



Estudio de las condiciones de audición en espacios claustros valencianos mediante simulación acústica por Ray-Tracing

Estudio del Claustro de La Nau “Universitat de Valencia”

Autor: Àngel Blasco Blasco

**Tutores: Ignacio Guillén Guillamón
Vicente Gómez Lozano
Pau Serrano Rodrigo**

INDICE

1. CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN 3

1.1. ANTECEDENTES 3

1.2. ESTRUCTURA DEL TRABAJO 5

1.3. HIPÓTESIS DE PARTIDA 7

2. CAPÍTULO 2 GENERALIDADES 8

2.1. ACÚSTICA DE SALAS 8

2.1.1. INTRODUCCIÓN 8

2.1.2. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS ACÚSTICOS BÁSICOS 9

2.1.3. EL SONIDO EN EL ESPACIO CERRADO 20

2.1.3.1. La absorción sonora 23

2.1.3.2. Influencia del recinto en la percepción del sonido 26

2.1.3.3. La teoría estadística de la reverberación 27

2.1.3.4. Tiempo de reverberación 28

2.1.3.5. Campo acústico directo y reverberado 29

2.1.3.6. Medida y control de la reverberación 32

2.1.4. PARAMETROS ACÚSTICOS DE CALIDAD DE RECINTOS 35

2.1.4.1. Parámetros temporales 36

2.1.4.2. Parámetros energéticos 38

2.1.4.3. Parámetros espaciales 40

2.1.4.4. Parámetros de inteligibilidad 43

2.2. SIMULACIÓN ACÚSTICA 44

2.2.1. INTRODUCCIÓN 44

2.2.2. SOFTWARE DE SIMULACIÓN. ODEON Room Acoustics Program. 46

2.2.2.1. Fundamentos básicos 46

2.2.2.2. Principales funciones proporcionadas por ODEON. El proceso de una simulación. 48

2.2.2.3. Métodos y parámetros simulados 55

3. CAPÍTULO 3 ESTUDIO DEL CASO 68

3.1. INTRODUCCIÓN 68

3.2.	EDIFICI LA NAU DE LA UNIVERSITAT DE VALENCIA. EL CLAUSTRE.	68
3.3.	CARACTERISTICAS ACUSTICAS MINIMAS PARA RECINTOS MUSICALES	87
3.4.	MATERIAL Y MÉTODOS. MEDICIÓN IN SITU Y SUS RESULTADOS	90
3.4.1.	MEDICIÓN IN SITU	90
3.4.2.	RESULTADOS	94
3.4.3.	RT _{MID} , SIN INTERVENCIÓN DE TECHOS DE PLADUR	98
3.5.	MATERIAL Y MÉTODOS. LA SIMULACIÓN DEL RECINTO	100
3.5.1.	REALIZACIÓN DEL MODELO GEOMÉTRICO	100
3.5.2.	CARACTERÍSTICAS DE LA SIMULACIÓN	103
3.6.	RESULTADO DE LA SIMULACIÓN Y SU ANALISIS	105
3.6.1.	INTRODUCCIÓN (Parámetros a estudiar)	105
3.6.2.	PARAMETROS TEMPORALES (RT ₃₀ y EDT)	106
3.6.3.	PARAMETROS ENERGETICOS (C ₈₀)	112
3.6.4.	PARAMETROS ESPACIALES (LF ₈₀).....	114
4.	CAPITULO 4 CONCLUSIONES	118
4.1.	INTRODUCCIÓN	118
4.2.	CONCLUSIONES SOBRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	118
4.3.	FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	119
5.	ANEXOS	120
6.	BIBLIOGRAFÍA	123

1. CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Actualmente existen muchas edificaciones religiosas que se usan para realizar diferentes actuaciones o actos culturales aparte de continuar sirviendo para practicar el culto religioso. Este hecho hace reflexionar sobre estos espacios monumentales y de grandes dimensiones que tienen sus orígenes en Grecia según los historiadores de la arquitectura, los cuales se proyectaban con solo dos intenciones, la de poder tener un gran aforo y que el orador pudiera entender el discurso o la música en todo el recinto. Pero hoy en día se utilizan para otro tipo de funciones, como actuaciones musicales, exposiciones, conferencias, teatros u otro tipo de actividades culturales.

El tipo de edificación que se estudia en este trabajo se trata de un claustro situado en el edificio la Nau de la Universitat de Valencia.

En la antigüedad, los claustros situados en los conventos y monasterios eran usados por los monjes para la práctica de la oración mientras deambulaban en ellos. Estos claustros siempre tienen la misma forma arquitectónica, se trata de un rectángulo simétrico o asimétrico en sus dos lados, formados por una columnata perimetral de algún orden clásico conocido (normalmente dórico en planta baja, y jónico en primera planta), y el material más utilizado siempre ha sido la piedra de las canteras más cercanas al lugar de construcción.

Los claustros en su parte central se presentan abiertos al cielo permitiendo tener un jardín en el centro del mismo, y poder tener iluminados todos los recintos que abrían hacia este espacio. Hace la función de patio interior como los que se proyectan en la actualidad.

Volviendo a la funcionalidad de estos espacios y pensando en los nuevos usos que les dan, siendo estos en mayor parte el uso de escenarios para agrupaciones musicales, se deberá tener en cuenta las características auditivas. Por tanto se deberá de conseguir que ciertos parámetros acústicos, tengan determinados valores definidos por el tipo de agrupaciones que van a actuar y la clase de repertorio que vayan a interpretar.

Los claustros principalmente tienen la ventaja de tener buena acústica, esto lo provoca el hecho de ser un espacio abierto, ya que el aire tiene un coeficiente de absorción alto y esto provoca que los tiempos de reverberación sean bajos.

En este trabajo se realiza un estudio acústico del claustro a través de métodos de simulación, usados cada vez más en la actualidad para estudios acústicos de cualquier espacio. Estos programas de simulación permiten calcular aproximadamente

cual será la respuesta acústica de un espacio antes de ser construido o realizar simulaciones de espacios que ya están construidos como el caso de este proyecto, y a partir de los datos obtenidos poder proyectar futuras intervenciones con las que poder mejorar la acústica para un nuevo uso en concreto.

Cada vez más, son los investigadores que se interesan por la acústica de los espacios eclesiásticos. Principalmente con dos finalidades: preservar el patrimonio acústico y poder acondicionar el espacio al nuevo uso, con la sensibilidad de mantener su belleza y el valor artístico.

Con este trabajo, se pretende comprobar si se obtienen resultados satisfactorios después de comparar los datos reales obtenidos en el espacio, con los datos obtenidos en la simulación sin que el modelo 3D sea validado con antelación. Para poder realizar esta simulación se introducirán parámetros de otro modelo con las características espaciales y materiales muy semejantes al caso de estudio. Los resultados serán satisfactorios siempre y cuando las desviaciones entre la realidad y la simulación estén dentro del rango que marca la norma UNE-EN ISO 3382.

Por último destacar la importancia del edificio La Nau de la Universitat de Valencia, ya que fue el primer edificio construido con el fin de reunir en él, todas las enseñanzas superiores que tenía la ciudad en el año 1498, y encargado al célebre arquitecto Pere Compte, autor de la Lonja y de importantes obras en la Catedral y en la Generalitat. Sus constituciones fueron elaboradas en 1499, por la aprobación del Papa Alejandro VI y el rey Fernando II el Católico, elevando el edificio al rango de Universidad en 1502.

1.2. ESTRUCTURA DEL TRABAJO

Introducidos en el contexto en el que se va a desarrollar el presente proyecto, en este apartado se describe la estructura del mismo con una breve explicación del contenido que se trata en cada uno de los capítulos.

El presente trabajo consta de cuatro capítulos:

En el Capítulo I, en el que nos encontramos, se realiza una introducción al proyecto realizado y se mencionan cuáles son sus principales objetivos. En él, se da a conocer al lector cual es el contexto en el que se trata el estudio y las razones por las cuales se realiza.

El Capítulo II se divide principalmente en dos partes. La primera realiza una revisión de la literatura existente sobre conceptos básicos de la acústica de salas, campo en el cual se sitúa el estudio del acondicionamiento acústico de recintos cerrados. En este proyecto se estudia un espacio abierto, pero para poder realizar la simulación con el programa Odeón, y poder aplicar la teoría de acústicas de salas, tenemos que transformar el espacio abierto con un espacio cerrado. Esto se realizará con la introducción de una superficie en la parte superior para cerrar el modelo, con un coeficiente de absorción alto como lo tiene el aire. La segunda parte, trata sobre la simulación acústica, presentando en que consiste este método, y cuáles son las bases de cálculo del software con el que se ha realizado el estudio, el Odeón 9.0. Con esto, se pretende dar a conocer las técnicas que se han utilizado para realizar el estudio y comprender su uso.

Teniendo como base el estudio previo realizado con el Capítulo II, el Capítulo III se corresponde con el trabajo empírico realizado para alcanzar los objetivos propuestos. Para ello este capítulo se divide en 5 partes principalmente:

- 1ª Parte: descripción histórica del edificio la Nau, concretamente el claustro que es el objeto de estudio.
- 2ª Parte: pequeña exposición de los valores de los parámetros acústicos que deberían conseguirse en el acondicionamiento acústico del claustro para una buena audición musical según el tipo de agrupación actuante.
- 3ª Parte: medición in situ en la que se explicará el procedimiento realizado y se analizarán los datos obtenidos con el fin de poder comprobar las propiedades actuales del claustro, determinando si tienen una buena acústica para los diferentes tipos de música.
- 4ª Parte: descripción de la simulación realizada, exponiendo cada uno de los pasos que se han realizado para llevarla a cabo. Desde la realización del modelo geométrico de forma adecuada, hasta la obtención de los resultados.
- 5ª Parte: análisis detallado de los resultados obtenidos anteriormente en la simulación, en comparación con los resultados obtenidos in situ.

Se describen los resultados a la vez que se discuten y se aplican los conocimientos adquiridos en los anteriores apartados del presente proyecto.

En el Capítulo IV se plasman las conclusiones extraídas del estudio realizado. Se realizan comentarios de las conclusiones de una manera general, de los resultados que arroja las simulaciones realizadas y de la metodología aplicada para llevarlas a cabo.

A continuación se recoge la bibliografía consultada, utilizada y referenciada a lo largo del trabajo desarrollado.

Finalmente a modo de Anexos se recogen algunos de los planos utilizados para la realización del modelo 3D.

1.3. HIPÓTESIS DE PARTIDA

Los objetivos de este trabajo son dos, comprobar las propiedades acústicas actuales del claustro y comprobar la idoneidad de la simulación, para comprobar si se pueden obtener resultados satisfactorios después de comparar los datos in situ, con los datos obtenidos en la simulación sin que el modelo 3D sea validado con antelación.

Para poder realizar esta simulación se introducirán parámetros de otro modelo con las características espaciales y materiales muy semejantes al caso de estudio. Los resultados serán satisfactorios siempre y cuando las desviaciones entre la realidad y la simulación estén próximas al rango que marca la norma UNE-EN ISO 3382 y sigan una tendencia similar.

La simulación del claustro se llevará a cabo con la previa realización del modelo 3D con el programa Auto-Cad, y con la posterior simulación acústica mediante el programa Odeón con el método Ray-Tracing (trazado de rayos).

Para ello, de manera más concreta, los objetivos parciales en este estudio son:

- Obtención de un modelo geométrico válido para realizar las simulaciones.
- Realización de la simulación del claustro sin validar este, solo utilizando parámetros de otro claustro con las características muy semejantes.
- Comparación de los resultados obtenidos en la simulación respecto a la realidad, y verificando si la utilización de esta metodología es válida o no para este caso, siempre y cuando los valores obtenidos estén dentro del marco normativo.
- Comprobación de si los datos obtenidos son idóneos para que el claustro pueda ser utilizado como sala de conciertos de una manera adecuada.

Para conseguir los objetivos, el trabajo se basa principalmente en la hipótesis de que la simulación acústica es un método fiable para poder predecir de manera aproximada los parámetros acústicos de un recinto sin la necesidad de construirlo o llevar a cabo la actuación prevista.

Los métodos y las bases de las técnicas de simulación acústica, en concreto las utilizadas por el software Odeón, utilizado para realizar este proyecto, están desarrolladas en el apartado 2 del capítulo segundo de este estudio.

A parte de comprobar la idoneidad de la simulación, se comprobarán las propiedades acústicas, calculando los parámetros necesarios y más relevantes, y con los datos que exponen los expertos en la teoría de acústica de salas.

2. CAPÍTULO 2 GENERALIDADES

2.1. ACÚSTICA DE SALAS

2.1.1. INTRODUCCIÓN

Primero hay que aclarar que vamos a estudiar un Claustro tratándose de un espacio abierto, como un recinto cerrado. Para ello se colocará una superficie en la parte superior con un coeficiente de absorción alto (aire).

La acústica de salas se define como: “Campo específico de la física que se ocupa del estudio de la calidad sonora de una sala de audición, de acuerdo con la percepción de que los seres humanos tenemos de ella. La acústica de salas oscila siempre entre la objetividad propia de la ciencia y la subjetividad inherente al proceso perceptivo” (Barba Sevillano & Giménez Pérez, 2011).

El diseño de salas destinadas a la interpretación musical es, sin lugar a dudas, el más complejo desde el punto de vista acústico. No existen fórmulas magistrales cuya utilización permita garantizar, a priori, la calidad acústica de un recinto. Además, en un sentido estricto, cada tipo de música requiere un recinto con unas características acústicas específicas y diferenciadas.

Por ejemplo no tendrán las mismas características sonoras, ni requerirá el mismo tipo de recinto un grupo de cámara formado por unos pocos músicos, que una orquesta sinfónica formada por más de 80 músicos, existiendo unas intensidades de sonido totalmente diferentes en las dos agrupaciones, las cuales necesitaran que el recinto tenga unos parámetros determinados para que el lenguaje que se quiere transmitir sea inteligible.

A lo largo de las últimas décadas se han hecho importantes esfuerzos encaminados a relacionar las valoraciones subjetivas sobre la calidad acústica de una sala con una serie de parámetros objetivos (físicamente medibles). Aunque en la actualidad todavía estamos lejos de conseguir una perfecta correspondencia entre lo subjetivo y lo objetivo. Además, la mayoría de parámetros pueden ser calculados en la fase de diseño mediante programas informáticos de simulación acústica, y también pueden ser medidos una vez construido el recinto.

Actualmente la simulación acústica virtual nos ayuda a poder predecir el comportamiento acústico de una sala antes de que sea construida, siempre teniendo en cuenta sus limitaciones.

En este capítulo se pretende lograr tres objetivos principales, para así poder entender el estudio realizado en esta investigación.

El primero es el de describir los conceptos básicos que se utilizan en la acústica arquitectónica. Se pretende dar a conocer, a través de unas pequeñas descripciones

y/o definiciones, las variables con que se trabaja en el ámbito de la acústica arquitectónica.

El segundo objetivo es dar a conocer el comportamiento del sonido en un recinto cerrado, lo que es fundamental para conseguir un acondicionamiento acústico correcto, y poder así analizarlo.

Y por último, conocer los parámetros que actualmente se utilizan para medir de manera objetiva, y así poder valorar la calidad de un recinto.

2.1.2. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS ACÚSTICOS BÁSICOS

A continuación se explican una serie de conceptos básicos del vocabulario del mundo la acústica arquitectónica, para la correcta comprensión del trabajo realizado.

Sonido: Vibración (perturbación rápida y de pequeña amplitud) mecánica que se propaga a través de un medio material elástico y denso (habitualmente el aire), y que es capaz de producir una sensación auditiva. A diferencia de la luz, el sonido no se propaga en el vacío ya que está asociado a un estímulo físico.

Fuente Sonora: Elemento generador del sonido (tambor, cuerda de un violín, cuerdas vocales, etc.). La generación del sonido tiene lugar cuando dicha fuente entra en vibración. Se transmite mediante las partículas de aire.

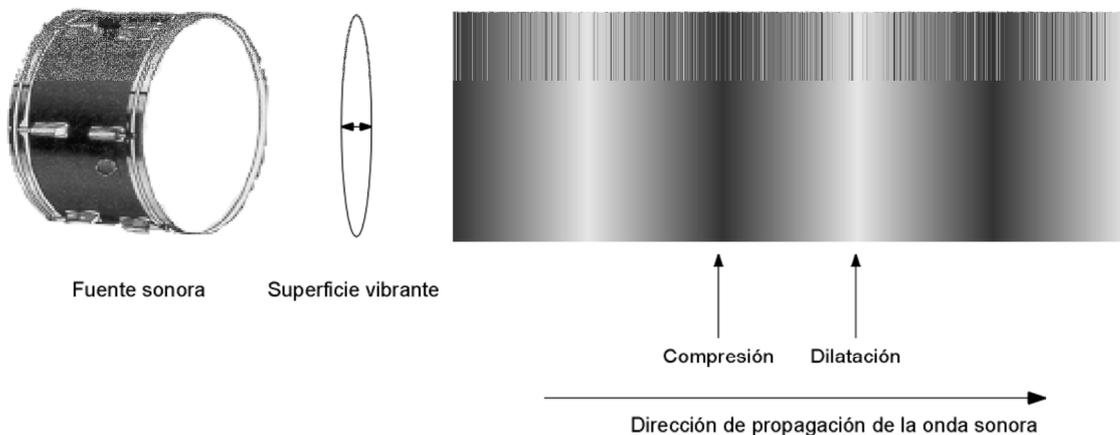


Fig. 1 Esquema de formación de una onda sonora.

Fuente: (Galiana, Llopis Reyna, Sancho Vendrell, Gómez Lozano, & Guillen Guillamón)

La oscilación de las partículas tiene lugar en la misma dirección que la de propagación de la onda. En este caso se habla de ondas sonoras longitudinales, en contraposición a las ondas electromagnéticas que son transversales.

Velocidad de propagación del sonido (c): Es función de la elasticidad y densidad del medio de propagación. En el aire, dependerá de la presión atmosférica estática P_0 y de la temperatura, que en condiciones normales (1 atm y 22°C) será de

345 m/s. En otro medio, cuanto más denso y menos elástico sea, mayor será la velocidad del sonido.

Presión sonora (P): Es la fuerza que ejercen las partículas de aire por unidad de superficie. Es la manera más habitual de expresar cuantitativamente la magnitud de un campo sonoro.

La presión sonora total P_T es la suma de la presión atmosférica estática P_0 y la presión asociada a la onda sonora P . Por lo que P es igual a la diferencia instantánea entre la presión producida por una sola onda sonora y la presión atmosférica en un punto del campo sonoro o lo que es lo mismo la amplitud de la onda sonora.

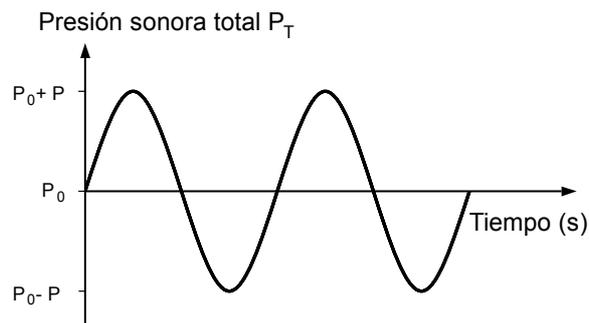


Fig. 1 Representación de una onda sonora.
Fuente: (Isbert, 1998)

Periodo (T): Es el intervalo de tiempo mínimo entre dos perturbaciones idénticas de las partículas. Su unidad es el segundo y es la inversa de la frecuencia.

Frecuencia de un sonido (f): Es el número de oscilaciones por segundo de la presión sonora P . Su unidad de medida es el Hercio (Hz).

La frecuencia es la cualidad que determina el tono o altura de un sonido.

Espectro frecuencial: Es la representación gráfica de las frecuencias que integran un sonido junto con su correspondiente nivel de presión sonora. Ya que la gran mayoría de los sonidos que percibimos están constituidos por múltiples frecuencias superpuestas.

Longitud de onda del sonido (λ): Es la distancia entre dos puntos consecutivos del campo sonoro que se hallan en el mismo estado de vibración en cualquier instante del tiempo. La relación entre las tres magnitudes es:

$$\lambda = c / f$$

Ecuación 1

Tipos de sonidos: Los sonidos pueden ser:

Deterministas: Se pueden representar mediante una función matemática:

- **Sonido periódico simple (Tono puro):** Es el tipo más simple de sonido existente en la naturaleza, se compone de una única frecuencia constante, por lo que su espectro está constituido por una sola raya.

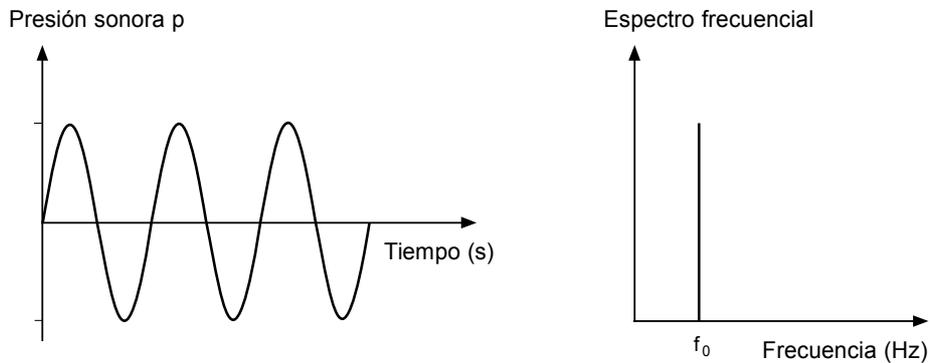


Fig. 2 Representación de un sonido periódico simple.
Fuente: (Isbert, 1998)

- **Sonido periódico complejo:** Sonido caracterizado por una frecuencia fundamental (primer armónico) y un conjunto de frecuencias múltiplos de esta (armónicos).

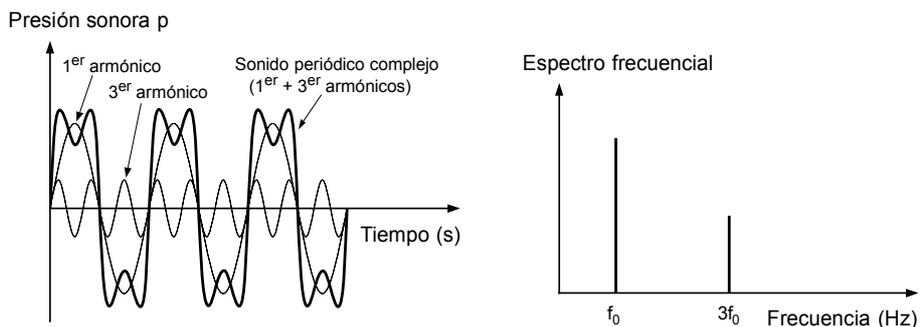


Fig. 4 Representación de un sonido periódico complejo.
Fuente: (Isbert, 1998)

- **Sonido transitorio:** Sonido resultante de la liberación brusca de energía, contiene un gran número de componentes frecuenciales que no guardan relación armónica entre sí, sino que forman un espectro continuo.

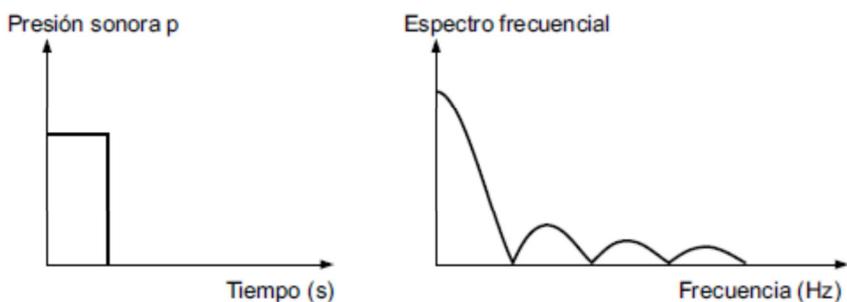


Fig. 5 Representación de un sonido transitorio.
Fuente: (Isbert, 1998)

Sonidos aleatorios: Son sonidos formados por muchas frecuencias de valor impredecible. Es a lo que denominamos Ruidos. En estos casos se caracterizan por la densidad espectral de potencia, es decir, de la potencia sonora por unidad de frecuencia.

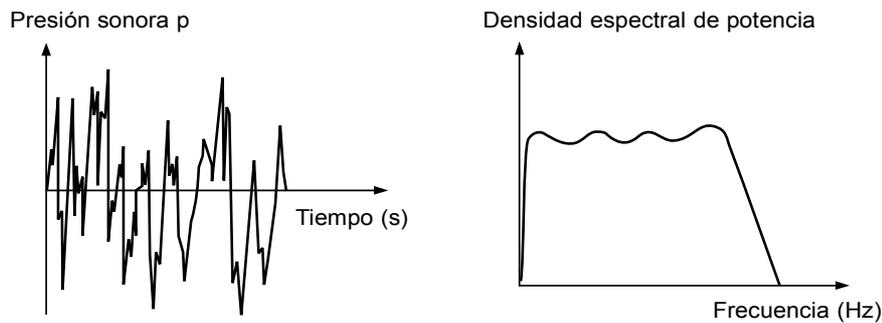


Fig. 6 Representación de un sonido aleatorio.
Fuente: (Isbert, 1998)

Armónicos: Como acabamos de ver la mayoría de los sonidos están compuestos de varias frecuencias superpuestas. Al escuchar un sonido, la frecuencia inferior de mayor energía es la del sonido fundamental y las restantes formarán el conjunto de armónicos cuyas frecuencias son múltiplos de la del sonido fundamental y que son las que distinguen a cada tipo de instrumento o voz, es decir, determinan el timbre del sonido.

Con este fenómeno se puede reducir el estudio de la propagación de un movimiento ondulatorio periódico como superposición de movimientos vibratorios armónicos para cada punto, el teorema de Fourier, obteniendo así el espectro de frecuencias acústico, los cuales tenemos ejemplos en las imágenes anteriores.

Bandas de frecuencia: Una fuente sonora emite un rango de frecuencias, desde el sonido más grave que pueda emitir (frecuencia más baja) al más agudo (frecuencia más alta). A esto se le denomina banda de frecuencia de dicha fuente sonora.

El análisis de la señal sonora por medio de la transformada de Fourier proporciona la energía por unidad de frecuencia. Esto obliga a trabajar en intervalos de espectros denominados Bandas de frecuencia, es decir, utilizar filtros que dejan pasar un rango de frecuencias.

El filtro más utilizado en un espectro sonoro es el de Anchura de Banda Proporcional. El ancho de banda (diferencia de las frecuencias de corte de cada una) es proporcional a la frecuencia representativa de la banda. Las bandas más utilizadas son:

Bandas de octavas: De una octava a la siguiente la frecuencia es el doble. Además la frecuencia central de cada banda será la media geométrica de las frecuencias de corte.

Bandas de tercios de octava: Es lo que sucede si dividimos cada una de las bandas de octava en tres bandas más pequeñas de forma que la relación geométrica entre los intervalos sea el mismo.

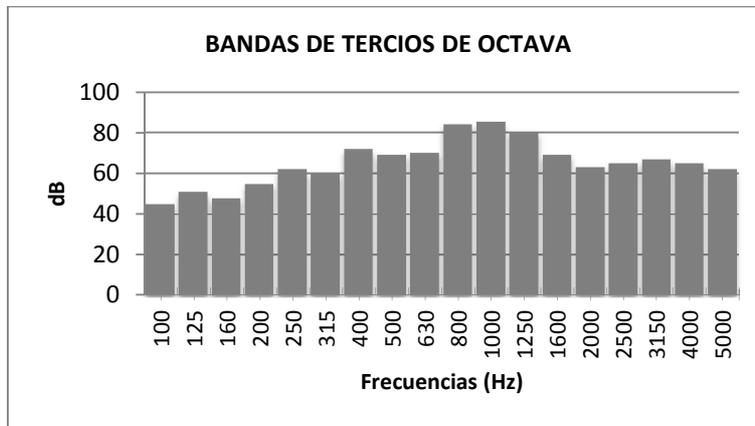


Fig. 7 Representación de Bandas de Tercios de Octava.

Fuente: TFM Estudio por técnicas de Ray Tracing sobre la eficacia de intervenciones acústicas en recintos eclesiásticos. Estudio de la Iglesia del monasterio de Sta Maria de la Valldigna.

Nivel de presión sonora (SPL o L_p): La manera más habitual de expresar la magnitud del campo sonoro es la presión, medida en Pascales o Newton/metro². Donde se considera el valor de la diferencia entre P_T y P_0 .

En principio, el valor a considerar es la diferencia entre el valor fluctuante de la presión sonora total P_T y su valor de equilibrio P_0 . Debido a la variación de dicha magnitud con el tiempo, se utiliza como valor representativo su promedio temporal, que recibe el nombre de valor eficaz o r.m.s. ("root-mean-square").

El uso de este valor eficaz da lugar a una serie de problemas cuyo origen se encuentra en el comportamiento del oído humano. Principalmente dos motivos:

1. La gama de presiones a las que responde el oído, desde el valor umbral de audición hasta el que causa dolor, es extraordinariamente amplia. En concreto, la presión eficaz sonora más débil que puede ser detectada por una persona, a la frecuencia de 1 kHz, es de 2×10^{-5} Pa, mientras que el umbral de dolor tiene lugar para una presión eficaz del orden de 100 Pa (milésima parte de la presión atmosférica estática $P_0 \approx 105$ Pa, equivalente a 1 atmósfera). En consecuencia, la escala de presiones audibles cubre una gama dinámica de, aproximadamente, 1 a 5.000.000. Es obvio, pues, que la aplicación directa de una escala lineal conduciría al uso de números inmanejables.
2. Nuestro sistema auditivo no responde linealmente a los estímulos que recibe, sino que más bien lo hace de forma logarítmica. Por ejemplo, si la presión de un tono puro de 1 kHz se dobla, la sonoridad, o sensación subjetiva producida por el mismo, no llegará a ser el doble. La escala con

niveles de presión sonora abarca los valores de 0 dB (presión igual al umbral de audición) a 135 dB (presión aproximada al umbral del dolor).

El cálculo de se realiza a través de la siguiente expresión:

$$L_p = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right)$$

Ecuación 2

siendo: p_0 : presión eficaz correspondiente al umbral de audición a 1 kHz (2×10^{-5} Pa)
 p : presión eficaz del sonido considerado

Nivel de potencia (L_w): Siendo la potencia, la energía emitida por la fuente acústica por unidad de tiempo. El nivel de potencia es 10 veces la relación logarítmica del cociente de la potencia sonora, referido al valor de referencia del umbral de audición ($W_0=10^{-12}$ Watios). Su medida es el dB.

$$L_p = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{W_s}{W_{s0}} \right)$$

Ecuación 3

Nivel de intensidad (L_p): Siendo la intensidad, la energía transmitida por unidad de superficie y tiempo. El nivel de intensidad es 10 veces la relación logarítmica del cociente de la intensidad sonora, referido a al valor de referencia del umbral de audición ($I_0=10^{-12}$ Watios·m²). Su medida es el dB.

$$L_p = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{|I|}{|I_0|} \right)$$

Ecuación 4

Nivel sonoro equivalente: En ocasiones, el nivel instantáneo no es útil para determinar el nivel de presión sonora en un punto porque varía rápidamente. Por ello se trabaja con el nivel sonoro equivalente durante un tiempo "t". Esta magnitud expresa el nivel de un sonido estacionario hipotético, que tuviera la misma energía acústica que el sonido inicial fluctuante durante el mismo periodo de tiempo.

Decibelio lineal (dB): Es la unidad logarítmica de medida que compara una cantidad con otra tomada como referencia. Se define como 10 veces el logaritmo de la intensidad acústica en un punto referida al umbral de audición o 20 veces este cociente si se mide la presión sonora.

Umbrales auditivos: Existe una gran dependencia entre la sensibilidad del oído humano y la frecuencia. El oído humano no tiene la misma sensibilidad para todo el margen de frecuencias (desde los 20 Hz hasta los 20.000 Hz).

Si consideramos la sonoridad como la sensación subjetiva del nivel sonoro, para obtener la misma sonoridad en una frecuencia baja que en una media, el L_p debe de ser mayor en la frecuencia baja que en la media. A continuación mostramos una gráfica donde observamos los diferentes niveles audibles en función de la frecuencia junto con las zonas correspondientes a la música y a la palabra.

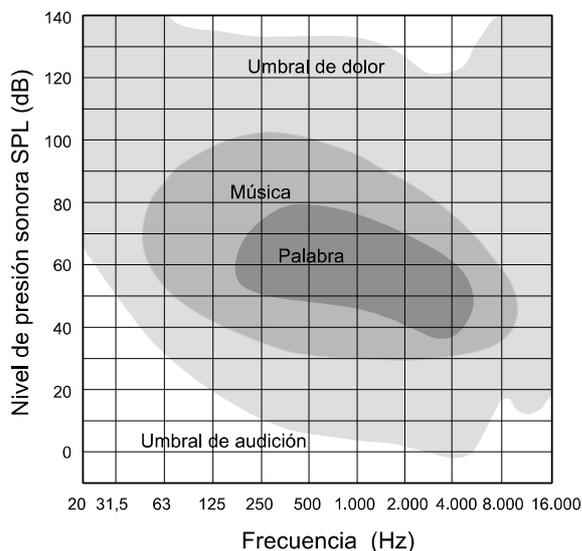


Fig. 8 Niveles audibles en función de la frecuencia.
Fuente: (Isbert, 1998)

Enmascaramiento: Cuando el oído está expuesto a dos o más tonos puros de frecuencias diferentes, existe la posibilidad de que uno de ellos enmascare los demás, y por tanto, evite su percepción de forma parcial o total. Este fenómeno puede utilizarse para enmascarar el ruido de fondo.

Filtros para análisis frecuencial: En la mayoría de casos no es suficiente conocer el nivel de presión sonora total L_p y el nivel ponderado L_A , sino que es necesario disponer de una información más detallada de su espectro, es decir, de su contenido energético a distintas frecuencias. Es lo que se ha convenido en llamar análisis frecuencial de la señal.

Con este fin, existen sonómetros que incorporan un conjunto de filtros eléctricos, cada uno de los cuales sólo deja pasar aquellas frecuencias que están dentro de una banda de frecuencias determinada (habitualmente se trabaja con bandas de 1 octava). La banda de 1 octava incluye todas las frecuencias comprendidas entre una frecuencia dada y la frecuencia doble.

Dicha denominación tiene su origen en el lenguaje musical. En la tabla siguiente se indican las frecuencias centrales de tales bandas, según prescribe la norma ISO 266.

Frecuencias en Hercios										
16	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000

Fuente sonora omnidireccional: Fuente que irradia energía de manera uniforme en todas las direcciones. Para ello es necesarios que sus dimensiones sean pequeñas respecto a la longitud de onda del sonido emitido y que el receptor esté “alejado” de la misma.

Fuente sonora direccional: Fuente sonora que radia más potencia en unas direcciones que en otras y, por tanto, presenta una cierta directividad que depende de la frecuencia y aumenta con la misma.

La manera de expresar la directividad de una fuente sonora en un punto cualquiera del espacio es mediante el denominado factor Q.

La representación de esta emisión con la dirección y frecuencia se denomina diagrama de direccionalidad de la fuente.

El ejemplo que más presente tenemos de este tipo de fuente, es la propia voz humana. La voz humana presenta unas características de directividad que vienen determinadas por el sistema de fonación y la forma de la cabeza, siendo la dirección frontal la de mayor directividad.

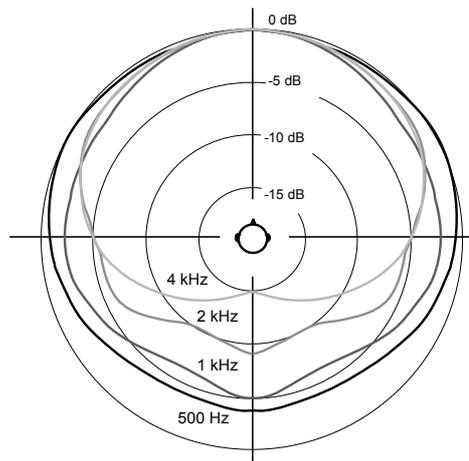


Fig. 9 Directividad de la voz humana en las bandas de octava comprendidas entre 500Hz y 4 kHz (según Moreno y Pfrezschner). Fuente: (Isbert, 1998)

Auralización: Es el proceso mediante el cual se simula la sensación de escuchar sonido tridimensional en el interior de una sala, para una posición dada del oyente y de la(s) fuente(s), y para unas señales sonoras determinadas.

