

El resultado de las mediciones realizadas “in situ” respecto al tiempo de reverberación medio fueron las siguientes:

Tiempo de Reverberación de la Iglesia de la Beneficencia real					
Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000
T_r (s)	3,54	3,8	3,46	3,07	2,59

Tabla 7. Tiempo reverberación de la iglesia. Medición “in situ”.
Fuente: Guillén Guillamón, 1999

²Los datos de la medición “in situ” se encuentran detallados en el Anexo II.

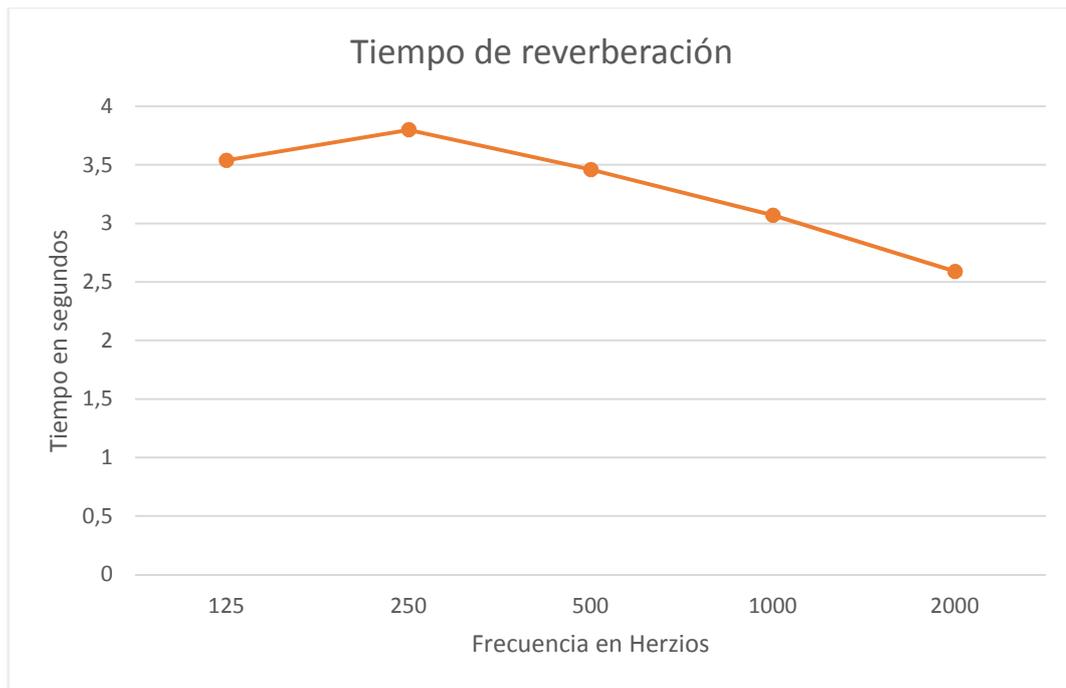


Figura 23. Representación de la curva tonal de la iglesia.
Fuente: Propia.

Con estos datos, y siguiendo las fórmulas planteadas en el capítulo 2.3. podemos calcular los siguientes datos:

- $Rt_{mid} = 3,26$ segundos
- BR (calidez) = 1,12
- Br (brillo) = 0,72

2.3 Características de las simulaciones.

En este estudio se llevaron a cabo dos simulaciones:

- Sala vacía después de la intervención.
- Sala ocupada después de la intervención.

Como se puede deducir, la única variación es la presencia o no de personas en la sala, por lo que el resto de parámetros respecto los materiales, fuentes, receptores, etc. son los mismos para las dos simulaciones. Los datos son los siguientes:

DESCRIPCIÓN	FRECUENCIAS				
	125	250	500	1000	2000
Enlucido sobre ladrillo	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04
Piedra	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
Revestimiento interior cubierta	0,2	0,15	0,13	0,13	0,15
Madera	0,2	0,15	0,15	0,1	0,1
Cortina de algodón de 620g/m2 fruncida al 150%	0,14	0,35	0,55	0,72	0,7
Lana de roca	0,13	0,74	0,98	1	1
Butacas vacías	0,49	0,66	0,8	0,88	0,82
Butacas ocupadas	0,52	0,68	0,85	0,97	0,93

Tabla 8. Coeficientes de absorción utilizados en la simulación.
Fuente: Propia

Los materiales utilizados en la simulación de validación fueron los siguientes:

- Enlucido sobre ladrillo. Es todo el revestimiento de muros y forjados.
- Piedra. Se refiere al suelo, los pilares y al escenario que había cuando se hicieron las mediciones.
- Butacas bien tapizadas. Son las butacas que se encuentran en la sala en la zona de público, sin estar ocupadas.
- Revestimiento interior de la cubierta. Este material no estaba en la biblioteca del software Odeon ya que es el que simulamos para que el tiempo de reverberación de las mediciones “in situ” y el de los resultados de la simulación coincidiesen.

Los materiales que se utilizaron para la primera simulación, es decir, la simulación con la sala vacía, son los anteriores más los tres siguientes:

- Madera. Se utilizó plafón de madera de cedro con cámara en el dorso para que el sonido reflejara en el escenario.
- Cortinas de algodón de 620g/m² fruncida al 150%. Se utilizaron colgadas en la parte posterior y en los laterales de la zona del público.
- Lana de roca. También se utilizaron paneles de este material en los huecos de los laterales y en los de la parte posterior de la zona del público.

La segunda simulación, con la sala ocupada, se realiza cambiando uno de los materiales descritos anteriormente, “Butacas bien tapizadas”, por:

- Audiencia ocupando butacas bien tapizadas. Son los asientos que se encuentran en la sala en la zona de público, con las personas sentadas en cada uno de ellos, por eso se sustituye por el de las otras simulaciones.

2.4 Definición de los escenarios.

Para realizar la simulación especificamos el tipo y la situación de las fuentes y receptores. En las simulaciones realizadas se utilizaron el mismo tipo y la misma situación de la fuente y de los receptores para poder comparar los datos entre ellas.

La fuente se situó sobre el escenario, en el centro de éste, a una altura de 1,5 metros y en el eje longitudinal de simetría de la iglesia.

Respecto a los receptores, teniendo en cuenta las dimensiones del recinto y la zona del público, tomamos la determinación de colocar 8 de ellos. Cuatro en el eje longitudinal de simetría de la iglesia, en la zona donde se sitúan los asientos centrales del público, con la misma distancia entre ellos. Y los otros cuatro en una de las zonas laterales habilitadas también para la colocación del público.

Se expone a continuación, en la figura 23, una idea de la colocación de la fuente y de los receptores con los que se ha hecho las simulaciones. En la segunda simulación la colocación tanto de receptores como de la fuente es la misma pero habrá público en el patio de butacas.

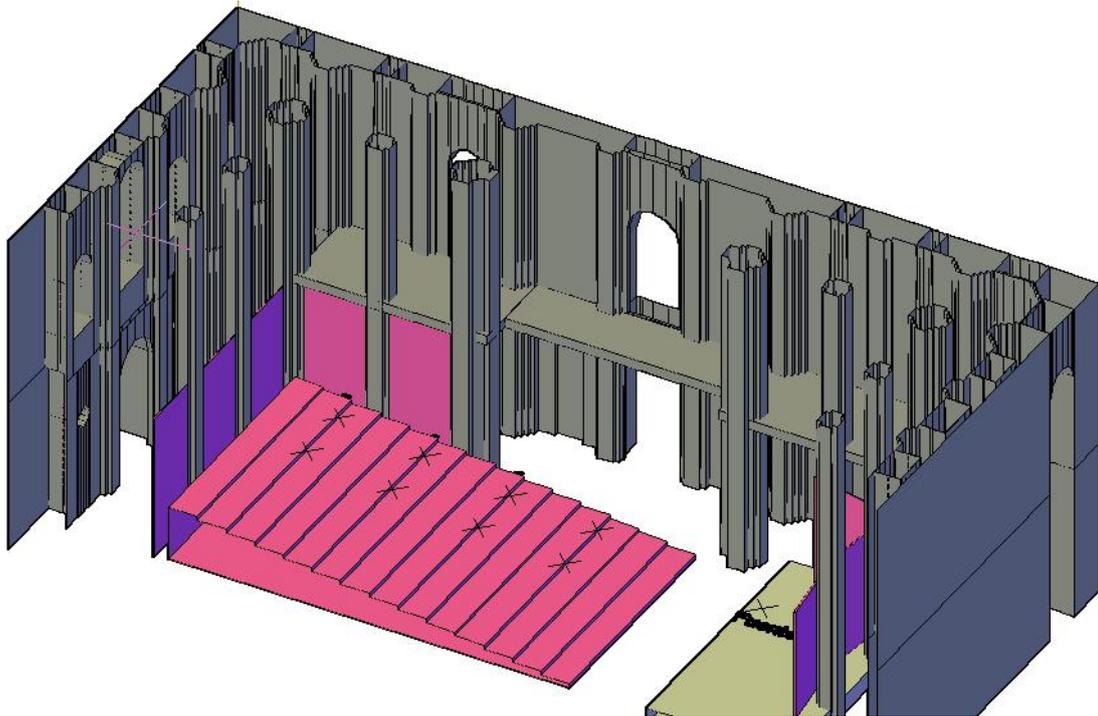


Figura 24. Representación de las simulaciones.
Fuente: Propia.

En la tabla siguiente se refleja exactamente la situación de los receptores y de la fuente.

Zona público	Nº receptor/Fuente	Coordenadas (X,Y,Z)
Escenario	Fuente 1	(2418,00; 744,00; 2,00)
Zona central	1	(2408,00; 744,00; 2,00)
Zona central	2	(2411,00; 744,00; 1,00)
Zona central	3	(2405,00; 744,00; 2,80)
Zona central	4	(2402,00; 744,00; 3,40)
Zona lateral	5	(2411,00; 747,00; 1,00)
Zona lateral	6	(2408,00; 747,00; 2,00)
Zona lateral	7	(2405,00; 747,00; 2,80)
Zona lateral	8	(2402,00; 747,00; 3,40)

Tabla 9. Coordenadas de la fuente y receptores de la simulación.
Fuente: Propia

3. Resultados de la simulación y su análisis.

3.1 Introducción.

En los siguientes apartados se mostrarán los parámetros objetivos de las simulaciones realizadas en los diferentes puntos donde se han colocado los receptores para el estudio de la iglesia. Algunos de estos datos se representarán con gráficas para ayudar a su comprensión de una manera más cómoda y fácil.

De los parámetros explicados en anteriores apartados para la determinación de la calidad acústica en las salas, en nuestro caso para la "Iglesia de la Beneficencia", se comentarán los que se enumeran a continuación:

- Tiempo de reverberación (Tr_{30} y Tr_{mid}).
- "Early Decay Time" (EDT).
- Brillo (Br) y Calidez (BR).
- Tiempo central (T_s).
- Nivel de presión sonora (SPL).
- Claridad musical (C_{80}).
- Definición (D_{50}).
- Eficiencia lateral (LF_{80}).
- Parámetro de inteligibilidad, STI.

La estructura de los siguientes apartados será similar, ya que se representan los datos de cada una de las simulaciones realizadas, es decir:

Simulación 0: Es la simulación con la que validamos el modelo, comparándola con los datos obtenidos de las mediciones in situ del recinto. No contiene ningún elemento de acondicionamiento acústico.

Simulación 1: Es la simulación con todos los elementos de acondicionamiento acústico, pero sin público, es decir la sala estará completamente vacía.

Simulación 2: Por último esta es la simulación con todos los elementos de acondicionamiento acústico y con el recinto lleno.

Posteriormente a esto, se analizarán los resultados obtenidos. Este análisis se realiza principalmente desde dos puntos de vista. El primero es la evolución de estos parámetros nombrados anteriormente, con respecto a las actuaciones de acondicionamiento acústico que se plantean. Y el segundo, trata sobre la mayor o menor diferencia de estos mismos parámetros respecto a la situación de los diferentes receptores.

3.2 Parámetros a estudio.

Tiempo de reverberación (Tr_{30}).

Este parámetro suele ser bastante constante en el interior de los recintos, por eso se toma como referencia para los ajustes de la simulación. A partir de estos resultados, calcularemos los parámetros de la **calidez (BR)** y el **brillo (Br)**.

Los datos obtenidos son:

- Simulación 0.

Receptor	Frecuencias							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	3,57	3,58	3,85	3,42	3,08	2,57	1,98	1,05
2	3,55	3,54	3,89	3,39	3,07	2,56	1,95	1,04
3	3,6	3,59	3,88	3,41	3,07	2,57	1,92	1,03
4	3,58	3,54	3,86	3,34	3,03	2,52	1,96	1,05
5	3,63	3,61	3,93	3,47	3,09	2,56	1,96	1,01
6	3,66	3,62	3,93	3,46	3,09	2,57	1,94	1,03
7	3,62	3,55	3,89	3,4	3,08	2,57	1,96	1,06
8	3,57	3,55	3,88	3,42	3,08	2,53	1,98	1,03
Mínimo	3,55	3,54	3,85	3,34	3,03	2,52	1,92	1,01
Media	3,60	3,57	3,89	3,41	3,07	2,56	1,96	1,04
Máximo	3,66	3,62	3,93	3,47	3,09	2,57	1,98	1,06

Tabla 10. Valores en segundos del Rt_{30} en los receptores. Simulación 0.
Fuente: Propia

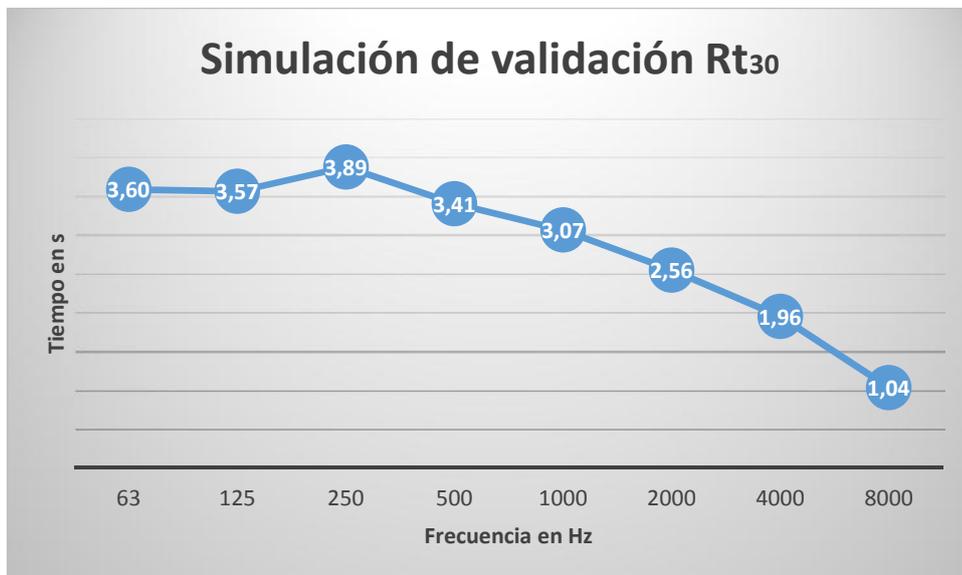


Figura 25. Curva tonal. Simulación 0.
Fuente: Propia.

Con los valores medios de cada frecuencia, se forma la denominada Curva Tonal, que caracteriza la iglesia. Como se ve en la figura 24 el recinto era muy reverberante; también se ve una caída del tiempo de reverberación importante a altas frecuencias.

Los datos referentes a los parámetros Tr_{mid} , brillo y calidez son los siguientes:

$$Tr_{mid} = 3,24 \text{ s}$$

$$BR = 1,15$$

$$Br = 0,69$$

- Simulación 1.

Receptor	Frecuencias							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2,32	2,38	2,16	1,82	1,63	1,51	1,3	0,81
2	2,31	2,38	2,11	1,8	1,64	1,53	1,31	0,78
3	2,31	2,37	2,14	1,8	1,62	1,49	1,33	0,8
4	2,29	2,41	2,19	1,79	1,66	1,5	1,27	0,81
5	2,27	2,37	2,12	1,83	1,64	1,48	1,28	0,83
6	2,29	2,4	2,15	1,81	1,66	1,52	1,32	0,8
7	2,28	2,41	2,14	1,83	1,63	1,5	1,31	0,84
8	2,29	2,41	2,15	1,8	1,65	1,51	1,28	0,78
Mínimo	2,27	2,37	2,11	1,79	1,62	1,48	1,27	0,78
Media	2,30	2,39	2,15	1,81	1,64	1,51	1,30	0,81
Máximo	2,32	2,41	2,19	1,83	1,66	1,53	1,33	0,84

Tabla 11. Valores en segundos del Rt_{30} en los receptores. Simulación 1.
Fuente: Propia

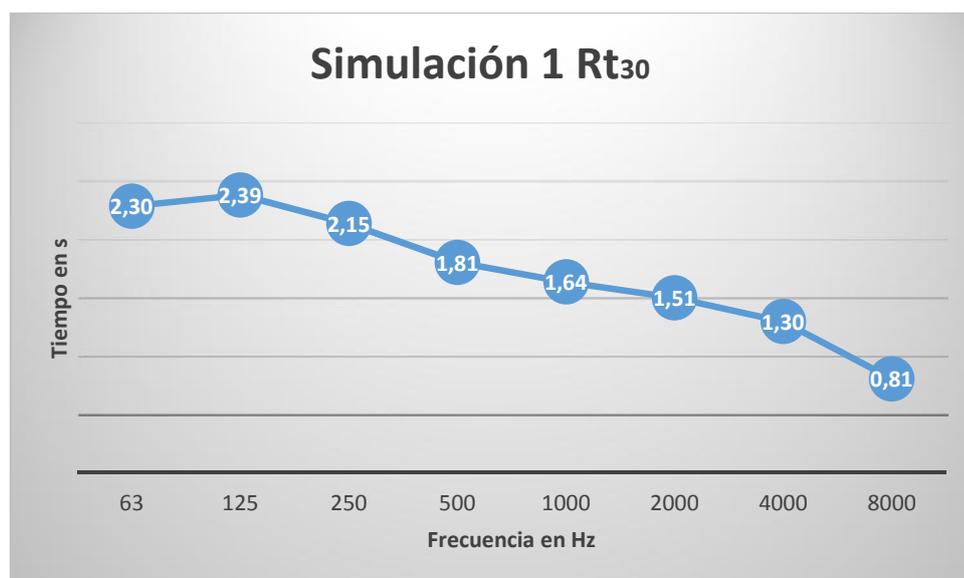


Figura 26. Curva tonal. Simulación 1.
Fuente: Propia.

Los datos referentes a los parámetros $T_{r_{mid}}$, brillo y calidez son los siguientes:

$$T_{r_{mid}} = 1,72 \text{ s}$$

$$BR = 1,32$$

$$Br = 0,81$$

- Simulación 2.

Receptor	Frecuencias							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2,32	2,34	2,14	1,82	1,61	1,5	1,28	0,78
2	2,31	2,34	2,1	1,8	1,61	1,47	1,26	0,79
3	2,31	2,37	2,12	1,78	1,66	1,47	1,28	0,77
4	2,29	2,36	2,14	1,77	1,61	1,46	1,26	0,78
5	2,27	2,35	2,14	1,82	1,61	1,49	1,31	0,77
6	2,29	2,38	2,14	1,77	1,63	1,45	1,27	0,82
7	2,28	2,38	2,14	1,77	1,61	1,49	1,25	0,81
8	2,29	2,35	2,14	1,77	1,63	1,46	1,3	0,81
Mínimo	2,27	2,34	2,1	1,77	1,61	1,45	1,25	0,77
Media	2,30	2,36	2,13	1,79	1,62	1,47	1,28	0,79
Máximo	2,32	2,38	2,14	1,82	1,66	1,5	1,31	0,82

Tabla 12. Valores en segundos del Rt_{30} en los receptores. Simulación 2.