Algoritmo de trazado de rayos: Algoritmo geométrico que empleaban los primeros softwares de simulación. Se basa en el trazado de rayos sonoros desde un punto del recinto que actúa como fuente hasta el punto de recepción, siguiendo las leyes de la acústica geométrica y considerando hasta un número determinado de reflexiones sonoras. La energía emitida por la fuente se distribuye en rayos que viajan a la velocidad del sonido colisionando con los paramentos del recinto. En cada reflexión el nivel de energía asociado al rayo reflejado decrece según la absorción

acústica del obstáculo que se encuentre, hasta el límite de abandono que se establezca.

Algoritmo de las fuentes imagen: Algoritmo geométrico posterior, el cual se basa en el principio de que toda reflexión especular se puede construir geométricamente mediante las imágenes de la fuente producidas por las superficies implicadas en un cierto orden de reflexión. A partir de estas reflexiones es posible construir un ecograma teniendo en cuenta el tiempo de llegada y la intensidad asociada a cada reflexión. La gran ventaja de este algoritmo es su carácter determinista a la hora de construir la respuesta impulsiva. No admite consideraciones estadísticas al realizar los cálculos.

Algoritmo híbrido: Método de cálculo más extendido en los softwares actuales de simulación, siendo este combinación de los dos anteriores.

Consideramos el recinto como cerrado aplicando una superficie de cierre, por lo que los principios de acústica de recintos cerrados son utilizados en el estudio.

El sonido en el espacio abierto: Cuando una fuente sonora situada en un recinto cerrado es activada, genera una onda sonora que se propaga en todas las direcciones. Un oyente ubicado en un punto cualquiera del mismo recibe dos tipos de sonido: el denominado sonido directo, es decir, aquél que le llega directamente desde la fuente sin ningún tipo de interferencia, y el sonido indirecto o reflejado originado como consecuencia de las diferentes reflexiones que sufre la onda sonora al incidir sobre las superficies límite del recinto.

Esto fenómeno no ocurre en un espacio libre ya que el único sonido que le llegará al oyente será el directo, al no producirse ninguna reflexión.

En primer lugar, se considera una fuente sonora omnidireccional, es decir, una fuente que radia energía de manera uniforme en todas las direcciones (factor de directividad $Q=1$), como ya se ha explicado anteriormente.

El hecho de que la radiación sea uniforme implica que, a una distancia cualquiera de la fuente, el nivel de presión sonora SPL será siempre el mismo, con independencia de la dirección de propagación considerada. Es la llamada propagación esférica.

A medida que uno se aleja de la fuente, la energía sonora se reparte sobre una esfera cada vez mayor, por lo que el nivel SPL en cada punto va disminuyendo progresivamente. En concreto, la disminución del mismo es de 6 dB cada vez que se dobla la distancia a la fuente.

Es la denominada ley cuadrática inversa y significa que el valor de la presión sonora se reduce a la mitad. En la siguiente figura se muestra la mencionada disminución del nivel SPL con la distancia en el caso de que la fuente sonora sea un avión.

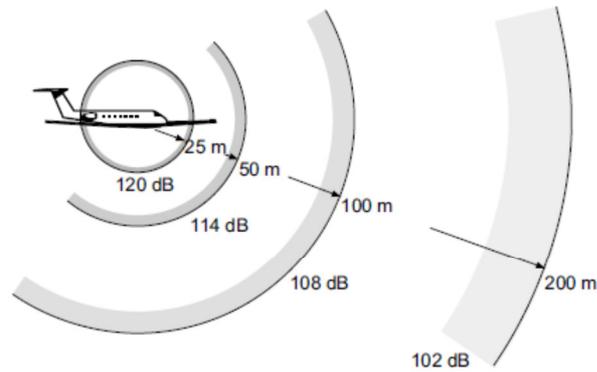


Fig. 10 Ejemplo de propagación esférica en el espacio libre
Fuente: (Isbert, 1998)

Para que una fuente sonora radie de forma omnidireccional es necesario que sus dimensiones sean pequeñas respecto a la longitud de onda del sonido emitido y que el receptor esté alejado de la misma.

Si bien existe toda una variedad de fuentes sonoras omnidireccionales, también es cierto que el cumplimiento simultáneo de ambos requisitos es difícil, sobre todo si la banda de frecuencias considerada es amplia. Es el caso de la voz humana que, como se ha visto en el apartado anterior, constituye un claro ejemplo de fuente directiva.

En la siguiente figura se representa el mapa de niveles SPL producidos por un orador situado en el espacio libre, en la banda de 2 kHz, en función de la distancia y del ángulo referido a su eje frontal. Se puede observar la disminución del nivel con la distancia, así como el efecto de directividad de la voz humana, evidenciado por la reducción del nivel a medida que aumenta dicho ángulo.

A través de la realización de una serie de experimentos, se ha podido averiguar que un mensaje oral emitido en una zona silenciosa (en ausencia de fenómenos atmosféricos ruidosos) puede ser oído de forma satisfactoria a una distancia máxima de 42 m en la dirección frontal del orador, de 30 m lateralmente y de 17 m en la dirección posterior. A distancias superiores, el mensaje deja de ser inteligible debido a que queda inmerso en el ruido de fondo existente, independientemente del lugar elegido para llevar a cabo la experiencia.

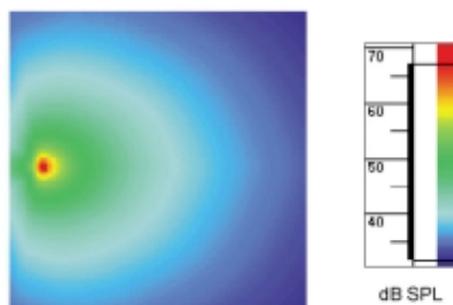


Fig. 11 Niveles de presión sonora producidos por un orador en el espacio libre, banda de 2 kHz
Fuente: (Isbert, 1998)

En campo abierto podemos considerar 3 tipos de fuentes, las cuales generan diferentes tipos de ondas:

Ondas planas: La superficie del frente de onda permanece constante con la distancia a la fuente acústica y, por lo tanto, la intensidad permanece constante con la distancia.

Ondas cilíndricas: Creadas por fuentes sonoras alargadas. Aquí la superficie del frente de onda aumenta con la distancia a la fuente y por tanto la intensidad disminuye con la misma.

$$I = \frac{W'}{2\pi r}$$

Ecuación 5

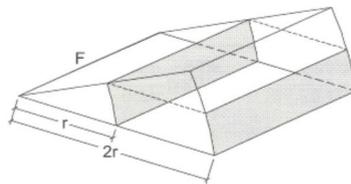


Fig. 12 Representación de una onda cilíndrica.

Fuente: (Galiana, Llopis Reyna, Sancho Vendrell, Gómez Lozano, & Guillen Guillamón)

Ondas esféricas: Creadas por una fuente sonora puntual. Aquí la superficie del frente de onda aumenta con la distancia a la fuente y por tanto la intensidad disminuye con la misma.

$$I = \frac{W'}{4\pi r^2}$$

Ecuación 6

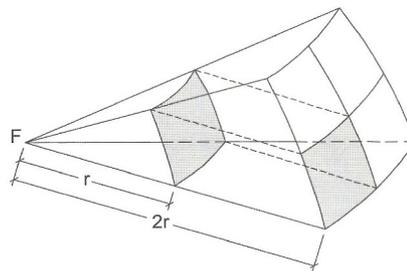


Fig. 13 Representación de una onda esférica.

Fuente: (Galiana, Llopis Reyna, Sancho Vendrell, Gómez Lozano, & Guillen Guillamón)

Si consideramos una fuente omnidireccional y puntual, la propagación de la onda será esférica, cumpliéndose que a medida que uno se aleja de la fuente, la energía sonora se reparte sobre una esfera cada vez mayor, por lo que el L_p en cada punto va disminuyendo progresivamente. En concreto la disminución es de 6 dB cada vez que se dobla la distancia a la fuente.

2.1.3. EL SONIDO EN EL ESPACIO CERRADO

Cuando una fuente sonora comienza a irradiar energía acústica en un recinto cerrado, las ondas sonoras, que inicialmente se propagaban libremente, comienzan a sufrir reflexiones al incidir sobre los distintos cerramientos y objetos presentes superponiéndose las ondas incidentes con las reflejadas.

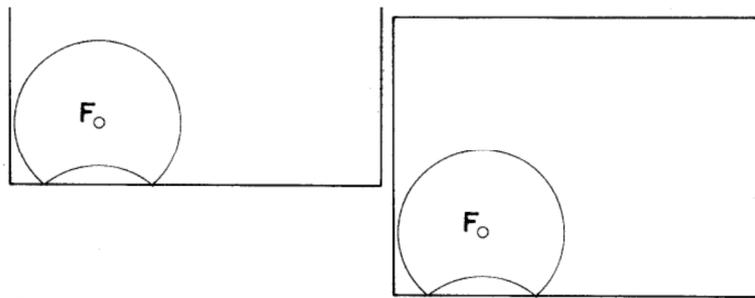


Fig. 14 Progresión de una onda sonora en un recinto cerrado.
Fuente: (Guillen Guillamon, 1999)

Con esto podemos decir, que el sonido en un recinto cerrado, llega a una persona situada en la sala de dos maneras distintas. Una parte del sonido, llega de forma directa a través de las ondas iniciales radiadas por la fuente, sin que se hayan producido ninguna reflexión (**ondas directas**) y la otra parte del sonido llega de forma indirecta a través de las reflexiones de las ondas iniciales que se producen cuando estas inciden sobre las distintas superficies del recinto (**ondas indirectas**).

Dentro de las ondas indirectas o sonido reflejado, podemos diferenciar dos zonas. Las primeras reflexiones o reflexiones tempranas, que llegan de forma discretizada al oyente y las reflexiones tardías, que llegan más unificadas al ser un número mayor. Estas reflexiones tardías, son las que forman la llamada **cola reverberante**.

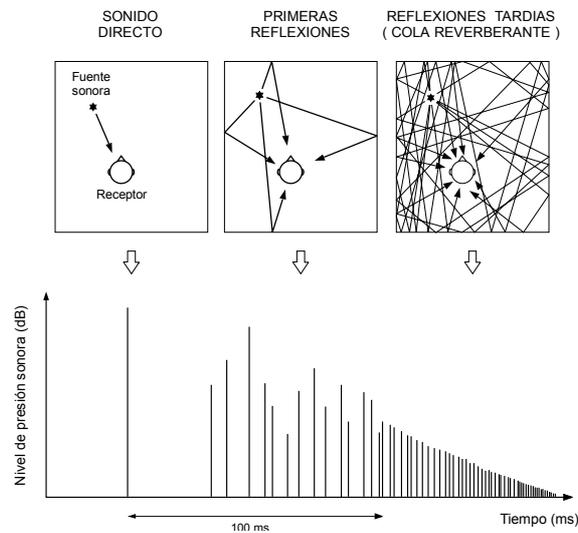


Fig. 15 Ecograma asociado a un receptor.

Fuente: (Isbert, 1998)

El sonido reverberado (cola reverberante) tiene las características de no ser direccional y de estar distribuido homogéneamente por la sala. Estas características son debidas a que con el tiempo el número de reflexiones aumenta (el número de reflexiones que llegan a un punto determinado en un intervalo de tiempo aumenta con la tercera potencia del tiempo transcurrido desde el inicio de la emisión acústica y es inversamente proporcional al volumen de la sala) de tal manera que su superposición en la sala, hace que el sonido parezca provenir por igual de todas las direcciones, es a lo que se denomina un sonido difuso.

El oído humano no es capaz de diferenciar la llegada discreta de las reflexiones y por eso se percibe un sonido continuo generalmente. Si tenemos en cuenta que el oído humano no es capaz de diferenciar entre respuestas que tengan 2000 o más impulsos por segundo, se obtiene un límite de tiempo más allá del cual no se deben estudiar los sucesos auditivos producidos por reflexiones individuales (impulsos) sino considerar las sensaciones producidas por la reverberación. Estas sensaciones se estudian por medios estadísticos.

Este intervalo de tiempo desde $t=0$ a $t=t_{st}$, que no se puede manejar por medios estadísticos, se extiende a los primeros 25 ms en una sala de 150 m^3 , mientras que sería del orden de 250 ms en una sala de 15000 m^3 .

Además, también hay que tener en cuenta que en una sala con cerramientos difusos (superficies irregulares de dimensiones comparables con la longitud de onda que producen las reflexiones de ondas incidentes en múltiples direcciones) el tiempo necesario para que aparezca la cola reverberante será menor que en una sala regular.

Resumiendo, nos encontramos tres formas por las que el oyente en una sala recibe el sonido: Sonido Directo, Primeras Reflexiones, y la Cola Reverberante.

- Sonido directo, es el primer sonido que se recibe y llega con un retraso que depende de la distancia directa fuente - receptor. Es un sonido direccional, que ha sufrido dos tipos de atenuación: una, debida a la divergencia esférica, proporcional al cuadrado de la distancia directa (6dB cada vez que se duplica la distancia) y otra, debida a la absorción del sonido por el medio en que ha transitado (aire o personas u objetos presentes en el recinto).
- Primeras reflexiones sobre los cerramientos más próximos a la fuente o al receptor que llegan con un retraso mayor que el sonido directo por una distancia total recorrida también mayor. Es un sonido aún direccional, que ha sufrido tres tipos de atenuaciones, dos ya descritas para el sonido directo (divergencia esférica y absorción del medio) pero de mayor valor por ser mayores las distancias recorridas y, una tercera, debida a la absorción del sonido en la reflexión, dependiente del tipo de superficie sobre la que ha impactado.
- Sonido reverberado que llega ciertamente después de las primeras reflexiones y está más distorsionado que ellas respecto al sonido emitido, pues sufre

mayores atenuaciones debido a la multiplicidad de reflexiones sufridas y al largo camino recorrido. Es un sonido difuso, suave y uniforme en todo el recinto.

Por ello, en un *pianissimo* se escucha el sonido directo y las primeras reflexiones, en definitiva al instrumento. En un *fortissimo* se escucha el sonido reverberado, es decir, la sala en su conjunto.

Hasta aquí, hemos explicado cómo percibe un oyente el sonido en una sala o recinto cerrado. Ahora vamos a ver cómo se comporta la energía introducida en un recinto cerrado por una fuente sonora.

Cuando una fuente sonora va emitiendo energía acústica en un recinto, como hemos visto anteriormente, con el sonido directo y las reflexiones, esta energía aumentaría indefinidamente si no fuera por la absorción de energía que se produce por el aire, la distancia y sobre todo, por la absorción de energía de las paredes y objetos que se encuentran en el recinto cuando las ondas inciden en ellos. Este fenómeno crea un punto de equilibrio entre la emisión de energía por la fuente y su absorción por el cual, la densidad de energía media en la sala permanece constante alrededor de un cierto nivel.

De igual forma, cuando la fuente sonora se detiene bruscamente, la densidad de energía acumulada no desaparece de inmediato, va disminuyendo progresivamente a causa de la absorción de los cerramientos, aire y objetos presentes en la sala. Este nivel no desaparece, si no que va disminuyendo hasta confundirse con el nivel de ruido de fondo. Al fenómeno de persistencia del sonido en un recinto después de cesar la emisión del sonido se le denomina reverberación.

Representando la variación de la densidad de energía (energía acústica por unidad de volumen) con el tiempo desde que la fuente comienza a emitir hasta que interrumpe su emisión y, posteriormente, en el proceso de reverberación se observa:

- Un primer tramo en el que la densidad de energía crece de forma gradual y continua, correspondiendo a un régimen transitorio de aumento de la densidad de energía, mientras la energía emitida por la fuente por unidad de tiempo supera a la absorbida por el recinto en ese mismo periodo.
- Un tramo en régimen estacionario a partir del momento en que se igualan las energías ganadas y perdidas por unidad de tiempo por el recinto en su conjunto. La densidad de energía permanece constante.
- A partir del momento en que se interrumpe la emisión de la fuente, la densidad de energía confinada en el recinto comienza a decrecer de forma gradual y continua debido a la absorción de energía acústica por parte de los cerramientos, aire y objetos presentes en el recinto.

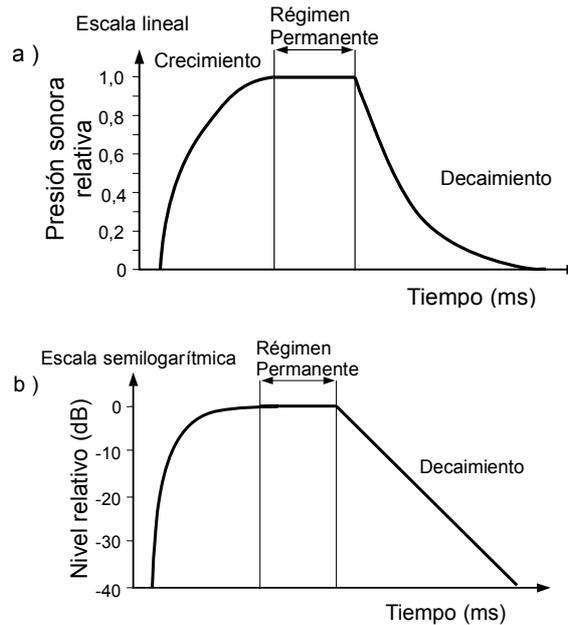


Fig. 16 Evolución teórica de la presión sonora en un punto de un recinto al conectar y posteriormente, desconectar un fuente sonora.
 Fuente: (Isbert, 1998)

Para evaluar el proceso de reverberación (permanencia de un gran número de ondas procedentes de múltiples y sucesivas reflexiones) no es suficiente seguir el camino individual de cada rayo (Acústica Geométrica), ni factible estudiar cada una de las infinitas ondas presentes en la sala (Acústica Ondulatoria), sino que es conveniente realizarlo mediante una evaluación estadística del comportamiento de la energía acústica en su conjunto (Acústica Estadística).

2.1.3.1. La absorción sonora

Para poder entender el funcionamiento del campo acústico en un recinto cerrado es imprescindible conocer la absorción sonora.

Como absorción acústica se entiende el fenómeno por el cual los elementos presentes en el canal de transmisión del sonido absorben energía acústica de la total emitida por la fuente. El fenómeno de la absorción se produce a causa de la transformación de la energía acústica en cualquier otro tipo de energía.

Cuando en el camino de una onda, se interpone cualquier elemento, la energía total que incide sobre el material E_i , se reparte en:

E_r : energía de la onda que se refleja en la superficie del elemento.

E_a : energía que se absorbe y/o transmite la superficie del elemento.

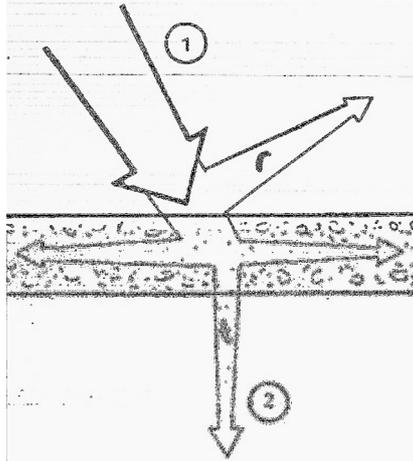


Fig. 17 Reparto de la energía de una onda acústica cuando incide en un material.

La cantidad de energía absorbida depende del tipo de material, espesor y sistema de montaje, es decir, del proceso de absorción que se realice, así como también del ángulo de incidencia y frecuencia de la onda sonora correspondiente. La energía que absorbe el material se puede transformar en:

Energía mecánica: Se lleva a cabo a través de membranas y resonadores. Estos absorben, fundamentalmente, la energía asociada a la frecuencia de la onda que coincide con el modo propio de vibración de la membrana o resonador.

Energía calorífica: Se lleva a cabo a través de materiales porosos o blandos. Estos materiales producen un amortiguamiento de las ondas sonoras al pasar éstas a su través, mediante la transformación de la energía sonora en energía calorífica o de deformación. Estos materiales pueden absorber de dos formas:

1. En materiales homogéneos y blandos: la onda de presión provoca deformaciones en la superficie que se transmiten a lo largo del material y requieren cierta energía para producirse, energía que toman de la onda acústica, que es la causa de las mismas. La presión de la onda sonora sobre la superficie es en este caso la causa de las deformaciones y por tanto de la absorción. La impedancia del material, o resistencia que pone a la propagación de la onda, interesa que sea grande para que al no permitir el paso de la onda a su través, se produzca la deformación. La estructura del material interesa que no sea rígida para facilitar la deformación. La absorción de los materiales blandos se produce fundamentalmente en frecuencias medias.
2. En materiales porosos o fibrosos de poro abierto: al incidir la onda acústica sobre ellos, se refleja una porción muy pequeña, pues las partículas del aire penetran en el material, a través de sus canales y en su vibración se produce un rozamiento con las paredes de los poros o canales, lo que produce una pérdida de energía cinética de las partículas del aire por transformación en energía calorífica disipada en el rozamiento. A mayor rigidez en la estructura del material, mayor será la

velocidad relativa y por tanto, se producirá mayor rozamiento y mayor absorción. Si la estructura del material es flexible se produce menos rozamiento y menor pérdida por calor, ya que los canales entrarán también en vibración, originándose una pérdida adicional por transformación de energía acústica en mecánica. En cualquier caso interesa un material con baja impedancia, para permitir que la onda se transmita en su interior, buscando un compromiso entre la porosidad y el espesor, puesto que a mayor porosidad mayor debe ser el espesor para que se pierda la misma cantidad de energía.

El coeficiente de absorción de un determinado material, con su forma, espesor y sistema de montaje correspondiente se define como:

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

Ecuación 7

Como se ha comentado, el coeficiente de absorción de cada material varía según las frecuencias del sonido. Para ello para cada material, va acompañado de la curva de variación del coeficiente respecto la frecuencia, valores obtenidos a partir de ensayos experimentales.

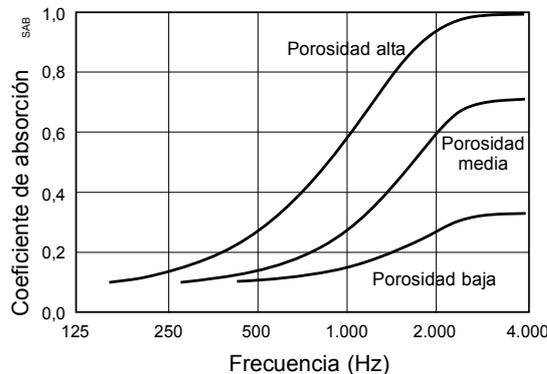


Fig. 18 Variación de la absorción en función de la frecuencia de un material absorbente con distintos grados de porosidad.

Fuente: (Isbert, 1998)

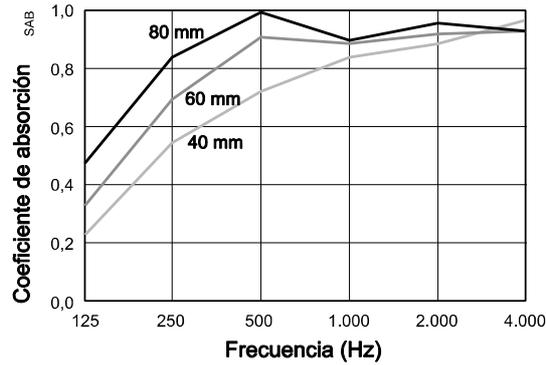


Fig. 19 Variación de la absorción en función de la frecuencia para diferentes espesores de un material absorbente.
Fuente: (Isbert, 1998)

La absorción de una superficie S, es:

$$A = \alpha \cdot S$$

Ecuación 8 (en Sabines)

Los Sabines es la unidad de la absorción acústica, que se puede definir como los metros cuadrados de ventana abierta.

Cuando se realiza un estudio acústico, además de los paramentos y los diferentes revestimientos de las paredes, suelos y techos, también se debe considerar la absorción de los objetos en el recinto. En base a lo nombrado se puede calcular el coeficiente de absorción medio de un recinto:

$$\bar{\alpha} = \frac{A}{S} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i + \sum_{i=1}^n N_i A_i}{\sum_{i=1}^n S_i}$$

Ecuación 9

Además de esta absorción, en salas grandes, hay que tener en cuenta la absorción de frecuencias altas producidas por la propagación del sonido en el aire, como se ve en apartados posteriores

2.1.3.2. Influencia del recinto en la percepción del sonido

En un recinto, la forma y el tipo de materiales con los que está construido, influyen en la percepción del sonido emitido. La reverberación que acompaña a cada impulso de un mensaje sonoro puede ser útil o perjudicial dependiendo de la duración de la misma, ya que, en exceso, resta claridad y definición a los sonidos emitidos y, por defecto, no llega a entremezclarlos ni conduce a la adecuada sonoridad, sobre todo en salas grandes.

El recinto, por tanto, tiene influencia sobre la señal que se propaga en él, para:

- acompañar a la señal directa con unas primeras reflexiones que alteran su estructura en el tiempo a la vez que incrementan su nivel, pudiendo distorsionar su color de tono al introducir cambios en su espectro de frecuencias, y modifican a su vez la percepción de la localización de la fuente.
- prolongar, entremezclar y difundir el sonido mediante la reverberación propia de los recintos cerrados. La influencia de la reverberación radica en el hecho de que los mensajes acústicos se componen de sonidos individuales emitidos con ciertos intervalos de tiempo entre ellos. La reverberación los entremezcla, llenando de sonido los intervalos de silencio a la vez que entremezcla direccionalmente el sonido emitido por diferentes fuentes en la sala.

En la audición de sonidos musicales, el sonido directo acompañado de las primeras reflexiones, a pesar de dar sensación de intimidad, no es suficiente para garantizar una audición de calidad, necesitando la cooperación y en ocasiones preponderancia del sonido reverberado que entremezcla espacial y temporalmente el sonido, dando plenitud de tono y la adecuada sonoridad.

La comprensión del proceso de reverberación del sonido en un recinto y su carácter fundamental en la percepción del sonido en el mismo, permitió la emancipación de la Acústica de Salas de las leyes puramente geométricas (Acústica Geométrica) que estudian el comportamiento del sonido directo y las primeras reflexiones, estableciendo la diferencia entre la percepción de la luz y el sonido. Así el conocido aforismo: “Dónde se ve bien se oye bien” es cierto para el sonido directo pero no considera al sonido reverberado y en audiciones musicales “puede oírse bien, sin ver” por estar en una zona con predominio del sonido reverberado e incluso “puede oírse mal, dónde se ve bien” por predominar el sonido directo y no percibir una audición equilibrada del conjunto.

La medida de la duración de la reverberación es, pues, un parámetro fundamental que define la calidad acústica de una sala. Wallace Clement Sabine, definió como índice de medida de la duración de la reverberación el tiempo de reverberación, o tiempo requerido después de cesar la fuente para reducir la energía presente en un recinto a la millonésima parte de su valor en régimen estacionario.

2.1.3.3. La teoría estadística de la reverberación

Las leyes de la reverberación, según la teoría de la Acústica Estadística, pueden formularse de una forma general, sólo en campos acústicos en los que todas las direcciones de propagación del sonido aporten la misma intensidad sonora, no sólo en estado estacionario sino en cualquier momento del proceso de descenso del sonido. A un campo en estas condiciones se le llama campo difuso y en ellos la distribución del campo acústico es homogénea e isotrópica en cualquier instante y punto del mismo.

Reverberación y difusión están íntimamente ligadas de forma que a mayor reverberación mayor difusión y viceversa. Conviene, pues, valorar las expectativas de

obtener un campo difuso en una sala. Las situaciones reales se acercarán tanto más al modelo del campo difuso:

- cuanto menor sea la absorción de las superficies limítrofes y objetos presentes.
- cuanto mayor sea la proporción de energía que se refleja difusamente respecto a la que se refleja especularmente.
- cuanto más lejos se esté de la fuente acústica y de las superficies absorbentes.

La teoría estadística de la reverberación predice la forma del proceso de ascenso y descenso del sonido en una sala.

Esta teoría, teniendo en cuenta las hipótesis para la obtención de un campo difuso y considerando un recinto con un determinado volumen, en cuyo interior emite una fuente acústica de potencia determinada, se puede obtener:

- La energía acústica ganada por la sala durante un periodo de emisión de la fuente
- La energía acústica perdida, proporcional a la energía que en ese periodo de tiempo ha llegado a los cerramientos de la sala, siendo el factor de proporcionalidad el coeficiente de absorción medio de la sala.

Una vez conocida la energía ganada y perdida por la sala en el intervalo de tiempo, se puede plantear la ecuación diferencial de la variación de la densidad de energía acústica con el tiempo, tanto en el proceso de ascenso del sonido como en el descenso.

2.1.3.4. Tiempo de reverberación

De la anterior teoría estadística de la reverberación Sabine, obtuvo una expresión para el tiempo de reverberación, o lo que es lo mismo en términos de niveles, intervalo de tiempo necesario para reducir el nivel de presión acústica en una sala en 60 dB respecto al nivel estacionario.

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

Ecuación 10

El tiempo de reverberación es, pues, proporcional al volumen de la sala e inversamente proporcional a su absorción. De la expresión obtenida por Sabine, bajo las hipótesis de campo difuso se observa que :

- es un parámetro independiente de la forma y geometría de la sala

- es independiente de la situación de la fuente acústica
- es el mismo en cualquier punto de la sala
- es independiente de la distribución de materiales

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

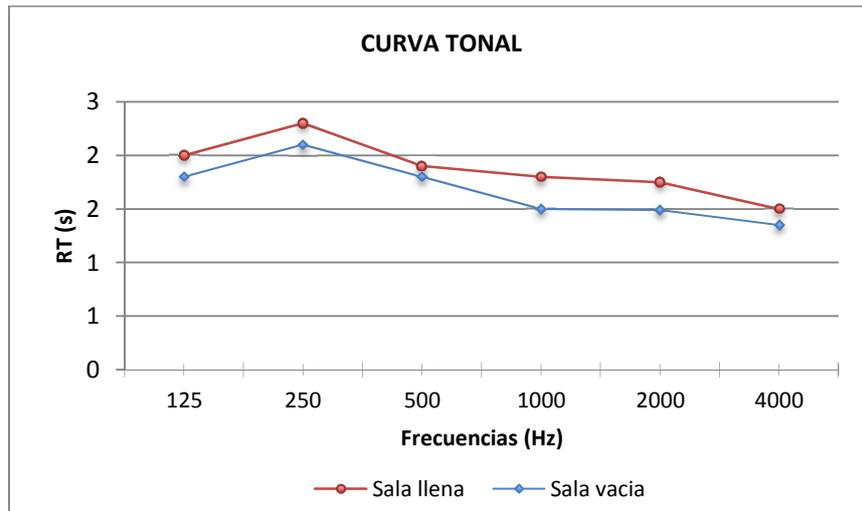


Fig. 20 Ejemplo de curva tonal. Sala llena - Sala vacía.

Fuente: TFM Estudio por técnicas de Ray Tracing sobre la eficacia de intervenciones acústicas en recintos eclesiásticos. Estudio de la Iglesia del monasterio de Sta Maria de la Vall digna.

2.1.3.5. Campo acústico directo y reverberado

La magnitud que evalúa un campo acústico uniformemente repartido es la densidad de energía, que se define como la energía acústica por unidad de volumen, ρ_E .

Una fuente acústica puntual, caracterizada por su potencia (W) y situada al aire libre (sin perturbaciones) crea un campo acústico en su entorno que es el campo directo.

Suponiendo que la fuente acústica es omnidireccional, la densidad de energía directa variará con la distancia a la fuente por la divergencia esférica de la onda, según:

$$\rho_{E_D} = \frac{W}{4\pi cr^2}$$

Ecuación 11

La misma fuente situada en el interior de un recinto crea un campo acústico que se obtiene, en todo momento, como superposición del conjunto de reflexiones originadas por los cerramientos del mismo, que constituiría el campo reverberado.

Supuesto en estado estacionario y para condiciones de campo difuso, la densidad de energía reverberada sería constante en todo el recinto de valor:

$$\rho_{E_R} = \frac{4W}{Ac}$$

Ecuación 12

Las expresiones para el nivel del campo directo y reverberado son respectivamente:

$$LP_D = LW - 11 - 20 \log r$$

$$LP_R = LW + 6 - 10 \log A$$

Ecuación 13

Se observa que el campo directo depende de la distancia a la fuente acústica, disminuyendo 6 dB cada vez que se duplica la distancia a la fuente, mientras que el campo reverberado permanece constante en el recinto y sólo depende del área de absorción equivalente del mismo.

Entonces el nivel del campo acústico resultante en un punto del recinto se obtiene como composición del nivel del campo directo y reverberado:

$$LP_T = LP_D \oplus LP_R$$

Ecuación 14

En las proximidades de la fuente predomina el campo acústico directo, mientras que a grandes distancias de la misma éste resulta despreciable frente al campo acústico reverberado.

Se denomina radio crítico a la distancia a la fuente en la que se igualan el campo directo y el reverberado:

$$r_c = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{A}{\pi}} \approx 0,14 \sqrt{A}$$

Ecuación 15

En la siguiente gráfica, vemos representado el nivel de potencia del campo directo, del reverberante y del total. Observamos que a la distancia del r_c , el nivel del campo resultante es 3dB mayor que cualquiera de ellos.

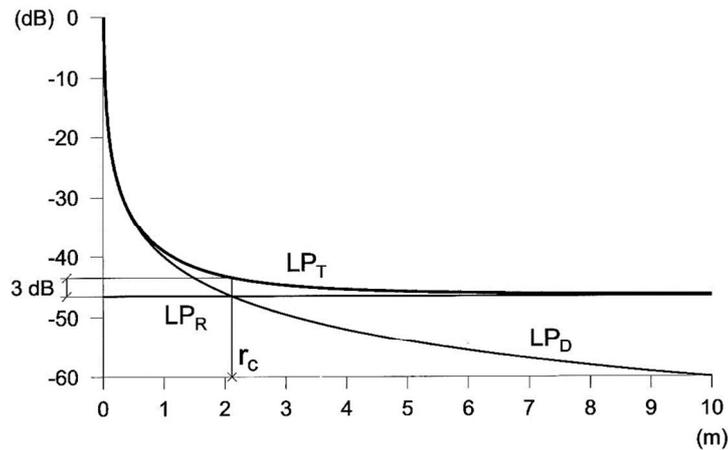


Fig. 21 Representación del nivel de potencia según la distancia.
Fuente: (Guillen Guillamon, 1999)

Así, en cada recinto se puede distinguir dos zonas acústicas en función de su poder absorbente, una próxima a la fuente en la que se perciben las características acústicas del sonido emitido y otra más alejada en la que se escucha la influencia del recinto en el mensaje emitido. Como la absorción depende de la frecuencia, para cada banda de frecuencias estas zonas pueden ser distintas.

Para fuentes no omnidireccionales hay que tener en cuenta el factor de direccionalidad, Q , dependiente de la frecuencia y de la dirección. Por ello para el cálculo del campo directo variaría la formulación, siendo:

$$\rho_{E_d} = Q \frac{W}{4\pi cr^2}$$

Ecuación 16

Por tanto el nivel correspondiente al campo directo es:

$$LP_D = LW - 11 - 20 \log r + 10 \log Q$$

Ecuación 17

Con lo cual, el radio crítico sería

$$r_c = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{Q \cdot A}{\pi}} \approx 0,14 \sqrt{Q \cdot A}$$

Ecuación 18

Con ello llegamos a la conclusión que en este caso, la diferenciación entre las dos zonas acústicas anteriores dependería, ahora no sólo de la frecuencia sino también de la dirección.

2.1.3.6. Medida y control de la reverberación

Los diferentes métodos utilizados para la medida de la reverberación de un recinto dependen de la conversión de una señal acústica en una eléctrica, proporcional al logaritmo de la señal mediante un micrófono. A partir de la curva de caída del voltaje frente al tiempo se puede determinar la reverberación.

Existen diversos métodos de medida del tiempo de reverberación, pero los más utilizados son: el método de ruido interrumpido y el método de la respuesta al impulso integrada.

En los procesos de reverberación compuestos por varias caídas exponenciales, se observa que la impresión subjetiva de la reverberación se produce por la primera parte de la curva de caída y, así, se recomienda el empleo de un primer tiempo de reverberación medido en la caída de los 10-20 primeros dB o en los primeros 160 ms del proceso de descenso del sonido.

Toda sala de audición, independientemente de otros parámetros acústicos, debe tener un tiempo de reverberación adecuado al uso de la misma y dependiente de su volumen.

La reverberación produce un alargamiento de los sonidos individuales, de forma que permanecen audibles cierto tiempo después de haber sido emitidos, entremezclándose su audición con la de sonidos posteriormente emitidos y restando claridad y posibilidad de identificación individual. Por otra parte, la reverberación contribuye también al nivel de sonoridad de la sala, de forma que en salas grandes sin la adecuada reverberación el nivel de sonoridad puede llegar a ser insuficiente.

En cada sala, dependiendo de su uso y su volumen, se debe llegar a un compromiso entre la pérdida de claridad debida a la excesiva reverberación y la pérdida de sonoridad debida al volumen. Así de una forma general se puede estimar unos valores del tiempo de reverberación adecuados en función del uso y del volumen de un recinto.

Ahora bien, el valor del tiempo de reverberación varía con la frecuencia, ya que así lo hace la absorción de la sala. Luego, realmente conviene conocer el tiempo de reverberación adecuado para una sala en función de la frecuencia o curva tonal de la misma. En general, y para reforzar el sonido de los sonidos graves, es recomendable un aumento del tiempo de reverberación en bajas frecuencias del orden del 20-30% respecto al tiempo de reverberación en frecuencias medias - altas.

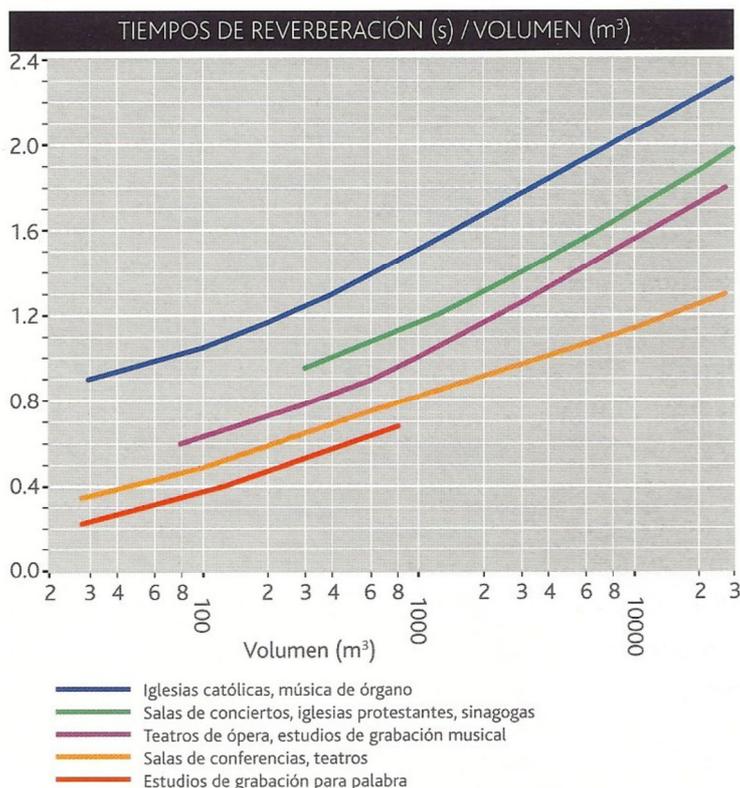


Fig. 22 Tiempos de reverberación óptimos propuestos por L.L. Beranek para la frecuencia de 500 HZ.

Fuente: (Barba Sevillano & Giménez Pérez, 2011)

El ajuste del tiempo de reverberación en un recinto es fundamental a la hora de adecuarlo para un determinado tipo de audición. La percepción de la reverberación se ha visto que viene determinada por el volumen de la sala, su *difusión* y la *absorción* presente en la misma, por lo que el control de la reverberación se hará teniendo en cuenta:

Absorción: Como hemos visto en el apartado anterior, la cantidad de energía absorbida por una superficie depende del tipo de material, su forma, su espesor y su puesta en obra, es decir del proceso de absorción que se realice, así como también de la frecuencia del sonido.

El coeficiente de absorción, α , de una solución constructiva (incluyendo el material de que está hecha, su espesor, su forma de montaje) se define como la razón entre la energía absorbida y la energía incidente y depende de la frecuencia del sonido.

Los diferentes mecanismos de absorción varían según transformen la energía acústica en energía calorífica o en energía mecánica.

En efecto, una forma de absorber energía acústica de un campo es introducir en él elementos capaces de adquirir energía mecánica de la energía acústica del campo. Este es el caso de las placas vibrantes, membranas y resonadores. En este mecanismo de absorción se absorbe fundamentalmente la energía asociada a la frecuencia de resonancia del sistema, ya sea la membrana o el resonador.

Tanto los resonadores como las membranas suelen presentar espectros de absorción en frecuencias bajas-medias.

Otra forma, que suele ser más común, es mediante el uso de materiales absorbentes del sonido. Estos absorbentes producen un amortiguamiento de las ondas sonoras al atravesarlos, mediante la transformación de la energía acústica (energía cinética de las partículas) en energía calorífica.

En general, la intervención para el acondicionamiento acústico de un determinado recinto se realiza tratando de ajustar el tiempo de reverberación mediante materiales absorbentes superficiales y en bajas frecuencias, cuando exista exceso de reverberación se recurrirá al empleo de membranas o resonadores.

Difusión: El campo sonoro en un recinto está, generalmente, lejos de la uniformidad supuesta por la teoría estadística. Las curvas de caída del sonido desde el estado estacionario suelen tener fluctuaciones que las alejan en mayor o menor medida de las supuestas caídas teóricas de tipo exponencial.

El grado de difusión suele ser el término usado para describir el grado de aleatoriedad del campo acústico en un recinto. Se dice que el campo es perfectamente difuso si se tiene una distribución uniforme de energía acústica para cualquier volumen y si las direcciones de propagación para cualquier punto son igualmente probables.

El campo sonoro difuso no se alcanza nunca en la realidad, sin embargo se aproximará más a él cuanto mayor sea la proporción de energía que se refleje difusamente en cada reflexión y cuanto menor sea la absorción del recinto.

Para mejorar el grado de difusión del campo acústico en un recinto se debe incidir en potenciar la reflexión difusa y no direccional del sonido mediante:

- optimización de las proporciones de la sala de forma que se eviten resonancias aisladas
- evitando el paralelismo entre cerramientos evitando la formación de ondas estacionarias y rompiendo la simetría y por tanto no favoreciendo ninguna dirección de propagación del sonido
- introduciendo irregularidades en las superficies de forma que el sonido no se refleje especularmente en ellas
- distribuyendo irregularmente los materiales absorbentes no favoreciendo ningún tipo de simetría
- utilizando difusores o elementos que difunden el sonido en un amplio margen de frecuencias. Los difusores RPG (Retícula por fase de reflexión) o rejillas de difracción acústica tienen una distribución de profundidades de sus hendiduras de forma que la onda

difractada por ellos está formada por un gran número de frentes de onda dispersados que se refuerzan mutuamente

2.1.4. PARAMETROS ACÚSTICOS DE CALIDAD DE RECINTOS

Una vez expuestos los conceptos básicos de la acústica de salas, comprendiendo así como se desarrolla el sonido durante un determinado tiempo en un recinto, vamos a explicar a continuación, los parámetros acústicos en concreto que se utilizan actualmente para definir la calidad acústica de una sala.

El ruido de fondo. Curvas NC: Se considera ruido de fondo todo aquel ruido que se percibe en una sala cuando en la misma no se realiza ninguna actividad. El efecto del ruido de fondo existente es el de elevar el nivel de audición, produciendo un efecto de enmascaramiento de algunos sonidos deseados y necesarios en la sala para el desarrollo de su actividad.

La evaluación objetiva del grado de molestia que un determinado ruido ambiental provoca en un oyente y realiza por comparación de los niveles de ruido existentes en un recinto, en cada banda de octava comprendida entre 63 Hz y 8 kHz, con un conjunto de curvas de referencia denominadas NC (Noise Criteria).

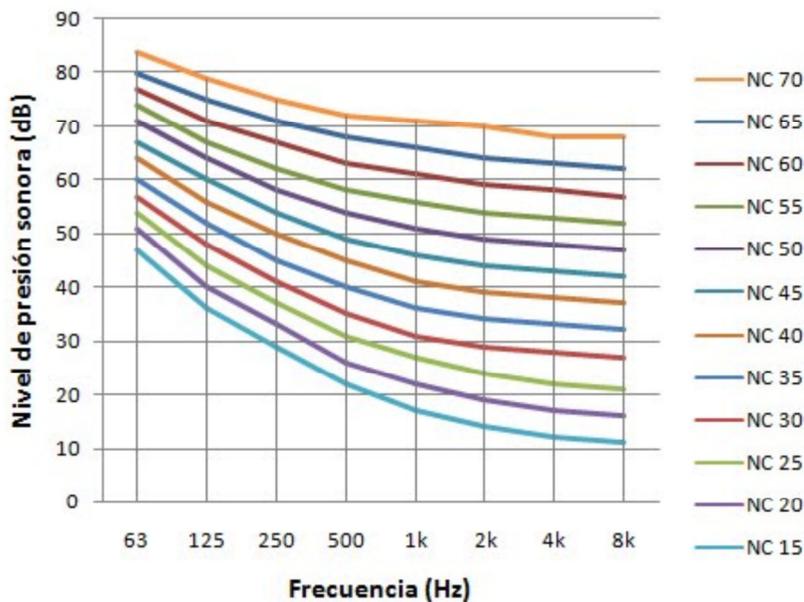


Fig. 23 Curvas NC.

Estas curvas NC siguen de forma aproximada la evolución de la sensibilidad del oído en función de la frecuencia. Por lo que siempre serán más permisivas en frecuencias bajas que en altas.

Son utilizadas principalmente para establecer los niveles de ruidos máximos recomendados en los diferentes recintos según su función. Un recinto cumple una determinada especificación NC cuando las medidas del ruido de fondo del recinto para

cada una de las frecuencias no superan en ningún momento los valores de la curva NC correspondiente.

La correspondencia de cada curva NC con su uso, suele variar según los distintos investigadores. Pero coinciden que para la percepción correcta de un pianísimo en una sala, se debe cumplir una NC-15. Este valor es complicado de conseguir, sobretodo dependiendo de la situación del recinto, por lo que para recintos con función de auditorios se suele recomendar que cumplan una NC-25 (Implica un ruido de fondo inferior a 30 dB en frecuencias medias).

2.1.4.1. Parámetros temporales

Tiempo de reverberación (RT): Es uno de los parámetros más importantes para definir un recinto acústicamente.

Como ya hemos explicado y definido en el capítulo anterior, el tiempo de reverberación (RT) a una frecuencia determinada es el tiempo (en segundos) que transcurre desde que el foco emisor se detiene hasta el momento en que el nivel de presión sonora cae 60 dB con respecto a su valor inicial.

Para el caso de las mediciones experimentales, el tiempo de reverberación es calculado desde la parte inicial del decaimiento, el cual es la evaluación de un intervalo de -5 dB a -35 dB multiplicado por un factor de dos, o hacia un límite superior de -25 dB multiplicado por un factor de tres para evitar problemas del ruido de fondo.

Normalmente para dar el valor del tiempo de reverberación de una sala se suele utilizar el valor del RT como media aritmética de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1 kHz. Ha esto lo denominamos RT_{mid} :

$$RT_{mid} = \frac{RT^{500Hz} + RT^{1kHz}}{2}$$

Ecuación 19 en segundos

Recordando, que según W. C. Sabine formuló el RT como:

$$RT = \frac{0,16V}{A}$$

Ecuación 20 en segundos

Siendo: V : el volumen del recinto en m^3 .
 A : Absorción total de las superficies del recinto (sabinios métricos)

“Early Decay Time” (EDT): Se define como 6 veces el tiempo que transcurre desde que el foco emisor deja de radiar hasta que el nivel de presión sonora cae 10 dB.

En unas condiciones ideales donde exista una perfecta difusión del sonido en el recinto, el valor de EDT, coincidiría con el RT. Ya que en este supuesto el decaimiento

teórico de la energía sonora sigue una evolución exponencial, que se traduce en una línea recta al pasarla a escala semi-logarítmica. Por lo que al tener la recta la misma pendiente el valor de los dos parámetros coincidirían.

En la práctica, este supuesto no se suele cumplir. La difusión perfecta del sonido en una sala es una situación ideal, por lo que la curva de decaimiento presenta una doble pendiente. En consecuencia el valor del EDT es diferente al RT. También es más notable la diferencia de estos valores en determinados puntos de un recinto donde por su situación las características acústicas en esos puntos son sensiblemente diferentes al resto de la sala.

Con esto podemos sacar como conclusión que cuanto más parecidos sean los valores del RT y del EDT, mejor difusión se dará en la sala.

Calidez (BR): La calidez acústica o timbre (“Bass Ratio” BR) se define como la relación entre la suma de los tiempos de reverberación a frecuencias bajas (125 Hz y 250 Hz) y la suma a los correspondientes a frecuencias medias (500Hz y 1000 Hz).

$$BR = \frac{RT^{125\text{ Hz}} + RT^{250\text{ Hz}}}{RT^{500\text{ Hz}} + RT^{1000\text{ Hz}}}$$

Ecuación 21 adimensional

Este parámetro se mide en unidades adimensionales e indica la presencia de sonidos graves (frecuencias bajas) en un recinto.

Se dice que una sala tiene calidez acústica si presenta una buena respuesta a frecuencias bajas.

Brillo (Br): El brillo de una sala (“Brilliance” Br) se define como la relación entre la suma de los tiempos de reverberación a frecuencias altas (2000 Hz y 4000 Hz) y la suma a los correspondientes a frecuencias medias (500Hz y 1000 Hz).

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

Ecuación 22 adimensional

Este parámetro se mide en unidades adimensionales e indica la presencia de sonidos agudos (frecuencias altas) en un recinto.

El término brillante significa que el sonido en una sala es claro y rico en armónicos.

Tiempo central (Ts): Es un parámetro de uso reducido y aplicable a cualquier tipo de recinto.

Según Kürer¹, t_s se define como el primer momento del área que queda debajo de la curva energía-tiempo:

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

Ecuación 23 en ms.

También se denomina "Centro de gravedad", puesto que mide el tiempo que transcurre desde el inicio hasta el centro de gravedad de la curva de decaimiento energético.

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

En el caso ideal de tener un campo sonoro difuso, la curva energía-tiempo presenta una caída exponencial, entonces los valores de t_s estarán comprendidos entre 72 y 144 ms, suponiendo que TR está entre 1 y 2 s.

En la práctica, estos límites teóricos se usan como referencia, aunque t_s suele desviarse de dichos valores, ya que está más relacionado con EDT que con TR.

2.1.4.2. Parámetros energéticos

Son aquellos que nos indican la medida de la transparencia de la señal percibida basándose en el estudio del sonido reflejado en relación con el sonido directo.

Sonoridad (G): Es el grado de amplificación producido por la sala. Según Lechman, la sonoridad se define como la diferencia entre el nivel total de presión sonora L_p producido por una fuente unidireccional en un determinado punto de la sala y el nivel de presión sonora producido por la misma fuente situada en campo libre y medido a una distancia de 10 m. (nivel de referencia)

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_A^2(t) dt}$$

Ecuación 24 en dB.

¹ A simple measuring procedure for determining the "center time" of room acoustical impulse responses. *7th Intern. Congress on Acoustics*

Habitualmente se utiliza el valor obtenido como promedio de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1000 Hz, el llamado G_{mid} :

$$G_{mid} = \frac{G^{500Hz} + G^{1kHz}}{2}$$

Ecuación 25 en dB.

La sonoridad depende principalmente de:

- La distancia del oyente al escenario.
- La energía asociada a las primeras reflexiones.
- La superficie ocupada por el público.
- Del nivel del campo reverberante.

Claridad musical (C_{80}) Claridad de la palabra (C_{50}): La Claridad es la capacidad de discriminar adecuadamente las sílabas en una palabra o cada nota de un pasaje musical en un ambiente sonoro determinado. Se define como 10 veces el logaritmo del cociente entre la energía sonora que llega al receptor en los primeros t milisegundos y la energía total recibida a partir de los t milisegundos. Se mide en decibelios:

$$C_t = 10 \log \frac{\int_0^t p^2(t) dt}{\int_t^\infty p^2(t) dt}$$

Ecuación 26 en dB.

siendo: $p(t)$: presión sonora instantánea.

La Claridad musical, C_{80} , se define como la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 80 ms ($t=80$), calculada en cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4000 Hz.

Este parámetro acústico objetivo fue inicialmente propuesto por Reichardt en 1975 donde el límite de 80 ms fue propuesto como el límite de perceptibilidad para la música. El C_{80} es una función del sonido directo, las reflexiones sonoras tempranas y el campo reverberante. Las reflexiones que llegan al oyente dentro de dicho intervalo son integradas por el oído humano junto con el sonido directo y, por tanto, contribuyen a aumentar la claridad musical.

Habitualmente se utiliza el valor promedio de las tres bandas de frecuencia centrales (500, 1000 y 2000 Hz):

$$C_{80} = \frac{C_{80}^{500\text{ Hz}} + C_{80}^{1\text{ kHz}} + C_{80}^{2\text{ kHz}}}{3}$$

Ecuación 27 en dB.

Por otra parte tenemos el valor de la claridad particularizado a la palabra, donde en este caso el tiempo será de 50 ms (C_{50}).

Definición (D_{50}): También denominado como razón de energía temprana a total o fracción de energía temprana, tiene una ventana temporal de 50 ms y es la razón de energía recibida en los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluyendo el sonido directo y las primeras reflexiones) y la energía total recibida. Se suele calcular en bandas de frecuencia entre los 125 Hz y los 4000 Hz. La Definición D_{50} se define:

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \times 100$$

Ecuación 28 en porcentaje.

siendo: $p(t)$: presión sonora instantánea.

Como observamos es una relación entre energías parciales y totales, por lo que se expresa en forma porcentual.

Sus valores fluctúan entre 0 y 1 y fue propuesto por Thiele² en 1953. La duración de 50 ms fue denominada como el límite de perceptibilidad respecto de la palabra hablada. Por ello a mayor valor de D , mayor claridad en el sonido.

2.1.4.3. Parámetros espaciales

En la audición musical, la amplitud aparente de la fuente sonora ASW (Apparent Source Width) se asocia con la sensación de que el sonido que llega del escenario proviene de una fuente de mayor amplitud que la correspondiente a la “orquesta” real.

Cuanto mayor sea ASW, mayor será la impresión espacial del sonido y mejor resultará la valoración subjetiva de la calidad acústica de la sala.

Los factores más influyentes para esta cualidad son la procedencia y secuencia de las reflexiones tempranas y por ello, la forma del recinto y sus proporciones geométricas son factores fundamentales. Los parámetros que utilizamos para cuantificar la espacialidad de la sala, son los siguientes:

Eficiencia Lateral “Lateral energy Fraction” (LF): La eficiencia lateral es la relación entre la energía que llega lateralmente al oyente dentro de los primeros 80

² Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallruckwürfe in Raumen. Acustica 3.

ms desde la llegada del sonido directo (se excluye el sonido directo) y la energía recibida en todas direcciones en dicho intervalo de tiempo:

$$LF = \frac{\int_{t_d}^{t_e} p_g^2(t) dt}{\int_0^{t_e} p^2(t) dt} = \frac{\int_{t_d}^{t_e} p^2(t) \cos \theta dt}{\int_0^{t_e} p^2(t) dt}$$

Ecuación 29 en porcentaje

siendo: $p_g(t)$: presión sonora instantánea medida con micrófono direccional tras la llegada del sonido directo ($t_d=5$ ms) hasta $t_e=80$ ms. Considerada el primer sonido reflejado.

$p(t)$: presión sonora instantánea medida con micrófono omnidireccional.

θ : ángulo del sonido incidente con el eje imaginario que pasa por los oídos del oyente.

Cuando nos referimos a la exclusión del sonido directo, nos referimos a que la medición se empieza a tomar desde los 5 ms, que es cuando se considera que se perciben las primeras reflexiones.

Normalmente se utiliza el promedio de LF correspondiente a las bandas sonoras de frecuencia de octava comprendidas entre 125 Hz y 1 kHz. El cual se denomina LF_{E4} .

$$LF_{E4} = \frac{LF^{125\text{ Hz}} + LF^{250\text{ Hz}} + LF^{500\text{ Hz}} + LF^{1\text{ kHz}}}{4}$$

Ecuación 30 en porcentaje

Cuanto mayor sea el valor, mayor será la ASW. Como consecuencia, mayor grado de espacialidad del sonido.

Eficiencia lateral coseno “Lateral Energy Fraction Cosine” (LFC): Este concepto introduce el coseno del ángulo de incidencia en el parámetro anterior (proyectando así el valor de la energía incidente sobre el eje imaginario que pasa por los oídos del oyente) con lo que se obtiene una mejor correlación con la impresión subjetiva de espacialidad respecto al parámetro anterior.

Proporciona una ponderación de las reflexiones laterales según el coseno del ángulo θ que forma el sonido incidente con el eje imaginario que pasa por los oídos del oyente.

Este parámetro tiene una mayor correlación con la impresión subjetiva del oyente.

$$LFC = \frac{\int_{t_d}^{t_e} |p(t) \cdot p_L(t)| dt}{\int_0^{t_e} p^2(t) dt}$$

Ecuación 31 en porcentaje

Siendo: p_L = presión sonora instantánea proyectada según el eje de los oídos (multiplicada por el factor coseno).

Al igual que el LF consideramos los mismos tiempos de medición (de 5 ms a 80 ms) que es el tiempo con el que se considera que percibimos las primeras reflexiones. También es usual utilizar el valor promedio de las bandas de frecuencia de octava comprendidos entre 125 Hz y 1 kHz (LFC_{E4}):

$$LFC_{E4} = \frac{LFC^{125Hz} + LFC^{250Hz} + LFC^{500Hz} + LFC^{1kHz}}{4}$$

Ecuación 32 en porcentaje

Correlación cruzada interaural “Interaural Cross- Correlation” (IACC): Se define como la correlación entre sonidos que llegan a ambos oídos, y es indicativa del grado de similitud existente entre las dos señales.

Se considera dos tipos de IACC:

$IACC_E$: (early) La medición corresponde desde los primeros 5 ms, que es cuando se considera que llega el sonido directo, hasta 80 ms, donde están las primeras reflexiones.

$IACC_L$: (late) La medición corresponde a partir de las primeras reflexiones, 80 ms, hasta el primer segundo de duración.

$$IACC = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t) p_R(t + \tau) dt}{\left(\int_{t_1}^{t_2} p_L^2(t) dt \cdot \int_{t_1}^{t_2} p_R^2(t) dt \right)^{1/2}}$$

Ecuación 33 para $\zeta \leq 1$ ms.

siendo: $p_L(t)$: presión sonora instantánea que incide sobre el oído izquierdo (left).
 $p_R(t)$: presión sonora instantánea que incide sobre el oído derecho (right).

El valor representativo de este parámetro se suele expresar como el promedio de las bandas centrales de frecuencia de octava, 500 Hz, 1000Hz y 2000Hz. ($IACC_{E3}$ y $IACC_{L3}$):

$$IACC_{E3} = \frac{IACC_E^{500Hz} + IACC_E^{1kHz} + IACC_E^{2kHz}}{3}$$

Ecuación 34

$$IACC_{L3} = \frac{IACC_L^{500Hz} + IACC_L^{1kHz} + IACC_L^{2kHz}}{3}$$

Ecuación 35

2.1.4.4. Parámetros de inteligibilidad

En el mensaje oral de una persona, las vocales tienen un mayor nivel de presión sonora (12 dB de media) y una mayor duración en el tiempo (90 ms frente 20 ms de las consonantes). Estos hechos son debidos a que las vocales tienen un gran contenido en bajas frecuencias, y que por lo contrario, las consonantes se componen principalmente de altas frecuencias.

Teniendo claro estos datos, las frecuencias que contribuyen a aumentar el nivel de la voz, son las frecuencias medias (500 Hz principalmente) pero las frecuencias altas son las que intervienen en la inteligibilidad de la palabra, por lo que los sonidos de las consonantes son los que realmente contribuyen a que un mensaje oral se pueda entender fácilmente.

Por todo ello, para poder valorar la inteligibilidad de la palabra en un recinto, además de los valores ya comentados como C50 y D50, ligados principalmente a la contribución del nivel de la voz, tenemos dos índices más representativos, el STI y el RASTI.

La percepción correcta de la palabra implica preservar las diferencias espectrales que este conlleva que son reducidas principalmente por tres factores:

- La distorsión.
- El ruido de fondo.
- La reverberación del recinto.

Para poner de manifiesto las diferencias espectrales y su reducción por los factores que acabamos de enumerar, usamos la envolvente de la señal en un determinado número de bandas de frecuencia que registre las modulaciones propias del habla humana, obteniendo la llamada “función de transparencia de modulación”, a partir de la cual obtendremos los valores de los parámetros STI y RASTI.

Índice de transmisión de la palabra “Speech Transmission Index” (STI): El STI suministra información sobre la manera en que un recinto distorsiona la señal y se calcula a partir de la reducción de los diferentes índices de modulación de la voz, debida fundamentalmente a la existencia de reverberación y al ruido de fondo. Para el

cálculo del STI se utilizan 14 frecuencias de modulación, donde cada una de ellas produce un efecto sobre las 7 bandas de octava más representativas de la voz humana.

A través de un complejo proceso obtenemos un valor que nos permite cuantificar el grado de inteligibilidad de la palabra, donde 0 es la inteligibilidad nula y 1 la óptima.

En la práctica, la realización de las mediciones necesarias para la obtención de los datos con los que se calcula el índice son muy complejas y laboriosas, por lo que normalmente se utiliza el índice RASTI, que es una simplificación del STI mucho más sencilla de obtener.

Índice rápido de transmisión de la palabra “Rapid Speech Transmission Index”(RASTI): En este método la señal de ruido se filtra únicamente para las bandas de octava de 500 Hz y 2.000 Hz, las cuales son bandas esenciales para la inteligibilidad de la palabra, y se modula en cada banda con señales de muy baja frecuencia que intentan reproducir las modulaciones de la voz humana al habla.

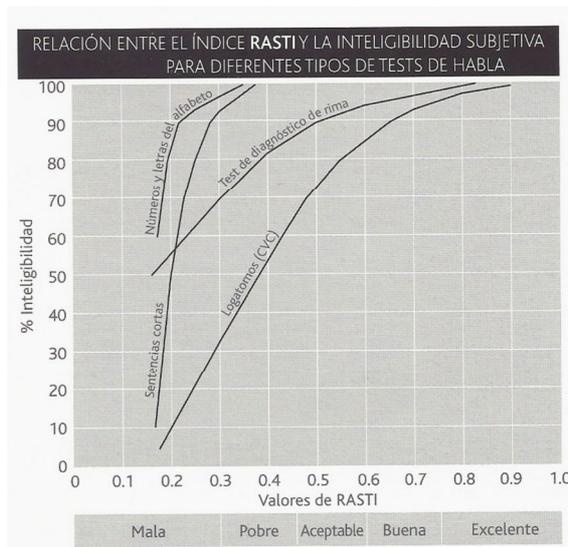


Fig. 24 Valoración subjetiva de la inteligibilidad en función del parámetro RASTI. Fuente: (Barba Sevillano & Giménez Pérez, 2011)

2.2. SIMULACIÓN ACÚSTICA

2.2.1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, las simulaciones acústicas de sonidos, es una valiosa herramienta para el diseño, el diagnóstico e investigación de cualquier tipo de recintos. Con ellos, de forma aproximada y rápida, podemos prever los parámetros sobre la calidad acústica de un recinto.

Una simulación acústica, es un modelo tridimensional virtual en el cual se reproduce en él los fenómenos acústicos que suceden en un recinto. Con un grado alto de fiabilidad. En este caso, la simulación es la herramienta de análisis que permite obtener diferentes datos que hacen posible el estudio completo de la respuesta acústica de la sala y efecto de sus intervenciones planteadas.

En general, en cualquier simulación, el primer paso es crear un modelo geométrico tridimensional. Este modelo debe ser una simplificación del recinto real de estudio. Se realiza normalmente, con un software de dibujo como el AUTOCAD, como en este caso. Posteriormente se exporta al programa de simulación utilizado, que en este caso es el ODEON.

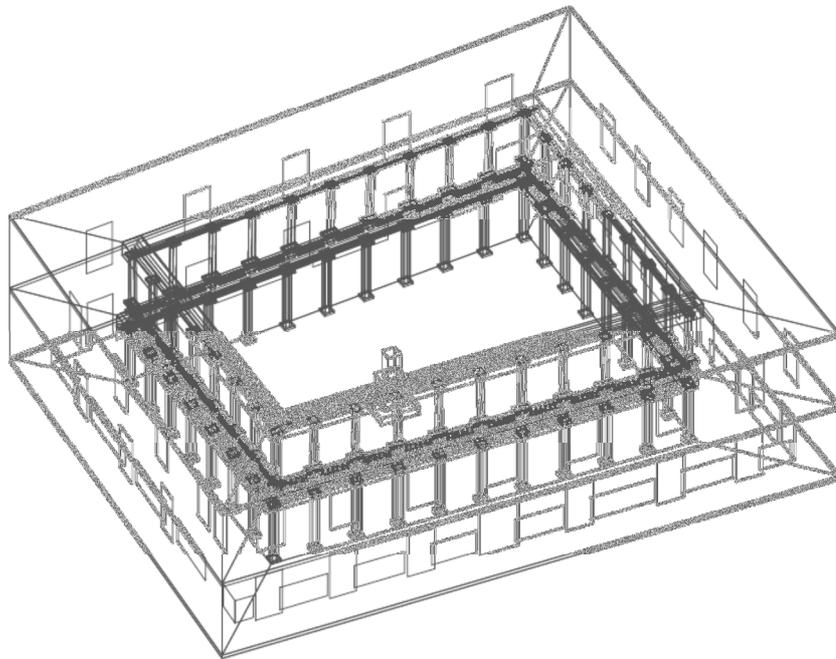


Fig. 25 Modelo geométrico realizado para el estudio.

Una vez exportado el modelo geométrico virtual al programa de simulación acústica, se le asigna a cada tipo de superficie su coeficiente de absorción y difusión que corresponden a los distintos coeficientes de cada uno de los materiales en los que está construido el recinto. En este punto está el principal problema en la simulación, en especial para recintos ya construidos, ya que no se sabe, ni se puede medir los valores correspondientes a los revestimientos interiores existentes en los edificios.

El procedimiento estandarizado en la mayor parte de este tipo de simulaciones es, primero se realiza la medición real del espacio y después se realiza la simulación validando el modelo con el método de prueba y error asignando materiales a las diferentes superficies y cambiando los coeficientes de absorción de estas, para que los resultados obtenidos en la simulación sean lo más parecidos posibles a la realidad.

Para la elección de los parámetros existe una gran variedad de bibliotecas con las características acústicas de los materiales de construcción, aunque sigue siendo muy complejo saber con exactitud los valores de cada tipo de revestimiento. Para solucionar este problema se realizan dos pasos principalmente:

- A las superficies de la simulación se les asigna los coeficientes extraídos de los materiales que más se asemejen a los existentes de las bibliotecas de materiales ensayados.
- Para ajustar estos coeficientes a los reales, tomamos como valor de referencia el RT medido “in situ” y comparándolos con los calculados por la simulación se van ajustando los valores hasta que las diferencia entre el RT virtual y el real se puedan considerar como despreciables.

En este caso se aplicarán las características y parámetros de un estudio similar realizado a otro claustro, obteniendo los datos de la simulación que posteriormente se compararan con los resultados obtenidos con la medición in situ. Así comprobaremos los parecidos que puedan tener dos espacios de una misma tipología arquitectónica.

2.2.2. SOFTWARE DE SIMULACIÓN. ODEON Room Acoustics Program.

2.2.2.1. Fundamentos básicos

ODEON Room Acoustics Program, es un programa de simulación acústica que ha sido elaborado por el Departamento de Tecnología Acústica de la Universidad Técnica de Dinamarca y que actualmente pertenece a Brüel & Kjaer Sound&Vibration Measurement A/S. El propósito inicial, era el de realizar un software de predicción fiable de acústica de salas. Hoy en día, tanto ODEON como otros simuladores similares, se utilizan para una amplia gama de aplicaciones.

El principio de los algoritmos utilizados por ODEON, se construyeron sobre la base del trazado de rayos (“Ray tracing”) y del método origen de la imagen (“Image source method”).

“Ray tracing”: En este método de trazado de rayos, la aplicación principal es el rastreo de partículas. Los rayos se consideran portadores de placas de energía acústica que viajan alrededor de la habitación a lo largo de los rayos con la velocidad del sonido, y después de cada reflexión de la energía se reduce en función de las propiedades de absorción de las superficies. El total de energía en todas las partículas se puede mostrar como una función del tiempo siendo esta la función de decaimiento global de la habitación, de la que puede ser una estimación bastante precisa del tiempo de reverberación calculado. Este método tiene en cuenta la posición de la fuente, la ubicación de material absorbente en la sala, y el grado de dispersión, es decir, la falta de difusión en la habitación. Sin embargo, no hay punto de recepción, la decadencia de la energía se calcula en todo el volumen.

“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.

En 1984 los creadores del programa, seleccionaron el algoritmo del Método de Ray Tracing en lugar de otros métodos similares como la base para la simulación acústica de salas. El método de Ray Tracing surgió a través de diversos estudios en los campos de la óptica y la imagen. Posteriormente el campo de la simulación acústica se interesó por este método, resultando una opción muy conveniente, ya que con este método, los rayos pueden ser tratados como exploradores de la geometría de la sala, con el fin de encontrar información relevante. Y las superficies reflectantes, se tratan como transportadores de la información sobre la energía. Posteriormente se recopilan estos datos para el cálculo de la respuesta de la sala.

En 1990, se desarrolla un modelo híbrido que combinaba los métodos del trazado de rayos y del origen de la imagen. Los modelos híbridos se introdujeron para acomodar el trazado de rayos y el método de imagen de origen, combinando las mejores características de ambos métodos. La combinación de los dos métodos también proporciona un ahorro de tiempo de cálculo.

En 1992, se introdujo como una mejora sustancial el método de la fuente secundaria. El método de la fuente secundaria, se ha desarrollado como un modelo híbrido que se beneficia de la combinación de rayos de búsqueda y un nuevo método de fuentes secundarias para un cálculo más preciso de las reflexiones finales. Los rayos se consideran portadores de placas de energía acústica, que se reduce después de cada reflexión de los rayos de acuerdo a los coeficientes de absorción de las superficies, las fuentes secundarias se encuentran en cada punto de reflexión durante el trazado de rayos. Cada punto de recepción en la habitación, entonces recoge información sobre la energía de todas las fuentes secundarias visibles en la habitación. En combinación con el vector de dispersión basado en este método, que se ha demostrado ser muy eficiente, especialmente en geometrías complicadas.

En 1995 la dispersión vectorial fue implementando como un método más eficiente en el trazado de rayos. El método de dispersión vectorial fue la forma de combinar las indicaciones dispersas y especular de reflejos durante el trazado de rayos, con un coeficiente de dispersión típica moderada en las superficies, conduciendo a resultados estables y fiables. Con la ventaja que los rayos son relativamente pocos en comparación con el tradicional método de Monte Carlo para la dispersión, que necesita una gran cantidad de rayos.

2.2.2.2. Principales funciones proporcionadas por ODEON. El proceso de una simulación.

Odeon, posee unas potentes herramientas de cálculo además de una serie de utilidades para facilitar el diseño y el posterior análisis de la sala cuyo comportamiento acústico queremos simular. En este apartado describiremos las principales funciones utilizadas en Odeon, al mismo tiempo que explicamos brevemente como se llevan a cabo las simulaciones en este software.