Fuente: Propia

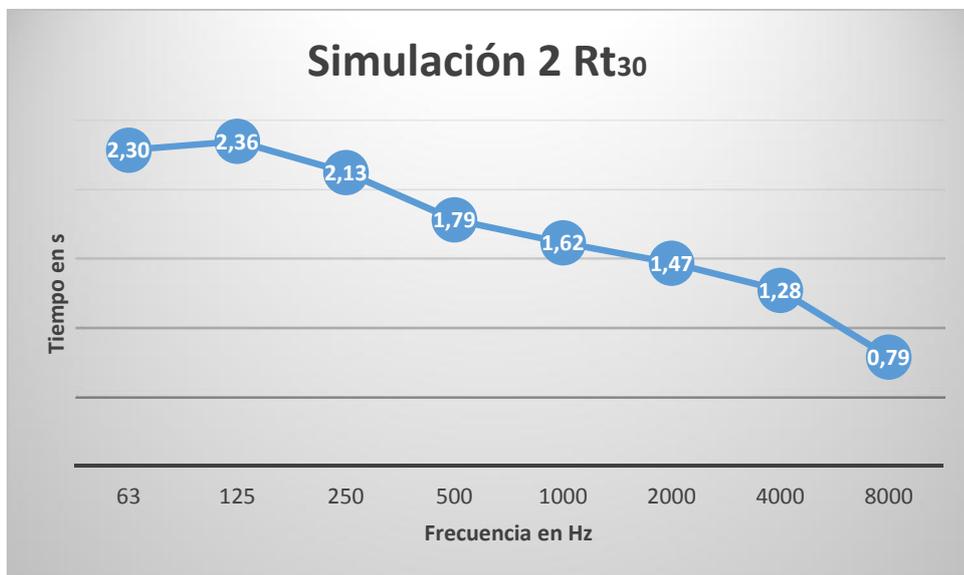


Figura 27. Curva tonal. Simulación 2.

Fuente: Propia.

Los datos referentes a los parámetros Tr_{mid} , brillo y calidez son los siguientes:

$$Tr_{mid} = 1,71 \text{ s}$$

$$BR = 1,32$$

$$Br = 0,81$$

Como resumen de las tres simulaciones respecto a su tiempo de reverberación medio, brillo y calidez tenemos la siguiente tabla:

	Tr_{mid}	BR	Br
Simulación 0	3,24	1,15	0,69
Simulación 1	1,72	1,32	0,81
Simulación 2	1,71	1,32	0,81

Tabla 13. Tabla resumen Tr_{mid} , BR y Br.

Fuente: Propia

Como apreciamos en los datos que se han expuesto en la tabla anterior, esta intervención relativamente sencilla y práctica, ha provocado que el tiempo de reverberación medio descendiera de 3,24 segundos a 1,72 segundos, prácticamente la mitad.

Como vimos en apartados anteriores, los valores idóneos de Tr_{mid} para este uso están comprendidos entre 1,5 y 2,0 segundos, valores que se han alcanzado en esta actuación.

Por otro lado, la mínima diferencia entre los tiempos de reverberación medios de la simulación 1 y 2 es posible por las características de las butacas para el público, en el sentido de que tienen unas cualidades absorbentes muy altas.

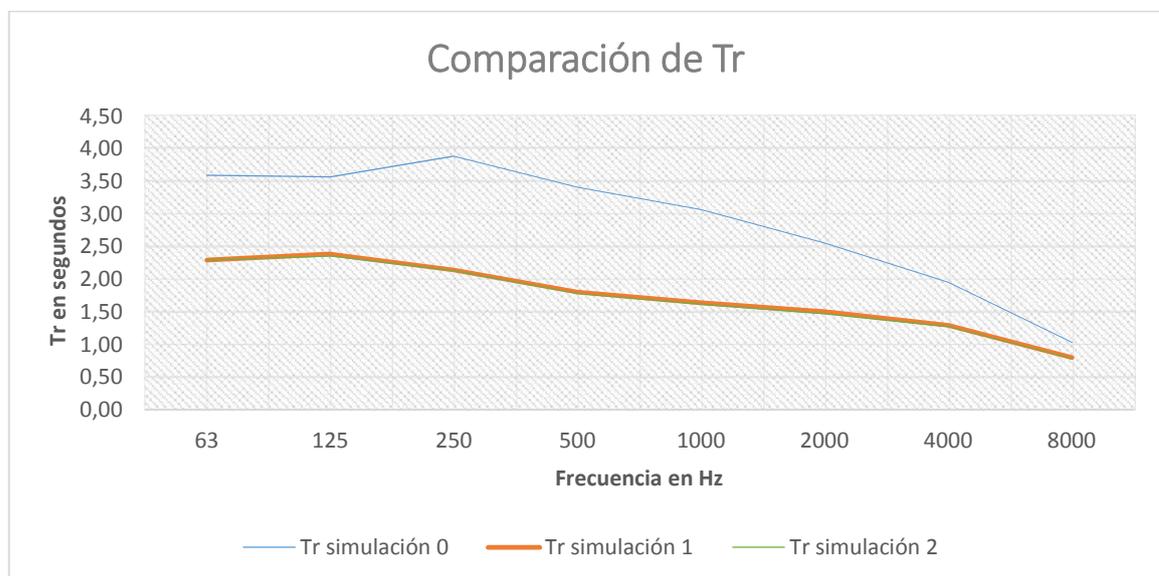


Figura 28. Gráfica de los valores del Tr de las 3 simulaciones.

Fuente: Propia.

En los valores de la calidez (BR) tenemos unos valores aceptables, ya que puede estar comprendido entre 1,10 y 1,45 si el tiempo de reverberación es de 1,8 segundos, por lo que tiene una buena respuesta a frecuencias bajas.

En los valores del brillo (Br), el acondicionamiento acústico de la sala hace que se acerque bastante al valor mínimo recomendado (0,87), ya que subimos de un 0,69 a un 0,81. En consecuencia, se podría decir que la riqueza de armónicos en la sala sería corta aunque suficiente.

Tanto el BR como el Br observamos que sus valores son los mismos en las simulaciones 1 y 2, es decir, la presencia o no del público no influye en él en la sala. Esto es debido a las características absorbentes de las butacas, como hemos dicho anteriormente, que hacen que los tiempos de reverberación no difieran demasiado entre una y otra simulación.

Respecto a los valores de Tr de los distintos receptores situados en las diferentes partes del recinto observamos que las diferencias son mínimas. La máxima variación de Tr se produce en la frecuencia de 250 Hz con un valor de 0,08 segundos. Este resultado se puede despreciar debido a que el ser humano no percibe un cambio en el Tr si no es mayor de 0,2 segundos.

“Early Decay Time” (EDT).

El EDT es el tiempo de caída inicial. En el Tr_{30} , se calcula el tiempo que tarda la señal en disminuir 30 dB y después es multiplicado por dos, para poder ser comparado con el Tr_{60} . En este caso solo se tiene en cuenta la caída de los 10 primeros dB, y posteriormente es multiplicado por 6, por el mismo motivo que el anterior, por lo que realmente es la extrapolación lineal del valor de la caída inicial de 10 dB hasta una caída de 60 dB.

Los datos obtenidos son:

- Simulación 0.

Receptor	Frecuencias							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	3,68	3,7	4	3,51	3,18	2,7	2,07	1,09
2	3,56	3,52	3,9	3,4	3,04	2,59	1,9	0,97
3	3,71	3,64	4	3,56	3,21	2,7	2,07	1,15
4	3,7	3,71	3,99	3,56	3,22	2,69	2,1	1,13
5	3,61	3,54	3,84	3,45	3,14	2,6	1,98	1,15
6	3,55	3,57	3,9	3,46	3,12	2,59	1,96	1,1
7	3,69	3,62	3,98	3,53	3,21	2,71	2,07	1,17
8	3,7	3,71	4,05	3,55	3,27	2,7	2,1	1,24
Mínimo	3,55	3,52	3,84	3,4	3,04	2,59	1,9	0,97
Media 0	3,65	3,63	3,96	3,50	3,17	2,66	2,03	1,13
Máximo	3,71	3,71	4,05	3,56	3,27	2,71	2,1	1,24

Tabla 14. Valores en segundos del EDT en los receptores. Simulación 0.

Fuente: Propia

- Simulación 1.

Receptor	Frecuencias							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2,15	2,19	1,93	1,68	1,55	1,42	1,16	0,77
2	1,93	2,11	1,72	1,53	1,34	1,28	0,99	0,57
3	2,16	2,31	2,05	1,76	1,58	1,43	1,25	0,79
4	2,19	2,31	2	1,77	1,6	1,53	1,22	0,77
5	2,19	2,24	1,97	1,7	1,57	1,45	1,2	0,83
6	2,12	2,23	1,98	1,69	1,57	1,4	1,27	0,73
7	2,17	2,33	2,06	1,8	1,6	1,5	1,34	0,82
8	2,23	2,37	2,06	1,8	1,71	1,54	1,33	0,84
Mínimo	1,93	2,11	1,72	1,53	1,34	1,28	0,99	0,57
Media 1	2,14	2,26	1,97	1,72	1,57	1,44	1,22	0,77
Máximo	2,23	2,37	2,06	1,8	1,71	1,54	1,34	0,84

Tabla 15. Valores en segundos del EDT en los receptores. Simulación 1.

Fuente: Propia

- Simulación 2.

Receptor	Frecuencias							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	2,15	2,19	1,93	1,67	1,49	1,31	1,19	0,72
2	1,93	2,01	1,7	1,41	1,33	1,22	1,02	0,51
3	2,16	2,22	1,95	1,68	1,57	1,38	1,3	0,75
4	2,19	2,22	2	1,69	1,62	1,5	1,28	0,74
5	2,19	2,25	1,96	1,68	1,49	1,44	1,23	0,78
6	2,12	2,24	1,98	1,69	1,54	1,43	1,2	0,69
7	2,17	2,24	1,96	1,72	1,59	1,46	1,27	0,79
8	2,23	2,29	2,06	1,83	1,62	1,51	1,26	0,8
Mínimo	1,93	2,01	1,7	1,41	1,33	1,22	1,02	0,51
Media 2	2,14	2,21	1,94	1,67	1,53	1,41	1,22	0,72
Máximo	2,23	2,29	2,06	1,83	1,62	1,51	1,3	0,8

Tabla 16. Valores en segundos del EDT en los receptores. Simulación 2.

Fuente: Propia

Para que una sala tenga una difusión uniforme, los valores del Tr_{mid} y los del EDT_{mid} deben ser bastante aproximados, en unas condiciones ideales donde exista una perfecta difusión del sonido en el recinto, el valor de EDT, coincidirá con el Tr. Pero en la práctica, este supuesto no se suele cumplir, ya que la difusión perfecta del sonido en una sala es una situación ideal.

Como vemos en la tabla resumen los valores de EDT_{mid} son muy similares a los de Tr_{mid} en cada una de las simulaciones, por lo que se puede considerar que la difusión de la sala es buena y que el acondicionamiento no ha influido en la pérdida de difusión.

Parámetro	Simulación 0	Simulación 1	Simulación 2
Tr_{mid} (s)	3,24	1,72	1,71
EDT_{mid} (s)	3,33	1,65	1,60

Tabla 17. Valores de EDT_{mid} y Tr_{mid} de las simulaciones.

Fuente: Propia

La diferencia mayor ha sido de 0,37 segundos, valor el cual no es claramente percibido por el oído humano. Este valor es correspondiente a la frecuencia de 1000 Hz de la simulación 1.

Tiempo central (Ts).

Sirve para medir el grado de nitidez del sonido; de modo que un aumento del Ts indicará un aumento de la nitidez percibida en la posición donde se ha calculado.

- Simulación 0.

Receptor	Frecuencias							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	270	268	293	259	233	194	147	72
2	218	216	238	207	183	147	106	47
3	285	283	307	272	247	208	160	83
4	287	284	308	274	249	211	163	86
5	251	249	273	240	216	179	134	63
6	255	253	278	244	219	182	136	67
7	282	279	304	269	244	205	157	82
8	293	290	314	279	254	215	167	89
Mínimo	218	216	238	207	183	147	106	47
Media	267,63	265,25	289,38	255,50	230,63	192,63	146,25	73,63
Máximo	293	290	314	279	254	215	167	89

Tabla 18. Valores en milisegundos del Ts en los receptores. Simulación 0.

Fuente: Propia

- Simulación 1.

Receptor	Frecuencias							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	133	138	115	97	88	82	68	40
2	100	107	88	74	66	60	50	28
3	156	161	137	116	107	98	84	51
4	153	160	139	119	110	101	86	52
5	125	132	112	95	87	80	67	37
6	137	143	122	104	96	89	75	44
7	158	165	142	124	116	108	93	58
8	162	169	148	127	117	108	93	57
Mínimo	100	107	88	74	66	60	50	28
Media	140,50	146,88	125,38	107,00	98,38	90,75	77,00	45,88
Máximo	162	169	148	127	117	108	93	58

Tabla 19. Valores en milisegundos del Ts en los receptores. Simulación 1.

Fuente: Propia

- Simulación 2.

Receptor	Frecuencias							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	133	136	114	94	85	78	68	39
2	100	105	87	72	63	57	49	28
3	156	159	135	114	105	95	83	50
4	153	158	137	117	108	98	85	52
5	125	130	111	92	83	76	66	37
6	137	141	121	102	93	85	74	44
7	158	163	140	122	114	105	92	58
8	162	167	146	125	115	105	92	56
Mínimo	100	105	87	72	63	57	49	28
Media	140,50	144,88	123,88	104,75	95,75	87,38	76,13	45,50
Máximo	162	167	146	125	115	105	92	58

Tabla 20. Valores en milisegundos del Ts en los receptores. Simulación 2.

Fuente: Propia

Los valores del ts de la simulación 0 son valores muy superiores a los recomendados de 74 hasta 144 ms, excepto en las frecuencias más altas como la de 4kHz y 8kHz. En cambio en las simulaciones 1 y 2, con el acondicionamiento acústico, estos valores bajan hasta estar casi todos dentro del rango recomendado. Bajan a medida que mas cerca están de la fuente y más alta sea la frecuencia. Se puede decir que el grado de nitidez del sonido es bueno.

Nivel de presión sonora (SPL).

Otro parámetro que nos proporciona el Odeon y que es interesante para el estudio es el nivel de presión sonora, del cual se presentan los datos obtenidos y posteriormente su análisis.

- Simulación 0.

Receptor	Frecuencias								Valor medio
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	-17,5	-17,5	-17,2	-17,8	-18,4	-19,4	-20,9	-24,6	-19,16
2	-16,3	-16,4	-16,1	-16,6	-17,1	-17,8	-19	-21,6	-17,61
3	-17,9	-17,9	-17,5	-18,2	-18,8	-19,9	-21,5	-25,8	-19,69
4	-18	-18	-17,6	-18,4	-19	-20,1	-21,9	-26,5	-19,94
5	-17,1	-17,2	-16,8	-17,4	-18	-18,9	-20,2	-23,5	-18,64
6	-17,3	-17,3	-17	-17,6	-18,2	-19,1	-20,5	-24,1	-18,89
7	-17,8	-17,8	-17,5	-18,2	-18,8	-19,8	-21,4	-25,7	-19,63
8	-18	-18	-17,6	-18,5	-19,1	-20,3	-22	-26,8	-20,04
Mínimo	-18	-18	-17,6	-18,5	-19,1	-20,3	-22	-26,8	-
Media	-17,49	-17,51	-17,16	-17,84	-18,43	-19,41	-20,93	-24,83	-
Máximo	-16,3	-16,4	-16,1	-16,6	-17,1	-17,8	-19	-21,6	-

Tabla 21. Valores en dB del SPL en los receptores. Simulación 0.

Fuente: Propia

- Simulación 1.

Receptor	Frecuencias								Valor medio
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	-20	-19,4	-20,3	-21,1	-21,5	-21,7	-22,3	-24,6	-21,36
2	-18	-17,6	-18,2	-18,9	-19,2	-19,3	-19,8	-21,5	-19,06
3	-21,3	-20,7	-21,9	-22,9	-23,3	-23,5	-24,3	-27,1	-23,13
4	-21,8	-21,2	-22,8	-24	-24,5	-24,7	-25,5	-28,7	-24,15
5	-19,1	-18,7	-19,4	-20,1	-20,5	-20,7	-21,3	-23,4	-20,40
6	-20	-19,5	-20,3	-21,1	-21,5	-21,7	-22,4	-25	-21,44
7	-21,2	-20,6	-21,8	-22,8	-23,3	-23,6	-24,5	-27,6	-23,18
8	-22,1	-21,5	-23,3	-24,6	-25	-25,3	-26,2	-29,5	-24,69
Mínimo	-22,1	-21,5	-23,3	-24,6	-25	-25,3	-26,2	-29,5	-
Media	-20,44	-19,90	-21,00	-21,94	-22,35	-22,56	-23,29	-25,93	-
Máximo	-18	-17,6	-18,2	-18,9	-19,2	-19,3	-19,8	-21,5	-

Tabla 22. Valores en dB del SPL en los receptores. Simulación 1.
Fuente: Propia

- Simulación 2.

Receptor	Frecuencias								Valor medio
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	-20	-19,5	-20,4	-21,2	-21,7	-22	-22,4	-24,6	-21,48
2	-18	-17,7	-18,3	-19	-19,4	-19,5	-19,8	-21,5	-19,15
3	-21,3	-20,8	-21,9	-23	-23,6	-23,9	-24,3	-27,2	-23,25
4	-21,8	-21,3	-22,9	-24,2	-24,7	-25,1	-25,6	-28,8	-24,30
5	-19,1	-18,8	-19,5	-20,2	-20,7	-21	-21,4	-23,4	-20,51
6	-20	-19,6	-20,3	-21,2	-21,7	-22	-22,5	-25,1	-21,55
7	-21,2	-20,7	-21,9	-23	-23,6	-23,9	-24,6	-27,7	-23,33
8	-22,1	-21,6	-23,4	-24,7	-25,3	-25,6	-26,3	-29,6	-24,83
Mínimo	-22,1	-21,6	-23,4	-24,7	-25,3	-25,6	-26,3	-29,6	-
Media	-20,44	-20,00	-21,08	-22,06	-22,59	-22,88	-23,36	-25,99	-
Máximo	-18	-17,7	-18,3	-19	-19,4	-19,5	-19,8	-21,5	-

Tabla 23. Valores en dB del SPL en los receptores. Simulación 2.
Fuente: Propia

Los valores registrados del SPL, entendidos como la cantidad de energía que llega a cada receptor, demuestran que la variación entre un receptor y otro es mayor cuanto más aumenta la distancia a la fuente.

Por otro lado, se observa que la diferencia entre las diferentes simulaciones, antes y después de llevar a cabo el acondicionamiento acústico, es mínima ya que los valores de SPL son muy parecidos.

Claridad musical (C_{80}).

Los datos obtenidos son los siguientes:

- Simulación 0.

Receptor	Frecuencias								Valor medio
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	-4,9	-4,9	-5,3	-4,7	-4,2	-3,2	-1,6	2,7	-3,26
2	-1,8	-1,8	-2,2	-1,6	-1	0	1,6	6	-0,10
3	-6	-6	-6,4	-5,8	-5,2	-4,3	-2,7	1,5	-4,36
4	-5,9	-5,8	-6,2	-5,7	-5,2	-4,3	-2,8	1,4	-4,31
5	-4,2	-4,2	-4,6	-4	-3,4	-2,4	-0,9	3,5	-2,53
6	-4,1	-4	-4,5	-3,9	-3,3	-2,4	-0,8	3,4	-2,45
7	-5,8	-5,7	-6,1	-5,5	-5	-4	-2,5	1,7	-4,11
8	-6,4	-6,2	-6,7	-6,1	-5,7	-4,7	-3,2	0,9	-4,76
Mínimo	-6,4	-6,2	-6,7	-6,1	-5,7	-4,7	-3,2	0,9	-
Media	-4,89	-4,83	-5,25	-4,66	-4,13	-3,16	-1,61	2,64	-
Máximo	-1,8	-1,8	-2,2	-1,6	-1	0	1,6	6	-

Tabla 24. Valores de C_{80} en los receptores. Simulación 0.
Fuente: Propia

- Simulación 1.

Receptor	Frecuencias								Valor medio
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	-0,1	-0,2	0,9	1,8	2,3	2,6	3,6	7,1	2,25
2	2,4	2,1	3,1	3,9	4,4	4,8	5,8	9,4	4,49
3	-1,6	-1,7	-0,6	0,3	0,8	1,2	2,2	5,6	0,78
4	-1,3	-1,5	-0,7	0,2	0,6	1,1	2	5,4	0,73
5	0,4	0	0,9	1,8	2,2	2,6	3,5	7,1	2,31
6	-0,3	-0,5	0,4	1,2	1,7	2	2,9	6,3	1,71
7	-1,7	-2	-1	-0,3	0	0,4	1,3	4,6	0,16
8	-2	-2,3	-1,4	-0,5	-0,1	0,4	1,3	4,7	0,01
Mínimo	-2	-2,3	-1,4	-0,5	-0,1	0,4	1,3	4,6	-
Media	-0,53	-0,76	0,20	1,05	1,49	1,89	2,83	6,28	-
Máximo	2,4	2,1	3,1	3,9	4,4	4,8	5,8	9,4	-

Tabla 25. Valores de C_{80} en los receptores. Simulación 1.
Fuente: Propia

- Simulación 2.