Una vez realizado el fichero con la geometría de la sala de estudio, y ejecutado en el programa (observaremos una vista en 3D de la sala) podemos empezar a chequear posibles fallos en el modelado en 3D realizado de la sala. Con estos fallos en el modelado nos referimos a superficies duplicadas o por lo contrario la ausencia de las mismas principalmente.

Funciones de verificación del modelo:

Para la verificación del modelo tenemos funciones como “**3DView**”. Es una ventana con una vista tridimensional de la sala, la cual nos permite principalmente visualizar el modelo desde todas las posiciones posibles.

También encontramos otras opciones que permiten visualizar la sala en tres dimensiones, permitiendo recorrerla tanto desde el exterior como desde el interior. Muestra las distintas superficies con colores aleatorios cuando todavía no se han asignado los materiales a todas las superficies. Lo cual facilita el encontrar los agujeros y las superficies incorrectamente diseñadas del modelo.

Otra función muy útil es “**3D Investigate Ray Tracing**”. Sirve para detectar si los rayos lanzados en la simulación se escapan del recinto. Para poder ejecutarlo es necesario asignar previamente los materiales a todas las superficies de la sala y definir una fuente en el interior de la misma.

Consiste en una ventana donde se visualiza la sala y la fuente definida en ella. Desde la fuente serán lanzados tantos rayos como especifiquemos. Si la sala está perfectamente diseñada, todos los rayos y sus reflexiones permanecerán en el interior.

Es importante revisar las superficies del modelo de la sala, ya que tanto la superposición como la ausencia de ellas llevan a resultados incorrectos de la simulación.

Funciones de asignación de materiales:

Una vez corregidos los errores presentes en el modelo geométrico de la sala, se asignan los materiales a las distintas superficies definidas.

Si el modelo geométrico se realiza en Autocad, es conveniente asignar a los diferentes tipos de superficies o de acabados, diferentes capas. Así, cuando se exporta al Odeon, se podrá asignar directamente, a cada capa, el material que consideremos oportuno, de una manera rápida.

Para ello se utiliza la función de **“Materials List”**. Aquí Odeón proporciona una librería con una tabla de materiales básicos y sus respectivos coeficientes de absorción. Estos coeficientes son los correspondientes a las bandas de octava de 63 Hz hasta 8.000Hz, con valores comprendidos entre 0 y 1. También podemos modificar los coeficientes de dispersión y de transparencia de los materiales. El coeficiente de dispersión (**“Scattering coefficient”**) caracteriza la dispersión propia del material, así como la debida a la geometría de la superficie a la que se le asigna dicho material. Aunque sólo se define un valor de este parámetro para todas las bandas de frecuencia, en bajas frecuencias la dispersión está dominada por el fenómeno de la difracción debido al tamaño limitado de las superficies, mientras que en altas frecuencias el efecto dominante son las irregularidades de las superficies.

Esta lista de materiales puede ser editada y modificada, al igual que permite eliminar o crear materiales nuevos o con características específicas que no se encuentren en la biblioteca que aporta el programa. Excepto en tres materiales específicos, los cuales no se pueden modificar por sus características especiales. Estos materiales son:

- Material 0: tiene todos los coeficientes de absorción nulos. Asignándolo a una superficie, ésta deja de influir en los cálculos de los parámetros acústicos, siendo completamente transparente para los rayos que la atraviesan durante la simulación.
- Material 1: tiene todos los coeficientes de absorción igual a 1. Representa a un material totalmente absorbente, en el cual no se refleja ningún rayo. Se utiliza para simular aquellas situaciones en las que la fuente se encuentra al aire libre, donde la absorción es muy grande. Por ejemplo, asignando este material al techo de una sala, desaparecen las reflexiones de los rayos que chocan contra él. Por tanto, es similar a que dicho obstáculo no existiese y los rayos se perdiesen en el espacio. Precisamente será el que utilizaremos para introducirle al programa el aire, ya que el claustro está abierto en toda su parte superior.
- Material 2: tiene todos los coeficientes de absorción nulos. Es un material 100 % reflexivo, es decir, todos los rayos que chocan con este material son reflejados sin sufrir ni dispersión ni absorción. Se utiliza para definir reflectores en la sala.

Funciones de definición de los escenarios:

En este punto ya hemos asignado los materiales a las superficies correspondientes. Ahora, se diseñan los distintos escenarios de simulación que se consideren convenientes.

Para definir estos escenarios, principalmente hay que especificar el tipo y situación de fuentes y receptores, además de otras opciones de cálculo.

Para ello hay diversas funciones. Principalmente la **“Source Receiver List”**. Esta función muestra una lista de las fuentes y receptores que se encuentran en el modelo. En la lista se permite modificar los datos de las fuentes y receptores.

También es posible crear directamente fuentes y receptores, tanto puntuales, lineales como superficiales. La función para crear las puntuales, que son las que utilizaremos en nuestro caso, es **“Define a point source”**. Con esta función se definen las fuentes puntuales que queramos colocar en el interior del recinto de estudio. Para situar las fuentes en el interior del recinto se debe introducir sus coordenadas y su orientación.

Además, permite variar el valor de los parámetros de:

- Ganancia global (**“Overall Gain”**): Determina el nivel de potencia radiado por la fuente. Se expresa en decibelios.
- Directividad: Mide el nivel de potencia sonora radiado por la fuente.

Los tres tipos de fuentes poseen además los siguientes parámetros comunes:

1. Coeficiente de dispersión (**“Scattering Coefficient”**): se asigna el valor 1 para indicar que la radiación de la energía sonora sigue la ley de Lambert o el valor 0 cuando queremos que la fuente radie perpendicularmente al eje de la misma.
2. Ecuilización: permite ajustar la potencia sonora para cada banda de octava.
3. Retardo (**“Delay”**): se utiliza cuando hay varias fuentes activas y queremos retardar unas respecto a otras. Esto permite que los resultados aparezcan relativos a la primera reflexión procedente de una de las fuentes.

Por último, tenemos la función de **“Define a receiver”**, con el que definimos los receptores en distintas posiciones del recinto.

Después de definir las fuentes y los receptores, en el menú **“Room Setup”**, se permite modificar parámetros de cálculo de la simulación.

Algunos de estos parámetros son:

1. Longitud de la Respuesta Impulsiva (**“Impulse response length”**): Es un parámetro muy importante, pues establece el tiempo durante el que se va a calcular la respuesta de la sala. Se recomienda que tenga un valor comparable al del tiempo de reverberación para que sea posible calcular éste. Tiene un límite superior de 20.000 ms.
2. El número de rayos prefijado por Odeón suele ser suficiente, pero si en el modelo hay superficies con fuertes efectos desacopladores o el área de absorción no está uniformemente distribuida, tendremos que aumentar su valor. El máximo permitido es 999.999.

3. Método de dispersión (“Scattering method”): Encontramos dos tipos, Lambert o ninguno. Eligiendo Lambert hacemos que se tengan en cuenta los coeficientes de dispersión, introducidos durante la asignación de materiales a las distintas superficies. Si escogemos no aplicar ningún método de dispersión, el nuevo rayo seguirá una dirección especular.
4. Número de rayos tempranos dispersados (“Number of early scatter rays”): si este valor es mayor que 0, entonces las primeras reflexiones de las fuentes puntuales son divididas en dos partes: una reflejada y otra dispersada, según el coeficiente de dispersión de la superficie con la que choca. Así, por ejemplo, si el coeficiente de dispersión es 0.7 y el número de rayos dispersados es 100 (valor recomendado), entonces el número real de rayos usados para simular la dispersión será 70. Por tanto, cuanto mayor sea la energía dispersada mayor será el número de rayos dispersados.
5. Orden de transición (“Transition order”): fija qué método se va a aplicar a los rayos reflejados. Así, si el orden de reflexión de un rayo es menor o igual al orden de transición se aplicará el método “Early ray”, sino se utilizará el método “Late ray”.

Se aconseja usar un orden 1, pero puede tomar otros valores más óptimos que tengan en cuenta la forma de la sala simulada:

- Orden 0: son recintos muy complicados, con predominio de superficies curvadas y sin límite de tamaño en las subdivisiones de las superficies integrantes. Por ejemplo: catedrales.
 - Orden 1: el número de superficies no supera las 1000 o 2000. Por ejemplo: teatros de ópera.
 - Orden 2: son salas relativamente sencillas con menos de 50 o 100 superficies. Por ejemplo: sala de conciertos.
 - Orden 3 o 4: son habitaciones básicamente rectangulares, modeladas con menos de 50 superficies. Un orden superior a los indicados no se debería usar a menos que el objetivo sea analizar problemas de eco. De este modo, aumentan el orden y aumentan el número de reflexiones de mayor orden visibles en el reflectograma.
6. Máximo orden de reflexión (“Max. reflection order”): sirve de criterio de parada para los rayos que son reflejados en el interior de la sala, es decir, una vez que es alcanzado este orden de reflexión los rayos desaparecen sin crear nuevas reflexiones. El máximo valor permitido es 2000.
 7. Resolución de la respuesta impulsiva (“Impulse response resolution”): fija el tamaño de las divisiones horizontales del histograma que recoge la energía sonora de las reflexiones (eje vertical) frente al tiempo (eje horizontal). Se aconseja un valor aproximado de 10 ms.

8. Absorción angular (“Angular absorption”): cuando se habilita esta opción se tienen en cuenta en los cálculos los coeficientes de reflexión angulares. El método aplicado considera, no sólo los coeficientes de absorción de la superficie, sino también su tamaño y el ángulo de incidencia de los rayos que chocan con ella, para calcular la dirección y energía de los nuevos rayos generados por reflexión y dispersión. Podemos elegir entre tres posibles valores: “Disabled”, inhabilitamos esta opción; “All materials”, aplicamos esta opción a todas las superficies; “Soft materials only”, utilizamos este método sólo en las superficies de materiales ligeros. Este último valor es tan rápido como el primero y casi tan fiable como el segundo. Debemos ser cuidadosos al usar esta función, puesto que en ciertas ocasiones empeora los resultados en vez de mejorarlos.

9. Diezmado de los rayos tardíos (“Decimate late rays”): esta opción está activada por defecto. Y tiene relevancia en las fuentes puntuales, en las que los rayos con orden de reflexión mayor al indicado en el orden de transición son eliminados. Se utiliza esta función para indicar a Odeón que del número de rayos establecido, sólo una pequeña porción será utilizada para generar la cola reverberante. Esto se hace así porque reduce el tiempo de cálculo y la fiabilidad conseguida de la reverberación es suficiente.

10. Densidad deseada de reflexiones tardías (“Desired late reflection density”): este parámetro es utilizado exclusivamente para las respuestas puntuales múltiples (“Multi Point Response”) y simples (“Single Point Response”). La respuesta de rejilla (“Grid Response”) tiene otra entrada de este parámetro. Permite establecer la densidad de reflexión que se debe alcanzar con las reflexiones tardías. Se debe escoger un valor adecuado que se pueda alcanzar y que evite la aparición de picos en la respuesta de la sala, en caso de que esté desactivada la opción “Decimate Late Rays” o el número de rayos sea bajo. En general, un valor alto ralentiza los cálculos, pero conduce a resultados fiables, con ausencia de picos en la respuesta. El máximo valor permitido es 1000 reflexiones / ms.

11. Suavizado del cociente entre las reflexiones tempranas y tardías (“Smooth early/late ratios”): esta opción suele estar activa por defecto y consiste en un promediado de algunos parámetros acústicos simulados. Se pretende con ello simular el filtrado presente en las medidas reales y corregir el hecho de que Odeón trabaja con reflexiones discretas, mientras que en la realidad son continuas. Además, con esta función activa se contrarrestan las imperfecciones del modelo que conducen a situar las reflexiones en posiciones distintas de las reales.

El valor de todos estos parámetros vienen prefijados por el propio programa, con cifras recomendables, aunque en ocasiones es posible que se tenga la necesidad de modificarlos según el tipo de simulación o el tipo de recinto estemos estudiando.

Aquí también permite el Odeon, definir las características del medio en el que se propaga el sonido. Por un lado, la temperatura y la humedad relativa del aire que

influyen en la velocidad y la atenuación del sonido. Y por otro, los niveles del ruido de fondo, los cuales se detallan para todas las bandas de frecuencia en dB.

Funciones de cálculo del tiempo de reverberación:

Como ya comentamos en la introducción de este apartado 2.2.1, definidos los escenarios de simulación, debemos comprobar el valor del RT de la simulación, respecto al real, para verificar que la elección de los materiales de las superficies ha sido la correcta.

Para ello utilizamos la función **“Quick Estimate Reverberation”**: Esta función, presente en la ventana **“Materials List”**, estima el tiempo de reverberación mediante las fórmulas estadísticas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades³. No nos proporciona los valores finales de la simulación, sino una aproximación, con rapidez de cálculo, para validar que los materiales elegidos nos proporcionaran los resultados buscados. Junto a estas tres expresiones aparecen otras tres que son modificaciones de las primeras y que tienen en cuenta la forma de la sala. En consecuencia, sus resultados son más fiables.

Seguidamente, una vez se tenga el modelo validado, se calcula la respuesta global de la sala para una fuente dada, con el **“Global Estimate Reverberation”**. Con este botón se inicia el cálculo de la respuesta global de la sala para una fuente dada. Aunque las curvas serán similares para las distintas fuentes definidas, a no ser que haya efectos desacopladores en la geometría del modelo.

Cuando la curva está estable, paramos el proceso de cálculo mediante el botón **“Derive results”**.

Una vez terminado este proceso el programa nos dará, entre otros datos, la siguiente información:

- **“Energy Curves”**: contiene 8 curvas correspondientes a las 8 bandas de frecuencia. Y representan la variación temporal de la energía sonora presente en la sala después de que la fuente seleccionada cese su emisión.
- **“Estimated Reverberation Times”**: es un diagrama de barras en el que se visualizan los tiempos de reverberación (T_{20} y T_{30}), para cada banda de frecuencia.
- **“Free Path Distribution”**: es una curva que contiene la distribución de la longitud de la trayectoria trazada por los rayos antes de chocar con alguna pared, durante el proceso de **“Ray Tracing”**. Sólo aporta información acerca de la geometría de la sala, no sobre sus características de absorción, ni sobre cómo se distribuye la energía sonora.

³ *ABC de la acústica arquitectónica*. España: Grupo Editorial CEAC.

Funciones de respuesta:

Con el RT calculado, podemos analizar las características acústicas del recinto de estudio que nos proporciona el programa. Odeon permite definir 20 simulaciones distintas ("**Job List**"). En cada simulación, como mínimo, se debe haber definido una fuente puntual y tener asignada una orientación a todos los receptores definidos.

Posteriormente para cada una de las simulaciones creadas, se puede calcular los siguientes parámetros acústicos y datos sobre el recinto. Permite calcular para un único receptor, con la función "**Single Point Response**", donde permite opciones de auralización o con la función "**Multi Point Response**", donde permite obtener respuestas puntuales de todos los receptores definidos en la sala. Esta función, fundamentalmente nos muestra los parámetros acústicos y el nivel de ruido a través de las siguientes gráficas:

- "Energy parameter curves": dos curvas de los parámetros energéticos. Una de ellas muestra el parámetro seleccionado, independiente de la frecuencia y la otra dependiente de la frecuencia. En esta última se puede ver la información para un solo receptor, o bien, verla en 3D para todos los receptores. También se puede obtener el resultado exacto de algún parámetro, pulsado encima de las barras de la gráfica.
- "Parameter versus distance": se calcula cuando en la simulación hay una única fuente puntual activa. Representa un parámetro seleccionado en función de la distancia o en función del $10\log_{10}$ (distancia).
- "Statistics": obtiene el valor máximo, mínimo y medio para un parámetro dado.
- "Spatial decay curves": la tasa de decaimiento espacial simboliza la caída del SPL frente al cuadrado de la distancia. Su parámetro asociado es DL_2 , que se calcula siguiendo la norma ISO 14257.
- "Noise control": simula en un diagrama de barras 3D los niveles de ruido causados por las fuentes activas, en las posiciones de los distintos receptores. Podemos desplazarnos a lo largo de esta gráfica hasta tener en primer plano el receptor que deseamos analizar. De este modo, aparecen en una gráfica adicional los niveles de ruido para las 8 bandas de frecuencia de este receptor. En ella se revela de qué fuentes procede el mayor ruido. Eliminando o modificando las fuentes más perjudiciales, podemos mejorar las condiciones auditivas en los distintos receptores.
- "Energy parameters": contiene un informe de todos los parámetros calculados.

- "3D sources and receivers": señala las fuentes activas y los receptores presentes en la sala.

Además Odeon, nos puede realizar mapas de color ("**Grid Response**") en los que se plasman los parámetros acústicos para una cuadrícula, previamente definida, que contiene varios receptores con distancias prefijadas entre ellos. Hay un mapa para cada una de las bandas de frecuencia. El programa permite tanto definir la rejilla (donde estarán los receptores) como la escala de color.

Funciones de auralización:

Odeón realiza una auralización binaural (la señal auralizada tiene dos componentes, canal izquierdo y derecho) mediante la convolución de una señal de excitación con la respuesta impulsiva del canal izquierdo y del canal derecho, respectivamente.

Las funciones que proporciona Odeon relacionadas con la auralización, principalmente son la "**Auralisation setup**", con la que accedemos a los parámetros de filtrado; la "**Auralisation display**", que contiene los elementos básicos para realizar la auralización; "**Play Wave**", útil para analizar la calidad de la respuesta simulada, ya que es posible que los parámetros acústicos sean aceptables, y sin embargo, subjetivamente el sonido suene poco real; y por último la "**Linear equalisation**", función que se utiliza solo cuando el objeto de la simulación es exclusivamente la auralización con fuentes naturales como la voz, de lo contrario hay que asegurarse de que la opción este desactivada.

2.2.2.3. Métodos y parámetros simulados

Parámetros acústicos del Odeon.

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

1. Tiempo de reverberación

Odeon, presenta dos formas para calcular el RT.

"**Quick Estimate**" que está disponible en la lista de materiales, es el método de prueba que permite una rápida evaluación de los efectos del cambio de materiales. Este método debe ser considerado sólo como una herramienta para los resultados preliminares.

"**Global estimate**" es un método más preciso que permite una alta calidad en los resultados.

En "Quick Estimate" se obtienen 6 valores con aproximaciones estadísticas basadas, tres en las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades⁴, incluyendo la influencia del aire y los otros tres valores con las fórmulas modificadas para considerar

⁴ ABC de la acústica arquitectónica. España: Grupo Editorial CEAC.

la forma del recinto simulado que, por tanto, son más fiables. Estas seis estimaciones son calculadas para las 8 bandas de frecuencia.

Los tiempos de reverberación obtenidos con las expresiones de Sabine y Eyring, presuponen condiciones de campo sonoro difuso, es decir, que todas las superficies tienen las mismas propiedades de absorción (siendo la fórmula de Eyring, una modificación de la de Sabine para aquellos casos en la que esta no es válida).

El tiempo de reverberación calculado según Arau-Puchades considera las variaciones de absorción en todas las direcciones (x,y,z).

En las tres fórmulas modificadas se utiliza el coeficiente de absorción medio, calculado a partir de la probabilidad de que los rayos emitidos por la fuente activa choquen contra cada una de las superficies.

En "Global Estimate" se calculan dos valores más fiables del tiempo de reverberación: 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 (RT), 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 varía:

- T_{20} : desde -5 dB hasta -25 dB (caída de 20 dB). Este tiempo multiplicado por 3 nos da la aproximación del tiempo de reverberación denominada T_{20} .
- T_{30} : desde -5 dB hasta -35 dB (caída de 30 dB). Este tiempo multiplicado por 2 nos da la aproximación del tiempo de reverberación denominada T_{30} .

Ambas medidas se toman a partir de -5 dB, para evitar transitorios tras el cese de emisión de la fuente.

2. 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.

3. 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.

El programa lo calcula de dos formas diferentes, según esté activada o no la función de "Smooth early/late ratios", que realiza el cálculo como un promedio:

- Con el promedio desactivado:

$$D \equiv \frac{E_{0-500ms}}{E_{0-\infty}}$$

Ecuación 36

- Con el promedio activado

$$D \equiv \frac{1}{3} \times \frac{E_{0-45ms} + E_{0-50ms} + E_{0-55ms}}{E_{0-\infty}}$$

Ecuación 37

Puesto que el programa de simulación trabaja con valores discretos, las contribuciones energéticas se calculan como la suma de la energía procedente de las reflexiones recibidas durante el tiempo indicado. Esto es:

$$E_{a-b} = \sum_{i=a}^b E_i$$

Ecuación 38

4. Claridad musical (C_{80})

También está relacionada con las primeras reflexiones. Y 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 períodos de tiempo a partir de las curvas energía-tiempo y reemplaza su valor en estas dos expresiones:

- Con el promedio desactivado:

$$C_{80} = 10 \log_{10} \left(\frac{E_{0-80ms}}{E_{0-\infty}} \right)$$

Ecuación 39

- Con el promedio activado:

$$C_{80} \equiv 10 \log_{10} \left(\frac{E_{0-72ms} + E_{0-80ms} + E_{0-88ms}}{E_{0-72ms} + E_{0-80ms} + E_{88ms-\infty}} \right)$$

Ecuación 40

5. Eficiencia lateral (LF_{80})

Como vimos en el apartado 2.3. 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.

- Con el promedio desactivado:

$$LF_{80} \equiv \frac{\sum_{t=5ms}^{80ms} E_t \times \cos^2(\beta t)}{E_{0-80ms}}$$

Ecuación 41

- Con el promedio activado:

$$LF_{80} \equiv \frac{\sum_{t=5ms}^{72ms} E_t \times \cos^2(\beta t) + \sum_{t=5ms}^{80ms} E_t \times \cos^2(\beta t) + \sum_{t=5ms}^{88ms} E_t \times \cos^2(\beta t)}{E_{0-72ms} + E_{0-80ms} + E_{0-88ms}}$$

Ecuación 42

6. Nivel de presión sonora (SPL)

El programa nos proporciona tres valores relacionados con este parámetro:

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

$$SPL \equiv 10 \log_{10}(E_{0-\infty})$$

Ecuación 43 en dB

"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"(LLSPL_A): 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:

- Con el promedio desactivado:

$$LLSPL_A \equiv 10 \log_{10} \left[\sum_{n=1}^{Nbandas} \sum_{t=80ms}^{\infty} E_t \times \cos^2(\beta t) \times A_n \right]$$

Ecuación 44 en dB.

- Con el promedio activado:

$$LLSPL_A \equiv 10 \log_{10} \left[\sum_{n=1}^{N_{bandas}} \left[\sum_{t=72ms}^{\infty} E_t \times \cos^2(\beta t) + \sum_{t=80ms}^{\infty} E_t \times \cos^2(\beta t) + \sum_{t=88ms}^{\infty} E_t \times \cos^2(\beta t) \right] \right] \times A_n$$

Ecuación 45 en dB.

7. 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. Hay que tener en cuenta en el cálculo que:

- Tiene en cuenta el ruido de fondo.
- Si posteriormente hay que compara su valor con medidas realizadas "in situ" la directividad de la fuente simulada y real deberán ser las mismas.

8. 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" (DL₂): índice de decaimiento espacial. Mide la variación de la presión sonora al duplicar la distancia. Y se evalúa para las 8 bandas de frecuencia comprendidas entre 63 Hz y 8 KHz.

"A-weighted Rate of Spatial Decay" (DL₂): índice de decaimiento espacial, corregido según la ley A, de forma que los niveles medidos coincidirán con la sensación de sonoridad a las distancias indicadas. Sólo se toman valores para las bandas de octava desde 125 Hz hasta 4 KHz.

9. Tiempo central (T₃)

"Centre time" es el momento de primer orden del área de la curva de decaimiento energético. Su valor es inversamente proporcional a la nitidez del sonido, calculándola Odeon con la fórmula:

$$T_s \equiv \frac{\sum_{t=0}^{\infty} t \cdot E_t}{E_{0-\infty}}$$

Ecuación 46 en ms.

10. 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 sí 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:

$$ST_{early} \equiv \frac{E_{20-100ms}}{E_{0,10ms}}$$

Ecuación 47 en dB.

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

$$ST_{late} = \frac{E_{100-1000ms}}{E_{0-10ms}}$$

Ecuación 48 en dB.

“Total support” (ST_{total}): mide la influencia de la sala en los músicos. Y su valor debería ser superior a -12 dB.

$$ST_{total} = \frac{E_{20-1000ms}}{E_{0-10ms}}$$

Ecuación 49 en dB.

2.2.2.3.2. Métodos de cálculo del Odeón.

En este apartado se analizan los distintos métodos en que se basan las funciones suministradas por Odeón:

- a) Odeón, para el cálculo de las respuestas puntuales, simple, múltiple y rejilla, se divide en dos partes:
 1. Se trazan los rayos emitidos por la fuente o fuentes activas y se estiman todas las reflexiones que se generan al chocar los rayos con las distintas superficies. Esta parte es independiente de los receptores definidos. El criterio de parada es el orden de reflexión, fijado en el parámetro "Max.

Reflection Order" o la longitud del camino recorrido por el rayo, limitado por "Impulse Response Length". Una vez finalizados los cálculos, Odeón almacena en un fichero el historial de los rayos, es decir, puntos y ángulos de incidencia, número de choques con cada superficie, fuentes imagen creadas, orden de reflexión de los rayos, etc.

2. Se evalúa para cada receptor, qué rayos contribuyen a la curva de decaimiento energético global. En caso de que haya varias fuentes activas, el resultado en cada receptor será la suma de todas las contribuciones procedentes de cada fuente. Y a partir de dicha curva se estiman todos los parámetros acústicos y todas las gráficas disponibles en Odeón.

Según el tipo de fuente que tengamos introducida en la simulación, Odeón utilizará un método diferente para el trazado de rayos de cada una.

Para fuentes puntuales utiliza un método híbrido (combinación entre "Early Ray Reflection" y "Late Ray Reflection") y para fuentes lineales y superficiales el método de "Late Ray Reflection".

Metodo Early Ray Reflection:

Este método es usado para obtener las primeras reflexiones de las fuentes puntuales. Dentro de esta categoría, entran todos los rayos cuyo orden de reflexión es menor o igual al orden de transición definido en el "Room Setup".

También recibe el nombre de 'Método de la Fuente Imagen Modificado', puesto que considera además de las reflexiones especulares, el fenómeno de dispersión asociado a la geometría específica del modelo.

El procedimiento seguido es el siguiente:

Inicialmente, la fuente puntual emite rayos en todas las direcciones de forma que el primer rayo es lanzado verticalmente hacia abajo y el último hacia arriba, consiguiendo que la distribución final sea uniforme.

Cuando uno de estos rayos impacta con una superficie del modelo, se calcula su fuente imagen correspondiente. Ésta queda definida por el ángulo de incidencia y la longitud del trayecto del rayo incidente.

Cada fuente imagen contribuye con un rayo reflejado según la ley de Snell y con un árbol de dispersión. Éste es simulado por Odeón como un conjunto de fuentes secundarias distribuidas sobre la superficie que originó la fuente imagen, emitiendo tantos rayos como indique el producto del coeficiente de dispersión de la superficie por el parámetro "Number of early scatter rays".

Cada uno de estos rayos genera a su vez otra fuente secundaria cuando choca con otra superficie. Por ello, para poner fin a este proceso, se trazan sólo los rayos desde el orden de reflexión inicial (el orden que tiene el rayo que originó la fuente imagen) hasta el orden de transición ("Transition order" en "Room Setup").

A su vez, los rayos generados por cada fuente imagen presentan una atenuación que tiene en cuenta:

- La directividad de la fuente primaria.
- Los coeficientes de reflexión de la superficie que la generó. Se consideran también las componentes angulares si la opción "Angular Absorption" está activa en "Room Setup".
- La absorción del aire.
- La atenuación con la distancia recorrida desde la fuente primaria hasta el receptor.
- Las pérdidas de difracción debidas al tamaño limitado de las superficies.
- Las pérdidas de dispersión, que tienen en cuenta el orden del rayo reflejado. Así, si el coeficiente de dispersión es α , la energía especular será multiplicada por un factor $(1 - \alpha)$ para un rayo de primer orden de reflexión, por $(1 - \alpha)^2$ si es de segundo orden, etc.

Por último, al analizar las reflexiones recibidas en cada receptor, Odeón comprueba qué fuentes imagen son visibles, pues sólo éstas aportan reflexiones válidas a los cálculos. Son fuentes imagen visibles aquellas que no encuentran paredes ni ningún obstáculo interfiriendo el trayecto de sus rayos hasta el receptor y además el receptor cae dentro del ángulo de apertura formado por el rayo reflejado y la superficie de choque.

Veamos un ejemplo para entenderlo mejor:

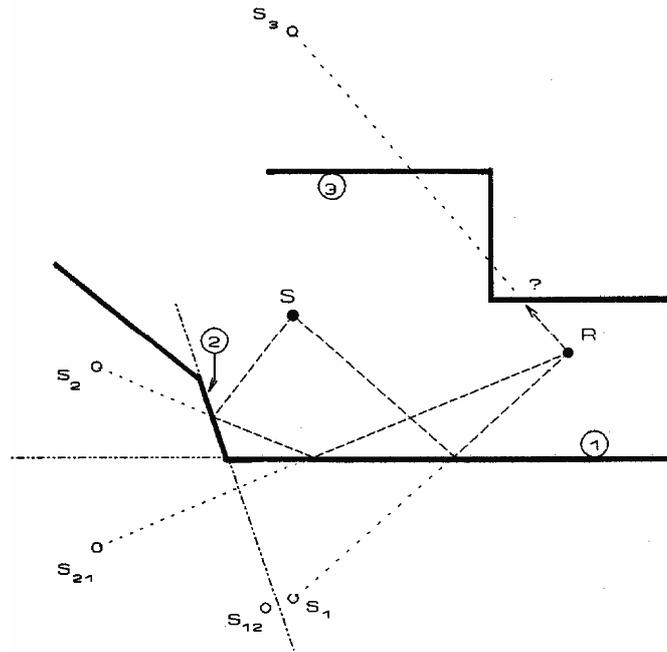


Fig. 26 Ejemplo de la visibilidad de las fuentes.
Fuente: (ODEON Room Acoustic Software, 2009)

Podemos observar en el ejemplo como las imágenes S_1 y S_{12} son visibles desde el receptor R, sin embargo S_2 , S_3 y S_{21} no lo son.

Método Late Ray Reflection:

Este método es el único que se aplica a las fuentes superficiales y lineales durante el proceso de trazado de rayos. Sin embargo, para las fuentes puntuales sólo maneja los rayos cuyo factor de reflexión está por encima del valor fijado en el parámetro "Transition order", presente en "Room Setup", y que representan las reflexiones tardías o cola reverberante.

En ambas situaciones, cada vez que un rayo choca contra una superficie de la sala, se crea en el punto de impacto una fuente secundaria. Esta fuente emite un rayo en una dirección que varía según esté activo o no el método de dispersión Lambert en "Room Setup". Si no está activo, el rayo emitido cumplirá la ley de Snell. Pero si se utiliza la dispersión de Lambert, la dirección del nuevo rayo se calcula teniendo en cuenta el coeficiente de dispersión de la superficie.

Por ejemplo, si el coeficiente de dispersión vale 0.7, la energía del nuevo rayo se distribuye en dos componentes: un 30% constituye la componente según la dirección especular y el 70% restante sigue la dirección de dispersión según la distribución de Lambert, es decir, la energía dispersada es proporcional a $\cos \theta$. Si el coeficiente vale 0, toda la energía será reflejada y si vale 1, será sólo dispersada según la ley de Lambert para dispersiones ideales, $\sin 2\theta$.

Al terminar, Odeón comprueba qué fuentes secundarias son visibles desde el receptor, descartando las que no lo son. Y aplica a cada nuevo rayo una atenuación debida a los siguientes factores:

- La directividad de la fuente primaria.
- El factor de directividad de las fuentes secundarias $4\cos\theta$, según la ley de Lambert.
- Los coeficientes de reflexión de la superficie que la generó. Se consideran también las componentes angulares si la opción "Angular Absorption" está activa en "Room Setup".
- La absorción del aire.
- La atenuación con la distancia recorrida desde la fuente primaria hasta el receptor.

En la realidad la propagación del sonido conduce a un número exponencialmente creciente de reflexiones, sin embargo, en la simulación interesa acotar el tiempo de cálculo. Por este motivo, el proceso de trazado de rayos cumple que la densidad de reflexión durante todo el tiempo de simulación, es siempre la misma.

Es un método óptimo en comparación con otros más tradicionales como el piramidal, pues para que una reflexión sea detectada por el receptor, no es necesario que pase muy próxima a él. Como consecuencia, con un número no muy grande de rayos emitidos se consigue un número aceptable de reflexiones en el receptor, pudiendo obtener resultados estadísticamente fiables.

b) BRIR:

Se calcula cuando se activa la opción de auralización durante la ejecución de la respuesta puntual simple. Y consiste en un proceso de filtrado de cada una de las reflexiones obtenidas, que para una respuesta puntual típica, pueden llegar a ser unas 100.000.

Inicialmente, a cada una de las reflexiones se les aplica, si corresponde, un desplazamiento de fase, en base a los coeficientes de absorción y al tamaño de la última superficie reflectante. A continuación, son filtradas a través de 9 filtros de banda de octava (filtros Kaiser-Bessel, siendo el 90 extrapolado). Y finalmente, el resultado es convolucionado con los dos filtros direccionales, correspondientes a cada oreja (filtros HRTF). Sumando la salida para cada reflexión recibida en un receptor concreto, se obtiene la respuesta impulsiva binaural de la habitación.

c) Quick Estimate:

Calcula las estimaciones del tiempo de reverberación de las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades⁵, obteniendo el coeficiente medio de absorción de la sala.

⁵ *ABC de la acústica arquitectónica*. España: Grupo Editorial CEAC.

Para ello, no se limita a multiplicar los coeficientes de absorción de cada superficie por su área, sino que emite rayos o "partículas", que se propagan por la habitación empleando el método "Late ray reflection", ya comentado.

Durante la propagación de estas partículas, se contabiliza el número de veces que chocan contra cada superficie. Así, si una superficie no es golpeada por uno de estos rayos, no será incluida en los cálculos. Y cuantas más reflexiones procedan de una superficie, mayor peso tendrá en la media del coeficiente de absorción.

Son calculadas dos medias del coeficiente de absorción:

- Clásica:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_i S_i \alpha_i}{\sum_i S_i}$$

Ecuación 50

- Modificada:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_i H_i \alpha_i}{\sum_i H_i}$$

Ecuación 51

siendo: S_i : área de la superficie i .
 α_i : coeficiente de absorción de la superficie i .
 H_i : no de veces que la superficie i es golpeada.

La primera expresión es utilizada en las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades⁶. Y sólo las superficies que fueron detectadas durante el trazado de rayos aparecen en el sumatorio. Por este motivo, el tiempo de reverberación estimado corresponderá a un subvolumen.

La segunda media aparece en las versiones modificadas. En ella se estima la probabilidad de que cada superficie refleje las partículas durante el trazado de rayos, mediante la obtención de H_i . De este modo, se tiene en cuenta la geometría del modelo y conduce a una mejor aproximación del tiempo de reverberación.

En ambos casos, se utiliza como valor del volumen, el calculado a partir de la expresión:

⁶ ABC de la acústica arquitectónica. España: Grupo Editorial CEAC.

$$V = \frac{S \cdot L}{4}$$

Ecuación 52

siendo: S: área total de las superficies activas, no transparentes. Se calcula como la suma de las áreas de las superficies detectadas durante el trazado de rayos. Sólo se considera un lado de las superficies.

L: camino libre medio o "Mean Free Path". Es el promedio de la distancia recorrida por los rayos sonoros entre reflexiones consecutivas. Depende de la forma de la habitación y de la distribución de las direcciones seguidas por las reflexiones.

Esta aproximación del volumen es bastante aceptable, excepto en aquellas situaciones en las que hay muchas superficies (como reflectores, ventanas, etc.) definidas sobre las paredes limítrofes o hay superficies que quedan fuera de la habitación; o bien, cuando hay paredes que tienen ambos lados expuestos a la habitación. En el primer caso, supondrá una subestimación, y en el segundo, una sobreestimación. Para estos modelos podremos definir manualmente el volumen. Sin embargo, la absorción del aire se considera sólo al utilizar el volumen estimado.

Los resultados son presentados cuando se alcanzan valores estables, esto es, cuando al menos 50 partículas emitidas conducen a un tiempo de reverberación dentro de un margen de error del 1%.

Todos los datos son almacenados, de manera que si se modifican las propiedades de absorción de una superficie, sólo se rehacen los cálculos necesarios. Esto permite investigar el efecto sobre el tiempo de reverberación, al usar distintos materiales en las superficies, sin emplear mucho tiempo de simulación.

El inconveniente es que asume condiciones de campo difuso, es decir, que la distribución del campo sonoro es uniforme en la sala, independientemente de la fuente seleccionada. Esto no es cierto en habitaciones con una absorción desigualmente distribuida o con efectos desacopladores, como corredores conectados o nichos.

d) Global Estimate:

Calcula los parámetros T_{30} y T_{20} a partir de la curva de decaimiento energético global, que es representada para las 8 bandas de frecuencia al terminar la simulación.

La adquisición de dicha curva comienza por emitir partículas desde la fuente escogida y reflejarlas en las paredes de la sala según el método "Late ray reflection".

A medida que estos rayos avanzan por la habitación, sufren pérdidas de energía debidas a los coeficientes de absorción de las paredes con las que chocan y a la absorción del aire, particularmente importante en altas frecuencias.

La propagación de estos rayos finaliza cuando se alcanza la longitud de la respuesta impulsiva o el orden de reflexión máximo, que son dos parámetros de configuración definidos en la ventana "Room Setup".

Sin embargo, se seguirán lanzando partículas desde la fuente hasta que detengamos el proceso. En ese momento, las contribuciones de todos los rayos son sumadas en función del tiempo.

Cuanto más tardemos en interrumpir la simulación, mayor será el sumatorio y mejor será la aproximación de la curva energía-tiempo. Siendo 35 dB, la mínima caída necesaria para obtener los parámetros acústicos T_{30} y T_{20} .

Su representación gráfica es previamente integrada hacia atrás, para corregir los efectos del truncamiento temporal.

No obstante, a pesar de ser una aproximación, sus resultados son más realistas que los devueltos por la función "Quick Estimate", ya que aquí se tiene en cuenta la distribución de la absorción y la geometría de la sala.

Así, por ejemplo, cuando la absorción se concentra en el techo y las fuentes están en el suelo, "Global Estimate" devuelve valores mayores e incluso pueden duplicar a los calculados en "Quick Estimate". Sin embargo, en auditorios donde la audiencia representa la máxima absorción y está próxima a la fuente, los valores T_{30} y T_{20} estiman un tiempo de reverberación menor.

e) Cobertura del reflector:

Mediante el despliegue de 25.000 rayos desde una fuente, se investiga la cobertura que ofrece al definir reflectores en el diseño.

Si se trata de una fuente puntual, emplea el método de reflexión de fuente imagen y si la fuente es lineal o superficial, obtiene las reflexiones a través del método "Late ray".

En cualquier caso, si el método de dispersión de Lambert es seleccionado en "Room Setup", las fuentes lineales y superficiales emitirán energía dispersada según la distribución de Lambert. Y en el caso de las fuentes puntuales, las reflexiones tendrán en cuenta los coeficientes de dispersión de los reflectores, si el orden de transición es cero.

3. CAPÍTULO 3 ESTUDIO DEL CASO

3.1. INTRODUCCIÓN

A continuación se realiza una descripción del proceso por el cual se han conseguido los resultados obtenidos. Este estudio acústico se realizará sobre el Claustro del Edificio de La Nau de la Universitat de Valencia, siendo el objeto del proyecto el estudio de las condiciones de audición en espacios claustros valencianos.

En primer lugar se realizará una explicación histórica del Edificio La Nau, y concretamente de su claustro, siendo este un edificio con mucha importancia durante muchos siglos para la sociedad Valenciana, albergando todos los estudios superiores universitarios en él.

Después se explicará cómo lo encontramos en su estado actual después de sufrir una reforma muy importante en el año 1997, ya que alcanzaba niveles muy altos de deterioro.

A continuación se aplicaran los conceptos y la metodología de la simulación vistos en el Capítulo 2, con el fin de obtener unos resultados con los que poder sacar las conclusiones del proyecto comparándolos con los datos obtenidos a través de distintas bibliografías sobre los valores más adecuados de los parámetros acústicos, para un recinto donde se vayan a realizar actuaciones musicales.

Y saber si la simulación podemos darla como válida después de comparar las desviaciones entre los datos reales y simulados, ya que deben encontrarse del rango que marca la norma UNE-EN ISO 3382.

3.2. EDIFICIO LA NAU DE LA UNIVERSITAT DE VALENCIA. EL CLAUSTRE.

En el siguiente apartado se realiza una reseña histórica del edificio, seguida de un resumen sobre el estado actual en que se encuentra el claustro después de la intervención, ya que se producen cambios de materiales y revestimientos que se deben tener en cuenta para la realización del modelo y la posterior simulación.

HISTORIA DEL EDIFICIO DE LA NAU, UNIVERSITAT DE VALENCIA.

Si bien desde el siglo XIII existieron en Valencia casas de estudios superiores, sólo a principios del siglo XV se logró agruparlos en un Estudi General con estatutos aprobados (1412) por el gobierno municipal y el obispo Hugo de Lluçà. Se establecieron en unos locales junto a la iglesia de San Lorenzo, aunque la libertad de enseñanza contenida en los

Furs permitió la continuidad de escuelas en otros lugares.

A finales del siglo, la rica y pujante sociedad valenciana de la época desea elevar estos estudios al rango de universidad y así, el 30 de abril de 1499, los jurados redactaban unas constituciones que preveían obtener el poder de conferir grados académicos. Una bula del papa Alejandro VI Borja del 23 de enero de 1501 reconocía la nueva universidad y disponía que el arzobispo fuese su canciller para otorgar los grados de bachiller y doctor en nombre de la autoridad pontificia. En una segunda bula, encargaba al arcediano mayor y al deán y cabildo catedralicio el cuidado de aplicar lo dispuesto en la anterior. El 16 de febrero de 1502, Fernando el Católico confirmaba esta fundación.

Configurada como una universidad municipal, según el modelo arraigado en la Corona de Aragón, el Consell General de la Ciutat demostró su poder sobre el Estudi General asumiendo su patronato o derecho de nombramiento de sus componentes, ya que cargaba con la financiación de salarios y gastos.



Imagen 1: Retratos de Alejandro VI y Fernando el Católico, Parainfo de la Universidad de Valencia. Fuente: Libro Edificio de La Nau

Uno de los primeros rectores de la Universitat fue Luis Navarro (1521), que había fundado un beneficio en la capilla universitaria de la Sapiencia, remodelándola y costeando el retablo con la imagen de María entre san Lucas y san Nicolás, obra del pintor Nicolás Falcó (1517).

Cuando se fundó la Universitat, dominaba en Europa el humanismo italiano y las tendencias nominalistas que venían de París y Oxford. El nombramiento en 1525 de Juan de Salaya como rector perpetuo hasta 1558 absorbió los fondos de varias cátedras que fueron suprimidas, empobreciendo y reduciendo el Estudi y reforzando el poder del rector en la designación de los profesores y el mantenimiento de la disciplina exterior.

En ese tiempo fue la Facultad de Medicina la que adquirió más relieve con las enseñanzas de Lluís Alcanyís, autor de la obra pionera sobre sanidad pública Regiment preservatiu e curatiu de la pestilència. Alcanyís había fundado en 1462 un colegio de

cirujanos. Las disecciones anatómicas de Pere Ximeno y Lluís Collado, discípulos de Andrea Vesalius, y la cátedra de “Herbes”, en la que destacaría Joan Plaza, creador de un huerto botánico para las prácticas, convirtieron a Valencia, que llegó a tener siete cátedras de medicina en la segunda mitad del siglo XVI, en avanzada del humanismo médico europeo.

El Consell Municipal de Valencia no emprendió la construcción de un edificio de nueva planta para el Estudi General, sino que se limitó a regularizar y ennoblecer unas construcciones preexistentes que había adquirido: una casa y huertos comprados el 1 de abril de 1493 a Isabel Saranyó que recaerán a las actuales calles de la Nave, de la Universidad y de Salvá, cuya entrada principal se abría ante una plazoleta. Para adaptar este edificio se recurrió a Pere Compte, con la ayuda de “mestre Martí obrer de vila”.

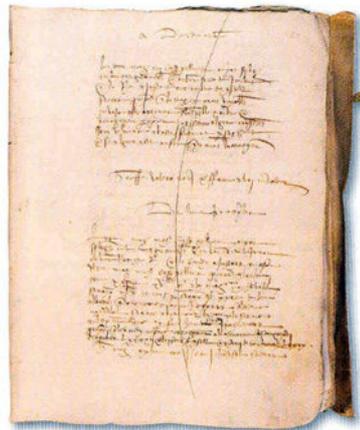


Imagen 2: Contrato de Pere Compte y Pere Bernia para la obra de fábrica del Estudi General, 1498
Fuente: Libro Edificio de La Nau

Una nueva fase de la construcción comienza con el contrato suscrito con Pere Compte y Pere Bernia el 16 de agosto de 1498, por el Consell General de la Ciutat, que la antevíspera había formalizado su voluntad de “refer la casa d’estudis” y dotar al Estudi General de unas “constitucions” o estatutos. Las obras se ajustarán a un proyecto de reforma y ampliación de lo ya existente, expresado con minucioso detalle en el documento. En mayo de 1499, el arzobispo bendice e inaugura la sede del Estudi General y en los años siguientes, mientras las obras prosiguen, los jurados compran nuevas casas para ampliar el solar.

El arquitecto Pere Compte, durante las dos últimas décadas del siglo XV y hasta su muerte en 1505, intervino en las más notables construcciones de la ciudad de Valencia: Lonja, Catedral, Generalitat, ampliación de la Seu, etc. Pere Bernia, “obrer de vila”, recibe el título de “mestre de la ciutat”, que se justifica por su labor al frente de diversas obras municipales en los portales de la muralla nueva, el almudín y otros trabajos de canalización de agua.

El edificio del Estudi General concentraba sus principales salas, con acceso desde un corredor con antepecho, en torno a un patio central, porticado en el piso alto, el “pati de les naves”, con “lo corral”, un pequeño patio de servicio trasero.

Algunas partes eran de piedra de sillería, como el arco de la puerta, semejante al de las casas nobles de la época, y cinco arcadas de la planta baja. Es posible que la escalera

principal se adosase a uno de los flancos del patio y fuese también de cantería.

Pero la sede de la Universitat de València ha sufrido tantas vicisitudes a lo largo de su historia, que no pueden identificarse con certeza los restos de aquella construcción primitiva, excepto quizás lo que se muestra de las excavaciones en la planta baja de la biblioteca.

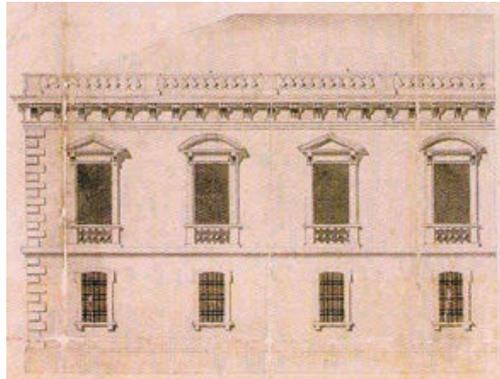


Imagen 3: Proyecto para la fachada de la biblioteca universitaria. Joaquín Martínez, 1790
 Fuente: Libro Edificio de La Nau

El desarrollo constructivo más importante del siglo XVII es la nueva puerta principal de la Universitat que debía sustituir a la primitiva, situada a los pies de la capilla, en la plaza del Patriarca, y “confrontaba con el horno que sale al patio de dentro” (Orellana).

El arzobispo Juan de Ribera obtuvo del Consell municipal que se hubiera de quitar para siempre y tapiarse de ladrillo y mortero, y costeó la construcción de la nueva puerta, recayente a la calle de la Universidad, que “se tuvo por única puerta principal, la cual tiene sobre su portada un escudo grande de piedra con las armas de la Ciudad”. Esta puerta sirvió en el siglo XVIII de acceso a la Real Academia de San Carlos, instalada entonces en ese sector del edificio. Cuando ésta se trasladó, se llevó el escudo, hoy empotrado sobre la puerta principal del Museo de Bellas Artes de San Pío V.

La erección de los colegios mayores contribuirá a crear el ambiente universitario de la barriada. El de la Presentación fue el primero, dotado por el arzobispo Tomás de Villanueva en 1550 para favorecer a diez pobres que aspirasen a ser sacerdotes. También para teólogos fueron dos de patronato particular; el de la Asunción o de Na Monforta (1561), y el de la Purificación o de Rodríguez (1572). El mejor dotado de todos fue el del Corpus Christi, creado en 1594 por Juan de Ribera. Felipe II mandó erigir en 1563 el de San Jorge, para religiosos de la orden de Montesa, y el doctor Melchor de Villena el de los Santos Reyes (1643), para estudiantes de teología y medicina.

A principios del siglo XVIII, el afán de embellecer el edificio, acrecentando el prestigio de la institución, llevó a la realización de importantes mejoras: casa rectoral, teatro académico y capilla, contemporáneas de la Memoria histórica de la fundación y progresos de la insigne Universidad de Valencia (1730), publicada por el rector Francisco Ortí, primer historiador de nuestra universidad, y de las nuevas Constituciones de 1733.

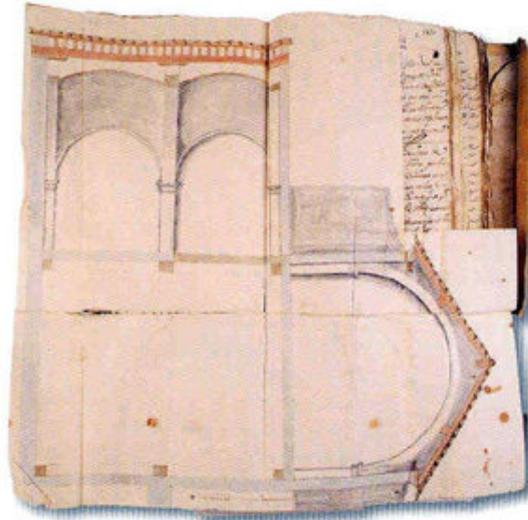


Imagen 4: Proyecto para el teatro académico (Paraninfo), obra de Felipe Rubio, 1732
Fuente: Libro Edificio de La Nau

El teatro académico, marco de las reuniones del Claustro y de solemnes debates, fue regularizado y ampliado con la adquisición de unos huertos contiguos a Fernando Bonavida, según proyecto de Felipe Rubio de 1733, que lo dotó de una doble entrada desde el patio rectoral. Su grandiosa bóveda tabicada, reforzada por una arcada sostenida por potentes estribos, fue decorada con molduras pintadas de trampantojo; sus paredes se revistieron con retratos e inscripciones de personajes ilustres.

La capilla agrandada y reedificada en estilo clasicista por Miguel Martínez provocó el entusiasmo del cronista Esclapés, que escribe: “concluida en el día 15 de Octubre de 1737, es una preciosa perla y abrigando en su altar a la Soberana Aurora de la Sapiencia, la constituye más majestuosa y excelente”.



Imagen 5: Detalle del plano de Valencia de Vicente Tosca (1738), en el que se puede ver el entorno urbano del Estudi General
Fuente: Libro Edificio de La Nau

La instalación, en 1765, de la Real Academia de Bellas Artes de San Carlos en el ángulo comprendido entre las calles de Salvá y de la Universidad dio lugar a la remodelación de

aquellas dependencias por el arquitecto Vicente Gascó, con la regularización de la fachada correspondiente; después, la necesidad de adaptar el edificio a las nuevas exigencias planteadas por el reformismo ilustrado reclamó otras obras. En 1788 se compraron una casa y el horno de munición, colindantes en la calle de la Universidad, para ubicar más aulas según planos de Antonio Perales. Pero la construcción de un laboratorio químico y, sobre él, un observatorio astronómico, encargados en 1790 por el rector Blasco a José Pérez, no llegó a realizarse.

La obra más importante de este periodo fue sin duda la de la biblioteca, para la que se adquirieron nuevos solares en la esquina de la calle de la Universidad con la de la Nave. Joaquín Martínez, uno de los arquitectos más significativos del neoclasicismo valenciano, elaboró el proyecto en 1789. Concebido con nobleza y sobriedad, siguiendo la pauta monumental ilustrada para los edificios públicos, no se concluyó hasta 1795. En la planta baja había seis aulas espaciosas y el piso principal, “una pieza grande y magnífica”, fue ocupado por la espléndida donación del erudito y bibliófilo Francisco Pérez Bayer, que había prometido “llenarla de libros exquisitos y de otras curiosidades”. La presidió un busto en mármol del propio Bayer sobre pedestal de jaspes y bronce, esculpido por José Esteve. El bombardeo de Valencia que se produjo en los primeros días de 1812, durante el asedio de la ciudad por las tropas napoleónicas del mariscal Suchet, fue causa de la destrucción de gran parte del edificio universitario. El 7 de enero, su biblioteca ardía reduciendo los libros a pavesas. Mientras arreciaba el incendio, “profesores, estudiantes y bedeles se esforzaban por salvar lo que les era posible” (Fernando Llorca).

Las instalaciones de la Universitat estaban arruinadas. El informe del arquitecto municipal Cristóbal Sales, en 1813, reclama reparaciones urgentes, pero éstas se demoran.

La reconstrucción empieza por la biblioteca. Tres salas provistas de estanterías adornadas con pilastras y cornisas de madera de pino y de peral y cierres de tela metálica realizadas por el carpintero Mauro Comín en 1837, permitieron alojar todos los libros de Vicente Blasco, con los del bibliotecario Domingo Mascarós, Mariano Liñán, Francisco Borrull y otros miembros del Claustro, junto con los procedentes de los conventos suprimidos, entre ellos la soberbia colección de códices procedente de San Miguel de los Reyes.

Pero al reconstruir los edificios era preciso reducir la anárquica composición del inmueble a criterios de simetría y sintaxis clásica por la cual su forma externa fuera expresión de la realidad interior. Por ello, el Claustro universitario encarga en 1839 un plan general del edificio al académico Timoteo Calvo Ibarra (1799-1879). En 1840 comenzaron las obras que debían extender el modelo de fachada presentado para la biblioteca por Joaquín Martínez a todo el lienzo de la calle de la Nave con una severa y elegante portada, levemente saliente en el centro. Al mismo tiempo, y hasta 1842, remodela el patio rectoral al estilo de un pequeño castillo renacentista. Arcos de medio punto, pateras, nichos con estucos y medallones de Bernardo Llácer hacen de él una alegoría de las enseñanzas que en ese momento se imparten, representando simbólicamente sus cuatro facultades: Ciencias, Medicina, Letras y Derecho.

De aspecto clásico y monumental, el Claustro Mayor comenzó a construirse en 1840 según proyecto del arquitecto Timoteo Calvo. Más tarde, en 1870, Sebastián Monleón

concluirá las obras del primer piso. Sin embargo, no será hasta 1944 cuando el arquitecto Javier Goerlich construya la columnata jónica del segundo cuerpo, confiriendo al Claustro su actual apariencia.

En el centro, y como verdadero referente para los estudiantes universitarios, aparece la imagen solemne del filósofo y humanista Juan Luis Vives, obra de José Aixá, en 1880 y fundida en bronce en una sola pieza por Vicente Ríos en los talleres de “La Primitiva Valenciana”.

Recorriendo los muros del patio, destacan algunas lápidas conmemorativas, así como los medallones con retratos, realizados en 1902, de los Jurados y oficiales de la Ciudad que participaron en la fundación del Estudi General y otros personajes vinculados a la institución universitaria.



Imagen 6: Vistas del claustro
Fuente: Libro Edificio de La Nau

Entre 1844 y 1845 se emprenderá la obra del patio mayor, levantando un peristilo de columnas de orden dórico con un potente entablamento en los lados recayentes al teatro y a la entrada desde la calle de la Nave. En 1871 la completará Sebastián Monleón (1815-1878), que estuvo al frente de otras numerosas mejoras como la construcción del observatorio meteorológico (1861), del salón rectoral (1864) y la reforma del teatro académico, donde abrió una nueva puerta, cerrando las dos existentes y dando a esta estancia su disposición actual. Obra suya también, concluida por Antonio Martorell (1845-1930), fue el Museo de Historia Natural (1872-1877), con una interesante cubierta acristalada sobre cuchillos de hierro. Martorell, con la ayuda de Luis Ferreres (1852-1926), continuaría también las obras de las fachadas en las calles Universidad y Salvá para “dar unidad y decoroso aspecto” al edificio, alineando al mismo tiempo dichas calles, preocupado no sólo por el monumento en sí mismo, sino también por el entorno urbano “mejorando notablemente la viabilidad y público ornato de esta parte central de la población”.

En 1880 se levantó en el centro del patio la estatua de Luis Vives, del escultor José Aixá (1834-1920), fundida en bronce de una sola pieza por Vicente Ríos en los talleres de La Primitiva Valenciana. En 1902, con ocasión de las fiestas del IV centenario de la fundación

de la Universitat, se colocaron 17 medallones con bustos en relieve de personajes vinculados a la historia de la institución.



Imagen 7: Luis Vives. José Aixá, 1880
Fuente: Libro Edificio de La Nau

Durante los primeros años del siglo XX aumenta considerablemente el número de estudiantes, poniéndose de manifiesto la escasez y las múltiples deficiencias de muchas instalaciones, por lo que se emprenderá la remodelación de algunas dependencias del caserón universitario para habilitar aulas nuevas e instalar las bibliotecas de las facultades de Derecho, Filosofía y Letras. En el verano de 1931, sobre planos del arquitecto Javier Goerlich, que se ocupó hasta 1965 de las obras de este edificio, se construyen los nuevos laboratorios de la Facultad de Ciencias, sobre la puerta principal, entre la Biblioteca General y el Museo de Historia Natural. Pero estas y otras mejoras se verán gravemente alteradas por el gran incendio de 1932 que destruyó parte del edificio, con los nuevos laboratorios, el observatorio y el propio museo.

Entre 1943 y 1944 se hizo la columnata jónica del segundo piso del patio mayor con un antepecho de balaustres y el remate que alberga el reloj. De 1948 era la escalinata de mármol que dio acceso a la biblioteca desde la calle de la Universidad.

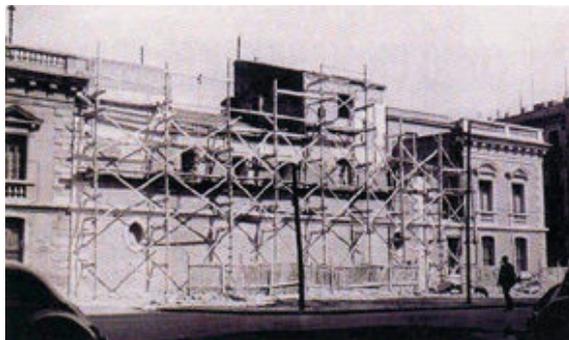


Imagen 8: Obras de finalización de la fachada de la Universidad recayente a la plaza del Patriarca
Fuente: Libro Edificio de La Nau

En 1954, con las actuaciones urbanísticas dirigidas a ampliar la plaza del Patriarca y el alineamiento de la fachada de la Universitat que a ella recae, fueron derribadas todas las edificaciones adosadas al muro lateral de la capilla y en el ángulo del edificio hasta el aula

magna. Un nuevo tramo de fachada completa entonces el perímetro del edificio según el modelo utilizado en el resto. También fue reformado el exterior de la cúpula de la capilla, que confiere su característico perfil a esta parte del edificio. En 1964 se añadió la fuente con las estatuas de Octavio Vicent.

Aunque en 1968 fueron trasladadas las facultades de Filosofía y Letras y Derecho a los nuevos edificios diseñados por el arquitecto Moreno Barberá en el campus de Blasco Ibáñez, durante los años 70 el viejo edificio continuó soportando el excesivo peso de una universidad masificada y las dependencias administrativas se multiplicaron, ocupando cualquier espacio disponible y provocando una arquitectura precaria y abusiva que contribuyó en gran medida a la degradación del edificio.

Una desgraciada reforma afectó a las salas del rectorado y el traslado en 1974 de la Facultad de Ciencias Económicas, último centro docente que habitó en el primitivo inmueble del Estudi General; sólo se procuró la recuperación de dos grandes arcadas de piedra en la planta baja de la biblioteca recayente a la calle de la Universidad, en un espacio que se dedicó a sala de exposiciones temporales.



Imagen 9: Fachada de la Universidad recayente a la plaza del Patriarca
Fuente: Libro Edificio de La Nau

La recuperación de la autonomía universitaria en 1985 propició la paulatina recuperación del histórico edificio, valioso testimonio de la arquitectura valenciana de los últimos tres siglos. Así, en 1987 se concluían las tareas de restauración del teatro académico y las obras de arte que encierra, y comenzaban las de la capilla de la Sapiencia, terriblemente degradada, inaugurada con gran solemnidad en febrero de 1991. La celebración en 1999 de sus cinco siglos de existencia ha propiciado finalmente la completa rehabilitación del edificio para ofrecerlo flamante a los nuevos actos culturales que en él se prevén, al servicio de Valencia.



Imagen 10: Edificio La Nau
Fuente: Libro Edificio de La Nau

Después de la celebración de la efeméride Cinc Segles de la creació de la Universitat de València, había que volver a tomarle el pulso al proyecto cultural, calibrar su dimensión oportunamente y atender las principales líneas marcadas desde el seno de la institución, esto es, estudio y difusión del patrimonio cultural de la Universitat de València, presencia de actividades culturales en el amplio marco geográfico universitario y divulgación del ámbito cultural en la sociedad valenciana. En este sentido, consideramos necesario continuar con el acercamiento y colaboración con las entidades públicas y con las privadas.



Imagen 11: Serenatas Musicales en el Claustro
Fuente: Libro Edificio de La Nau

Para hacer efectivos estos objetivos, el Vicerectorat de Cultura canaliza las actividades a través de las aulas culturales de Música, Teatro, Cine, Poesía y Fòrum de Debats, los colegios mayores Lluís Vives y Rector Peset, el Jardí Botànic y el área de Patrimonio, así como la Universitat Internacional de Gandia y la Fundación General de la Universitat de València, especialmente a través de los patronatos de Activitats Musicals y el especial Martínez Guerricabeitia.

Las relaciones que la Universitat de València mantiene con instituciones como el Ayuntamiento de Valencia, el Instituto Valenciano de la Música o el Liceu de Barcelona, o

con asociaciones como Capella de Ministrers, Victoria Musicae, la Sociedad Filarmónica de Valencia, la Societat Coral El Micalet o el Cor de Cambra Lluís Vich, por citar algunos ejemplos, permiten ampliar considerablemente la oferta cultural en el marco universitario.



Imagen 12: Critico Deseo
Fuente: Libro Edificio de La Nau



Imagen 13: Arte y propaganda
Fuente: Libro Edificio de La Nau

Una de las principales preocupaciones culturales es el conocimiento de las colecciones patrimoniales universitarias, su estudio, catalogación y difusión. Para esta finalidad se creó el proyecto Thesaurus, que dota de continuidad al análisis del fondo patrimonial universitario. También fomentar las donaciones constituye un objetivo en sí mismo. El compromiso de la Universitat de València con la cultura se materializa especialmente en la programación permanente de exposiciones temporales de producción propia presentadas en el marco universitario y en las itinerancias de estas muestras en otros ámbitos geográficos.

La orquesta y el coro de la Universitat de València elaboran anualmente programas y actividades musicales que proporcionan soporte, entre otros, a eventos consolidados como el Festival Ensembls o las tradicionales Serenates al Claustre. Así mismo, el Grup de Teatre Universitari trabaja en la preparación bianual de una representación teatral. Talleres, cursos y representaciones musicales, teatrales y de poesía son coordinados por las respectivas aulas culturales.



Imagen 14: Edipo Rey
Fuente: Libro Edificio de La Nau

El Fòrum de Debats y la Universitat Internacional de Gandia canalizan a través de sus

actuaciones el debate y la reflexión alrededor de las principales preocupaciones actuales. Es un espacio que se enriquece, necesariamente, con las propuestas internas y las que llegan de fuera.

La cultura en la Universitat de València, ya lo hemos dicho, es una apuesta seria, rigurosa, absolutamente imprescindible, que no debe faltar nunca en los territorios de reflexión conjunta que la sociedad nos reclama. Es necesario, creemos, en definitiva, que la cultura rompa con la rigidez del pensamiento único y seguro y apostar por los riesgos e incertezas, aun a sabiendas que esta actitud no resulta siempre cómoda.

3.1.1. Rehabilitación del Edificio de la Nau, Universitat de Valencia en 1997.

El equipo rectoral de la universidad de Valencia decide como una iniciativa trascendente, para la celebración de su 500 aniversario, acometer la rehabilitación del histórico y emblemático edificio de la calle la Nave y nos confía este trabajo profesional.

Los objetivos de este encargo se concretan en el documento del Vicerrectorado de Cultura de octubre de 1994: “La Nave: restauración y usos culturales”.

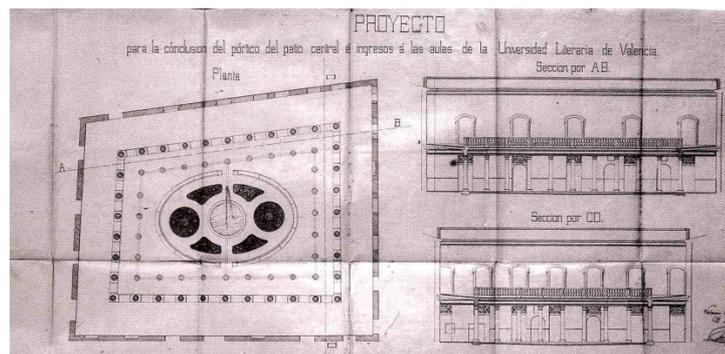


Imagen 15: Conclusión Pórtico Patio (1871)
Fuente: Libro Rehabilitación del edificio “La Nau”

Tomada conciencia de la importancia y responsabilidad de la intervención, y una vez analizados rigurosamente los antecedentes históricos plasmados documentalente, se formularán unas primeras propuestas de intervención basadas en los siguientes criterios generales:

- El objetivo básico es el protagonismo del edificio sobre cualquier otra consideración, con los valores que en sí mismo tiene como bien de interés cultural, manteniendo la imagen por la que se ha reconocido a lo largo de su historia.
- Definición de los espacios y elementos de auténtico valor patrimonial e histórico integral y prioritariamente.
- Eliminación de elementos impropios, añadidos, conocidos y sin valor, que ocultan espacios de valor.
- Eliminación de intervenciones impropias de mayor importancia consideradas agresivas e incoherentes del resto del edificio.

- Consideración de la expectativa de posibles apariciones de interés arqueológico y arquitectónico a tener en cuenta con el proceso de intervención.
- Refuncionalización, con el criterio ya definido del edificio como protagonista, dejándolo en todo caso abierto al cambio.
- Investigación y resolución de las patologías estructurales e incorporación de los elementos de confort ambiental y de seguridad.



Imagen 16: Continuación de la fachada c/La Nau (1886)
Fuente: Libro Rehabilitación del edificio "La Nau"

Además de los planos históricos del edificio, que se utilizan para su confección física y su evolución en el tiempo y de los planos históricos de la ciudad en los que este aparece reflejado, cuya lectura tiene los mismos fines; se incorpora al propio documento del proyecto una memoria histórico-artística, resumida por el Servicio de Conservación del Patrimonio Histórico-Artístico de la Universidad en la que se recogen:

- Datos históricos, con los orígenes del Edificio Universitario como Estudio General.
- La Capilla de la Sapiencia, con las noticias sobre su configuración original y su reconstrucción en el Siglo XVIII.
- El Teatro Académico, descrito ya en 1662 con su actual configuración, siendo las intervenciones de 1773 y 1864, solamente decorativas y/o funcionales.
- La Academia de Bellas Artes en la Universidad.
- La biblioteca, como origen de la reestructuración del Edificio de la Universidad para acoger el legado de Pérez Bayer, con proyecto de Joaquín Martínez en 1790 en la esquina entre las calles de la Nave y Universidad.
- Laboratorio Químico y Observatorio Astronómico, proyectados y no materializados.
- La destrucción y reconstrucción durante el siglo XIX.
- El Patio Rectoral, remodelado por Timoteo Calvo con carácter renacentista entre 1840 y 1842, junto con una nueva portada de acero a la Capilla y la escalera rectoral.
- La fachada exterior, extendiéndola a la totalidad de la c/Nave, los tres huecos primeros de Plaza del Patriarca y seis huecos de la calle Universidad.
- Las fachadas interiores: el Patio Mayor. En 1844 se inicia la construcción del pórtico de columnas dóricas rematado por balaustrada de piedra e inspirado también en las formas puras del diseño de la fachada exterior, que concluye el arquitecto Sebastián Monleón en 1871.

- El Observatorio Meteorológico (1861), la reforma del teatro académico (1864), la Sala Rectoral (1864) y el Museo de Historia Natural (1872), obras de Sebastián Monleón, esta última terminada por su sucesor Antonio Martorell en 1876, el cual continuo la construcción de las fachadas exteriores entre 1886 y 1890 en la calle Universidad y la calle Salva.
- Ya en 1954 se redactó un plan de reformas que dirigidas por Javier Goerlich dieron lugar al derribo de las edificaciones adosadas al muro lateral de la Capilla, a su alineamiento y unión con la fachada de la calle Salva, configurándose el edificio en la manzana completa.
- En 1986 se acomete la restauración del Paraninfo, en 1987 se inicia la restauración de la Capilla y se termina en 1991.

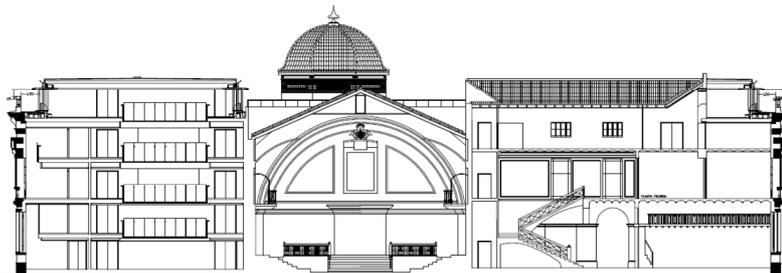
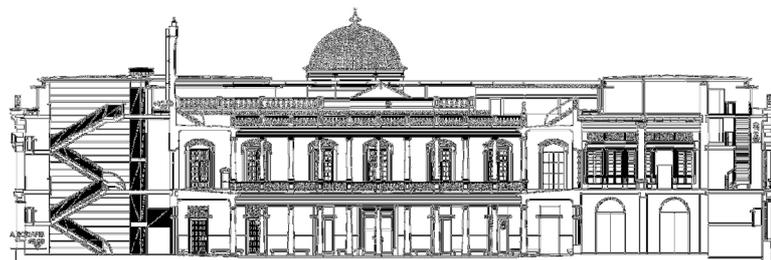


Imagen 17 y 18: Secciones después de la reforma (1997)
Fuente: Oficina Técnica de la Universidad de Valencia (planos originales)

El nuevo programa del Edificio de la Nau se redefine como Espacio CULTURAL, UNIVERSITARIO y ABIERTO a la sociedad valenciana, VIVO y POLIVALENTE.

Se consideran como factores positivos del proyecto:

- La ubicación, en el triángulo histórico de fuerte carga simbólica.
- El entorno y la accesibilidad, con la posibilidad de ir a pie a la Nave.
- El cinturón peatonal que ya está realizado.

Se propone un plan Global Guiado por las siguientes líneas:

- Lugar de encuentro Universidad-Sociedad.
- Foro de la Creatividad Universitaria.
- Conjunto Monumental Histórico-Artístico
- Espacio de las artes contemporáneas

- Lugar académico emblemático.
- Lugar de investigación bibliográfica
- Lugar privilegiado de estancia.