Receptor	Frecuencias								Valor medio
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	-0,1	-0,1	0,9	2	2,5	2,9	3,7	7,2	2,38
2	2,4	2,2	3,1	4,1	4,7	5,2	5,9	9,4	4,63
3	-1,6	-1,6	-0,6	0,4	0,9	1,4	2,2	5,6	0,84
4	-1,3	-1,4	-0,6	0,3	0,7	1,2	2,1	5,5	0,81
5	0,4	0,1	1	1,9	2,5	2,9	3,6	7,2	2,45
6	-0,3	-0,4	0,4	1,4	1,8	2,3	3	6,3	1,81
7	-1,7	-1,9	-0,9	-0,2	0,2	0,6	1,4	4,6	0,26
8	-2	-2,2	-1,4	-0,4	0	0,5	1,4	4,7	0,08
Mínimo	-2	-2,2	-1,4	-0,4	0	0,5	1,4	4,6	-
Media	-0,53	-0,66	0,24	1,19	1,66	2,13	2,91	6,31	-
Máximo	2,4	2,2	3,1	4,1	4,7	5,2	5,9	9,4	-

Tabla 26. Valores de C_{80} en los receptores. Simulación 2.
Fuente: Propia

El valor del $C_{80}(3)$ para cada una de las simulaciones, calculado con el valor medio de los 8 receptores es:

Parámetro	Simulación 0	Simulación 1	Simulación 2
$C_{80}(3)$ (dB)	-3,24	1,55	1,66

Tabla 27. Valores de $C_{80}(3)$ en cada simulación.
Fuente: Propia

Como vemos, una vez realizado el acondicionamiento acústico de la iglesia, el valor de la claridad musical de la sala vacía no entra dentro del rango recomendado ($-4 \geq C_{80}(3) \geq 0$ dB) que corresponde al valor de la simulación 1; y el el valor en el caso de la sala ocupada cumple perfectamente ($-2 \geq C_{80}(3) \geq 2$ dB) que corresponde al valor de la simulación 2.

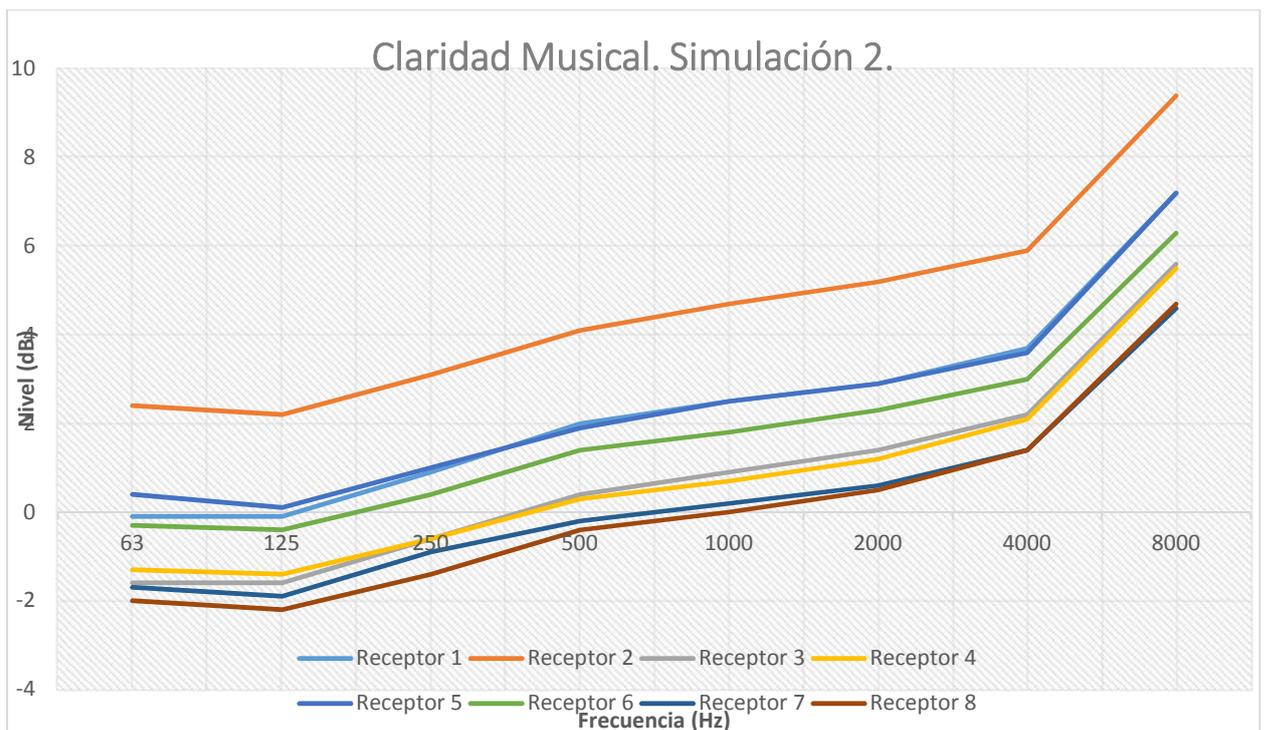


Figura 29. Gráfico de los valores del C_{80} en los 8 receptores.
Fuente: Propia.

Observando la gráfica de la figura 28, donde se representan los valores de la claridad musical para cada frecuencia y por cada receptor en la simulación 2 (sala ocupada) y recordando que el C_{80} es un parámetro que se determina a partir de la relación de la energía que llega al oyente durante los primeros 80 ms y la que llega después, podemos realizar las siguientes observaciones:

Los receptores que se encuentran más cerca de la fuente, el 1, 2 y 5, son los que tienen un mayor valor en este parámetro. Esto es debido a que el nivel de energía que llega estos puntos en los primeros 80 ms, debido a las primeras reflexiones, es mayor que el que les llega a los puntos más alejados de la fuente.

El receptor 3, estando más cerca que el receptor 4, tiene unos valores más bajos de claridad musical. Esto probablemente es debido a que el receptor 4, situado al final de la zona del público esté reforzado por primeras reflexiones, en una mayor medida que el receptor 3.

Las frecuencias altas siempre tienen una mayor claridad, esto es debido a que en las frecuencias altas llegan más reflexiones de primer y segundo orden que posteriores, ya que la energía de estas ondas es absorbida más rápidamente por el aire de la sala y los materiales que se suelen encontrar en recintos de estas características.

Cuanto mayor sea el tiempo de reverberación, menor será la sensación de claridad para el público de la sala, como nos sucede en este recinto.

Definición (D_{50}).

Los datos obtenidos respecto a la definición en las diferentes simulaciones son los siguientes:

- Simulación 0.

Receptor	Frecuencias							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	0,17	0,17	0,16	0,17	0,19	0,23	0,29	0,5
2	0,31	0,31	0,3	0,33	0,35	0,41	0,48	0,69
3	0,13	0,13	0,12	0,14	0,15	0,18	0,24	0,43
4	0,14	0,14	0,13	0,14	0,15	0,18	0,23	0,42
5	0,19	0,19	0,18	0,2	0,22	0,25	0,32	0,53
6	0,2	0,2	0,18	0,2	0,22	0,26	0,33	0,54
7	0,14	0,14	0,13	0,15	0,16	0,19	0,25	0,44
8	0,12	0,12	0,11	0,12	0,14	0,16	0,21	0,39
Mínimo	0,12	0,12	0,11	0,12	0,14	0,16	0,21	0,39
Media	0,18	0,18	0,16	0,18	0,20	0,23	0,29	0,49
Máximo	0,31	0,31	0,3	0,33	0,35	0,41	0,48	0,69

Tabla 28. Valores de D_{50} en los receptores. Simulación 0.

Fuente: Propia

- Simulación 1.

Receptor	Frecuencias							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	0,38	0,38	0,44	0,49	0,51	0,52	0,57	0,72
2	0,54	0,52	0,57	0,62	0,65	0,66	0,7	0,82
3	0,29	0,28	0,34	0,38	0,4	0,42	0,47	0,63
4	0,31	0,3	0,34	0,38	0,4	0,42	0,46	0,62
5	0,42	0,41	0,45	0,49	0,52	0,53	0,58	0,73
6	0,37	0,36	0,4	0,44	0,46	0,48	0,52	0,67
7	0,28	0,27	0,32	0,34	0,35	0,36	0,4	0,55
8	0,27	0,26	0,3	0,34	0,35	0,37	0,41	0,58
Mínimo	0,27	0,26	0,3	0,34	0,35	0,36	0,4	0,55
Media	0,36	0,35	0,40	0,44	0,46	0,47	0,51	0,67
Máximo	0,54	0,52	0,57	0,62	0,65	0,66	0,7	0,82

Tabla 29. Valores de D_{50} en los receptores. Simulación 1.

Fuente: Propia

- Simulación 2.

Receptor	Frecuencias							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	0,38	0,38	0,44	0,5	0,52	0,54	0,57	0,72
2	0,54	0,53	0,58	0,63	0,66	0,68	0,71	0,82
3	0,29	0,29	0,34	0,39	0,41	0,43	0,47	0,63
4	0,31	0,3	0,34	0,38	0,4	0,43	0,46	0,62
5	0,42	0,41	0,45	0,5	0,53	0,55	0,58	0,73
6	0,37	0,36	0,4	0,45	0,47	0,49	0,52	0,67
7	0,28	0,27	0,32	0,35	0,35	0,37	0,4	0,56
8	0,27	0,26	0,3	0,34	0,36	0,38	0,42	0,58
Mínimo	0,27	0,26	0,3	0,34	0,35	0,37	0,4	0,56
Media	0,36	0,35	0,40	0,44	0,46	0,48	0,52	0,67
Máximo	0,54	0,53	0,58	0,63	0,66	0,68	0,71	0,82

Tabla 30. Valores de D_{50} en los receptores. Simulación 2.

Fuente: Propia

El valor de la definición nos da una idea de la inteligibilidad de la palabra en la iglesia. Los valores de este parámetro deberían ser superiores al 0,5 y, como se observa, solo se cumple para las frecuencias de 4000 y 8000 Hz en la simulación 1 y 2.

Como observamos en la figura siguiente, el acondicionamiento acústico de la iglesia previsto, mejora la inteligibilidad de la palabra en todas las frecuencias en alrededor de un 20 %. Sin embargo, no llega a los valores deseados.

Este comportamiento del parámetro de inteligibilidad es normal en este tipo de recintos a causa del T_r elevado. La solución para mejorar la inteligibilidad de la palabra, en este tipo de recintos es con el apoyo electroacústico, colocando unos pequeños altavoces puntuales dispersos por toda la sala. Este tema no es tratado en este trabajo ya que se está estudiando un uso musical del recinto y no oral.

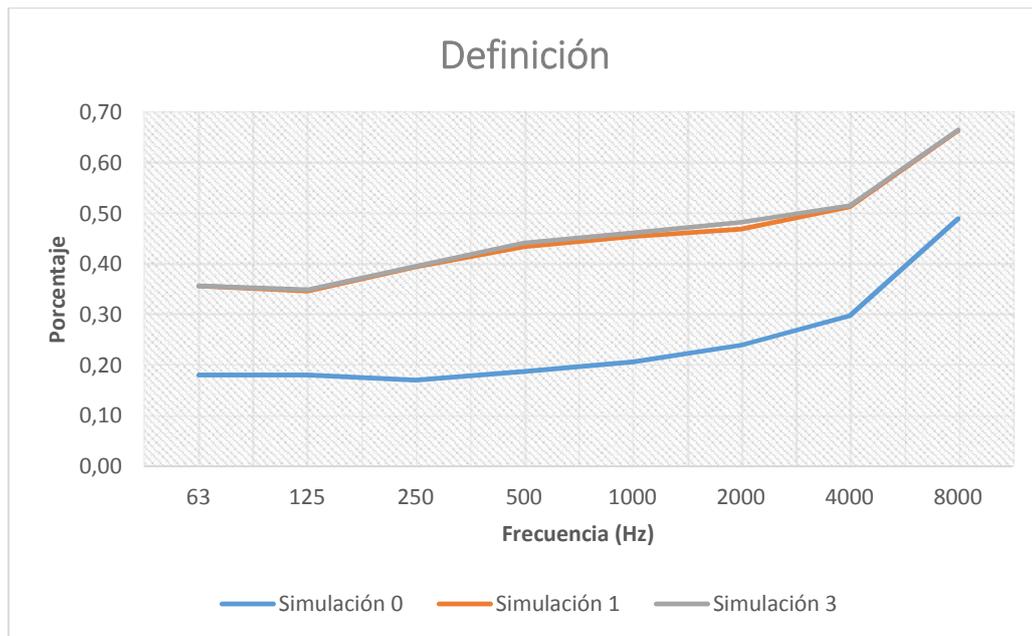


Figura 30. Gráfico de los valores del D₅₀ en las 3 simulaciones.
Fuente: Propia.

Eficiencia lateral (LF_{80}).

Los resultados de este parámetro son los siguientes:

- Simulación 0.

Receptor	Frecuencias							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	0,17	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,13
2	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,25	0,24
3	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	0,16
4	0,23	0,22	0,21	0,20	0,20	0,19	0,19	0,17
5	0,15	0,15	0,15	0,14	0,15	0,15	0,14	0,12
6	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,15
7	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,18
8	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,18	0,17
Mínimo	0,15	0,15	0,15	0,14	0,15	0,15	0,14	0,12
Media	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,18	0,17
Máximo	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,25	0,24

Tabla 31. Valores de LF_{80} en los receptores. Simulación 0.
Fuente: Propia

- Simulación 1.

Receptor	Frecuencias							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	0,167	0,164	0,172	0,183	0,183	0,184	0,18	0,158
2	0,228	0,228	0,24	0,249	0,252	0,258	0,257	0,242
3	0,198	0,193	0,19	0,206	0,208	0,207	0,205	0,184
4	0,162	0,165	0,148	0,15	0,15	0,151	0,151	0,135
5	0,126	0,134	0,138	0,146	0,145	0,147	0,145	0,125
6	0,186	0,184	0,193	0,202	0,204	0,206	0,204	0,185
7	0,258	0,255	0,258	0,262	0,261	0,26	0,257	0,237
8	0,181	0,195	0,156	0,15	0,153	0,16	0,161	0,148
Mínimo	0,126	0,134	0,138	0,146	0,145	0,147	0,145	0,125
Media	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	0,18
Máximo	0,258	0,255	0,258	0,262	0,261	0,26	0,257	0,242

Tabla 32. Valores de LF_{80} en los receptores. Simulación 1.
Fuente: Propia

- Simulación 2.

Receptor	Frecuencias							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	0,167	0,164	0,172	0,181	0,18	0,18	0,179	0,157
2	0,228	0,229	0,24	0,248	0,25	0,256	0,256	0,242
3	0,198	0,193	0,19	0,205	0,205	0,205	0,204	0,183
4	0,162	0,164	0,148	0,149	0,147	0,148	0,15	0,134
5	0,126	0,133	0,138	0,144	0,141	0,142	0,143	0,124
6	0,186	0,184	0,193	0,201	0,201	0,203	0,203	0,184
7	0,258	0,255	0,258	0,262	0,26	0,259	0,256	0,236
8	0,181	0,194	0,156	0,148	0,149	0,155	0,16	0,146
Mínimo	0,126	0,133	0,138	0,144	0,141	0,142	0,143	0,124
Media	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,18
Máximo	0,258	0,255	0,258	0,262	0,26	0,259	0,256	0,242

Tabla 33. Valores de LF_{80} en los receptores. Simulación 2.
Fuente: Propia

Este parámetro mide el grado de espaciabilidad del sonido. Para valorar y comparar este parámetro se utiliza el LF_{E4} , que es una media de los valores para las bandas de frecuencia de 125 Hz hasta 1000 Hz. La siguiente tabla proporciona el valor del LF_{E4} para cada simulación:

Parámetro	Simulación 0	Simulación 1	Simulación 2
LF_{E4} (%)	18,90	19,12	19,01

Tabla 34. Valores de LF_{E4} en las tres simulaciones
Fuente: Propia

Observamos que en las simulaciones 1 y 2 alcanzamos el valor recomendado mínimo del 19% muy justo.

El porcentaje de este parámetro aumenta, según la cantidad de reflexiones tempranas laterales que lleguen a cada receptor. Si nos fijamos en los valores de cada uno de los receptores por separado, en las simulaciones 1 y 2, hay 3 receptores que cumplen este parámetro, el 2, el 3 y el 7. El resto de ellos no reciben las suficientes reflexiones laterales tempranas, debido, supuestamente, a que al colocar las cortinas, material que es muy absorbente acústicamente, para evitar el excesivo tiempo de reverberación que existe en las iglesias, ha provocado además, que las primeras reflexiones laterales se atenúen de forma excesiva y, como consecuencia, que los valores del LF en los receptores sean excesivamente bajos.

Parámetro de inteligibilidad, STI.

Por último, se analiza el STI, parámetro que nos indica la calidad de la inteligibilidad de la palabra. Los resultados encada una de las simulaciones son los siguientes:

Receptor	Simulación 0	Simulación 1	Simulación 2
1	0,35	0,55	0,56
2	0,46	0,62	0,62
3	0,33	0,5	0,51
4	0,34	0,51	0,51
5	0,39	0,55	0,56
6	0,38	0,53	0,53
7	0,34	0,47	0,47
8	0,33	0,48	0,48
Mínimo	0,33	0,47	0,47
Media	0,37	0,53	0,53
Máximo	0,46	0,62	0,62

Tabla 35. Valores del STI en las tres simulaciones.

Fuente: Propia

Según la tabla 6 mostrada en el capítulo 2, apartado 3, la inteligibilidad de la palabra en la simulación 0 es considerada pobre y, en el resto de simulaciones es considerada aceptable.

Estos resultados son previsibles, causa del alto valor en Tr que se tiene en la iglesia. Al emitir un mensaje oral, la duración de las vocales y su correspondiente nivel de presión sonora es mayor que en el de las consonantes. Además el contenido frecuencial de las vocales es más rico en bajas frecuencias, en tanto que las consonantes presentan un mayor contenido en altas frecuencias. En una sala como la de nuestro estudio, con un tiempo de reverberación elevado, el decaimiento energético de una vocal emitida en la misma es apreciablemente más lento que su decaimiento propio. Tal hecho, junto con la mayor duración y nivel comentados anteriormente, provoca un solapamiento temporal de la vocal con la consonante inmediata posterior, que provoca que la inteligibilidad sea baja.

3.3 Mapas de los parámetros acústicos.

El software Odeon puede realizar mapas de color donde se muestran los parámetros acústicos para una cuadrícula, previamente definida, que contiene varios receptores con distancias prefijadas entre ellos. Estos mapas, mediante escalas de colores, plasman las tendencias de cada parámetro a lo largo de toda la superficie del recinto. Con ellos se puede aportar una información global y visual del comportamiento acústico de la iglesia, reforzando el análisis realizado con los datos concretos en cada uno de los 8 receptores.

Se puede realizar un mapa para cada una de las bandas de frecuencia y para cada uno de los parámetros calculados. En el presente trabajo, se han calculado los mapas acústicos correspondientes a la frecuencia de 1000 Hz para cada parámetro en cada una de las simulaciones. En este apartado solamente están expuestos algunos de los mapas calculados de la simulación 2, ya que es la que más información práctica y característica nos da. No obstante, en el Anexo III de este proyecto están expuestos todos los mapas de color de cada uno de los parámetros en la banda de frecuencia de 1000 Hz para cada una de las simulaciones.