Y un resumen de usos especiales, referido a:

- Fachada, cubiertas y seguridad
- Biblioteca
- Actos académicos solemnes.
- Monumento histórico-artístico
- Espacios de cultura contemporánea
- Sala de exposiciones
- Depósito de fondos artísticos
- Sala alternativa
- Aula Magna
- Paraninfo
- Claustro
- Plaza del Patriarca
- Espacio de estancia
- Despachos de instituciones universitarias.

Una vez realizado todo el proyecto, se empieza con la obra. A continuación se hace una breve explicación constructiva de las partes más interesantes, igual que la introducción de unas imágenes de la obra en el proceso de rehabilitación.

Un informe de SEG, ingeniería especializada en patologías de la construcción hace especial hincapié en el deficiente estado de las estructuras sustentantes de las cubiertas, además de en el ya conocido y entibado entramado del depósito de libros y en el agrietamiento del muro de fachada a c/la Nave en las proximidades de la esquina con c/Universidad.

Complementariamente se realiza una campaña de inspecciones y catas de reconocimiento sobre los siguientes extremos:

- ESTRUCTURAS VERTICALES:

Están compuestas por varios tipos constructivos, el más generalizado es el de muros de carga de fábrica de ladrillo en la construcción de las fachadas exteriores e interiores, así como en la delimitación de la Capilla, el Paraninfo y los zaguanes de los tres accesos y las escaleras. Estos muros se perforan mediante arcos de medio punto o carpaneles o bien con dinteles de madera o acero ocultos. Paralelamente a la calle de la Nave, desde el vestíbulo de acceso hasta las fachadas Este y Oeste, aparece un muro en funciones de línea interior de apoyo de estructuras horizontales. Para refuerzo de muros aparecen puntos apilastrados.

Complementariamente a los muros y como líneas interiores de apoyo estructural

paralelas a c/La Nave y c/Universidad están dispuestos pilares rectangulares de fábrica de ladrillo ornamentados con basas y capiteles.

Para la construcción del soportal del claustro se han utilizado columnas de piedra, con basas y capiteles (dóricos en planta baja, jónicos en planta 1ª) que apoyan unos dinteles revestidos con frisos de piedra.

En la última intervención de Javier Goerlich la estructura interna es de hormigón en columnas y forjados, manteniendo el sistema constructivo de muros de ladrillo en las nuevas fachadas a calle Salva y Plaza del Patriarca.



Imagen 19: Sustitución de la cubierta sobre la Capilla de la Virgen de la Sapiencia, Imagen 20: Preparación de losa para visualización de restos arqueológicos en sala de estudio.
Fuente: Libro Rehabilitación del edificio “La Nau”

- ESTRUCTURAS HORIZONTALES

Los forjados tradicionales son de vigueta de madera y bovedillas de rasilla hechas in situ, algunas veces aparentes y ornamentales según se indica en los planos de techos y las más de las veces ocultos por cielorrasos. Otros forjados de intervenciones más recientes están contruidos con viguetas metálicas o de hormigón y bovedillas de rasilla, yeso o cerámica. Los forjados apoyan en los muros, vigas principales de madera o acero, o en dinteles de huecos y pórticos.

- ESPACIOS ABOVEDADOS

Son los más antiguos y característicos del conjunto, la capilla y el paraninfo, cubiertas con bóvedas de medio cañón con refuerzos de arcos fajones sobre los apilastrados de muros. Las bóvedas son de rasilla con un mínimo de dos roscas y ambas tienen pechinas en los laterales.

- ESCALERAS

Son todas, abovedadas de roscas de ladrillo a excepción de las de madera de acceso a altillos (portería y biblioteca de investigadores).



**Imagen 21: El Claustro al inicio de las obras, Imagen 22: Refuerzo del arco en vestíbulo a c/Nave.
Fuente: Libro Rehabilitación del edificio “La Nau”**

- CUBIERTAS

Excepto unos tramos de terraza al Norte y al Sur de la bóveda del crucero de la capilla, todas las cubiertas son de teja sobre tablero de rasilla apoyada en entramado de cabios de madera de 7x3 cm apoyados en vigueta de 11x24 cm que a su vez apoya en vigas, cerchas o muros.

Sobre la bóveda de capilla hay dos tramos de forjado de cubierta de terraza ya descritos (uno de viguetas de hormigón sobre vigas Warren metálicas y otro de viguetas de acero con bovedillas de rasilla de reciente factura).

Sobre la bóveda del paraninfo, debido a las intervenciones más recientes, existen unos pórticos metálicos atirantados y correas de acero que apoyan placas de fibrocemento que sirven de soporte a las tejas de cerámica tipo árabe.

Una estructura metálica en celosía, de configuración variable da soporte al entramado de cubierta de la cúpula de la Capilla.

La estructura de cubierta del cuerpo paralelo a c/La Nave, así como la de las dependencias del patio rectoral y claustro está formada por viguetas de madera de 11x24 perpendiculares a fachada, a poyadas sobre muros o vigas principales horizontales.

La cubierta del cuerpo paralelo a c/Universidad también está construida con el mismo tipo de viguetas, pero colocadas en paralelo a las fachadas y apoyadas sobre pares colocados sobre pilares y a mitad de la luz de las vigas principales centrales.

En la cubierta del cuerpo Sur, el mismo sistema de viguetas paralelas a fachadas se apoya sobre cerchas metálicas de sección variable en función de las convergencia de los muros de fachadas no paralelas, procedentes de la reconstrucción posterior al incendio de 1932.

La cubierta plana de la obra más reciente está montada sobre u entramado de hormigón armado, en el ángulo S.E. del edificio.



Imagen 23: Nuevas cubiertas a fachada c/Universidad, Imagen 24: Nuevas cubiertas, fachada al Claustro y vista del Patriarca.

Fuente: Libro Rehabilitación del edificio “La Nau”

- EL PROCESO DE OBRAS EN EL CLAUSTRO.

Antes del inicio de los trabajos se procedió a la protección de los espacios principales a conservar (Paraninfo y Capilla), de los elementos constructivos a mantener y restaurar (pavimentos, zócalos, columnas) y de los elementos simbólicos y ornamentales que pudieran sufrir daños en la ejecución de las obras (placas, medallones, pequeñas estatuas, molduras, etc.).

Las intervenciones que se realizan en el claustro son muy pocas, solo se restauran todas las carpinterías históricas que abren hacia él, y se limpian los pavimentos y techos. Este último año los techos del claustro tanto en planta baja como en planta primera se reforman, y se cubre con un techo de escayola incrustando la iluminación en el mediante plafones.

En cuanto a la eliminación de elementos la referimos a dos grupos:

En primer lugar, aquellos que afectan a la imagen y expresión del edificio, fundamentalmente en cubiertas, dada la convivencia no armoniosa de cubierta de teja con cubiertas planas en volúmenes emergentes y dispares, con claraboyas y aparatos de tratamiento del aire.

En este grupo consideramos también de heterogéneo el trazado de las cubiertas inclinadas dada la irregularidad de planta de los pabellones Norte, Este y Sur que rodean el Claustro particularmente el Sur, de planta trapecial con cuya cubierta de cerchas metálicas se ocupa totalmente el interior de la balaustrada de coronación de fachadas cegando su transparencia.

En segundo lugar, consideramos impropias aquellas obras, sean altillos o distribuciones de tabiquería que desmenuzan los espacios restándoles su escala y dimensión estructural básica bajo el ala Norte de la biblioteca, distribución de altillos de biblioteca, ubicación de oficinas de biblioteca en planta 1ª.

En tercer lugar por inadecuación funcional a su caso se propone la sustitución interna del cuerpo más recientemente construido en 1956, que permita la obtención en la Sala de Usos Múltiples de una gran flexibilidad de uso.

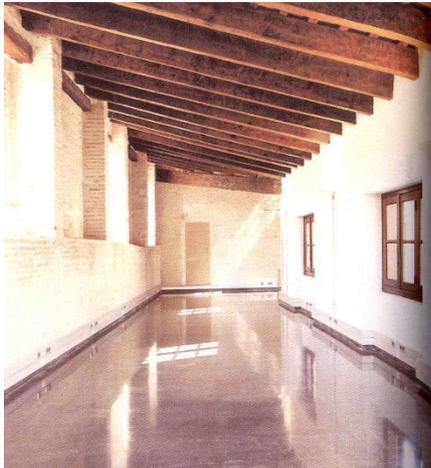


Imagen 25: Andana del patio rectoral, zona Sur, Imagen 26: Contrafuerte del Paraninfo y tienda. Fuente: Libro Rehabilitación del edificio “La Nau”

La propuesta de sustitución de cubierta con obtención de nuevos espacios que se propone en el proyecto tiende a producir nuevos lugares de trabajo muy cualificados por sus condiciones de iluminación y vistas sobre la ciudad y sobre el propio edificio.

Estas cubiertas de poca pendiente y materiales nobles de acabado (cobre) se aproximan a las balaustradas respetando un espacio visitable de 1.5 y 1.8 m. entre ellas, que se amplía en la fachada recayente a la plaza del patriarca hasta 5 metros.

En definitiva, y después de realizar una breve descripción de la rehabilitación integral que se le hizo a este edificio, se llega a la conclusión que la parte del claustro que es el objeto de estudio de este proyecto, no es intervenida en ningún aspecto que cambie su función o forma de cómo se encontraba antes de la intervención.

En esta parte del edificio solo se realizan operaciones de limpieza en carpinterías suelos y techos, y sustitución y consolidación de alguna parte de la piedra de las columnas que se encontraba muy deteriorada o que no existía.



Imagen 27: Vista del Claustro planta baja, Imagen 28: Vista del Claustro desde cubierta

Fuente: Propia



Imagen 29: Paso del Claustro a las estancias, Imagen 30: Lona que cubre el Claustro en casos en que sea necesario.

Fuente: Propia



Imagen 31: Columna dórica esquina del Claustro, Imagen 32: Ventana mixta de madera y cristal.
Fuente: Propia

3.3. CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS MÍNIMAS PARA RECINTOS MUSICALES

En este apartado se exponen los valores de los principales parámetros objetivos para valorar la idoneidad de un recinto para un uso musical.

Según Berenak⁷ los valores más recomendables para el RT_{mid} están entre 1,8 a 2,0 s para música sinfónica, y contando con un recinto de un gran volumen (entre 10.000 y 30.000 m³). Para otros tipos de música podemos considerar los siguientes:

⁷ *Music, Acoustics and Architecture*,. London: John Wiley and Sons New York.

TIPO DE MÚSICA	RT _{mid}
Música sinfónica	1,8 - 2,0
Música Barroca y clásica	1,6 - 1,8
Música de cámara	1,3 - 1,7
Ópera	1,2 - 1,5

Tabla 1 Valores recomendados de RTmid.

Estos valores del tiempo de reverberación, siempre dependen del volumen del recinto. A continuación se muestra también dos graficas de Cremer and Müller⁸, donde nos indican los valores recomendables para frecuencias medias del tiempo de reverberación en función del volumen y de los m² de absorción de la sala.

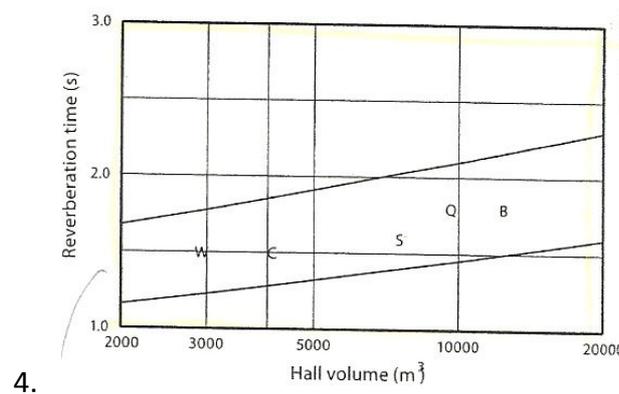


Fig. 27 Recomendación de valores de RT para frecuencias medias en función del volumen de la sala.

Fuente: (Barron, 1993)

Los puntos individuales marcados, son los valores de las siguientes salas: B, Berlin Chamber Music Hall; C, Cambridge Music School; Q, Queen Elizabeth Hall; S, Snape Maltings Concert Hall; W, Wigmore Hall London. Salas de referencia en la música de cámara.

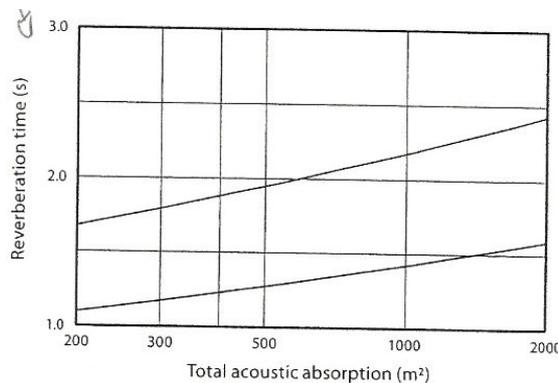


Fig. 28 Recomendación de valores de RT para frecuencias medias en función de la superficie de absorción de la sala.

Fuente: (Barron, 1993)

⁸ Auditorium Acoustics and Architectural Desing. E & FN spon.

Respecto los valores de brillo (Br) y calidez (BR) acústica, Beranek⁹ recomienda para los valores de la calidez acústica:

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

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

Para salas con valores intermedios de RT_{mid} , se pueden hallar los valores del BR por interpolación.

Para los valores del brillo acústico, recomienda un valor superior a:

$$Br \geq 0,87$$

aunque nunca superando la unidad. En muy rara situación donde el brillo superare la unidad, ya que la absorción inevitable que realiza el aire sobre las ondas sonoras es a partir de las frecuencias de 2 kHz y superiores.

El último parámetro temporal que se estudia es el tiempo central, t_s . Según Kürer¹⁰, en el caso ideal de tener un campo sonoro difuso, la curva energía-tiempo presenta una caída exponencial, entonces los valores de t_s estarán comprendidos entre:

$$72 \geq t_s \geq 144 \text{ ms,}$$

suponiendo que TR está entre 1 y 2 segundos.

En la práctica, estos límites teóricos se usan como referencia, aunque t_s suele desviarse de dichos valores, ya que está más relacionado con EDT que con TR.

En lo referente a los parámetros energéticos, el valor de la claridad musical C_{80} , según Beranek, para una sala vacía se recomienda un valor de:

$$-4 \geq C_{80} (3) \geq 0 \text{ dB,}$$

siendo $C_{80} (3)$ el valor medio correspondiente a las bandas de frecuencia de 500 Hz, 1.000 Hz y 2.000 Hz, también denominado "music average". Además se debe evitar valores superiores a +1 dB.

También se puede comparar este valor, según L.G. Marshall¹¹, para una sala OCUPADA, con los valores comprendidos entre:

$$-2 \geq C_{80} (3) \geq 2 \text{ dB}$$

La claridad musical no depende solo de los valores energéticos con los que se calcula, sino que también depende tanto de los valores del RT como de la habilidad y

⁹ *Music, Acoustics and Architecture*,. London: John Wiley and Sons New York.

¹⁰ A simple measuring procedure for determining the "center time" of room acoustical impulse responses. *7th Intern. Congress on Acoustics*

¹¹ *A note on the importance of room crosssection in concert halls*. J. Sound Vib.

virtuosismo de los intérpretes. Benarek realizó un estudio con 36 salas donde se vio que a medida que el tiempo de reverberación de la sala era mayor, la claridad musical disminuía.

La definición (D_{50}), según Theiele¹², se define como la relación entre la energía que llega al oyente dentro de los 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluyendo el sonido directo y las primeras reflexiones) y la energía total recibida por el mismo. Para cada punto de una sala ocupada y para cada una de las bandas de frecuencia se debe cumplir que:

$$D > 0,50$$

Cuanto más elevado sea el valor, mejor será la inteligibilidad de la palabra.

En el parámetro de eficiencia lateral (LF), cuanto mayor sea el valor, mayor será la sensación de espacialidad del sonido. Según A. H. Marshall, el valor que debe cumplir como mínimo es de:

$$LF_{E4} \geq 0,19$$

Siendo LF_{E4} el valor medio de los LF_{80} correspondientes a las bandas de frecuencia de octava comprendidas entre 125 Hz y 1.000 Hz.

Por último, comentaremos el parámetro del STI o RASTI, que es un método simplificado de conseguir el mismo parámetro, como explicamos anteriormente. Para este parámetro, existe una relación entre el valor del STI/RASTI y la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad de la palabra, que se muestra en la siguiente tabla:

STI/RASTI	VALORACIÓN
0,88 - 1	Excelente
0,66 - 0,86	Buena
0,50 - 0,64	Aceptable
0,36 - 0,49	Pobre
0,24 - 0,34	Mala

Tabla 2 Relación entre STI/RASTI y la valoración subjetiva.

3.4. MATERIAL Y MÉTODOS. MEDICIÓN IN SITU Y SUS RESULTADOS

3.4.1. MEDICIÓN IN SITU

Las mediciones in situ en el claustro se llevaron a cabo siguiendo el procedimiento que se describe a continuación.

¹² *Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallruckwürfe in Raumen. Acustica 3.*

Los **equipos de medida** utilizados en el proceso de medición, están formados por tres partes:

- La sala es excitada mediante un sistema de emisión sonora (Fuente).
- La respuesta acústica de la sala ante la excitación producida es registrada por un sistema de adquisición de señales. (Receptores)
- A partir de las señales registradas por el equipo de adquisición se determina el valor de los parámetros acústicos objetivos del recinto utilizando el software especializado.

El sistema de emisión que es el encargado de excitar la sala, está formado por un PC, una tarjeta de sonido, un amplificador (Lab. 300 de Lab Grupper), y una fuente sonora dodecaédrica (Omnipower 4296 de Bruel & Kjaer, con 12 altavoces).

Para la adquisición de la respuesta de la sala a la excitación sonora realizada se utilizó el mismo PC con la tarjeta anteriormente nombrada y un micrófono bidireccional (Shure KSM44).

Respecto la determinación de los parámetros acústicos el software utilizado fue el Dirac con el que se registró y se grabó la señal recibida por los micrófonos y posteriormente se realizó el tratamiento en el despacho de los archivos acústicos recogidos en la medición para obtener los parámetros acústicos estudiados.

La medición. Para la caracterización del claustro se registró su respuesta al impulso. Es decir, se registra la señal temporal que recibe el micrófono (receptores) a partir de la señal de excitación creada. Con esto se consigue saber cómo el claustro modifica el sonido al transmitirse de la fuente al receptor.

La señal de excitación utilizada fue un Sweep o barrido sinusoidal porque la frecuencia es una función de tiempo desde 20 Hz hasta 20 KHz cubriendo de esta forma todo el rango de frecuencias audibles. Este tipo de señal es adecuado ya que tiene un incremento de frecuencia por unidad de tiempo exponencial (logarítmico) al igual que el oído humano. Además la energía de la señal se distribuye uniformemente por bandas de octavas.

El escenario de la medición. Durante la medición el claustro se encontraba vacío. Se realizaron mediciones con una sola posición de la fuente, y 19 posiciones del receptor. A continuación se introduce el plano utilizado para la medición con la posición de cada receptor.

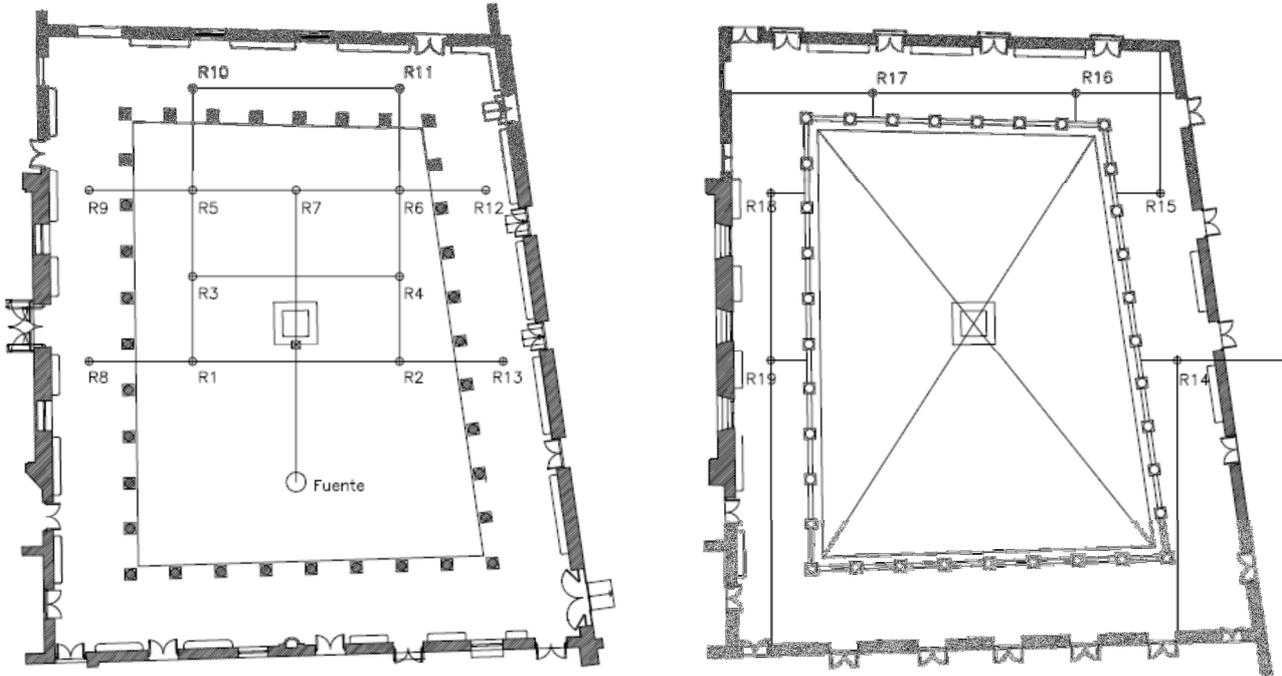


Figura 29 Representación de la fuente y los receptores.

A continuación se introduce la tabla con las coordenadas y posiciones de cada punto estudiado.

Zona	Nº Receptor/Fuente	Coordenadas (x,y,z)
Eje de simetría	Fuente	(0,00, 8,00, 1,50)
Central exterior P.B.	Receptor 1	(6,00, 1,00, 1,20)
Central exterior P.B.	Receptor 2	(-6,00, 1,00, 1,20)
Central exterior P.B.	Receptor 3	(6,00, -5,00, 1,20)
Central exterior P.B.	Receptor 4	(-6,00, -5,00, 1,20)
Central exterior P.B.	Receptor 5	(6,00, -10,00, 1,20)
Central exterior P.B.	Receptor 6	(-6,00, -10,00, 1,20)
Central exterior P.B.	Receptor 7	(0,00, -10,00, 1,20)
Lateral interior P.B.	Receptor 8	(13,00, 1,00, 1,20)
Lateral interior P.B.	Receptor 9	(13,00, -10,00, 1,20)
Central interior P.B.	Receptor 10	(6,00, -16,00, 1,20)
Central interior P.B.	Receptor 11	(-6,00, -16,00, 1,20)
Lateral interior P.B.	Receptor 12	(-11,00, -10,00, 1,20)
Lateral interior P.B.	Receptor 13	(-12,00, 1,00, 1,20)
Lateral interior P.1.	Receptor 14	(-12,00, 1,00, 6,50)
Lateral interior P.1.	Receptor 15	(-11,00, -10,00, 6,50)
Central interior P.1.	Receptor 16	(-6,00, -16,00, 6,50)
Central interior P.1.	Receptor 17	(6,00, -16,00, 6,50)
Lateral interior P.1.	Receptor 18	(13,00, -10,00, 6,50)
Lateral interior P.1.	Receptor 19	(13,00, 1,00, 6,50)

Tabla 3 Coordenadas de la fuente y los receptores.

Como se observa en la imagen, la fuente está situada en el eje de simetría, a 8 metros de la escultura de Lluís Vives que se encuentra en el centro del claustro y a una altura de 1,50 m. Los receptores se situaron en 19 puntos diferentes del claustro y situados en unos puntos específicos para poder realizar un estudio detallado de todo el claustro. Se situaron 13 receptores en la parte inferior, de los cuales 7 eran exteriores y 6 interiores (bajo techo). De los 7 exteriores tenemos una simetría entre 3 y se queda uno centrado con el eje de simetría. Y de los puntos interiores también se tiene una simetría claramente diferenciada.

En la parte superior del claustro se colocan 6 receptores interiores con simetría de 3 en un lado, y 3 al otro, como se observa en el plano de la medición o en la tabla de las coordenadas. Estos puntos tienen una altura de 6,50 metros respecto la cota 0 del claustro.

A continuación se introducen unas imágenes de la medición:



Imagen 32 Fotografía del equipo de medición con la fuente, el receptor, el portátil y el amplificador.



3.4.2. RESULTADOS

Los parámetros obtenidos en la medición fueron los siguientes:

- RT_{30} : Tiempo de reverberación (en segundos)
- EDT: Tiempo de caída inicial (en segundos)
- C_{80} : Claridad musical (en decibelios)
- FF_{E4} : Eficiencia lateral (porcentaje)

A continuación se exponen los resultados obtenidos, además de la comparación con los parámetros ideales para la audición acústica, siempre se debe tener en cuenta que estos parámetros han sido calculados con la sala vacía, y por tanto siempre mejoraran cuando esté llena de gente, ya el efecto del publico aporta una absorción importante.

RT_{30}

TIEMPO DE REVERBERACIÓN real (RT_{30})							
Receptores	Posición	Frecuencias					
		125	250	500	1000	2000	4000
Receptor 1	Exterior P.B.	1,785	2,475	2,548	2,596	2,208	1,514
Receptor 2	Exterior P.B.	1,993	2,892	2,763	2,473	2,193	1,567
Receptor 3	Exterior P.B.	2,847	2,858	2,861	2,596	2,277	1,615
Receptor 4	Exterior P.B.	1,924	2,247	2,567	2,896	2,186	1,547
Receptor 5	Exterior P.B.	1,872	3,205	2,730	2,744	2,201	1,555
Receptor 6	Exterior P.B.	2,052	2,268	2,684	2,736	2,256	1,574
Receptor 7	Exterior P.B.	1,546	2,733	3,207	3,427	3,250	1,692
Receptor 8	Interior P.B.	1,814	2,302	2,539	2,405	2,169	1,569
Receptor 9	Interior P.B.	1,709	2,110	2,973	2,761	2,118	1,574
Receptor 10	Interior P.B.	2,104	2,365	2,887	2,750	2,330	1,660
Receptor 11	Interior P.B.	2,405	2,560	2,689	2,779	2,253	1,653
Receptor 12	Interior P.B.	3,045	2,316	2,746	2,504	2,257	1,603
Receptor 13	Interior P.B.	1,944	2,542	2,572	4,841	4,783	1,701
Receptor 14	Interior P.1.	2,256	2,329	2,900	2,693	2,330	1,706
Receptor 15	Interior P.1.	2,047	4,177	2,691	2,874	2,348	1,688
Receptor 16	Interior P.1.	1,680	2,886	3,132	3,304	2,597	1,726
Receptor 17	Interior P.1.	3,051	2,709	2,785	2,818	2,373	1,708
Receptor 18	Interior P.1.	3,233	2,966	2,787	2,606	2,371	1,697
Receptor 19	Interior P.1.	1,962	2,645	2,989	2,619	2,280	1,663
	Minimo	1,546	2,110	2,539	2,405	2,118	1,514
	Maximo	3,233	4,177	3,207	4,841	4,783	1,726
	Media	2,172	2,662	2,792	2,864	2,462	1,632

Con estos datos del tiempo de reverberación se calcula los siguientes parámetros:

Tiempo de reverberación medio (RT_{mid}): 2,828 s.

Calidez (BR): 0,854 s.

Brillo (Br): 0,723 s.

En este recinto se suele interpretar música de muchas variedades, tanto clásica, barroca, de cámara o sinfónica, siendo diferente la reverberación adecuada para cada tipo (Barba Sevillano & Giménez Pérez, 2011).

TIPO DE MÚSICA	RT_{mid}
Música sinfónica	1,8 – 2,0
Música Barroca y clásica	1,6 – 1,8
Música de cámara	1,3 – 1,7
Ópera	1,2 – 1,5

Se observa que el RT_{mid} en la sala vacía es de 2,82 segundos faltando bastante para aproximarse a los 2 segundos de la música sinfónica que es el tipo que requiere mayor tiempo de reverberación. Este valor seguro que mejora con el público presente en las actuaciones, absorbiendo bastante energía y bajando este resultado a tiempos ideales.

En cuanto a la Calidez de la sala comentar que el resultado está por debajo mínimo recomendado que es 1,10 “Isbert, A. C. (1998)”. Esto ocurre debido a la colocación del techo de pladur en la intervención, el cual absorbe más a frecuencias bajas que a frecuencias medias, por tanto ocurre este fenómeno y el valor se queda por debajo de los exigidos.

En cuanto al resultado obtenido del Brillo igual 0,72, decir que se queda muy poco por debajo del ideal marcado por los expertos igual a 0,87 “Isbert, A. C. (1998)”, por lo que se puede considerar despreciable y decir que la sala tiene una buena respuesta al Brillo.

EDT

TIEMPO DE CAÍDA INICIAL real (EDT)							
Receptores	Posición	Frecuencias					
		125	250	500	1000	2000	4000
Receptor 1	Exterior P.B.	1,750	2,218	2,427	2,165	1,897	1,168
Receptor 2	Exterior P.B.	1,314	2,263	2,256	2,442	1,887	1,502
Receptor 3	Exterior P.B.	2,030	2,334	2,073	2,415	1,987	1,407
Receptor 4	Exterior P.B.	1,687	2,253	2,648	2,431	2,151	1,572
Receptor 5	Exterior P.B.	2,234	2,368	2,181	2,538	1,990	1,503
Receptor 6	Exterior P.B.	1,794	2,403	2,454	2,478	2,095	1,476
Receptor 7	Exterior P.B.	1,794	2,403	2,454	2,478	2,095	1,476
Receptor 8	Interior P.B.	1,837	2,248	2,294	2,407	1,952	1,355
Receptor 9	Interior P.B.	2,313	2,254	2,404	2,428	2,080	1,529

Receptor 10	Interior P.B.	2,655	2,251	2,392	2,581	2,176	1,561
Receptor 11	Interior P.B.	1,944	2,400	2,537	2,445	1,863	1,512
Receptor 12	Interior P.B.	1,829	2,483	2,546	2,553	2,191	1,637
Receptor 13	Interior P.B.	2,322	2,030	2,446	2,298	1,882	1,233
Receptor 14	Interior P.1.	2,182	2,740	2,554	2,631	2,275	1,584
Receptor 15	Interior P.1.	2,678	2,762	2,910	2,417	2,234	1,677
Receptor 16	Interior P.1.	1,867	3,151	2,452	2,605	2,384	1,770
Receptor 17	Interior P.1.	2,177	2,732	2,965	2,714	2,171	1,609
Receptor 18	Interior P.1.	2,912	2,732	2,632	2,621	2,393	1,650
Receptor 19	Interior P.1.	1,970	2,516	2,490	2,794	2,306	1,589
	Minimo	1,314	2,030	2,073	2,165	1,863	1,168
	Maximo	2,912	3,151	2,965	2,794	2,393	1,770
	Media	2,068	2,450	2,480	2,497	2,106	1,516

El EDT_{mid} como se ha explicado anteriormente es el tiempo que transcurre desde que el foco emisor deja de radiar hasta que el nivel de presión sonora cae 10 dB.

En unas condiciones ideales donde exista una perfecta difusión del sonido en el recinto, el valor de EDT, coincidiría con el RT. Esto pasa porque sigue una evolución exponencial y la recta tendría la misma pendiente.

En la práctica, este supuesto no se suele cumplir. La difusión perfecta del sonido en una sala es una situación ideal, por lo que la curva de decaimiento presenta una doble pendiente. Con esto podemos sacar como conclusión que cuanto más parecidos sean los valores del RT y del EDT, mejor difusión se dará en la sala. “Barron, M.(1993)”.

El EDT_{mid} se obtiene igual que el RT_{mid} , con la media de las frecuencias medias de 500 y 1000 Hz, obteniendo como resultado 2,5 s. Sabiendo que el RT_{mid} es 2,8, vemos que los valores no coinciden pero se aproximan bastante, por lo que podemos decir que el recinto tendrá buena difusión y buena respuesta a las primeras reflexiones.

C_{80}

CLARIDAD MUSICAL real (C_{80})							
Receptores	Posición	Frecuencias					
		125	250	500	1000	2000	4000
Receptor 1	Exterior P.B.	3,257	-0,453	-2,310	2,783	2,617	4,987
Receptor 2	Exterior P.B.	4,803	-0,637	-1,530	-0,027	0,677	3,877
Receptor 3	Exterior P.B.	1,230	-1,050	-2,167	-0,960	1,253	1,410
Receptor 4	Exterior P.B.	-1,700	-1,093	-2,233	-2,690	-0,270	1,687
Receptor 5	Exterior P.B.	3,473	-0,583	-3,077	-3,507	0,297	2,520
Receptor 6	Exterior P.B.	2,337	-2,053	-3,047	-3,900	0,050	2,273
Receptor 7	Exterior P.B.	0,387	-3,097	-4,267	-3,600	-1,990	-1,080
Receptor 8	Interior P.B.	2,807	0,350	-0,907	-0,927	-1,440	-0,280
Receptor 9	Interior P.B.	-4,200	-9,657	-9,900	-10,283	-13,933	-12,587
Receptor 10	Interior P.B.	-3,147	-0,390	-2,123	-3,973	-0,167	0,963
Receptor 11	Interior P.B.	-0,597	-1,007	-1,727	-3,747	-0,317	1,043
Receptor 12	Interior P.B.	-1,957	-1,287	-2,043	-5,587	-2,540	-1,890

Receptor 13	Interior P.B.	0,363	0,297	-0,627	-2,453	-0,350	2,503
Receptor 14	Interior P.1.	-3,400	-1,437	-3,857	-4,277	-3,137	-0,520
Receptor 15	Interior P.1.	-2,460	-2,927	-5,317	-6,243	-3,533	-1,547
Receptor 16	Interior P.1.	-3,090	-3,240	-2,383	-3,387	-1,687	-0,307
Receptor 17	Interior P.1.	-6,150	-2,777	-3,520	-3,247	-3,143	-0,147
Receptor 18	Interior P.1.	-1,450	-1,407	-3,757	-4,190	-3,803	-2,393
Receptor 19	Interior P.1.	-2,163	-0,093	-3,200	-3,570	0,273	-0,520
	Minimo	-6,150	-9,657	-9,900	-10,283	-13,933	-12,587
	Maximo	4,803	0,350	-0,627	2,783	2,617	4,987
	Media	-0,614	-1,713	-3,052	-3,357	-1,639	0,000

El valor medio que se obtiene del $C_{80(3)}$ es de -2,68 s para todos los receptores y de -1,32 s para la media de los exteriores. Estos valores entran dentro de las recomendaciones establecidas ($-4 \geq C_{80(3)} \geq 0$ dB, para salas vacías), “Barron, M.(1993)”.

Por tanto como sabemos que la Claridad musical se define como la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 80 ms ($t=80$), calculada en cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4000 Hz, y el C_{80} va en función del sonido directo, las reflexiones sonoras tempranas y el campo reverberante.

Se puede concluir que en este caso el oído humano percibirá en este intervalo de 80 ms las reflexiones y en el sonido directo de manera integrada, siendo este el fenómeno que contribuye a aumentar la claridad musical.

LF_{E4}

EFICIENCIA LATERAL real (LF ₈₀)							
Receptores	Posición	Frecuencias					
		125	250	500	1000	2000	4000
Receptor 1	Exterior P.B.	0,067	0,163	0,417	0,313	0,280	0,330
Receptor 2	Exterior P.B.	0,160	0,233	0,340	0,197	0,257	0,150
Receptor 3	Exterior P.B.	0,050	0,237	0,360	0,313	0,240	0,440
Receptor 4	Exterior P.B.	0,083	0,200	0,297	0,340	0,253	0,363
Receptor 5	Exterior P.B.	0,137	0,257	0,370	0,463	0,300	0,390
Receptor 6	Exterior P.B.	0,293	0,117	0,327	0,337	0,327	0,380
Receptor 7	Exterior P.B.	0,167	0,407	0,650	0,353	0,523	0,743
Receptor 8	Interior P.B.	0,130	0,153	0,343	0,330	0,420	0,740
Receptor 9	Interior P.B.	0,000	0,000	0,007	0,000	0,017	0,010
Receptor 10	Interior P.B.	0,423	0,230	0,367	0,347	0,183	0,403
Receptor 11	Interior P.B.	0,163	0,403	0,457	0,250	0,243	0,340
Receptor 12	Interior P.B.	0,393	0,257	0,293	0,390	0,337	0,463
Receptor 13	Interior P.B.	0,517	0,230	0,260	0,500	0,267	0,377
Receptor 14	Interior P.1.	0,183	0,157	0,427	0,447	0,363	0,360
Receptor 15	Interior P.1.	0,193	0,230	0,357	0,503	0,560	0,873

Receptor 16	Interior P.1.	0,130	0,457	0,290	0,317	0,253	0,377
Receptor 17	Interior P.1.	0,240	0,280	0,213	0,217	0,250	0,387
Receptor 18	Interior P.1.	0,223	0,347	0,367	0,550	0,440	0,653
Receptor 19	Interior P.1.	0,127	0,193	0,457	0,533	0,350	0,613
	Minimo	0,000	0,000	0,007	0,000	0,017	0,010
	Maximo	0,517	0,457	0,650	0,550	0,560	0,873
	Media	0,194	0,239	0,347	0,353	0,309	0,442

La eficiencia lateral es la relación entre la energía que llega lateralmente al oyente dentro de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo (se excluye el sonido directo) y la energía recibida en todas direcciones en dicho intervalo de tiempo.

Cuando nos referimos a la exclusión del sonido directo, nos referimos a que la medición se empieza a tomar desde los 5 ms, que es cuando se considera que se perciben las primeras reflexiones.

Normalmente se utiliza el promedio de LF correspondiente a las bandas sonoras de frecuencia de octava comprendidas entre 125 Hz y 1 kHz. El cual se denomina LF_{E4} . "Barron, M.(1993)".

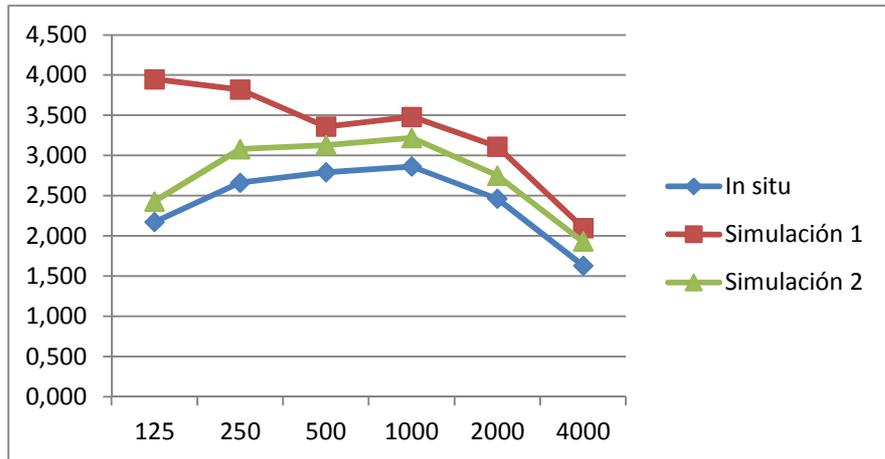
Dicho esto, el valor de este parámetro obtenido con los datos medidos es del 28%, superando el mínimo recomendado del 19%. Por lo que el recinto tiene una buena sensación de espacialidad debido a que tiene una respuesta de las primeras reflexiones más alta que la recomendada. Este dato habría que estudiarlo mejor ya que los valores en tercios de octavas son muy dispares aunque la media sea correcta.

3.4.3. RT_{MID} , SIN INTERVENCIÓN DE TECHOS DE PLADUR

En este apartado se comparará la primera simulación realizada en la que no se tuvo en cuenta el material de los techos interiores realizados con pladur, y si calculó introduciendo un material erróneo (enlucido de yeso), el cual la curva que nos resultó comparada con la real tenía una tendencia distinta y tuvimos que analizar porque ocurría este fenómeno.

A continuación se presentan los resultados que obtuvimos tanto in situ como en las dos simulaciones.

RT30	125	250	500	1000	2000	4000
In situ	2,172	2,662	2,792	2,864	2,462	1,632
Simulación 1	3,950	3,820	3,360	3,480	3,110	2,100
Simulación 2	2,430	3,080	3,130	3,220	2,750	1,930



Analizando los resultados comprobamos que la curva real tiene más absorción en frecuencias bajas que en frecuencias medias, esto ha pasado porque en la intervención que se hizo en los claustros los techos los cubrieron con placas de pladur, comportándose estas como efecto de membrana o resonador siendo estos unos mecanismos de absorción de energía asociados a bajas frecuencias.

Como ya hemos dicho antes la absorción de un material es la cantidad de energía que este pueda absorber por unidad de superficie, dependiendo del tipo de material, su forma, su espesor y su puesta en obra, es decir del proceso de absorción que se realice, así como también de la frecuencia del sonido.

El coeficiente de absorción, α , de una solución constructiva (incluyendo el material de que está hecha, su espesor, su forma de montaje) se define como la razón entre la energía absorbida y la energía incidente y depende de la frecuencia del sonido.

Los diferentes mecanismos de absorción varían según transformen la energía acústica en energía calorífica o en energía mecánica.

Los materiales y sus coeficientes de absorción utilizados en los techos de la primera y la segunda simulación son los siguientes:

Descripción	Código	Frecuencias							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Enlucido de yeso	19017	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02
Techo Pladur	4046	0,29	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09	0,08

Como en la primera simulación no nos dimos cuenta de la asignación de este material a la capa de techos, la curva que nos salía no coincidía con la tendencia de la curva real, teniendo en frecuencias bajas muy poca absorción. Por este motivo se realizó el cambio de material en el programa Odeón y la curva de la simulación 2, es la que dimos por buena para poder continuar realizando los cálculos de todos los parámetros estudiados.

3.5. MATERIAL Y MÉTODOS. LA SIMULACIÓN DEL RECINTO

Como se ha expuesto anteriormente el objetivo de este proyecto a parte de determinar para qué tipo de música es óptimo este claustro, y comparar los parámetros espaciales, temporales y energéticos con los requeridos en las teorías de diferentes autores para que tenga una buena sonoridad el espacio, también se tendrá que realizar una simulación con el objetivo de obtener datos satisfactorios en relación con los reales y cumpliendo con la normativa sin necesidad de validar el modelo.

Para poder realizar esta simulación se introducirán parámetros de otro modelo con las características espaciales y materiales muy semejantes al caso de estudio. En este caso el modelo y los parámetros de referencia que tomaremos serán los de la simulación ya realizada en el Claustro de Llutxent¹³.

Para ello se realiza una simulación con un mismo escenario, para poder comparar los datos obtenidos en la medición real.

3.5.1. REALIZACIÓN DEL MODELO GEOMÉTRICO

En este apartado se plasma el proceso de realización del modelo geométrico de la simulación, junto con las recomendaciones generales para realizar este tipo de modelos.

Como ya se ha comentado al principio se trata de un espacio abierto, pero para poder realizar la simulación en Odeón y poder comprobar las propiedades acústicas según la teoría de la acústica de salas, se deberá transformar en un espacio cerrado a efectos del programa, ya que las fórmulas de los expertos están propuestas para espacios cerrados, y el programa Odeon necesita que el modelo sea cerrado, ya que este proyecta rayos y estos se tienen que mantener dentro del modelo, y no se pueden escapar. Para conseguir que el modelo sea cerrado se aplicará una superficie en la parte superior con un coeficiente de absorción alto (aire). (ODEON Room Acoustic Software. (2009).

El primer paso que se realizó, fue el modelo 3D del recinto de estudio, en este caso, el "Claustro de La Nau".

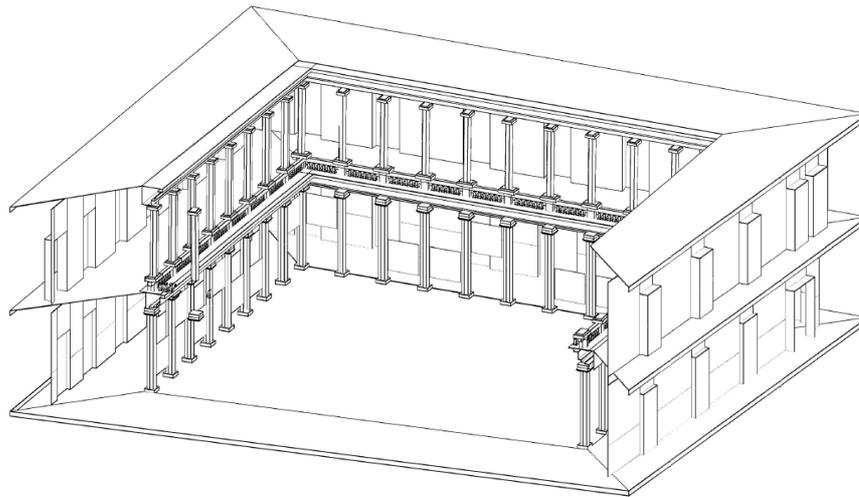
El modelo se realizó, con los datos de los planos de planta y sección longitudinal, facilitados por la oficina técnica de la Universitat de Valencia, realizados en la intervención del año 1997.

Un buen modelo para realizar una simulación, no debe ser complejo ni muy detallado, sino un modelo simplificado de 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. Es mucho más importante, que el paso donde se designan los materiales con sus correspondientes

¹³ P.F.G. Estudio por técnicas de Ray Tracing sobre la adecuación de las simulaciones acústicas a recintos al aire libre. Estudio del Claustro de Llutxent.

características acústicas se haga de manera correcta, ya que son datos, que a menudo no son fáciles de disponer con la aproximación adecuada.

Es importante en este punto, realizar el modelo del recinto en tres dimensiones con unas características en concreto, para que Odeon, pueda analizar su geometría sin dificultad. El Odeon, al igual que otros software de simulación, permiten realizar el modelo a simular. Pero en ocasiones como esta, donde la geometría del recinto es bastante compleja, es más sencillo realizar el 3D, en un programa de CAD. En este caso fue utilizado el AutoCAD 2013. (ODEON Room Acoustic Software. (2009).



Modelo geométrico realizado

Los pasos y consideraciones que se han seguido para la realización del modelo son los siguientes:

- Primero, dibujamos el 3D del claustro, tal y como se realiza en este tipo de programas, a partir de los planos adquiridos.
- Una vez, realizado el claustro en 3D, utilizaremos la función de Autocad denominada “**3D CARA**”. Con ella se repasaron todas las superficies interiores del recinto. Para su posterior exportación al software de simulación, hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:
 - Todas las superficies deben ser planas, por lo que las molduras de los capiteles y basas de las columnas con relieves curvos fueron simplificadas a rectangulares o triangulares según fuera más conveniente para cada elemento.
 - Para facilitar la designación de los materiales en el Odeon, se utilizaron diferentes “capas” de Autocad para cada tipo de material de revestimiento con el que está construido el recinto. Las capas que se

utilizaron fueron diferentes, dependiendo de los revestimientos y zonas que interesen.

- Para los elementos de piedra. Se utilizó una capa para todos los elementos de piedra.
 - Para los revestimientos interiores se utilizó una sola capa de revestimiento de yeso.
 - Para el revestimiento de vidrio. Se utilizó una capa para todas las ventanas.
 - Para los elementos de madera existentes en el recinto, como las puertas.
 - Para el suelo se utilizaron dos capas aunque fueran del mismo material. Se distinguió entre suelos exterior e interiores.
 - Para los techos de pladur se ha utilizado otra capa diferente.
 - Para la escultura situada en el centro del claustro, la fuente situada en uno de los pasillos, y el zócalo que rodea perimetralmente la parte interior de los pasillos se utilizó otra capa.
 - En el momento que fuimos a realizar la medición nos encontramos con una exposición de fotografías la cual estaba expuesta en el claustro con unos paneles de 2,00 x 1,60 m, los cuales hemos modelado e introducido en la simulación para el cálculo. Se ha utilizado otra capa para estos paneles.
 - Y la última capa para el aire, que actúa de cerramiento superior en esta tipología.
- Con el modelo realizado en estas condiciones, se puede exportar al software de simulación Odeon, sin ningún problema.

Seguidamente se revisaron las superficies del modelo del claustro, ya que tanto la superposición como la ausencia de ellas llevan a resultados incorrectos de la simulación. En este caso, en la primera revisión se observó que se perdía una cantidad de energía considerable por la zona del techo de planta primera, y también por alguna de las puertas. Esta pérdida de energía, fue creada por un fallo en el modelado de cierre de las caras 3D, el cual se detectó y se subsano, pudiendo dar como correcto el modelo en la siguiente revisión.

3.5.2. CARACTERÍSTICAS DE LA SIMULACIÓN

Como se ha comentado al principio, el objetivo de este trabajo es saber si con la utilización de los parámetros de otro claustro muy semblante a este, se pueden sacar valores válidos según el marco normativo, sin que sea necesario validar el modelo con antelación.

El otro objetivo es comprobar las propiedades acústicas actuales entre la medición in situ y la simulación, analizando los resultados de cada parámetro y comparando con los datos que presentan los expertos en la teoría de acústica de salas.

A continuación se describen las características de los materiales utilizados para la simulación del Claustro.

Materiales y datos generales:

Descripción	Código	Frecuencias							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Piedra	19017	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02
Pavimentos	18032	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Enlucido de yeso	19017	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02
Madera	17009	0,01	0,01	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
Vidrio	18027	0,18	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
Zócalo	18025	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Fuente	18025	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Figura	18025	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Paneles	4040	0,11	0,11	0,13	0,05	0,03	0,02	0,03	0,03
Aire	90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Techo Pladur	4046	0,29	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09	0,08

Tabla 4 Coeficientes de absorción utilizados en la simulación

Los materiales utilizados en la simulación son:

- Piedra. Se refiere a todo la estructura del claustro realizada con piedra. (Columnas, capiteles, basas, entablamento).
- Enlucido de yeso. Se refiere a todo el revestimiento en contacto con el aire libre en el interior del claustro.
- Pavimentos. Se refiere a todo el revestimiento del pavimento del claustro, realizado con baldosas.
- Vidrio de una hoja. Son los coeficientes de absorción para revestimientos de vidrios con una sola hoja con 6 mm de espesor, como es el caso de las ventanas del claustro.
- Puerta solida de madera. Representa a las diferentes puertas de madera maciza que se encuentran en el claustro.

- Zócalo, fuente y figura. Son los coeficientes de absorción para un revestimiento de mármol.
- Aire. Según la simulación el coeficiente de absorción del aire es del 100%.

Todos los materiales están tomados de la biblioteca del propio Software Odeón, y en el caso en concreto de la piedra y el revestimiento de yeso de la simulación realizada del Claustro de Llutxent.

Estos dos materiales son los que normalmente se utilizan para realizar la validación de este tipo de simulaciones, ya que son los elementos constructivos de los que no se tienen datos concluyentes de sus coeficientes a causa de su antigüedad y la imposibilidad de realizar ensayos. Por ello se ha cogido como referencia los utilizados en el Claustro de Llutxent, edificio de similares características y materiales, comprobando así si tienen un comportamiento similar.

Además, para acabar de definir el escenario de las simulaciones, se destacan los siguientes datos y referencias de cálculo que se fijaron, ya que influyen en los resultados finales.

- Temperatura interior: 20 °C
- Humedad relativa: 50 %
- Densidad del aire: estándar
- Longitud de la Respuesta Impulsional: 4.500 ms (tiempo durante el cual que se va a calcular la respuesta de la sala)
- El número de rayos prefijado: 209.880 rayos
- Método de dispersión: Lambert

Definición del escenario:

Para ello, principalmente se especificaron el tipo y situación de la fuente y los receptores.

La fuente y los receptores se situaron exactamente en la misma posición que en la medición que se realizó en la simulación, para poder comprobar la validez de los valores. Es una fuente omnidireccional, con una ganancia de 90 dB, la cual emitía una señal simulada de ruido rosa.

En la tabla que se expone a continuación, se muestran exactamente la situación de los receptores y la fuente respecto las coordenadas del modelo geométrico de la simulación.

Zona	Nº Receptor/Fuente	Coordenadas (x,y,z)
Eje de simetria	Fuente	(0,00, 8,00, 1,50)
Central exterior P.B.	Receptor 1	(6,00, 1,00, 1,20)
Central exterior P.B.	Receptor 2	(-6,00, 1,00, 1,20)
Central exterior P.B.	Receptor 3	(6,00, -5,00, 1,20)
Central exterior P.B.	Receptor 4	(-6,00, -5,00, 1,20)
Central exterior P.B.	Receptor 5	(6,00, -10,00, 1,20)
Central exterior P.B.	Receptor 6	(-6,00, -10,00, 1,20)
Central exterior P.B.	Receptor 7	(0,00, -10,00, 1,20)
Lateral interior P.B.	Receptor 8	(13,00, 1,00, 1,20)
Lateral interior P.B.	Receptor 9	(13,00, -10,00, 1,20)
Central interior P.B.	Receptor 10	(6,00, -16,00, 1,20)
Central interior P.B.	Receptor 11	(-6,00, -16,00, 1,20)
Lateral interior P.B.	Receptor 12	(-11,00, -10,00, 1,20)
Lateral interior P.B.	Receptor 13	(-12,00, 1,00, 1,20)
Lateral interior P.1.	Receptor 14	(-12,00, 1,00, 6,50)
Lateral interior P.1.	Receptor 15	(-11,00, -10,00, 6,50)
Central interior P.1.	Receptor 16	(-6,00, -16,00, 6,50)
Central interior P.1.	Receptor 17	(6,00, -16,00, 6,50)
Lateral interior P.1.	Receptor 18	(13,00, -10,00, 6,50)
Lateral interior P.1.	Receptor 19	(13,00, 1,00, 6,50)

3.6. RESULTADO DE LA SIMULACIÓN Y SU ANALISIS

3.6.1. INTRODUCCIÓN (Parámetros a estudiar)

En este apartado se comprobarán las propiedades acústicas actuales entre la medición in situ y la simulación, analizando los resultados de cada parámetro y comparando con los datos que presentan los expertos en la teoría de acústica de salas, además se comprobará la idoneidad de la simulación.

Como ya hemos dicho antes para verificar la validez de este método, los resultados obtenidos en la simulación respecto a la medición in situ deberían estar dentro del rango que marca la normativa UNE-EN ISO 3382.

Según los parámetros que vamos a estudiar la normativa marca un umbral diferencial (JND), el cual se trata de la diferencia máxima permitida tanto en positivo como en negativo, que puede haber entre el resultado de la medición real, con el de la simulación. El propósito de cumplir el valor de estos márgenes de diferencia en la simulación es poder estar dentro de unas diferencias en el modelo 3D que el oído humano no es capaz de percibir, en el momento que se sobrepasan los límites marcados por la normativa, el oído humano percibe la diferencia, y por tanto los resultados de la simulación no serían válidos, y se debería de validar.

La valores que nos marca la normativa para cada parámetro como límite máximo y mínimo entre los resultados reales y los simulados, son los siguientes:

Parámetros	Umbral diferencial
RT	5%
EDT	5%
C80	1 Db
LF80	0,05

A continuación se presentan los datos obtenidos en la simulación, con las comparaciones pertinentes entre las curvas reales y normativas. También se hace una diferenciación entre los puntos exteriores e interiores, ya que el número de reflexiones variará dependiendo de si su situación es bajo techo o no.

3.6.2. PARAMETROS TEMPORALES (RT₃₀ y EDT)

A continuación se introduce la tabla de los RT obtenidos en la simulación:

RT₃₀

TIEMPO DE REVERBERACIÓN simulación (RT ₃₀)							
Receptores	Posición	Frecuencias					
		125	250	500	1000	2000	4000
Receptor 1	Exterior P.B.	2,41	3,08	3,11	3,19	2,73	1,89
Receptor 2	Exterior P.B.	2,44	3,08	3,12	3,20	2,72	1,91
Receptor 3	Exterior P.B.	2,39	3,05	3,08	3,20	2,70	1,93
Receptor 4	Exterior P.B.	2,45	3,09	3,15	3,22	2,79	1,96
Receptor 5	Exterior P.B.	2,37	3,05	3,11	3,19	2,71	1,90
Receptor 6	Exterior P.B.	2,39	3,05	3,15	3,18	2,72	1,88
Receptor 7	Exterior P.B.	2,40	3,02	3,05	3,16	2,72	1,92
Receptor 8	Interior P.B.	2,47	3,08	3,14	3,23	2,72	1,92
Receptor 9	Interior P.B.	2,35	3,03	3,08	3,19	2,70	1,91
Receptor 10	Interior P.B.	2,38	3,00	3,05	3,12	2,65	1,94
Receptor 11	Interior P.B.	2,43	3,15	3,23	3,34	2,82	1,91
Receptor 12	Interior P.B.	2,49	3,13	3,23	3,25	2,79	1,92
Receptor 13	Interior P.B.	2,43	3,03	3,07	3,18	2,72	1,93
Receptor 14	Interior P.1.	2,43	3,07	3,18	3,27	2,75	1,94
Receptor 15	Interior P.1.	2,44	3,11	3,18	3,28	2,83	1,97
Receptor 16	Interior P.1.	2,46	3,09	3,07	3,15	2,76	2,03
Receptor 17	Interior P.1.	2,47	3,12	3,16	3,20	2,76	1,97
Receptor 18	Interior P.1.	2,49	3,15	3,24	3,28	2,85	1,95
Receptor 19	Interior P.1.	2,44	3,06	3,11	3,29	2,74	1,95
	Mínimo	2,35	3,00	3,05	3,12	2,65	1,88
	Máximo	2,49	3,15	3,24	3,34	2,85	2,03
	Media	2,43	3,08	3,13	3,22	2,75	1,93

A continuación se realiza la comprobación de las características acústicas del claustro simulado en comparación con los resultados obtenidos in situ y los datos recomendados que proponen los expertos en la teoría de la acústica de salas.

Parámetro	IN SITU	SIMULACIÓN
RT mid	2,828	3,175
BR	0,854	0,868
Br	0,723	0,737

Se observa que el RT mid de la simulación tiene un valor superior al real, con lo que la acústica del espacio según la teoría aún sería peor, ya que la máxima era de 2,2 segundos para música sinfónica, y para otro tipos de música el valor era más bajo. Este resultado se obtienen a consecuencia de introducir materiales en el modelo con características que difieren con las reales, y por tanto que tienen menos absorción. Esto es debido a que no se ha validado el modelo y se han utilizado datos de otro modelo con las características similares.

Los valores de Calidez y Brillo vemos que si coinciden. Para calcular este valor se realiza un cociente entre las frecuencias altas y las bajas, entre las medias. Y como observaremos a continuación la curva simulada y la real tienen la misma tendencia, por tanto el resultado de estos cocientes es el mismo y es un buen resultado en el Brillo, y un poco peor en la Calidez ya que el techo de pladur influye bastante en la absorción de frecuencias bajas y se queda un poco por debajo del mínimo ideal.

El análisis que se realiza en cada parámetro consiste en la comparación en graficas de los resultados obtenidos en la simulación, los obtenidos in situ, y los obtenidos aplicando la normativa a los datos reales, así se puede observar si la curva de la simulación pasa por dentro de las 2 curvas que marca la normativa como máximo y mínimo permitido.

El procedimiento será siempre el mismo, primero se introducirá la gráfica con la media de todos los receptores, a continuación la gráfica con la media de los receptores exteriores, y por último la gráfica con los receptores interiores.

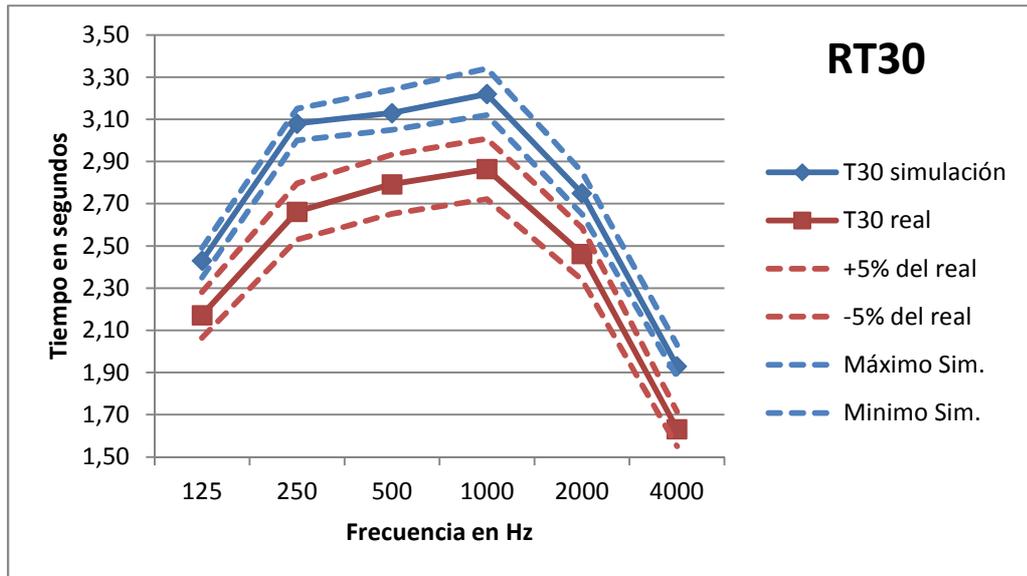


Fig. 29 Curvas tonales. Todos los receptores

A continuación la tabla y las gráficas de los resultados obtenidos como media de los receptores exteriores e interiores.

RT30	Frecuencias	125	250	500	1000	2000	4000
In situ	Exteriores	2,003	2,668	2,766	2,781	2,367	1,581
	Interiores	2,271	2,659	2,808	2,913	2,517	1,662
Simulación	Exteriores	2,407	3,060	3,110	3,191	2,727	1,913
	Interiores	2,440	3,085	3,145	3,232	2,758	1,945

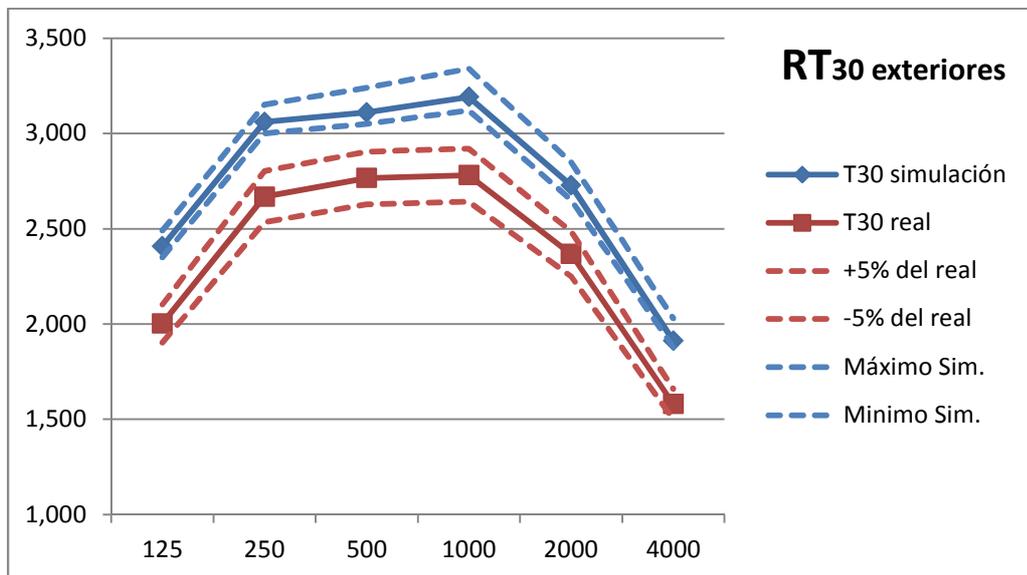


Fig. 30 Curvas tonales. Receptores exteriores

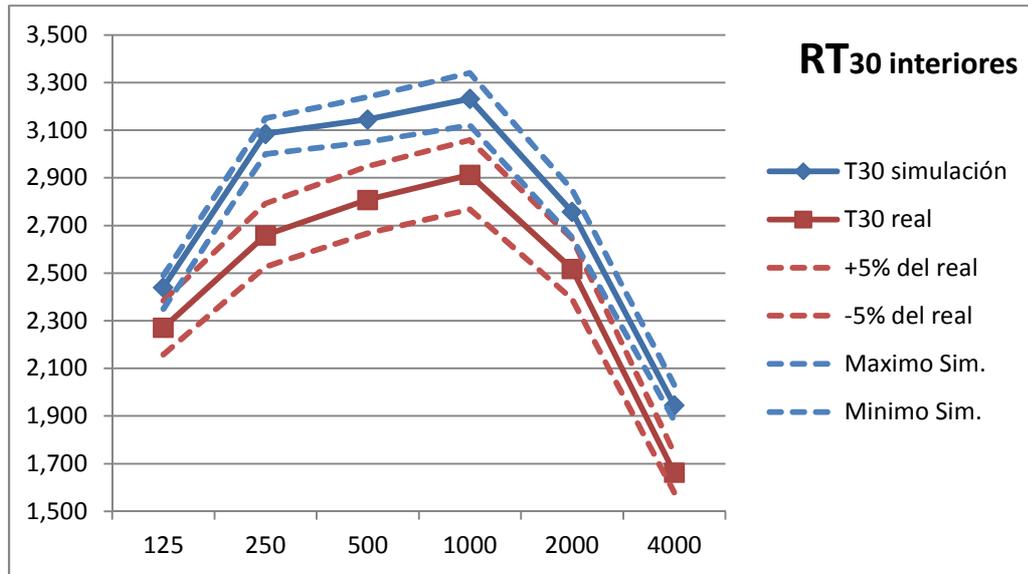


Fig. 31 Curvas tonales. Receptores interiores

Se observa que la curva del RT₃₀ de la simulación en ninguno de los tres casos pasa por dentro de la curva máxima y mínima que marca la normativa, pero teniendo en cuenta que la medición se realizó con sala vacía y sabiendo que con el público este resultado es más bajo, se puede decir que llegaría a cumplir con la normativa.

EDT

TIEMPO DE CAÍDA INICIAL simulación (EDT)							
Receptores	Posición	Frecuencias					
		125	250	500	1000	2000	4000
Receptor 1	Exterior P.B.	2,36	2,93	2,98	3,15	2,80	2,02
Receptor 2	Exterior P.B.	2,12	2,72	2,76	2,84	2,50	1,75
Receptor 3	Exterior P.B.	2,14	2,80	2,86	2,98	2,64	1,87
Receptor 4	Exterior P.B.	2,45	2,99	3,02	3,13	2,79	2,15
Receptor 5	Exterior P.B.	2,29	2,91	2,93	3,01	2,69	1,93
Receptor 6	Exterior P.B.	2,58	3,10	3,19	3,28	2,90	2,18
Receptor 7	Exterior P.B.	2,12	2,74	2,79	2,89	2,55	1,82
Receptor 8	Interior P.B.	2,41	2,98	3,06	3,17	2,82	2,01
Receptor 9	Interior P.B.	2,57	3,15	3,26	3,30	2,87	2,09
Receptor 10	Interior P.B.	2,28	2,91	2,97	3,09	2,66	1,95
Receptor 11	Interior P.B.	2,49	3,09	3,17	3,21	2,85	2,11
Receptor 12	Interior P.B.	2,57	3,19	3,26	3,31	2,89	2,24
Receptor 13	Interior P.B.	2,34	3,03	3,12	3,25	2,82	2,04
Receptor 14	Interior P.1.	2,76	3,44	3,47	3,56	3,07	2,22
Receptor 15	Interior P.1.	2,66	3,38	3,46	3,56	3,11	2,19
Receptor 16	Interior P.1.	2,67	3,38	3,54	3,55	3,10	2,31
Receptor 17	Interior P.1.	2,57	3,34	3,44	3,49	3,03	2,10
Receptor 18	Interior P.1.	2,79	3,44	3,50	3,60	3,13	2,31
Receptor 19	Interior P.1.	2,73	3,41	3,41	3,49	3,14	2,24

Mínimo	2,12	2,72	2,76	2,84	2,50	1,75
Máximo	2,79	3,44	3,54	3,60	3,14	2,31
Media	2,47	3,10	3,17	3,26	2,86	2,08

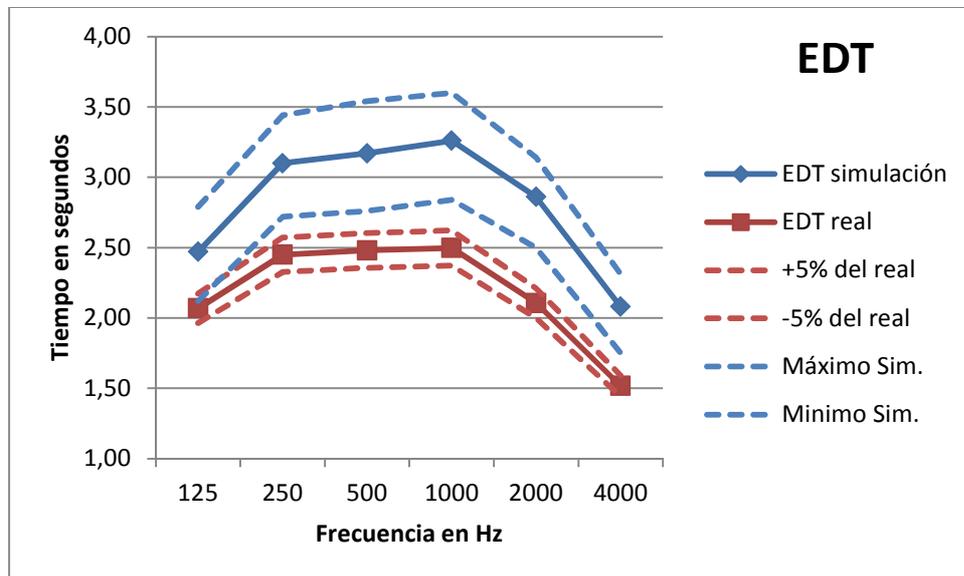


Fig. 32 Curvas tonales. Todos los receptores

A continuación se realiza la comprobación de las características acústicas del claustro simulado en comparación con los resultados obtenidos in situ y los datos recomendados que proponen los expertos en la teoría de la acústica de salas.

Parámetro	IN SITU	SIMULACIÓN
EDT	2,50	3,21

Como se ha explicado anteriormente, para que el espacio tenga buena difusión y una buena respuesta a las primeras reflexiones el valor de EDT deberá de coincidir o ser muy próximo al valor de RT mid.

En este caso el resultado in situ del EDT es 2,5 s. Sabiendo que el RT_{mid} es 2,8, vemos que los valores no coinciden pero se aproximan bastante, y lo mismo pasa con el EDT simulado que es igual a 3,21 y por tanto se aproxima al RT_{mid} simulado igual a 3,17. Como los valores se aproximan bastante se puede decir que se tiene buena difusión y buena respuesta a las primeras reflexiones. Otro fenómeno importante y positivo que ocurre es que la curva del EDT real y el EDT simulado tienen la misma tendencia.

A continuación se realiza la comparación en graficas de los resultados obtenidos de la simulación, los obtenidos in situ, y los obtenidos aplicando la normativa a los datos reales, con la media de todos los receptores interiores y exteriores.