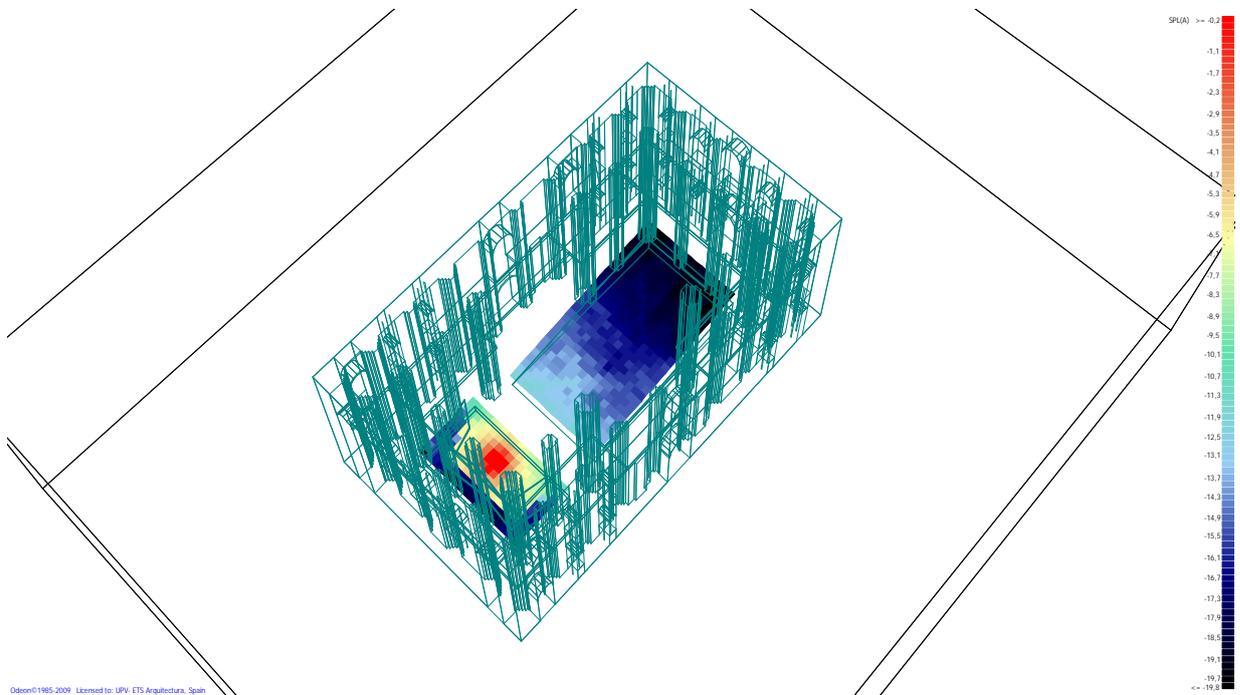


Figura 31. Mapa de color del SPLA. Simulación 2.
Fuente: ODEON Room Acoustics Program.

En el mapa de color anterior, se observa, tal y como se dedujo con los datos de los receptores estudiados, que el nivel de presión sonora va disminuyendo progresivamente a medida que se aleja de la fuente. No hay que olvidar que el mapa está calculado para la frecuencia de 1000 Hz, por lo que el descenso del nivel de presión sonora será más rápido que en una frecuencia más baja. Cabe destacar que la sensación de sonoridad de las primeras filas, como se observa tanto en el mapa de color como en los datos obtenidos, será mayor que la del resto del público.

Otro de los mapas de color interesantes es el de la claridad musical. Podemos observar que en las primeras filas, correspondientes a la situación del receptor 2 y 4 la claridad tiene valores mayores que para el resto del público de la sala, donde estaría situados el resto de receptores. En consecuencia, la gran mayoría del público está situado en zonas donde el valor de la claridad es inferior a 2, que es lo recomendable y, por lo tanto, no se percibirá una claridad adecuada.

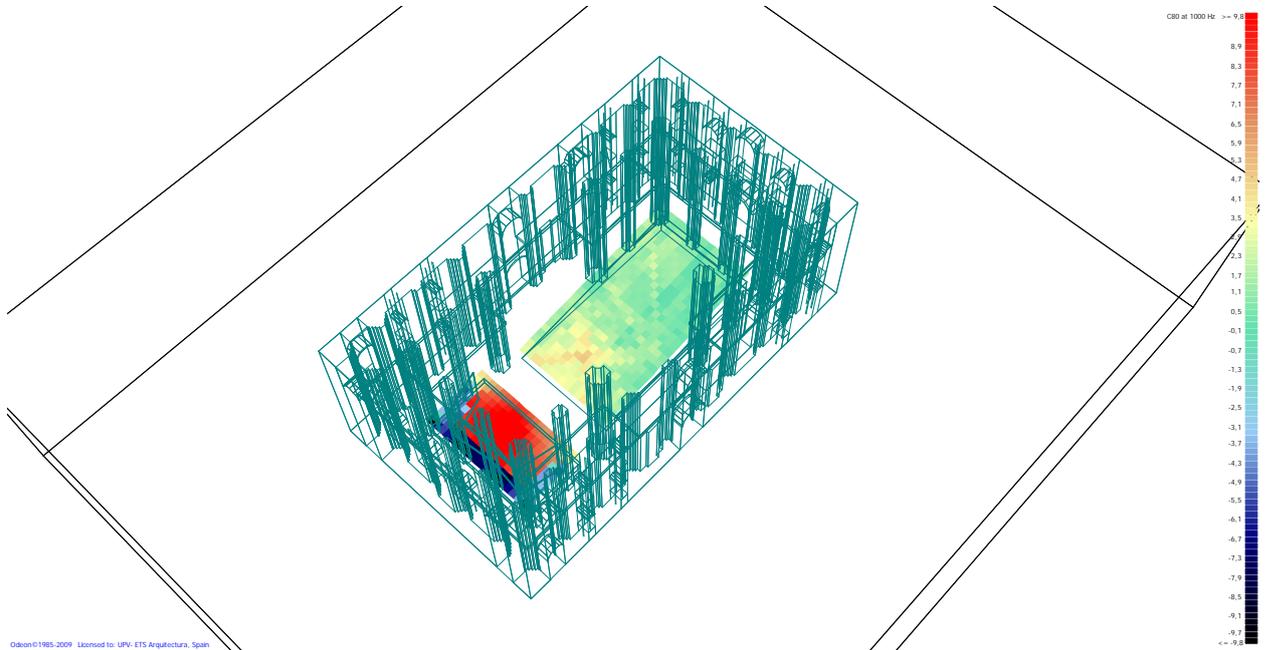


Figura 32. Mapa de color del C_{80} . Simulación 2.

Fuente: ODEON Room Acoustics Program.

Seguidamente se presenta el mapa de color del parámetro acústico de la definición, que relaciona la energía en los primeros 50 ms, incluyendo el sonido directo y el resto de la energía. El valor mínimo de este parámetro se sitúa en torno al 50 %, por lo que, como se observa en el mapa, en la gran mayoría de la sala se llega a este valor, pero muy justo.

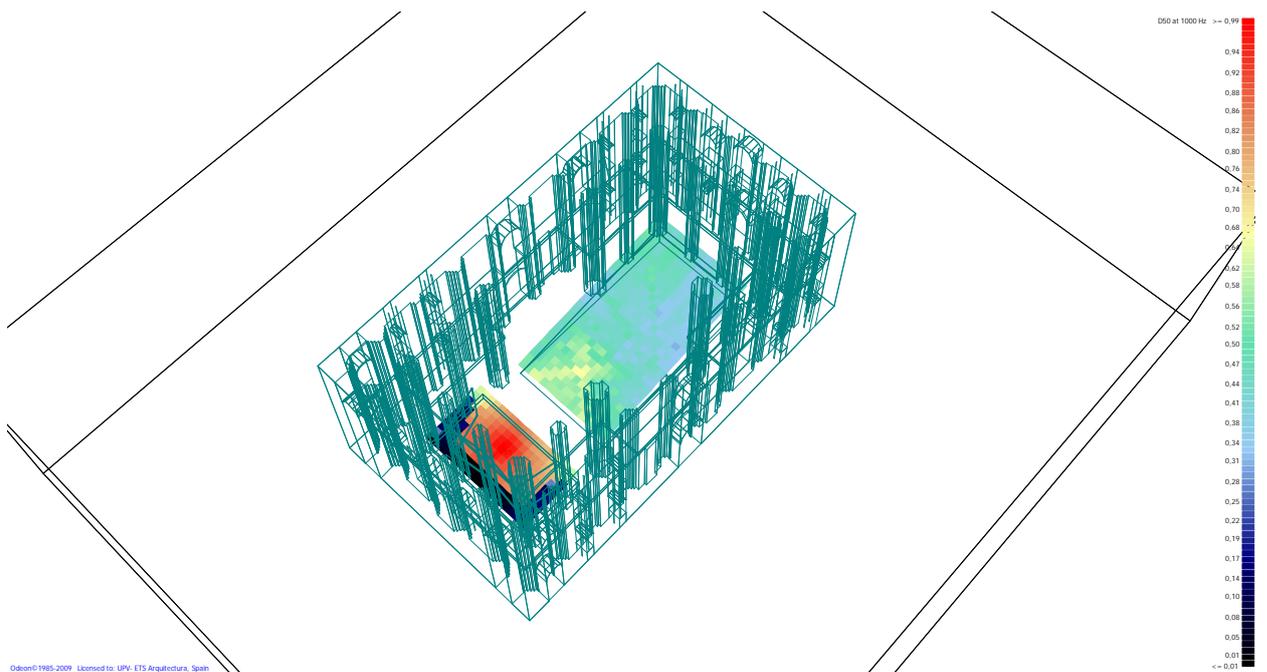


Figura 33. Mapa de color del D_{50} . Simulación 2.

Fuente: ODEON Room Acoustics Program.

Por último comentaremos el mapa de la eficiencia lateral, que se define como la relación entre la energía que llega lateralmente al oyente dentro de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo (se excluye este último) y la energía recibida en todas las direcciones en dicho intervalo de tiempo.

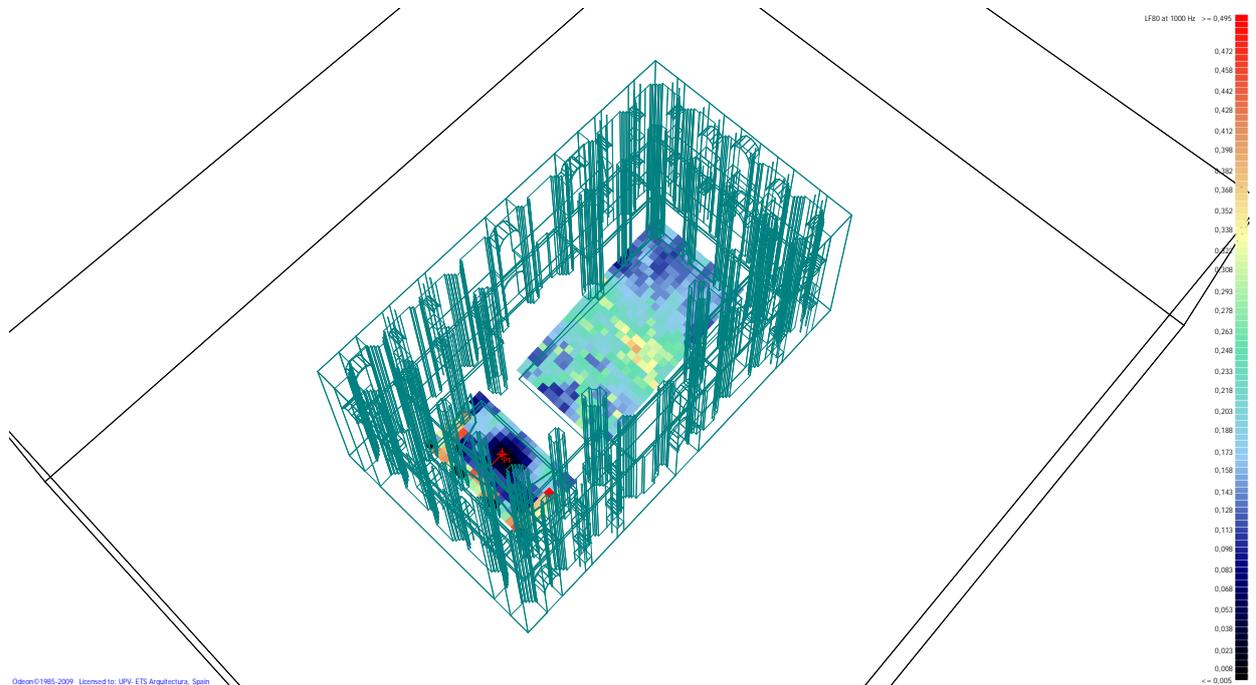


Figura 34. Mapa de color del LF_{80} . Simulación 2.
Fuente: ODEON Room Acoustics Program.

Como ya se confirmó en el análisis numérico de este parámetro, hay una zona, correspondiente a la situación de los receptores 2,3 y 7, donde el valor de la eficiencia lateral es superior al mínimo exigible y en el resto del recinto, incluso en el escenario, los valores son más bajos.

Capítulo 4.

Conclusiones

En primer lugar, desde el punto de vista del método elegido, hay que decir que el uso de las simulaciones acústicas es una buena manera de aproximarse a las cualidades que puede llegar a tener un recinto acústico, además es un método relativamente rápido y sencillo de utilizar.

Sin embargo, existen algunos inconvenientes tanto para salas ya construidas como para salas de obra nueva. En ambos casos los inconvenientes tienen una temática común, el comportamiento acústico de cada material del cual se compone el recinto. Es difícil saber cuánta energía acústica absorbe, cuánta refleja y con qué coeficiente de difusión los hacen cada uno de los materiales que forman el revestimiento interior del recinto, añadiendo la dificultad que para cada frecuencia el valor es diferente.

Los resultados obtenidos han mejorado en gran manera las cualidades de la sala, ya no solo el parámetro del tiempo de reverberación que es el más importante debido a que a raíz de él podemos calcular o comparar otros, sino conceptos como el brillo, el tiempo central o el STI han evolucionado hasta tener unos valores aceptables.

De todas maneras, aunque los parámetros no tengan unos valores que destaquen dentro del acondicionamiento acústico, si es verdad que se tendrá una mejora del sonido directo y de las visuales, debido a que el patio de butacas tiene forma escalonada, lo que hace que a medida que se vaya alejando del escenario los asientos estarán más altos y provocará una mejor visión.

Por otro lado, el hecho de que las simulaciones 1 y 2 en todos los parámetros tengan resultados muy parecidos, aún sabiendo que se diferencian en que una sala está vacía completamente y la otra ocupada, es debido a que las butacas tienen unas cualidades absorbentes muy altas.

También cabe decir que los resultados obtenidos por la simulación han sido coherentes y podemos considerarlos como fiables para este caso. Podemos observar mediante este trabajo que con una intervención como ésta, sencilla y económicamente viable, podemos mejorar bastante los parámetros acústicos para un mejor confort en el interior de la sala; además de no modificar su condición de edificio histórico.

Finalmente, destacar el papel de la acústica dentro del diseño de nuevos edificios, que al inicio de mis estudios no veía como un papel para nada importante a lo largo del proceso edificatorio y, ahora, una vez hecho el área optativa y el trabajo final de grado relacionado con la acústica arquitectónica, lo veo no solo como un área importante sino como una rama en la cual poder profundizar y seguir aprendiendo.

Capítulo 5.

Índice de figuras

	Página
Figura 1. Comparación octavas y 1/3 de octavas. www.magrama.gob.es	5
Figura 2. Línea de puntos: Sonido directo, línea continua: Sonido reflejado. www.magrama.gob.es	8
Figura 3. Sonido directo y reflexiones. Isbert, 1998.....	8
Figura 4. Ejemplo curva tonal. Propia.	10
Figura 5. Tiempo de reverberación. Aulestia Valencia, 2010.....	11
Figura 6. Curvas NC. García García, 2013.....	12
Figura 7. Diferencia entre EDT y Tr. www.ingenieriaacusticafacil.com	14
Figura 8. Modelo tridimensional realizado para el estudio. Propia.....	18
Figura 9. Ubicación de la Casa de la Beneficencia, sede del Museo de Prehistoria..... de Valencia. www.google.es/maps .	22
Figura 10. Imagen esquina del Centro Cultural de la Beneficencia. www.ayto-valencia.es	23
Figura 11. Imagen de la fachada del Centro Cultural de la Beneficencia. www.ayto-valencia.es	23
Figura 12. Dibujo planta baja del Museo de Prehistoria. www.museuprehistoriavalencia.es	24
Figura 13. Dibujo planta primera del Museo de Prehistoria. www.museuprehistoriavalencia.es	24
Figura 14. Dibujo planta segunda del Museo de Prehistoria. www.museuprehistoriavalencia.es	24
Figura 15. Postal antigua de la Iglesia de la Beneficencia. Postalesdevalencia.blogspot.com	25
Figura 16. Planta de la Iglesia. Propia.	25
Figura 17. Imagen interior iglesia. Guillén Guillamón, 1999.....	26
Figura 18. Imagen interior de uno de los pasillos de la iglesia. Guillén Guillamón, 1999.....	26
Figura 19. Imagen de un lateral de la iglesia. Guillén Guillamón, 1999.	26
Figura 20. Imagen del patio de butacas. Guillén Guillamón, 1999.	26
Figura 21. Modelo geométrico realizado. Sección. Propia.....	27
Figura 22. Modelo geométrico realizado. Vista exterior. Propia.	28
Figura 23. Representación de la curva tonal de la iglesia. Propia.....	30
Figura 24. Representación de las simulaciones. Propia.	32

	Página
Figura 25. Curva tonal. Simulación 0. Propia.	34
Figura 26. Curva tonal. Simulación 1. Propia.	35
Figura 27. Curva tonal. Simulación 2. Propia.	36
Figura 28. Gráfica de los valores del Tr de las tres simulaciones. Propia.....	37
Figura 29. Gráfico de los valores del C_{80} en los 8 receptores. Propia.	44
Figura 30. Gráfica de los valores del D_{50} en las 3 simulaciones. Propia.	47
Figura 31. Mapa de color del SPLA. Simulación 2. ODEON Room Acoustics Program.....	50
Figura 32. Mapa de color del C_{80} . Simulación 2. ODEON Room Acoustics Program.....	51
Figura 33. Mapa de color del D_{50} . Simulación 2. ODEON Room Acoustics Program.....	51
Figura 34. Mapa de color del LF_{80} . Simulación 2. ODEON Room Acoustics Program.....	52

Capítulo 6.

Índice de tablas

	Página
Tabla 1. Representación octavas y 1/3 de octava. www.magrama.gob.es	6
Tabla 2. Comparación presión sonora – nivel de presión sonora. http://datateca.unad.edu.co/	7
Tabla 3. Tiempo de reverberación medio para cada tipo de sala. www.noisess.com	11
Tabla 4. Nivel de presión sonora máxima en cada banda. García García, 2013.	12
Tabla 5. Curvas NC recomendadas. Carrión Isbert, 1998.....	13
Tabla 6. Relación entre %AlCons, STI/RASTI y el grado de inteligibilidad. Carrión Isbert, 1998.....	16
Tabla 7. Tiempo de reverberación de la iglesia. Medición “in situ”. Guillén Guillamón, 1999.....	29
Tabla 8. Coeficientes de absorción utilizados en la simulación. Propia.....	30
Tabla 9. Coordenadas de la fuente y receptores de la simulación. Propia	32
Tabla 10. Valores en segundos del Tr_{30} en los receptores. Simulación 0. Propia.	34
Tabla 11. Valores en segundos del Tr_{30} en los receptores. Simulación 1. Propia.	35
Tabla 12. Valores en segundos del Tr_{30} en los receptores. Simulación 2. Propia.	36
Tabla 13. Tabla resumen Tr_{mid} BR y Br. Propia.	37
Tabla 14. Valores en segundos del EDT en los receptores. Simulación 0. Propia.....	38
Tabla 15. Valores en segundos del EDT en los receptores. Simulación 1. Propia.....	39
Tabla 16. Valores en segundos del EDT en los receptores. Simulación 2. Propia.....	39
Tabla 17. Valores de EDT_{mid} y Tr_{mid} de las simulaciones. Propia.	39
Tabla 18. Valores en milisegundos del T_s en los receptores. Simulación 0. Propia.....	40
Tabla 19. Valores en milisegundos del T_s en los receptores. Simulación 1. Propia.....	40
Tabla 20. Valores en milisegundos del T_s en los receptores. Simulación 2. Propia.....	41
Tabla 21. Valores en dB del STL en los receptores. Simulación 0. Propia.....	41
Tabla 22. Valores en dB del STL en los receptores. Simulación 1. Propia.....	42
	Página
Tabla 23. Valores en dB del STL en los receptores. Simulación 2. Propia.....	42

Tabla 24. Valores de C_{80} en los receptores. Simulación 0. Propia.....	43
Tabla 25. Valores de C_{80} en los receptores. Simulación 1. Propia.....	43
Tabla 26. Valores de C_{80} en los receptores. Simulación 2. Propia.....	44
Tabla 27. Valores de C_{80} (3) en cada simulación. Propia.....	44
Tabla 28. Valores de D_{50} en los receptores. Simulación 0. Propia.....	45
Tabla 29. Valores de D_{50} en los receptores. Simulación 1. Propia.....	46
Tabla 30. Valores de D_{50} en los receptores. Simulación 2. Propia.....	46
Tabla 31. Valores de LF_{80} en los receptores. Simulación 0. Propia.....	47
Tabla 32. Valores de LF_{80} en los receptores. Simulación 1. Propia.....	48
Tabla 33. Valores de LF_{80} en los receptores. Simulación 2. Propia.....	48
Tabla 34. Valores de LF_{80} en las tres simulaciones. Propia.....	48
Tabla 35. Valores del STI en las tres simulaciones. Propia.....	49

Capítulo 7.

Bibliografía

Referencias Bibliográficas.

- CARRIÓN ISBERT, A. 1998. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Edicions UPC. Páginas 62-63.
- BERANEK, L. 1962. Music, Acoustics and Architecture. London: John Wiley and sons New York.
- KURER, R. 1971. A simple measuring procedure for determining the “center time” of room acoustical impulse responses. 7th Intern Congress on Acoustics.

Bibliografía consultada.

- ABAD SORBET, M. Estudio acústico y electroacústico de la sala de conciertos Ritmo y Compás. Madrid.
- ARAU, H. 1999. ABC de la Acústica Arquitectónica.
- AULESTIA VALENCIA, C. 2010. estudio del estado acústico de dos iglesias patrimoniales de quito (la catedral y la compañía de jesús).
- BARRON, M. 1993. Auditorium Acoustics and Architectural Design. E & FN spon.
- BLASCO BLASCO, A. 2014. Estudio de las condiciones de audición en espacios claustrales valencianos mediante simulación acústica por Ray-Tracing. Estudio del Claustro de La Nau “Universitat de Valencia”.
- GARCÍA GARCÍA, R. Cálculo de curvas NC en tercios de octava y su aplicación práctica. 44º congreso español de acústica encuentro ibérico de acústica.
- ODEON Room Acoustic Software. 2009. User Manual.
- SERRANO RODRIGO, P. 2012. T.F.M. Estudio de la Iglesia del monasterio de Sta María de la Valldigna.

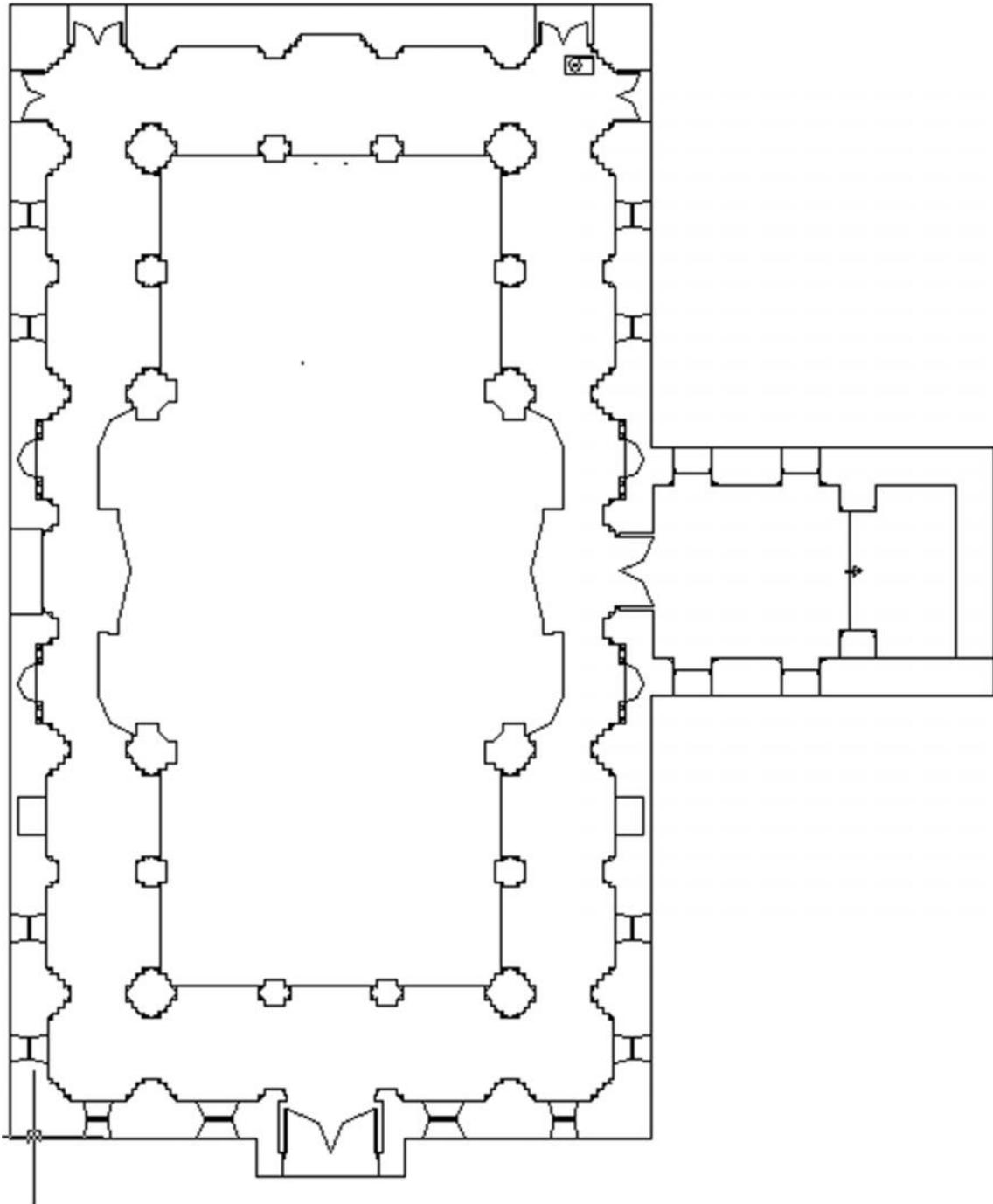
Páginas web consultadas.

- http://datateca.unad.edu.co/contenidos/208042/Contenido_en_linea/index.html
- https://arauacustica.com/files/publicaciones_relacionados/pdf_esp_100.pdf
- https://arauacustica.com/index.php?option=com_jumi&fileid=3&Itemid=58&lang=es&activ_fam=1
- <http://www.ehu.eus/acustica/espanol/salas/casles/casles.html>
- <http://www.ingenierosacusticos.com/ingenieros-acusticos-manual-sobre-acustica-de-salas.pdf>
- http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/contaminacion_acustica_tcm7-1705.pdf
- http://elrincondelaudioylaacustica.blogspot.com.es/2010/04/las-famosas-curvas-nc_19.html

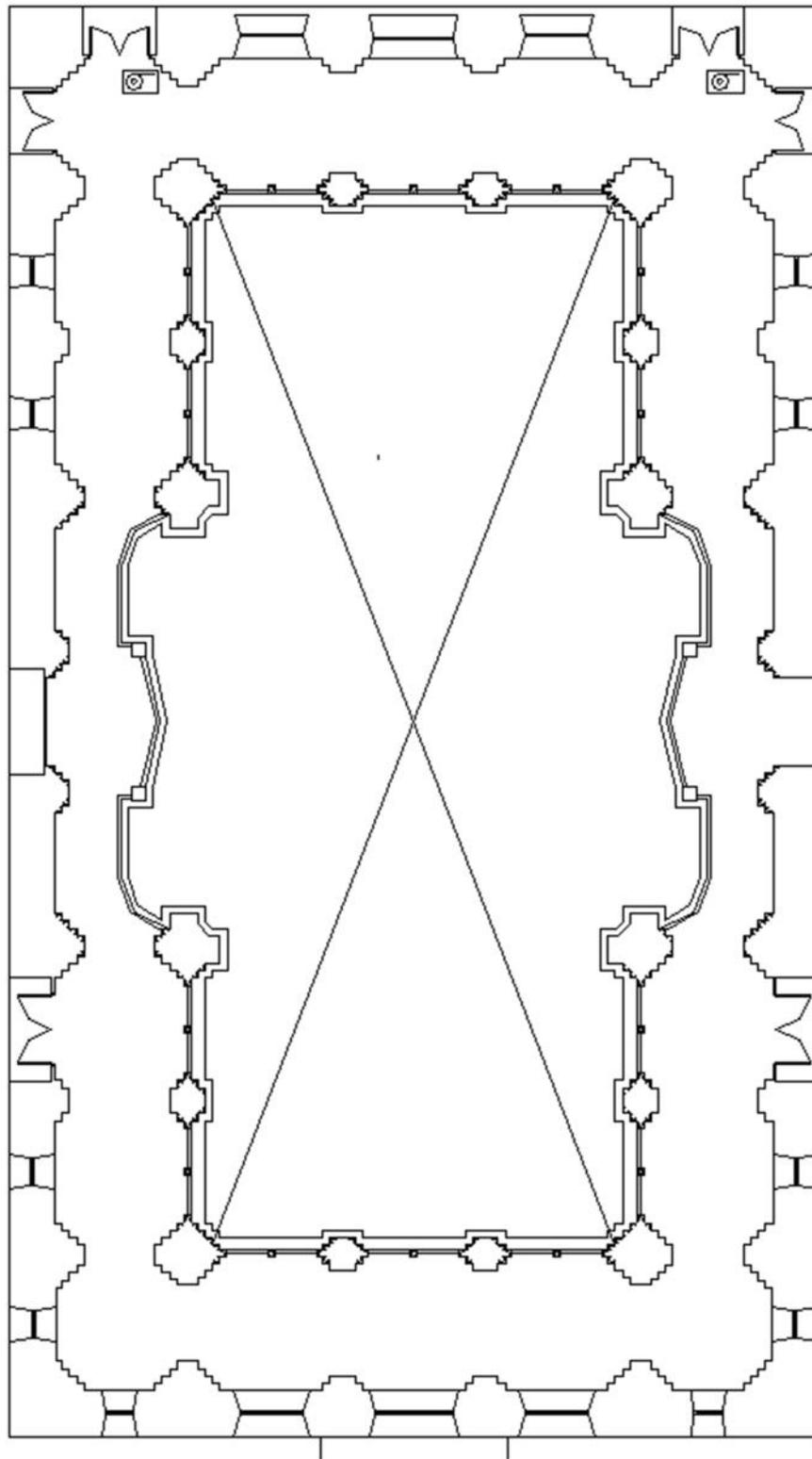
ANEXOS

Anexo I. Planos de la Iglesia de la Beneficencia.

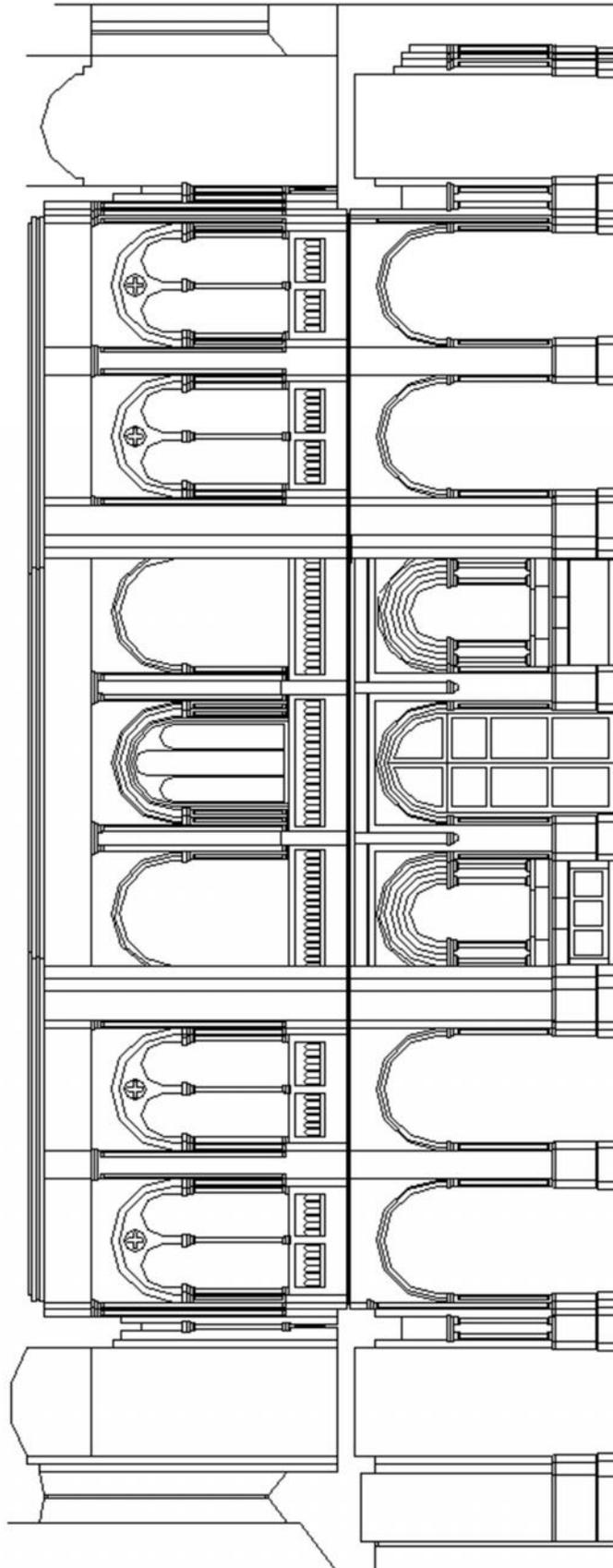
- *Planta baja.*



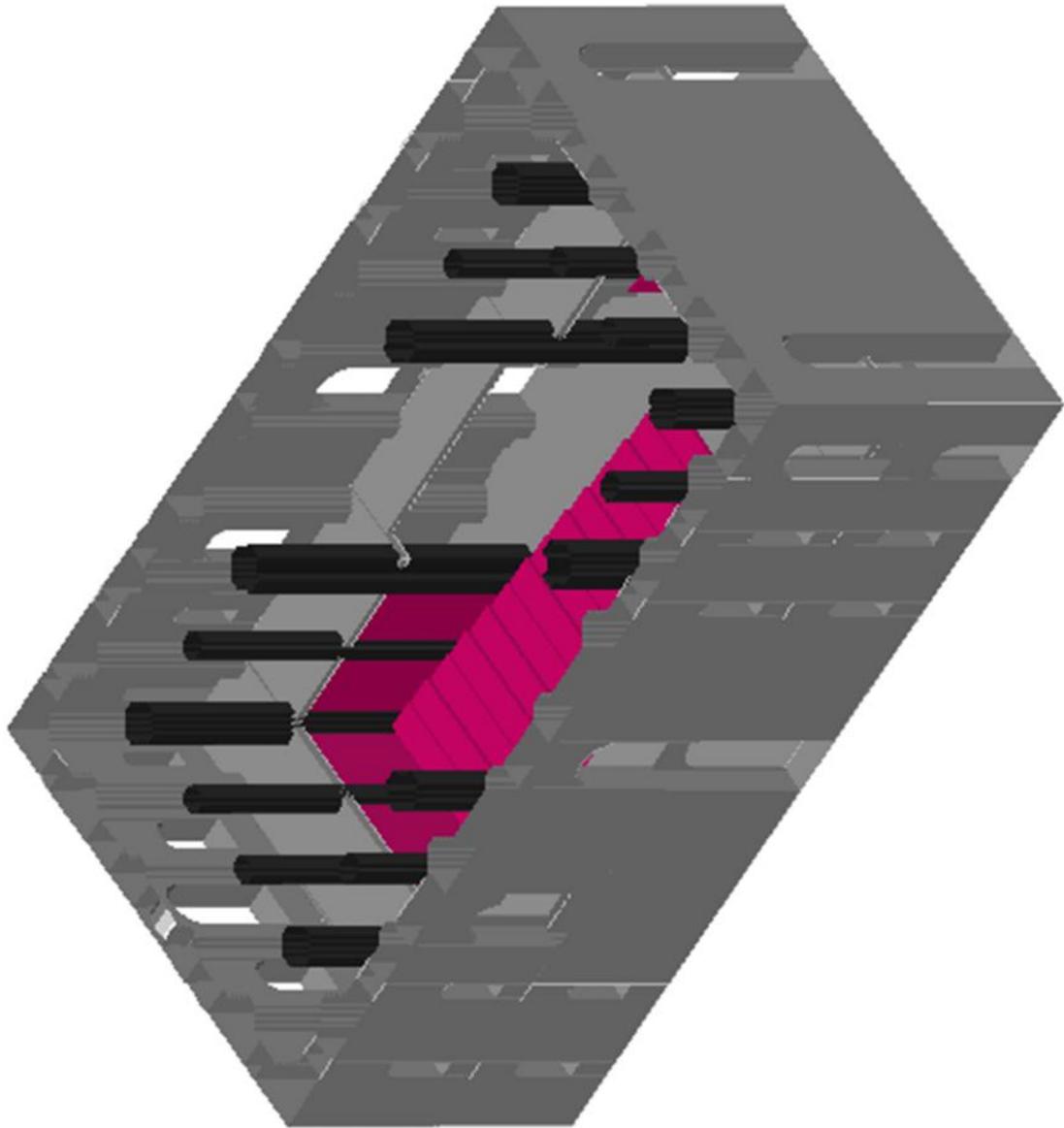
- *Planta alta.*



- *Sección longitudinal.*



- *Modelo geométrico tridimensional. Realizado con la función 3DCARA de AutoCAD. Vista interior.*

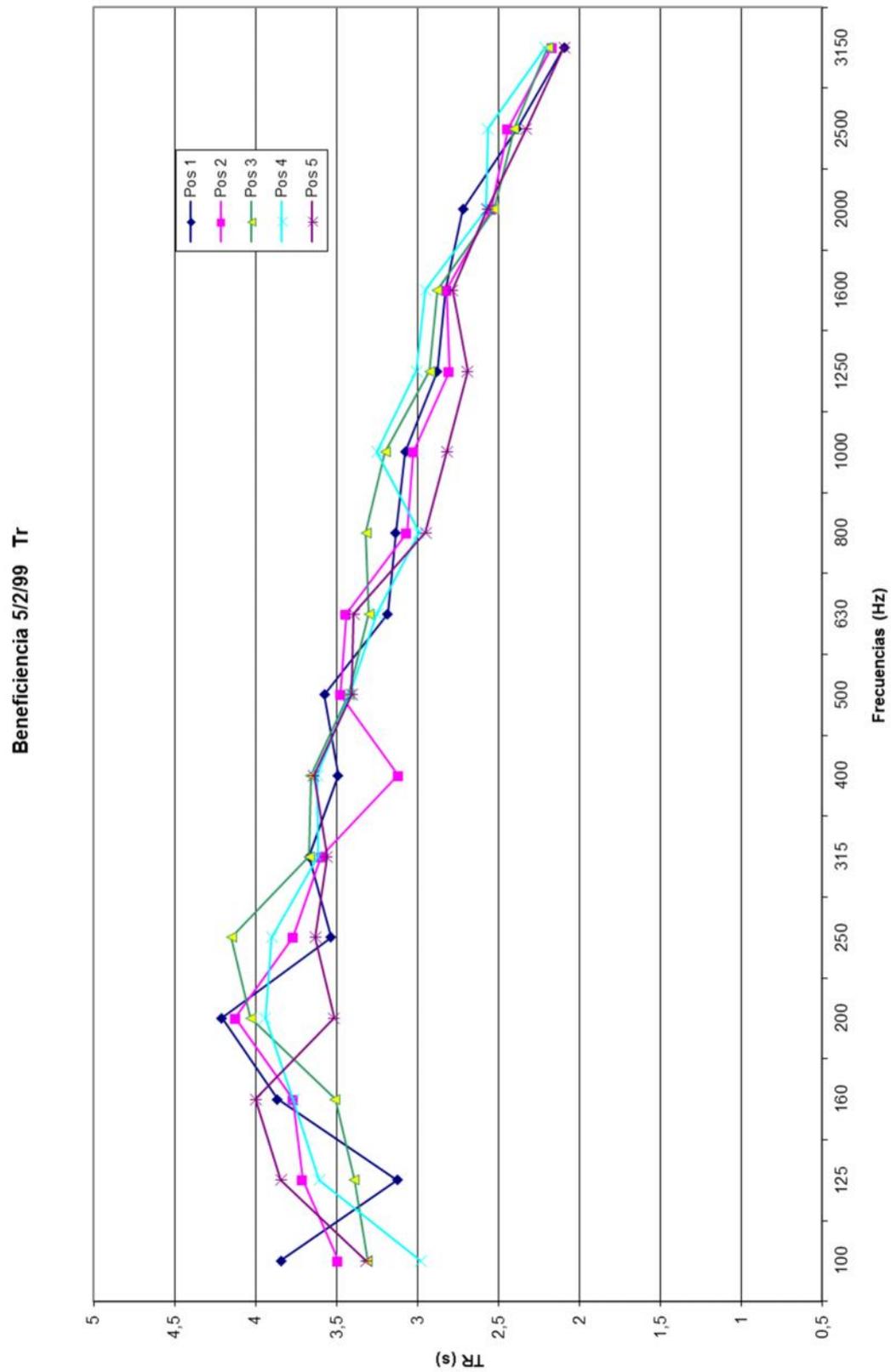


Anexo II. Mediciones del tiempo de reverberación “in situ”.

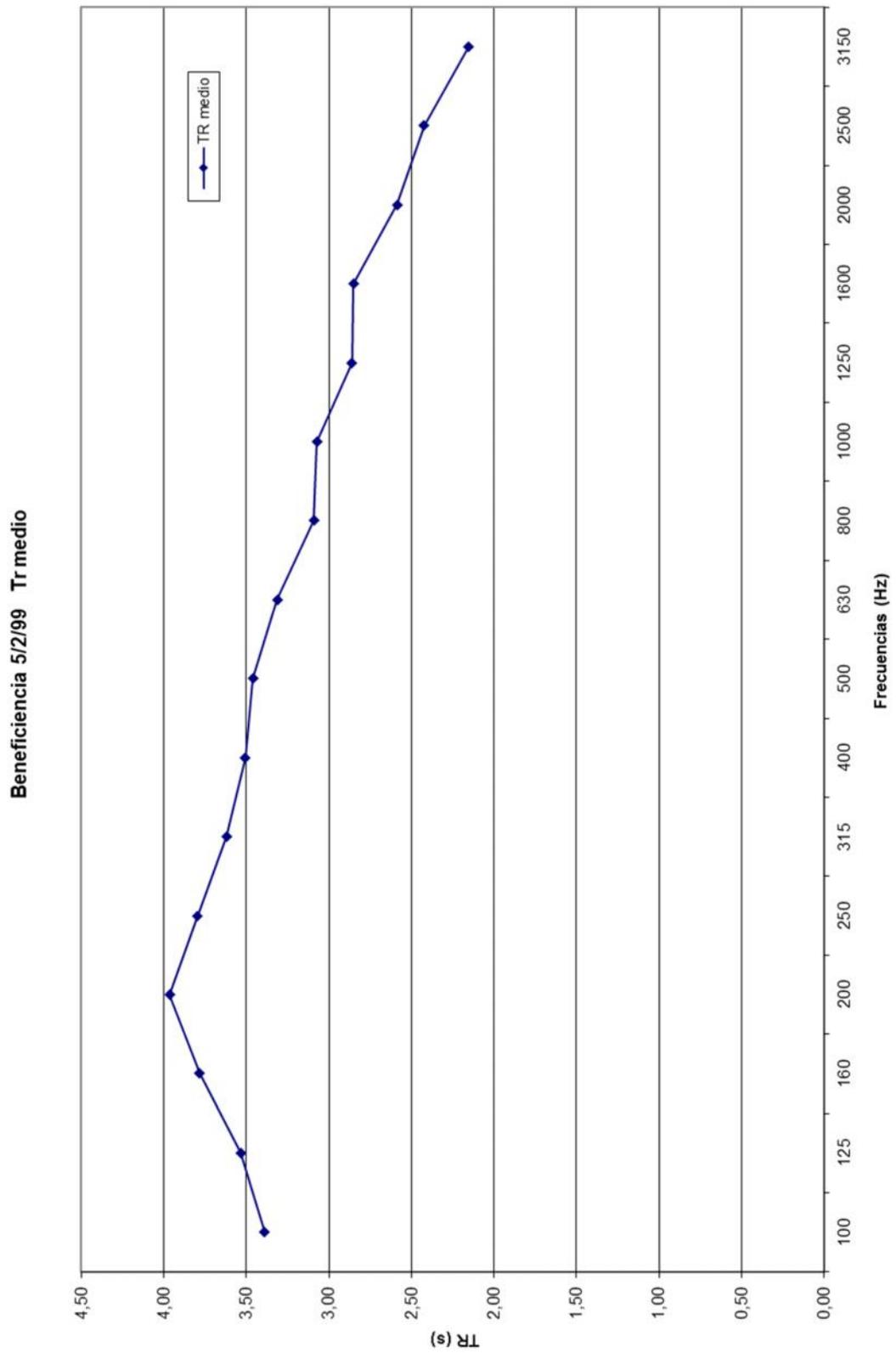
- Datos numéricos.

Frecuencia (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
TR20 (s)	3.71	2.88	3.91	4.28	3.57	3.75	3.57	3.75	3.26	3.16	3.15	2.96	2.87	2.68	2.36	2.11
TR30 (s)	3.98	3.37	3.82	4.14	3.5	3.59	3.41	3.4	3.11	3.11	3	2.8	2.78	2.76	2.41	2.08
Media (s)	3.845	3.125	3.865	4.21	3.535	3.67	3.49	3.575	3.185	3.135	3.075	2.88	2.825	2.72	2.385	2.095
Posición 1																
TR20 (s)	3.09	3.67	3.78	4.14	3.74	3.64	3.14	3.46	3.38	2.97	3.01	2.74	2.81	2.48	2.43	2.19
TR30 (s)	3.89	3.75	3.76	4.11	3.8	3.55	3.1	3.49	3.5	3.16	3.04	2.87	2.83	2.61	2.45	2.15
Media (s)	3.49	3.71	3.77	4.125	3.77	3.595	3.12	3.475	3.44	3.065	3.025	2.805	2.82	2.545	2.44	2.17
Posición 2																
TR20 (s)	3.31	3.34	3.52	4.07	4.29	3.77	3.7	3.4	3.4	3.38	3.19	2.89	2.92	2.54	2.42	2.22
TR30 (s)	3.31	3.44	3.5	3.99	4.01	3.57	3.62	3.45	3.2	3.26	3.21	2.96	2.84	2.52	2.39	2.17
Media (s)	3.31	3.39	3.51	4.03	4.15	3.67	3.66	3.425	3.3	3.32	3.2	2.925	2.88	2.53	2.405	2.195
Posición 3																
TR20 (s)	2.98	3.42	3.67	3.93	3.94	3.64	3.79	3.44	3.2	2.91	3.35	3.03	3.03	2.58	2.61	2.23
TR30 (s)	2.98	3.79	3.87	3.95	3.86	3.59	3.45	3.4	3.3	3.07	3.15	2.98	2.87	2.57	2.52	2.19
Media (s)	2.98	3.605	3.77	3.94	3.9	3.615	3.62	3.42	3.25	2.99	3.25	3.005	2.95	2.575	2.565	2.21
Posición 4																
TR20 (s)	3.32	3.93	4.27	3.35	3.54	3.51	3.65	3.41	3.45	2.88	2.7	2.71	2.81	2.56	2.32	2.08
TR30 (s)	3.32	3.76	3.73	3.68	3.72	3.61	3.63	3.4	3.34	3.02	2.94	2.67	2.76	2.58	2.34	2.11
Media (s)	3.32	3.845	4	3.515	3.63	3.56	3.64	3.405	3.395	2.95	2.82	2.69	2.785	2.57	2.33	2.095
Medias Tr (s)																
	3.39	3.54	3.78	3.96	3.80	3.62	3.51	3.46	3.31	3.09	3.07	2.86	2.85	2.59	2.43	2.15

- Gráfico tiempo de reverberación en las diferentes posiciones.



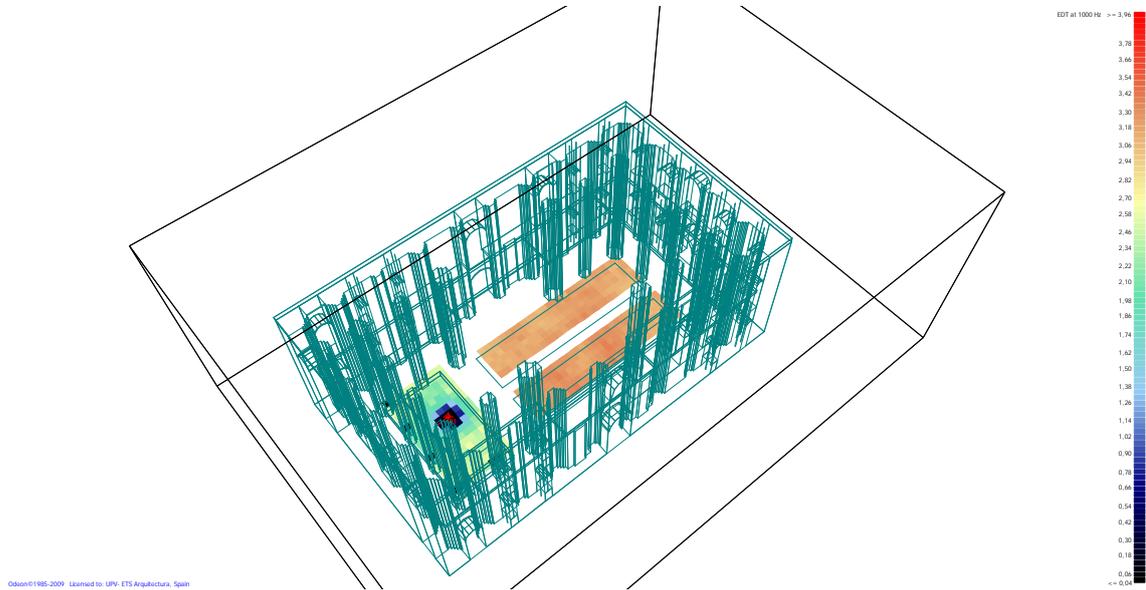
- Gráfico tiempo de reverberación medio.



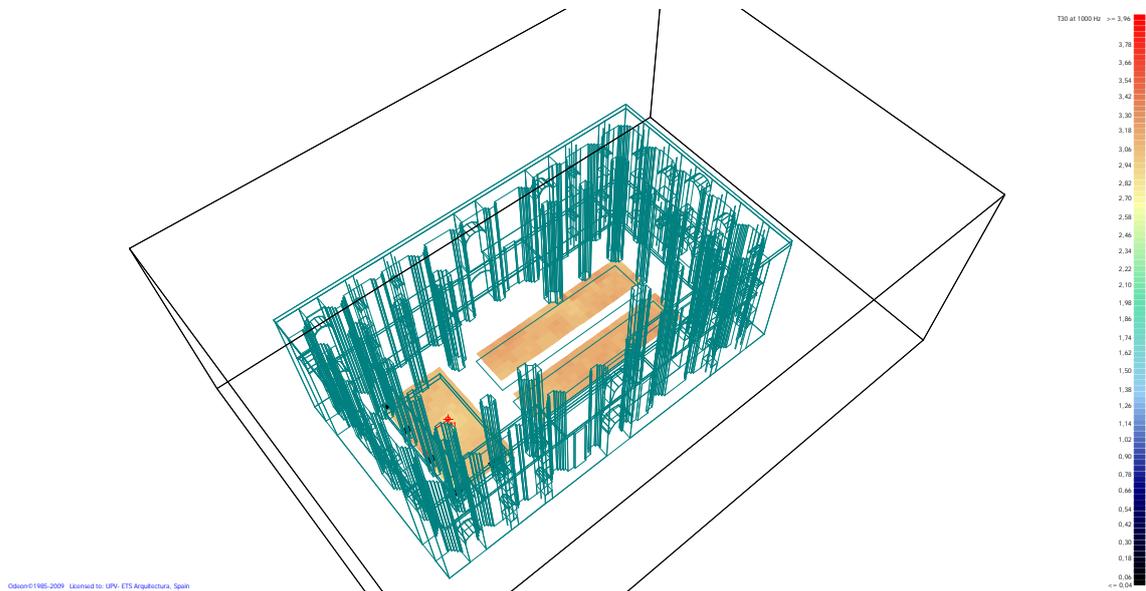
Anexo III. Mapas de parámetros acústicos (1000 Hz).

- *Mapas de la Simulación 0.*

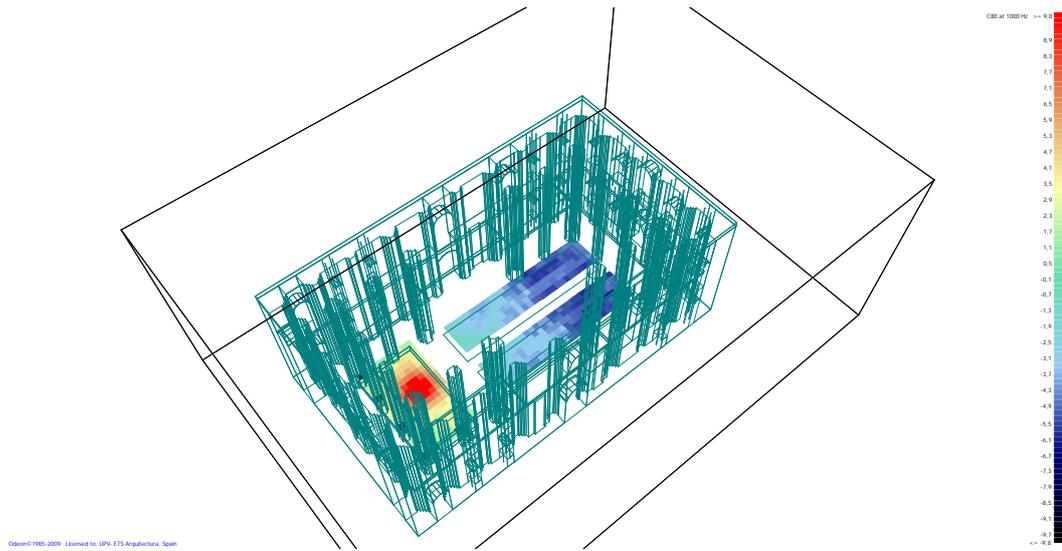
EDT



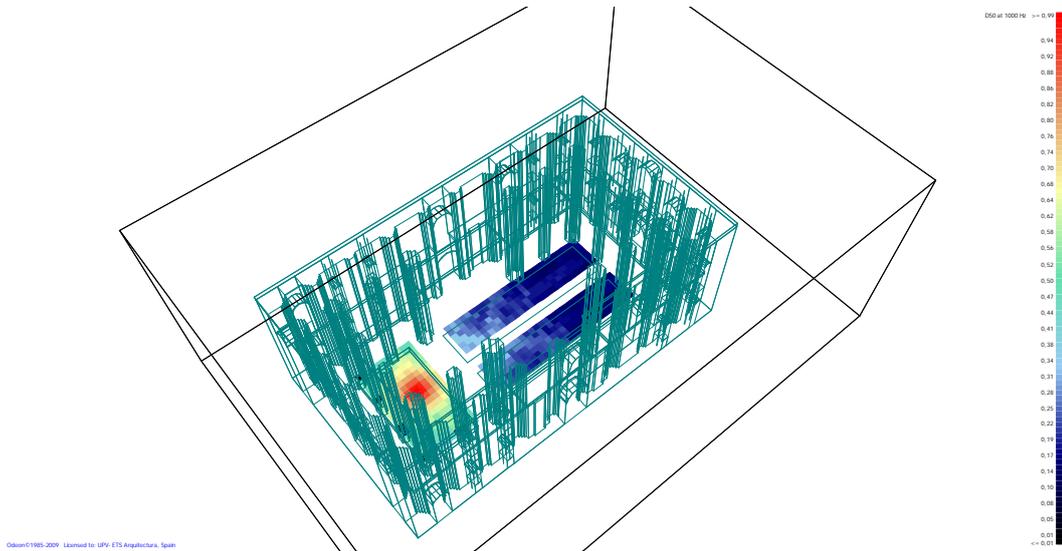
T₃₀



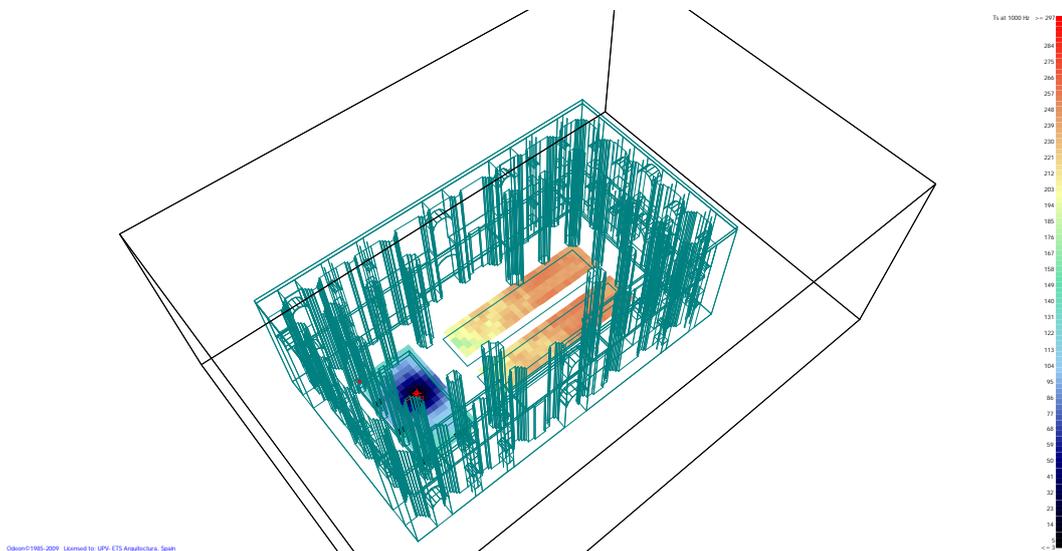
C80



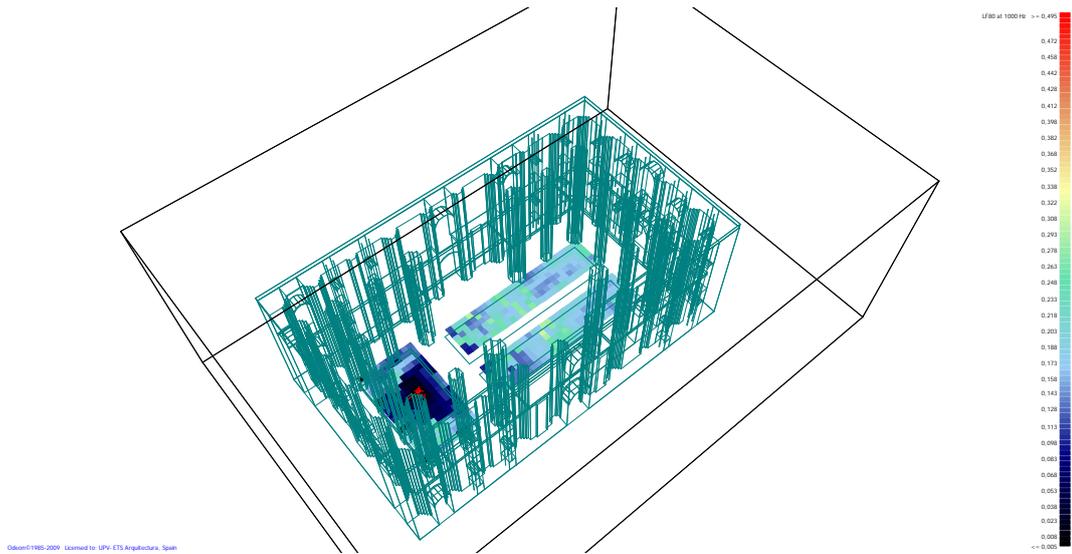
D50



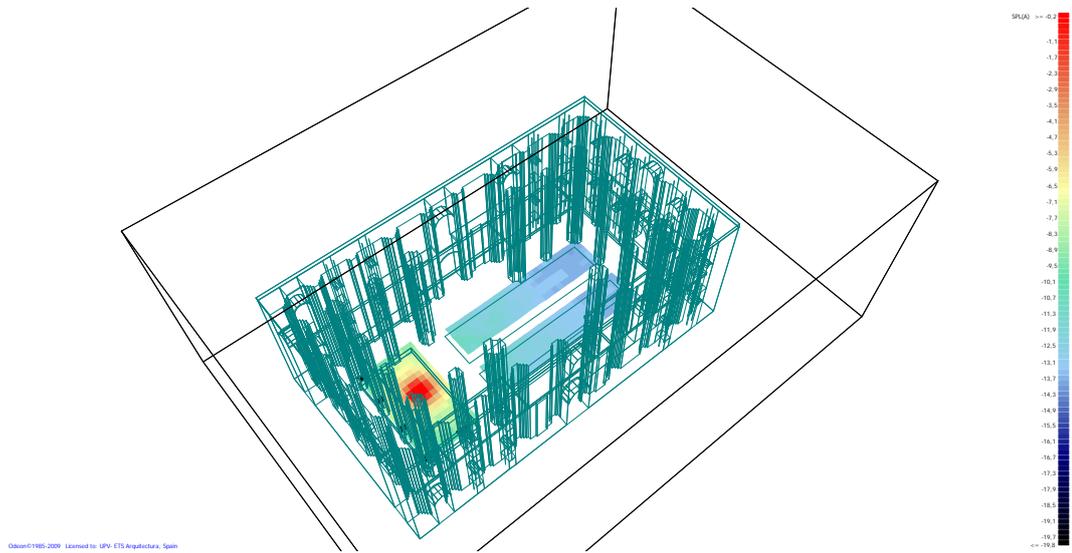
Ts



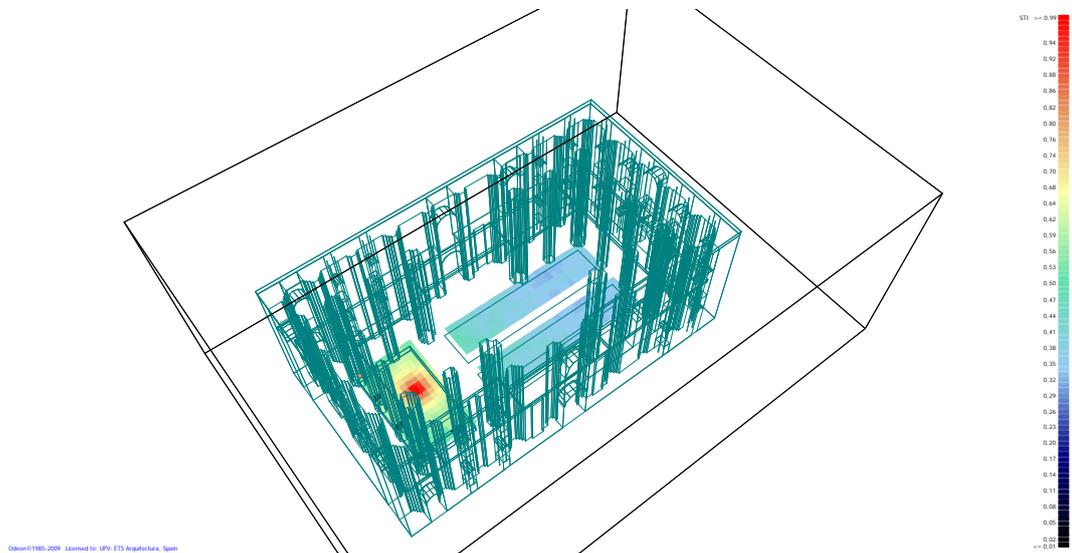
LF₈₀



SPLA

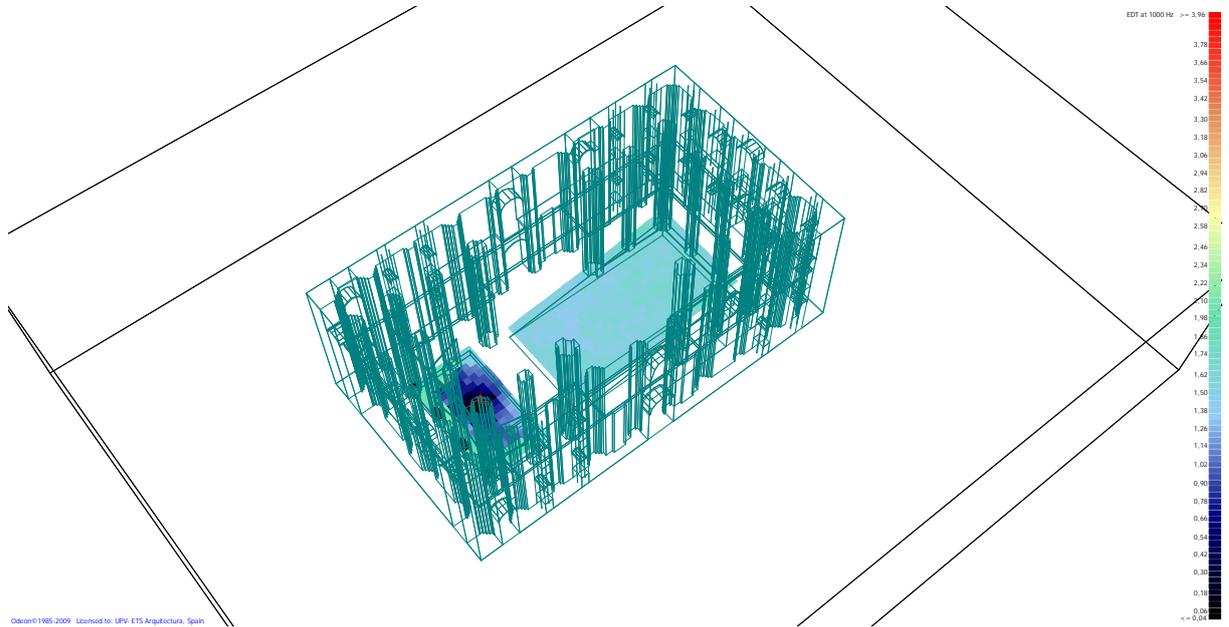


STI

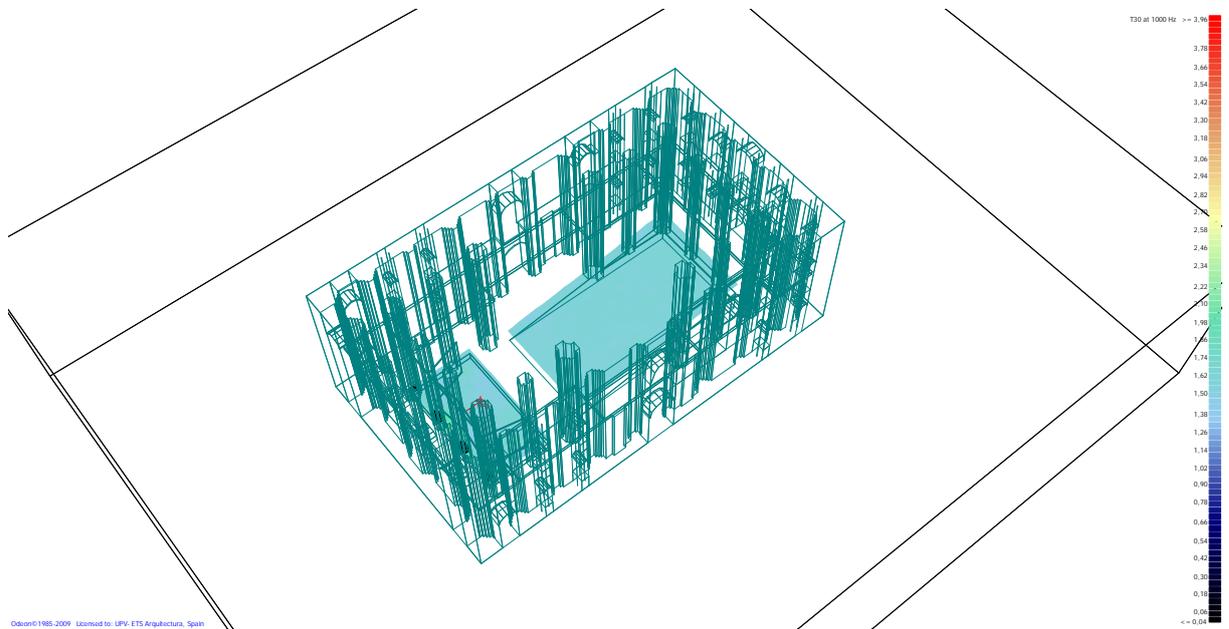


- Mapas de la simulación 1.

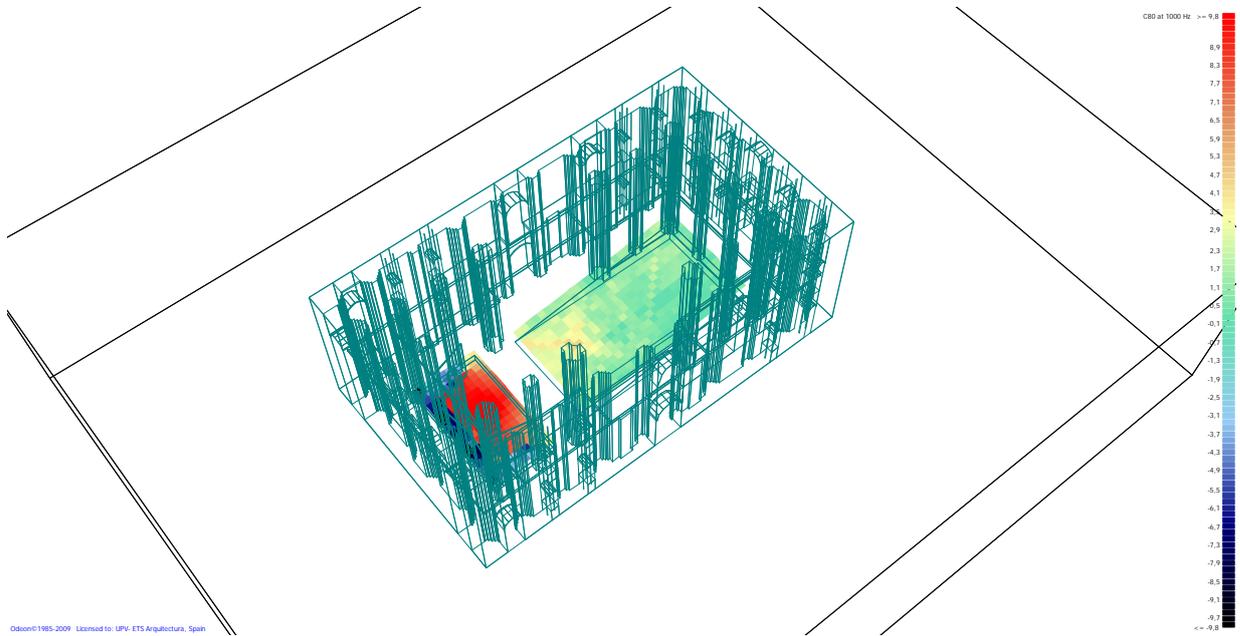
EDT



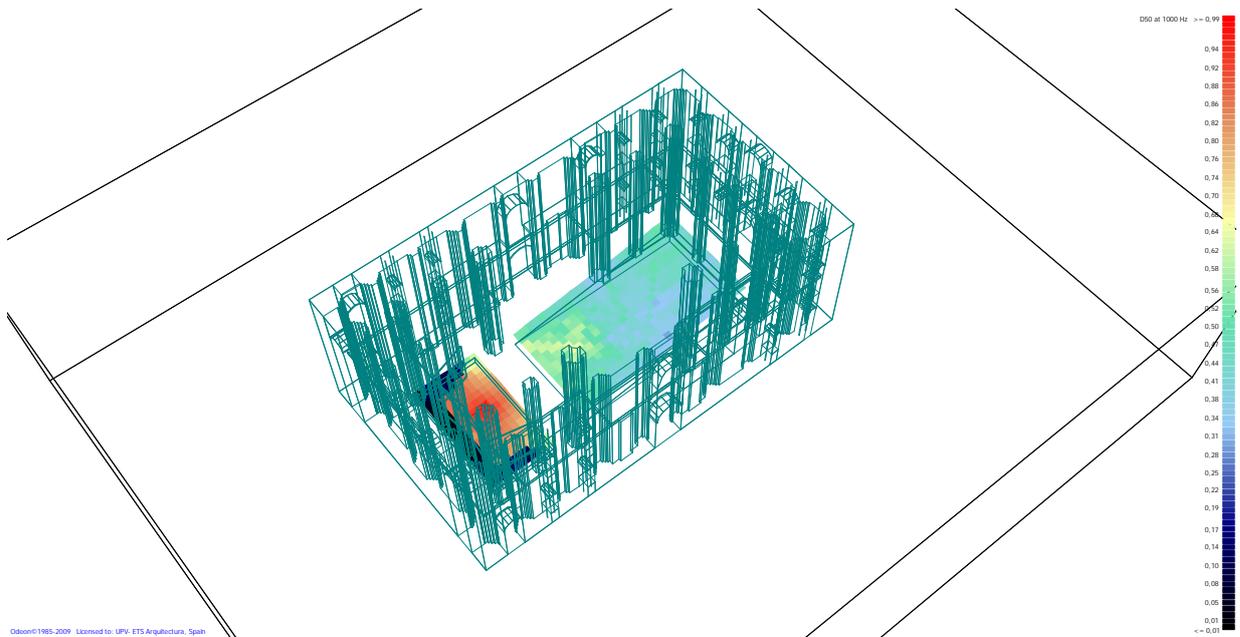
T₃₀



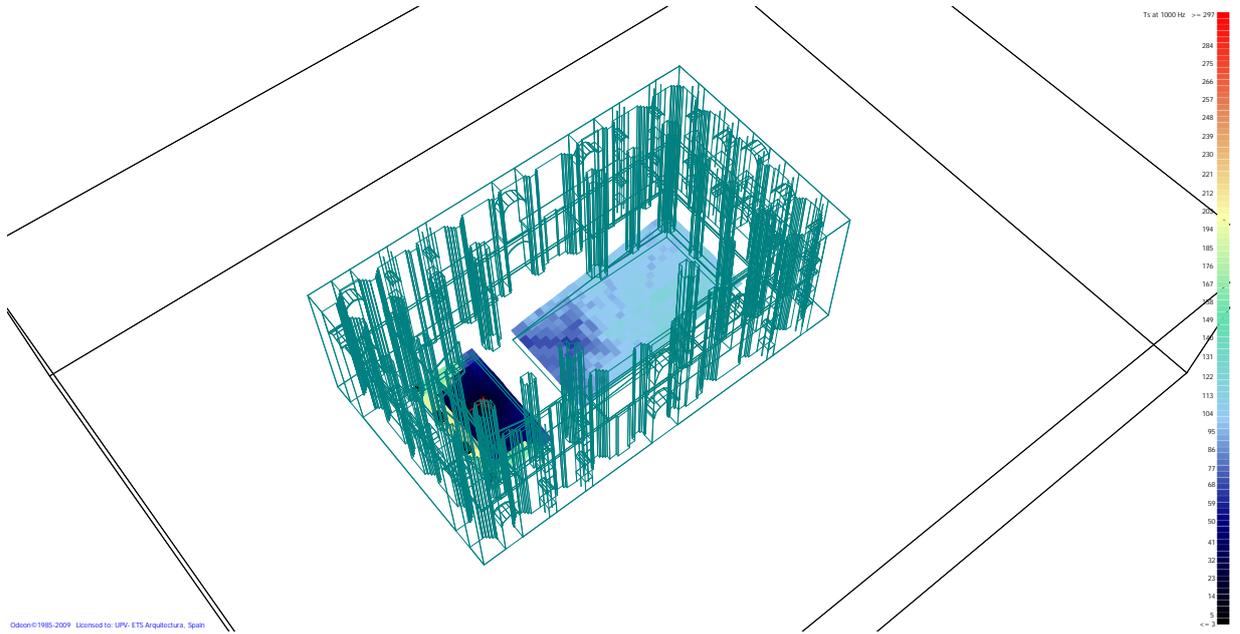
C₈₀



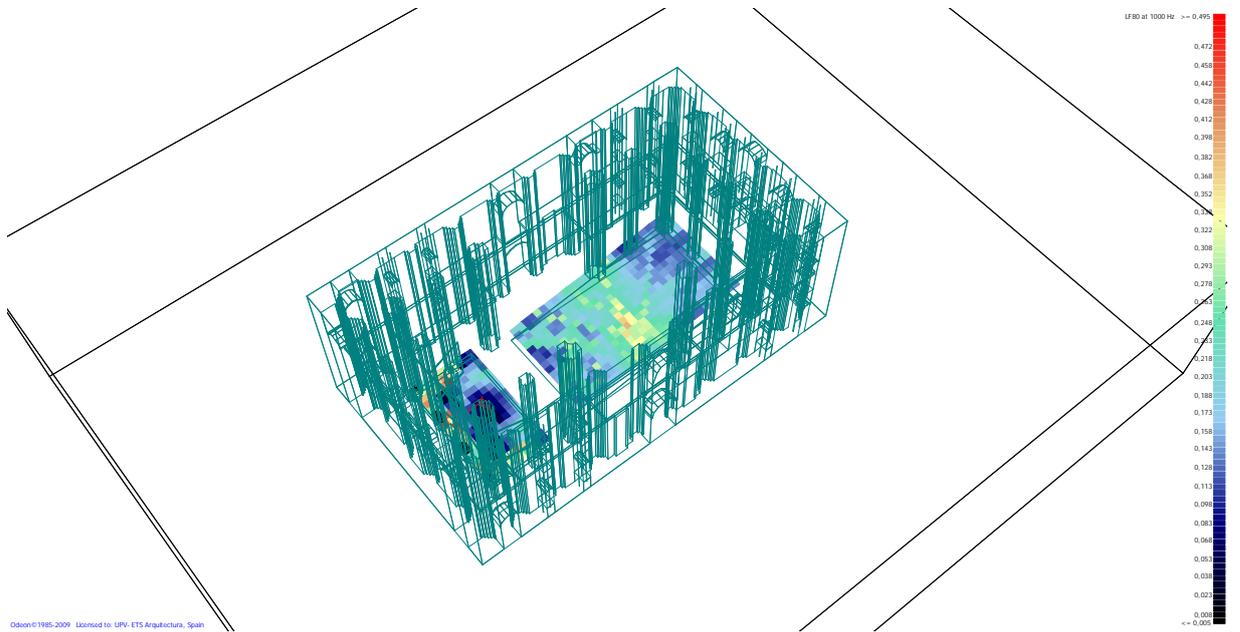
D₅₀



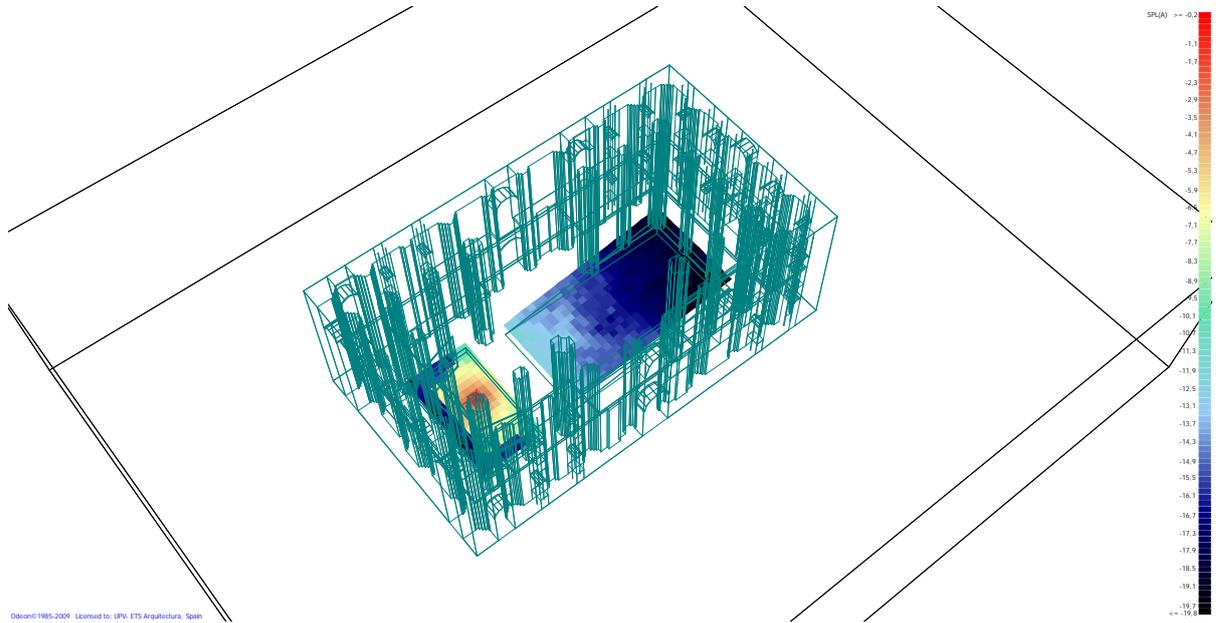
Ts



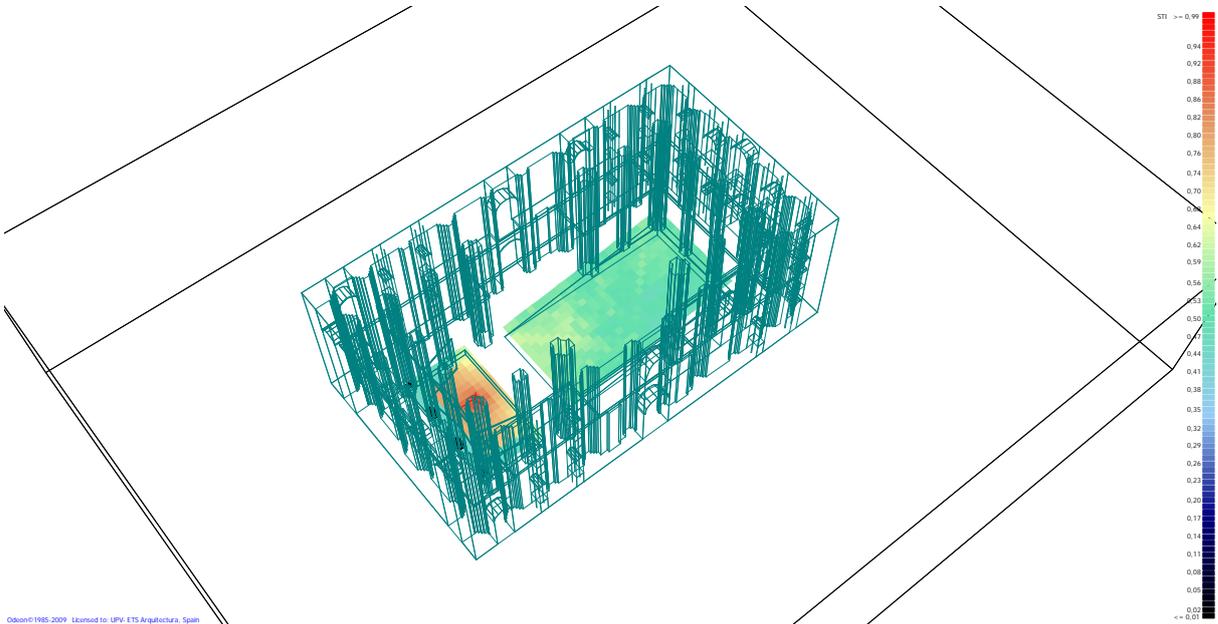
LF₈₀



SPLA

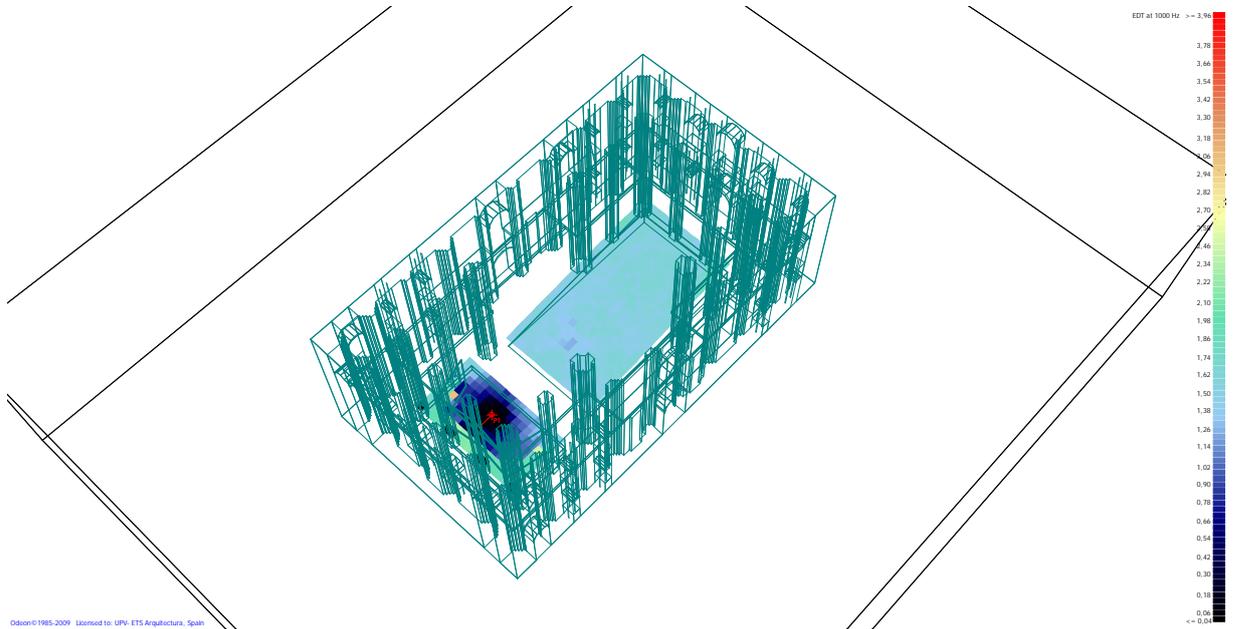


STI

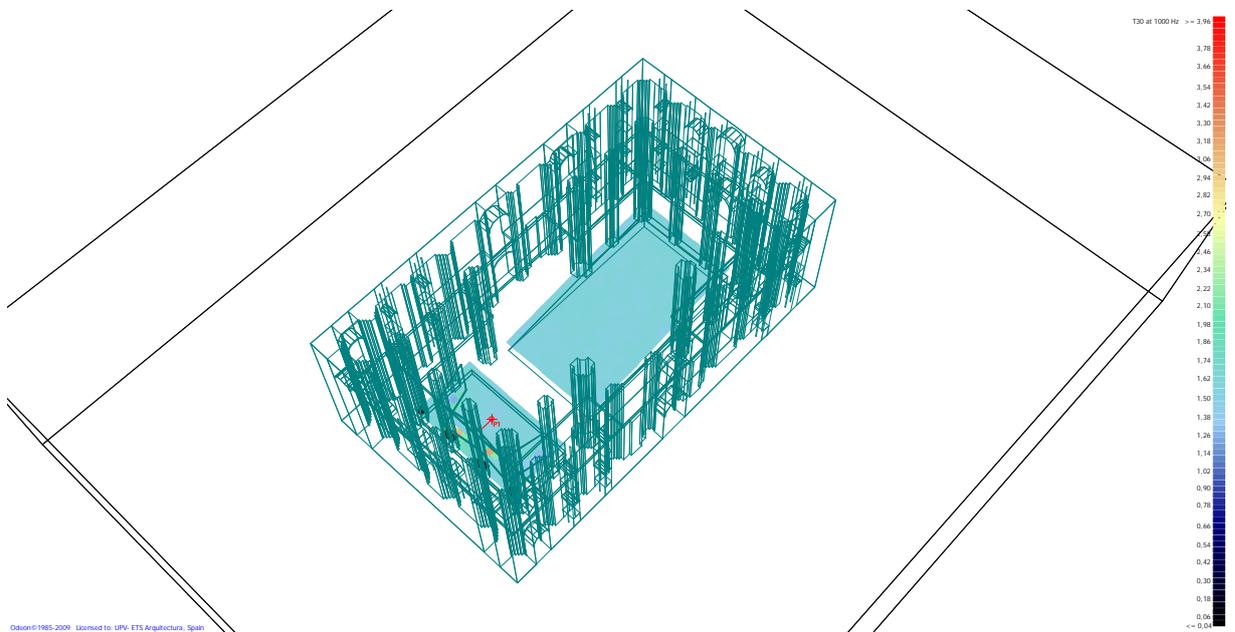


- Mapas de la simulación 2.

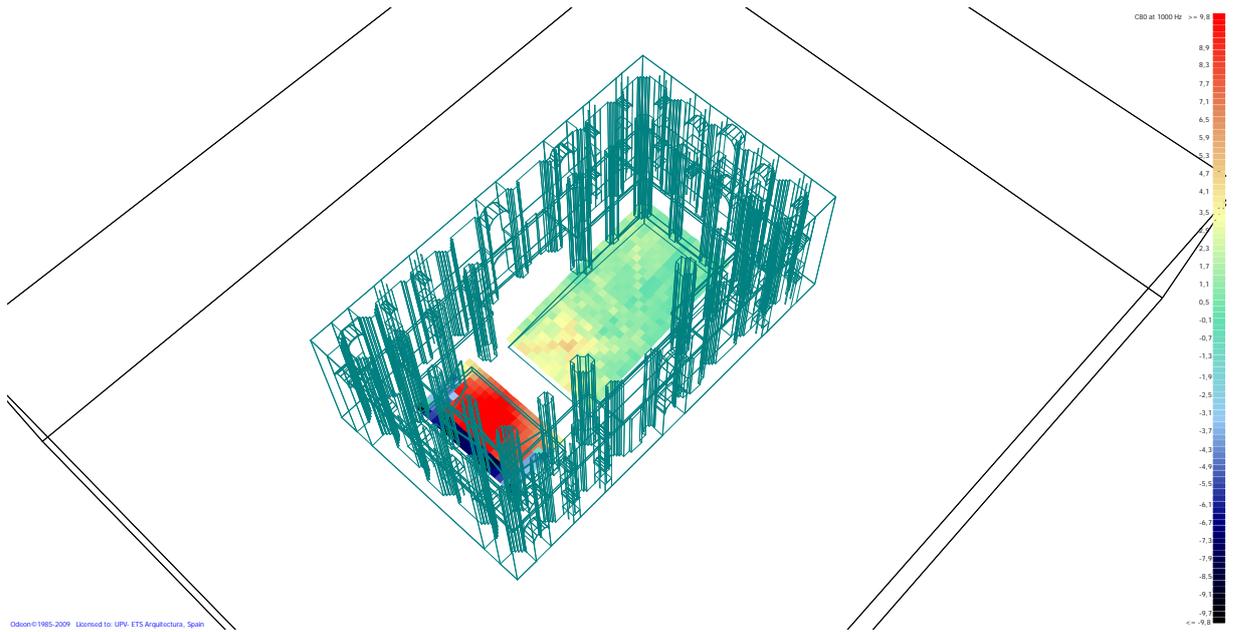
EDT



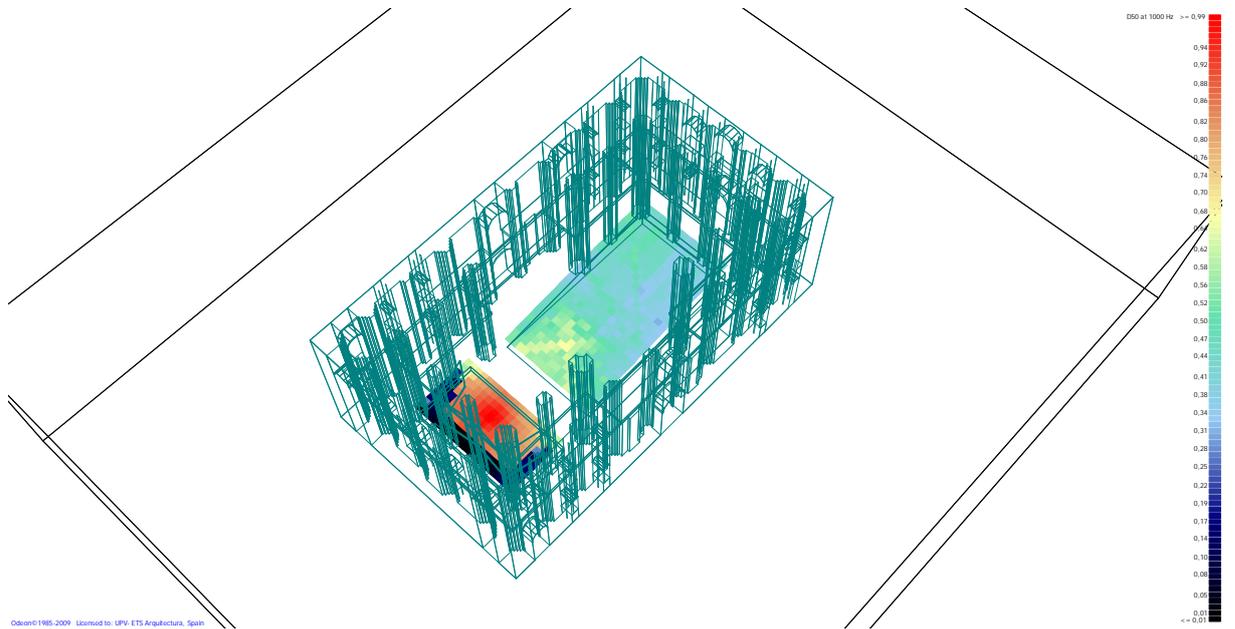
T₃₀



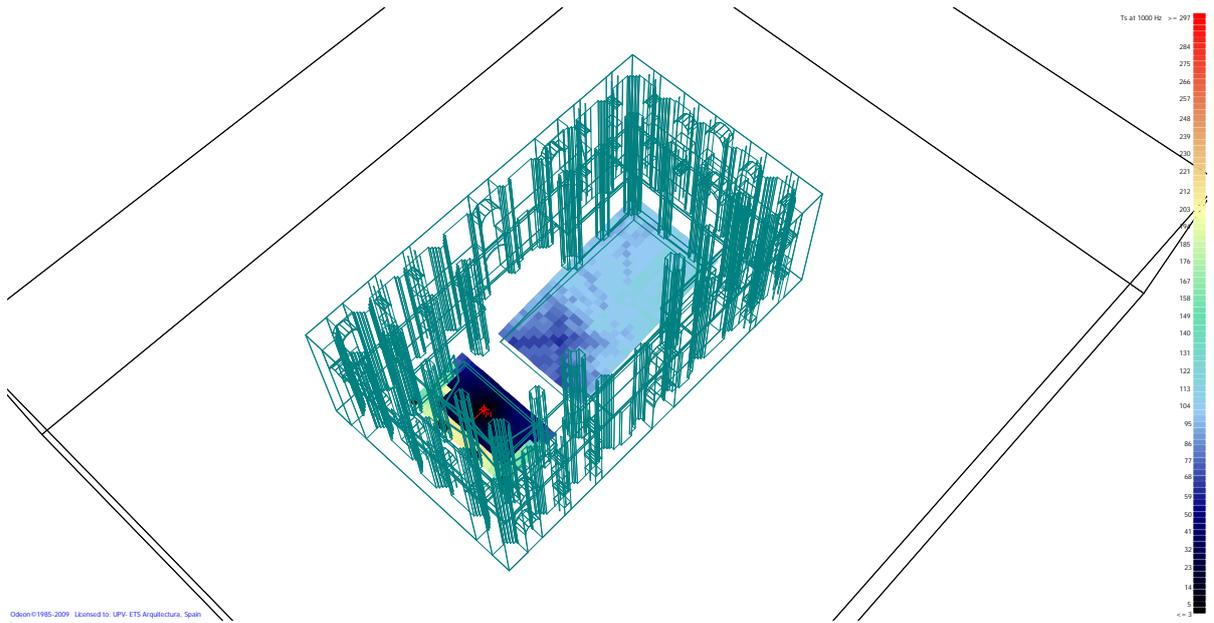
C₈₀



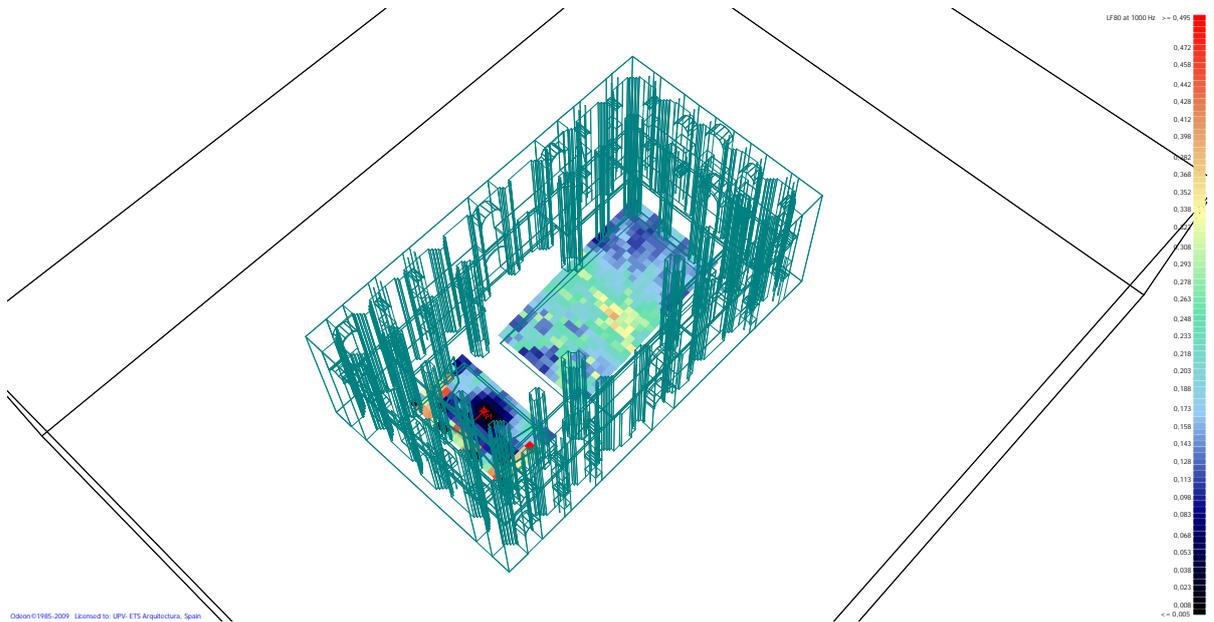
D₅₀



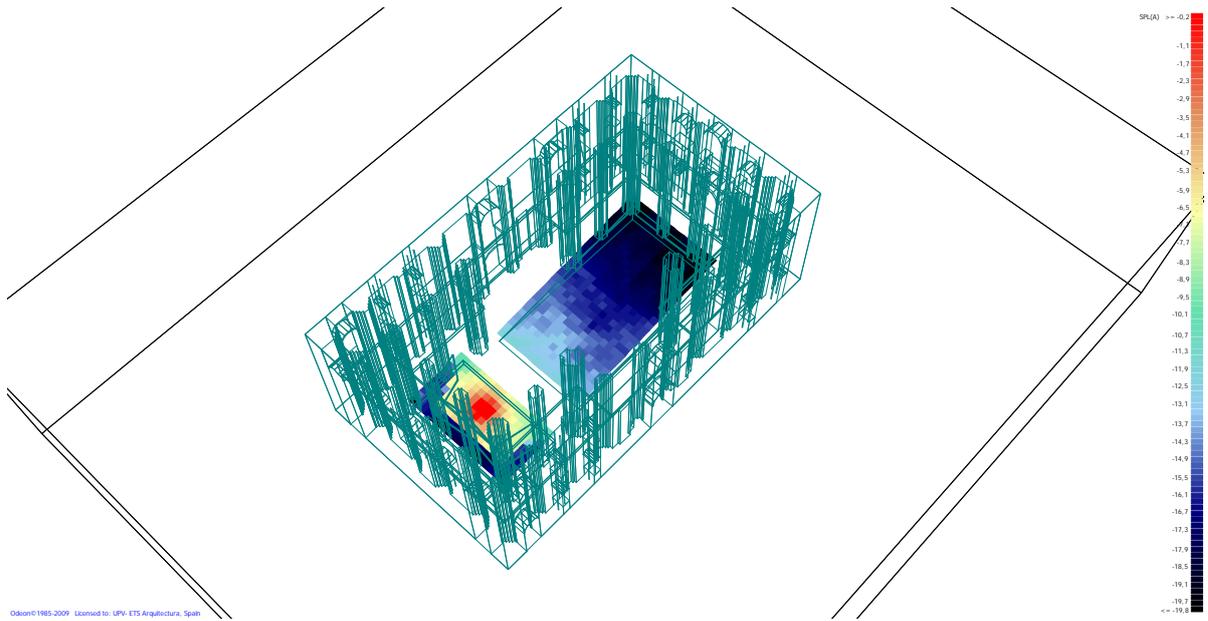
Ts



LF₈₀



SPLA



STI