EDT	Frecuencias	125	250	500	1000	2000	4000
In situ	Exteriores	1,800	2,320	2,356	2,421	2,015	1,444
	Interiores	2,224	2,525	2,552	2,541	2,159	1,559
Simulación	Exteriores	2,294	2,884	2,933	3,040	2,696	1,960
	Interiores	2,570	3,228	3,305	3,382	2,958	2,151

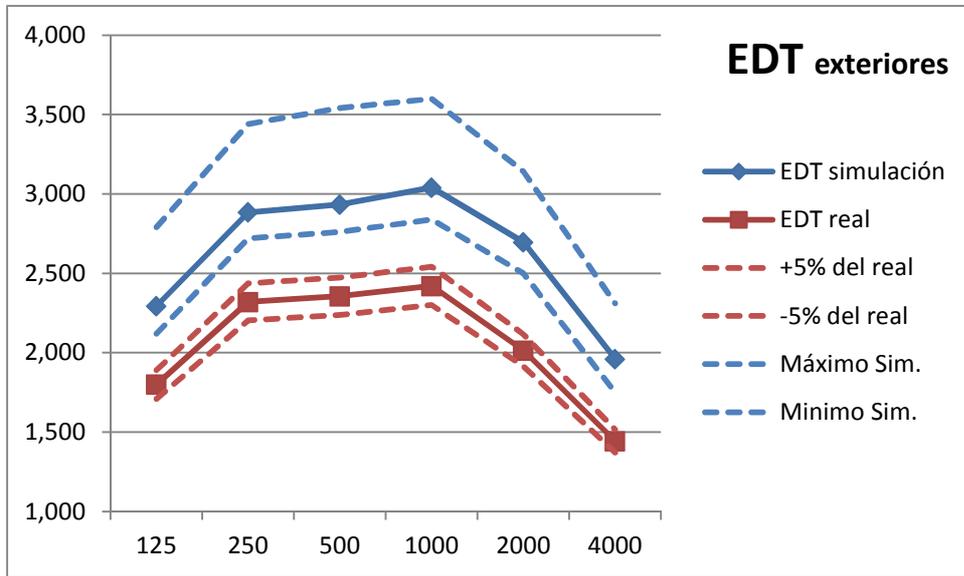


Fig. 33 Curvas tonales. Receptores exteriores

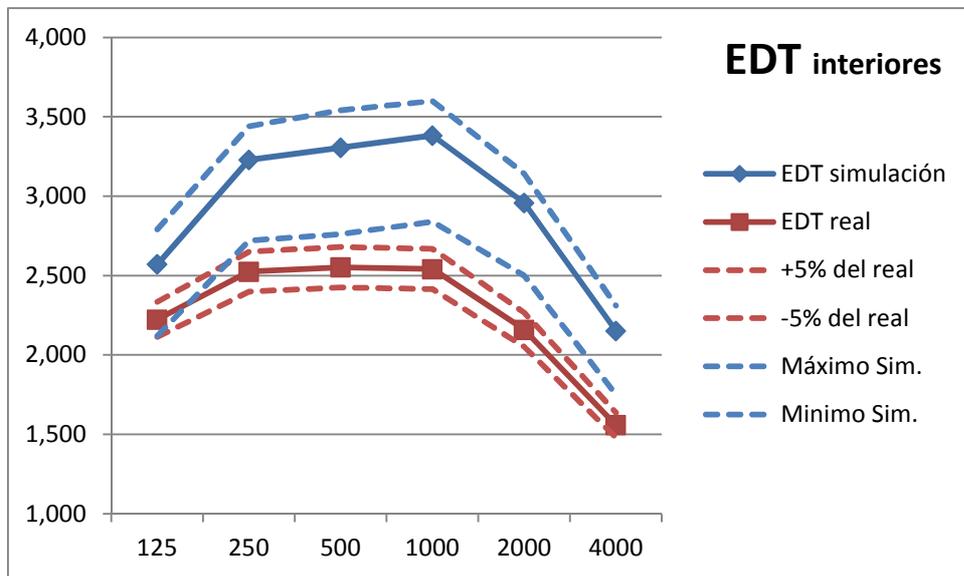


Fig. 34 Curvas tonales. Receptores interiores

Se observa que la curva del EDT de la simulación en ninguno de los tres casos pasa por dentro de la curva máxima y mínima que marca la normativa, pero pasa lo mismo que el parámetro anterior, y con el público estos niveles serían más bajos y se cumplirían con la normativa, observando también que siguen la misma tendencia.

Se observa que en los valores de los interiores la curva se aleja más de la real, porque se tiene un mayor número de primeras reflexiones.

3.6.3. PARAMETROS ENERGETICOS (C₈₀)

CLARIDAD MUSICAL simulación (C ₈₀)							
Receptores	Posición	Frecuencias					
		125	250	500	1000	2000	4000
Receptor 1	Exterior P.B.	-0,30	-1,40	-1,80	-1,80	-0,90	1,30
Receptor 2	Exterior P.B.	-0,40	-1,10	-1,10	-1,10	-0,40	1,40
Receptor 3	Exterior P.B.	-2,90	-3,80	-3,80	-3,90	-3,10	-1,20
Receptor 4	Exterior P.B.	-3,80	-4,80	-4,80	-5,00	-4,30	-2,20
Receptor 5	Exterior P.B.	-2,60	-3,60	-3,70	-4,00	-3,40	-1,60
Receptor 6	Exterior P.B.	-4,60	-5,90	-5,90	-6,00	-5,20	-2,90
Receptor 7	Exterior P.B.	-0,50	-1,40	-1,40	-1,70	-1,40	0,10
Receptor 8	Interior P.B.	-1,90	-3,70	-3,80	-4,00	-3,40	-1,40
Receptor 9	Interior P.B.	-2,60	-4,30	-4,50	-4,80	-4,20	-2,30
Receptor 10	Interior P.B.	-1,10	-2,80	-3,10	-3,50	-2,90	-1,10
Receptor 11	Interior P.B.	-4,00	-5,60	-5,80	-6,10	-5,40	-3,50
Receptor 12	Interior P.B.	-3,60	-5,40	-5,70	-5,80	-4,80	-2,60
Receptor 13	Interior P.B.	-0,60	-2,60	-2,80	-3,40	-2,50	-0,30
Receptor 14	Interior P.1.	-6,30	-7,60	-7,80	-7,90	-7,20	-5,20
Receptor 15	Interior P.1.	-4,30	-5,90	-6,10	-6,40	-5,80	-3,90
Receptor 16	Interior P.1.	-5,80	-7,70	-8,10	-8,40	-7,70	-5,80
Receptor 17	Interior P.1.	-2,90	-4,90	-5,30	-5,60	-5,10	-3,20
Receptor 18	Interior P.1.	-6,00	-7,90	-8,30	-8,70	-8,10	-6,20
Receptor 19	Interior P.1.	-6,30	-7,90	-8,20	-8,50	-8,00	-6,10
	Mínimo	-6,30	-7,90	-8,30	-8,70	-8,10	-6,20
	Máximo	-0,30	-1,10	-1,10	-1,10	-0,40	1,40
	Media	-3,20	-4,60	-4,90	-5,10	-4,40	-2,50

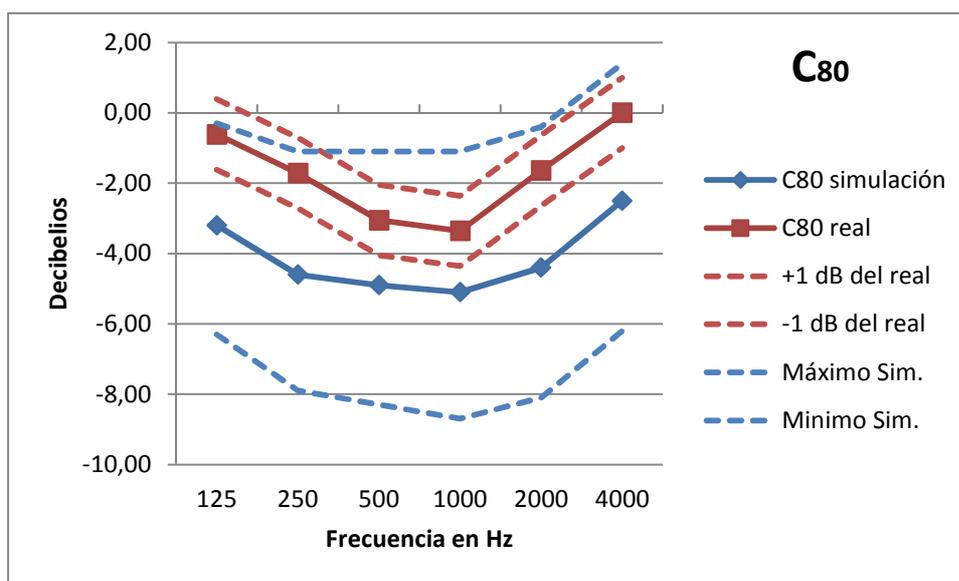


Fig. 35 Curvas tonales. Todos los receptores

A continuación se realiza la comprobación de las características acústicas del claustro simulado en comparación con los resultados obtenidos in situ y los datos recomendados que proponen los expertos en la teoría de la acústica de salas.

Parámetro	IN SITU	SIMULACIÓN
C80 (3)	-2,68	-4,80
C80 (3) ext.	-1,32	-3,08

El valor medio que se obtiene del $C_{80(3)}$ real es de -2,68 s para todos los receptores y de -1,32 s para la media de los exteriores. En comparación con los resultados que se obtienen en la simulación de -4,80 para todos los receptores y 3,08 para los receptores exteriores, se observa una diferencia de unos 2 dB aproximadamente por debajo.

Según los expertos los valores establecidos para este parámetro están comprendidos entre $(-4 \geq C_{80(3)} \geq 0 \text{ dB})$, para salas vacías). En este caso la medición real está dentro de las recomendaciones, pero los resultados para todos los receptores de la simulación se sale fuera de las recomendaciones. Por tanto en la simulación se puede decir que no llega bastante energía sonora al oyente durante los primeros 80 ms, y por tanto en este periodo de tiempo las reflexiones y el sonido directo no quedaran integradas, y no habrá buena claridad musical.

A continuación se realiza la comparación en graficas de los resultados obtenidos de la simulación, los obtenidos in situ, y los obtenidos aplicando la normativa a los datos reales, con la media de todos los receptores interiores y exteriores.

C80	Frecuencias	125	250	500	1000	2000	4000
In situ	Exteriores	1,970	-1,281	-2,661	-1,700	0,376	2,239
	Interiores	-2,120	-1,964	-3,280	-4,324	-2,815	-1,307
Simulación	Exteriores	-2,157	-3,143	-3,214	-3,357	-2,671	-0,729
	Interiores	-3,783	-5,525	-5,792	-6,092	-5,425	-3,467

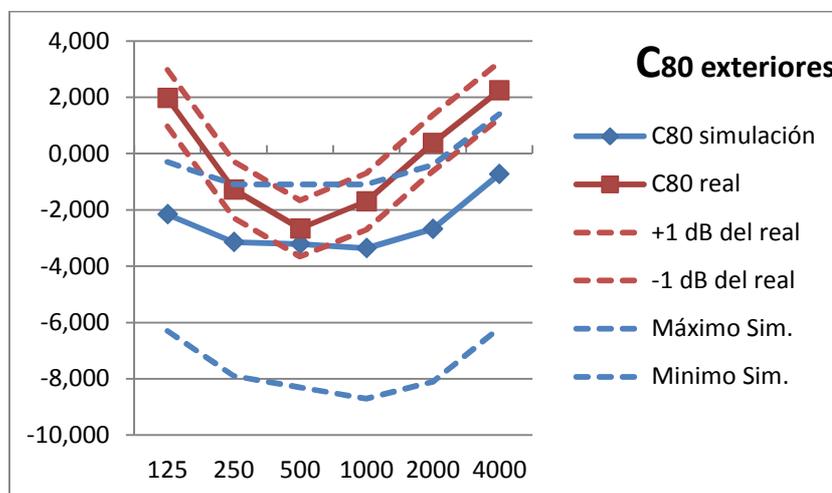


Fig. 36 Curvas tonales. Receptores exteriores

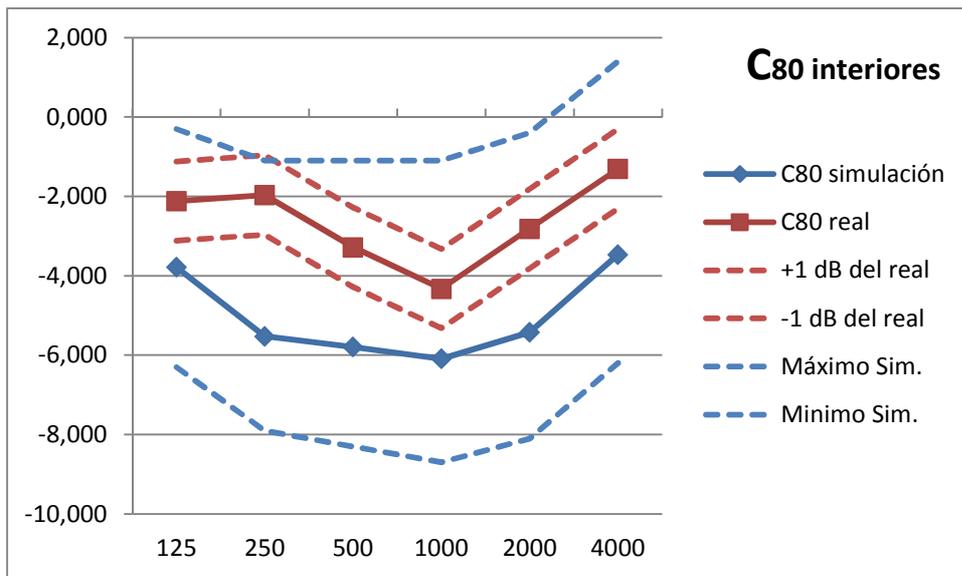


Fig. 37 Curvas tonales. Receptores interiores

Se observa que la curva del C_{80} de la simulación en la media de todos los receptores y en los receptores interiores, no entra dentro de la curva máxima y mínima que marca la normativa, en cambio en la media de los receptores exteriores se observa que en la frecuencia 500 Hz sí que cumple con la normativa estando dentro de los límites marcados por las curvas de +1 y -1 respecto el resultado real.

En este parámetro hay que tener en cuenta los máximos y mínimos y no solo las medias ya que depende mucho de la situación del receptor, y pudiéndose considerar resultados válidos todos los que estén dentro del rango de máximos y mínimos.

En esta frecuencia de 500 Hz ocurre esto porque en la zona exterior del claustro llegará más energía sonora durante los primeros 80 ms, además al ser un parámetro que depende del sonido directo, las reflexiones sonoras tempranas y el campo reverberante, se puede decir que en este punto llegarán más reflexiones tempranas, más sonido directo y por tanto el valor de C_{80} subirá siendo más positivo, habiendo más claridad en esta zona y entrando en el marco normativo.

3.6.4. PARAMETROS ESPACIALES (LF_{80})

EFICIENCIA LATERAL simulación (LF_{80})							
Receptores	Posición	Frecuencias					
		125	250	500	1000	2000	4000
Receptor 1	Exterior P.B.	0,273	0,256	0,239	0,229	0,231	0,224

Receptor 2	Exterior P.B.	0,205	0,212	0,219	0,216	0,205	0,185
Receptor 3	Exterior P.B.	0,137	0,134	0,129	0,132	0,129	0,120
Receptor 4	Exterior P.B.	0,308	0,313	0,313	0,288	0,262	0,241
Receptor 5	Exterior P.B.	0,294	0,299	0,303	0,300	0,283	0,271
Receptor 6	Exterior P.B.	0,337	0,355	0,364	0,375	0,374	0,369
Receptor 7	Exterior P.B.	0,407	0,423	0,434	0,440	0,442	0,445
Receptor 8	Interior P.B.	0,297	0,300	0,302	0,296	0,282	0,265
Receptor 9	Interior P.B.	0,328	0,319	0,321	0,327	0,330	0,325
Receptor 10	Interior P.B.	0,260	0,258	0,254	0,253	0,248	0,243
Receptor 11	Interior P.B.	0,330	0,310	0,311	0,315	0,312	0,307
Receptor 12	Interior P.B.	0,327	0,331	0,335	0,333	0,327	0,321
Receptor 13	Interior P.B.	0,448	0,413	0,420	0,451	0,460	0,462
Receptor 14	Interior P.1.	0,318	0,321	0,323	0,338	0,354	0,359
Receptor 15	Interior P.1.	0,389	0,411	0,423	0,413	0,411	0,413
Receptor 16	Interior P.1.	0,350	0,357	0,357	0,358	0,353	0,350
Receptor 17	Interior P.1.	0,277	0,257	0,242	0,249	0,260	0,273
Receptor 18	Interior P.1.	0,341	0,367	0,379	0,382	0,377	0,371
Receptor 19	Interior P.1.	0,226	0,249	0,260	0,271	0,282	0,289
	Mínimo	0,137	0,134	0,129	0,132	0,129	0,120
	Máximo	0,448	0,423	0,434	0,451	0,460	0,462
	Media	0,308	0,310	0,312	0,314	0,312	0,307

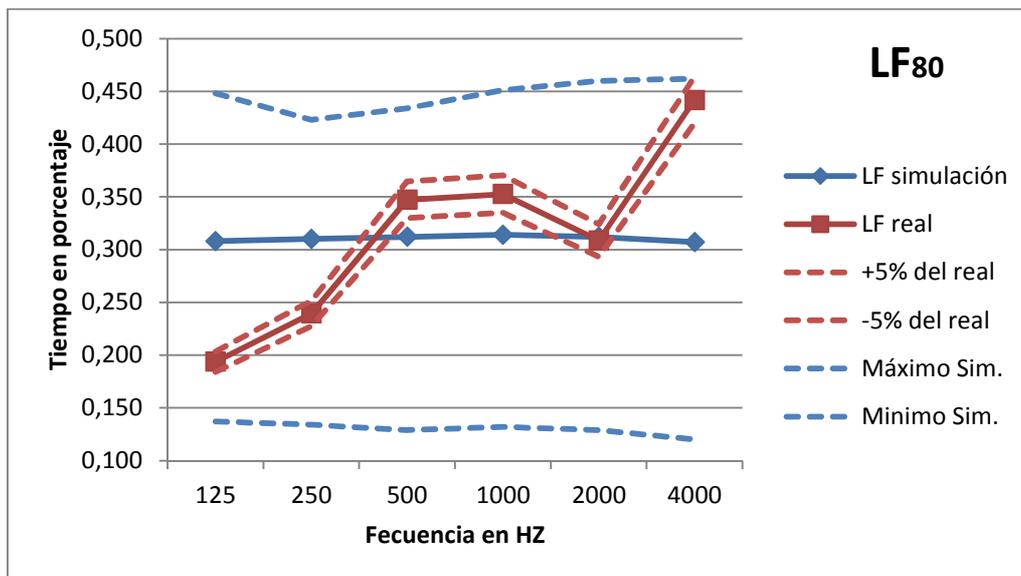


Fig. 38 Curvas tonales. Media de todos los receptores

A continuación se realiza la comprobación de las características acústicas del claustro simulado en comparación con los resultados obtenidos in situ y los datos recomendados que proponen los expertos en la teoría de la acústica de salas.

Parámetro	IN SITU	SIMULACIÓN
LF E4	28%	31%
LF E4 exterior	27%	28%
LF E4 interior	28%	32%

La eficiencia lateral es la relación entre la energía que llega lateralmente al oyente dentro de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo y la energía recibida en todas direcciones en dicho intervalo de tiempo.

Normalmente se utiliza el promedio de LF correspondiente a las bandas sonoras de frecuencia de octava comprendidas entre 125 Hz y 1 kHz. El cual se denomina LF_{E4} .

Dicho esto, el valor de este parámetro obtenido con los datos medidos in situ es del 28%, superando el mínimo recomendado del 19%. Observando el resultado obtenido en la simulación se ve una mejora con un 31%, llegando más energía lateral en la simulación que en la realidad.

Los resultados obtenidos entre receptores exteriores e interiores, se observa el mismo fenómeno. Los resultados de la simulación siempre son superiores a los reales, y por tanto habrá mayor sensación de espacialidad debido a que tiene una respuesta de las primeras reflexiones más alta que la recomendada por los expertos (19%), y que los resultados obtenidos in situ.

A continuación se realiza la comparación en graficas de los resultados obtenidos de la simulación, los obtenidos in situ, y los obtenidos aplicando la normativa a los datos reales, con la media de todos los receptores interiores y exteriores.

LF80	Frecuencias	125	250	500	1000	2000	4000
In situ	Exteriores	0,137	0,230	0,394	0,331	0,311	0,400
	Interiores	0,227	0,245	0,320	0,365	0,307	0,466
Simulación	Exteriores	0,280	0,285	0,286	0,283	0,275	0,265
	Interiores	0,324	0,324	0,327	0,332	0,333	0,332

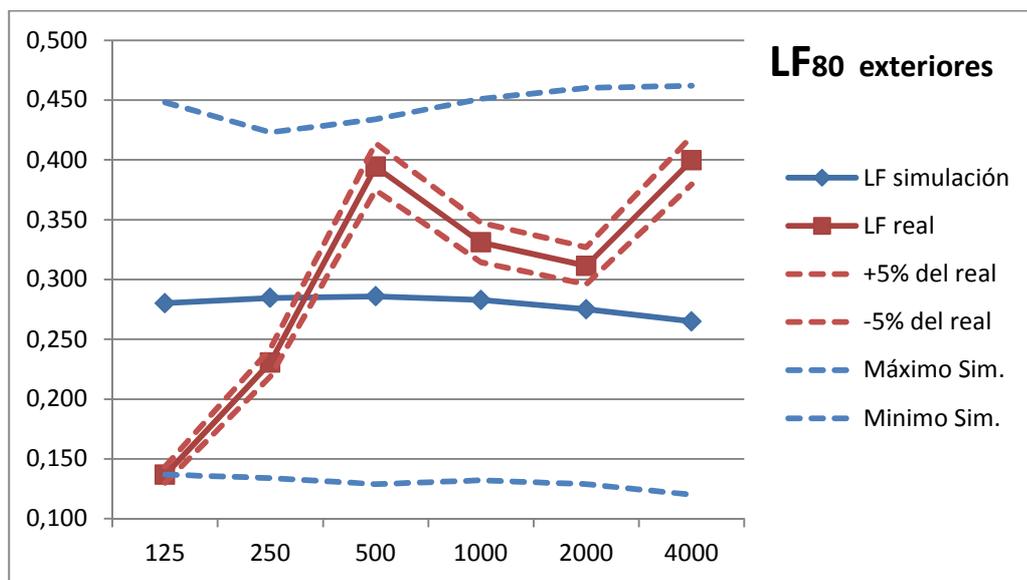


Fig. 39 Curvas tonales. Receptores exteriores

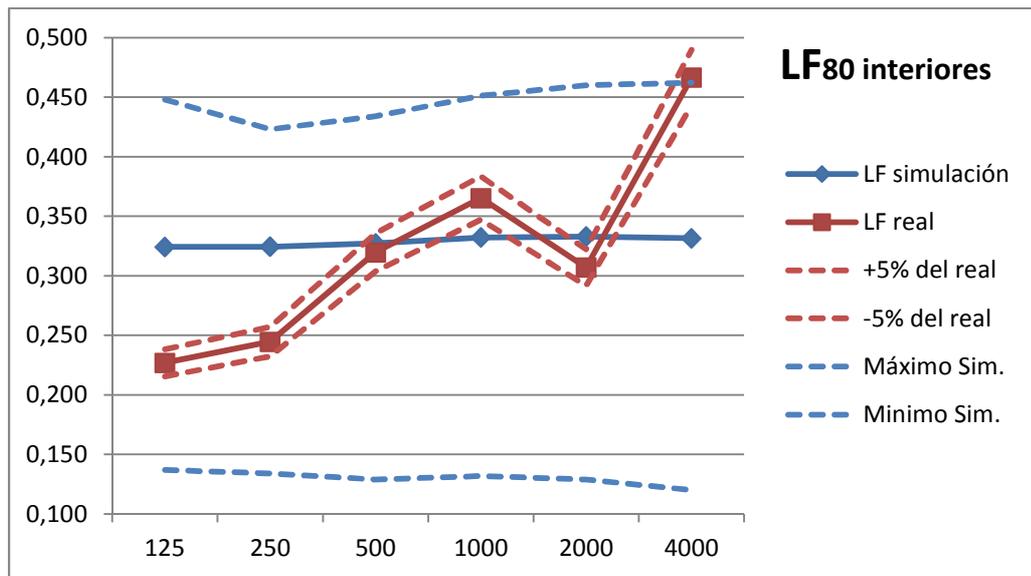


Fig. 40 Curvas tonales. Receptores interiores

Se observa que la curva del LF_{80} de la simulación tiene una tendencia diferente a la real tanto en la media de todos los receptores como en los receptores exteriores e interiores por separado.

Esto ocurre porque tanto en el parámetro de LF_{E4} , como en el C_{80} la posición del receptor influye mucho, y también la llegada de la energía directa y las primeras reflexiones, es por esto que no se le puede dar la fiabilidad a una media y también hay que comprobar que los máximos y mínimos estén dentro del rango real.

La eficiencia lateral es la relación entre la energía que llega lateralmente al oyente dentro de los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo y la energía recibida en todas direcciones en dicho intervalo de tiempo, por tanto en este caso en particular se observa una desviación en cuanto a la tendencia de la curva simulada y real, pero se encuentra dentro de los máximos y mínimos, por tanto no es problema.

Dicho esto, el espacio estudiado tiene buena espacialidad con la comparación de que los resultados reales y simulados se encuentran en el mismo rango.

4. CAPITULO 4 CONCLUSIONES

4.1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo de investigación ha pretendido analizar la idoneidad del método de la simulación acústica para recrear las condiciones acústicas de un claustro sin validar previamente el modelo 3D y utilizando como características de referencia las ya utilizadas en otra simulación de un claustro muy similar.

Hasta ahora siempre que se ha realizado una simulación de un modelo 3D, este se valida previamente con un método de prueba-error, cambiando los coeficientes de absorción de uno de los materiales que menos información se tiene y que no se encuentra en bibliografía para obtener esos datos y por la imposibilidad de realizar ensayos de esos sistemas constructivos. Así se modifican los resultados de la simulación aproximándose lo máximo posible a los resultados obtenidos in situ, y poder verificar que se tiene un modelo 3D fiable, muy próximo al real.

En este caso se ha pretendido llegar a unos resultados aproximados a la realidad sin validar previamente el modelo. Por eso se han analizado respecto al marco normativo que nos garantiza que dentro de esas diferencias el umbral auditivo no las diferencia.

A parte de cumplir con este objetivo, también se ha cumplido con el objetivo de comprobar las propiedades acústicas actuales del claustro, con un análisis de los parámetros acústicos comparándolos con la teoría de acústica de salas, para saber cuál es el tipo de música óptimo para interpretar en este espacio, y saber si haría falta alguna reforma para mejorar esta.

4.2. CONCLUSIONES SOBRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Después del análisis y comparación de los resultados obtenidos in situ respecto a la simulación hemos observado que los resultados comparten siempre la tendencia, y el parámetro de LF_{E4} , que no la comparte se encuentra dentro del rango de máximos y mínimos por lo que también se puede dar por válido este resultado, ya que este parámetro depende mucho de la posición del receptor y no se puede analizar solo una media.

Se aprecia una pequeña coincidencia en el parámetro C_{80} , en la frecuencia de 500 Hz, en las cuales los resultados de la simulación están dentro del marco normativo, por lo que sería un buen resultado.

Desde el punto de vista de los resultados de la medición in situ, podemos observar que los resultados obtenidos del RT difieren de los ideales propuestos por los expertos, aun así siempre hay que tener en cuenta que son datos obtenidos con la sala vacía, y este fenómeno provoca que los tiempos de reverberación sean superiores,

faltando toda la absorción que nos aporta el público y por tanto se bajaría el RT acercándose a los ideales y entrando dentro del marco normativo, el cual asegura que entre los valores propuestos, el oído humano no aprecia ninguna diferencia.

Lo que sí se puede afirmar del claustro en cuanto a valores positivos respecto a la audición musical, es que tiene buena claridad musical, buena eficiencia lateral (sensación de espacialidad), y una buena difusión según los valores marcados por la teoría musical de salas.

Por todo lo expuesto anteriormente, se puede concluir aceptando el método estudiado ya que se han obtenido los valores esperados, con la utilización de las características de la simulación del Claustro de Llutxent¹⁴, para el Claustro de La Nau, sin validar previamente.

Las pocas diferencias que se pueden observar respecto de la normativa se cumplirían con el estudio de la sala llena, y las diferencias sobre la comparación entre lo real y lo simulado es porque las características materiales de los dos claustros no son las mismas y los resultados difieren un poco, pero siempre dentro de lo normal y lo esperado, y sabiendo que para hacer coincidir los datos reales con los simulados se debería de validar el modelo.

También con el presente trabajo se realizará una publicación en el congreso TecniAcústica 2014. Murcia.

4.3. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Para concluir el estudio se presentan unas posibles líneas de trabajo para seguir la investigación de este tema.

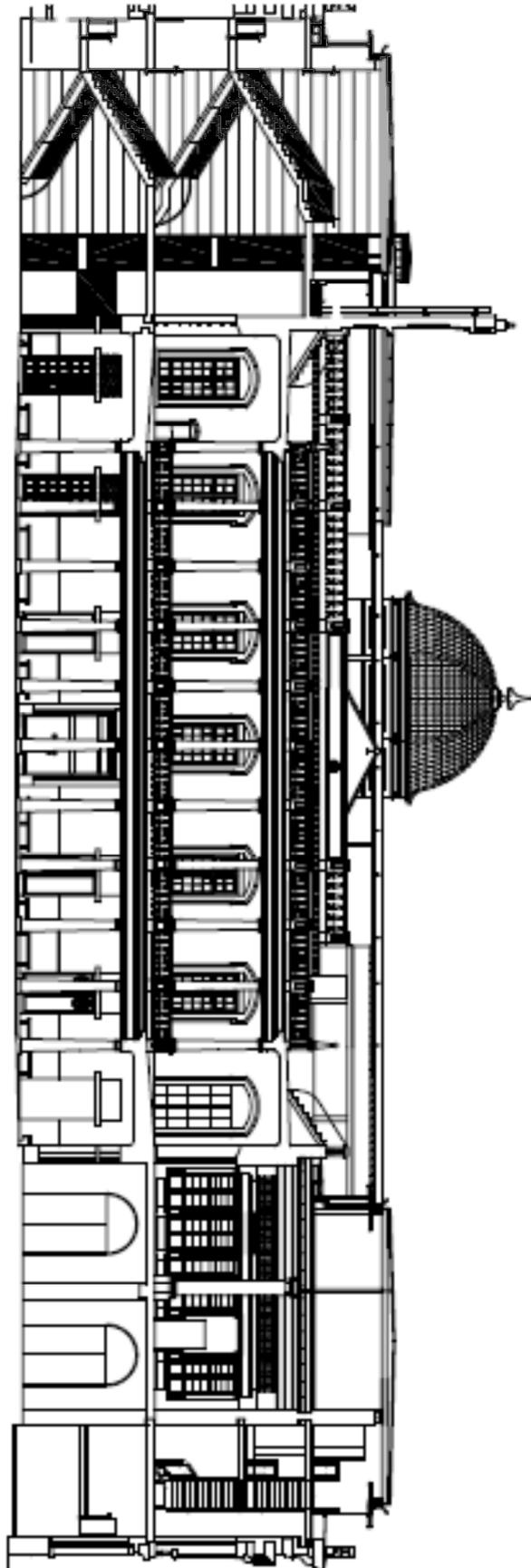
Principalmente, el siguiente paso es la realización de otro estudio en este claustro pero con la sala llena para poder contrastar los resultados y así poder afirmar lo que ahora son predicciones. Además se debería realizar más estudios de diferentes claustros, aplicando los mismos sistemas de simulación, para conseguir corroborar que el comportamiento acústico de los claustros de este tipo sigue un patrón.

Otro tema importante, sería comprobar si compensa la belleza del lugar donde se realizan los conciertos con las condiciones acústicas óptimas.

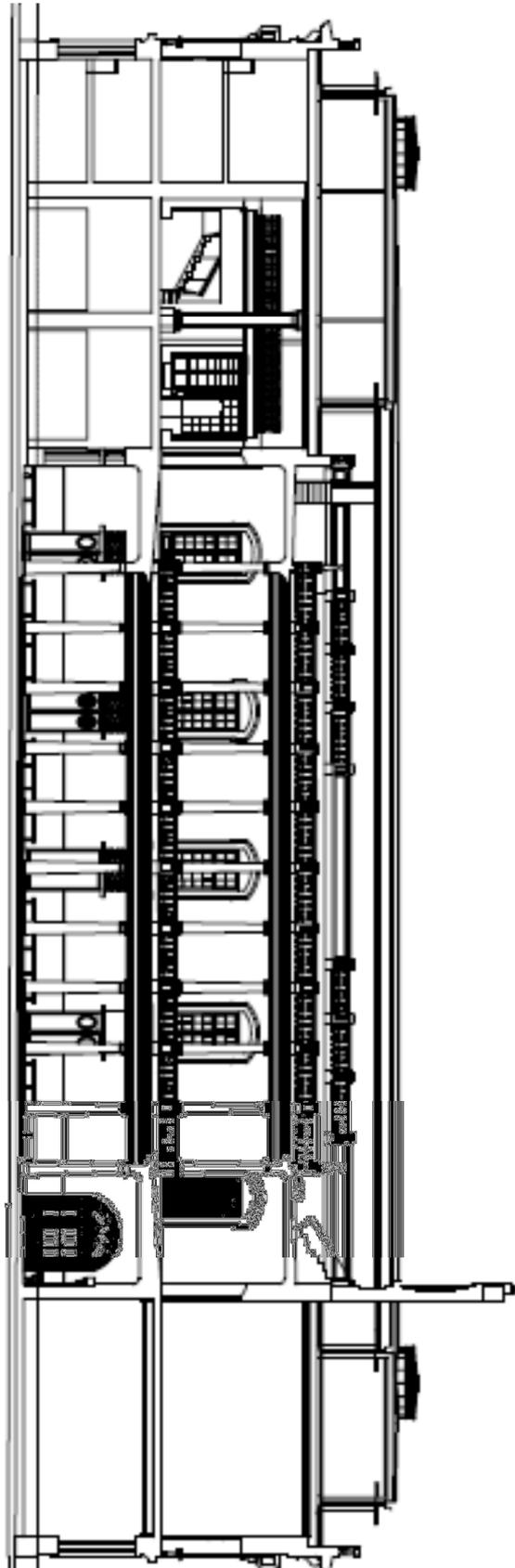
Para concluir, decir que el objetivo de estas líneas de trabajo es conseguir unos conocimientos del acondicionamiento acústico de recintos históricos, para que sirvan de guía para aquellas rehabilitaciones de estos edificios en las que se quiera cambiar su uso, por el de una sala de conciertos, ya que cada vez más se están deteriorando todos aquellos recintos que no están activos y son un patrimonio arquitectónico, artístico y cultural que se debe proteger y mantener.

¹⁴ P.F.G. *Estudio por técnicas de Ray Tracing sobre la adecuación de las simulaciones acústicas a recintos al aire libre. Estudio del Claustro de Llutxent.*

-SECCIÓN LONGITUDINAL



-SECCIÓN TRANSVERSAL



6. BIBLIOGRAFÍA

- Barba Sevillano, A., & Giménez Pérez, A. (2011).** *El Teatro Principal de Valencia. Acústica y Arquitectura Escénica*. Valencia: LLIG, Llibreria de la Generalitat Valenciana.
- Barron, M. (1993).** *Auditorium Acoustics and Architectural Desing*. E & FN spon.
- Beranek, L. (1962).** *Music, Acoustics and Architecture*. London: John Wiley and Sons New York.
- Guillen Guillamon, I. (1999).** *Estudio tipológico de salas de audición de música de banda en la C.V. Contribución a la determinación de parámetros acústicos de las mismas*. Valencia: Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Galiana, J. L., Llopis Reyna, A., Sancho Vendrell, F., Gómez Lozano, V., & Guillen Guillamón, I.** *Ampliación de Física Acústica*. Valencia: UPV.
- Galindo, M. (2003).** *La acustica en espacios religiosos Católicos: Las Iglesias Gótico-Mudejars*. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla.
- Giménez, A., Barba Sevillano, A., Cerdá, S., Romero, J., Cebrián, R., & Lacatis, R. (2008).** *Historical and chronological evolution of the concert hall acoustics parameters*. Paris: Acustic'08 Paris.
- Girau, J. T. (2006).** *Valldigna, Estudis d'Història*. Simat de la Valldigna: Edicions La Xara.
- Isbert, A. C. (1998).** *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Catalunya: Edicions UPC.
- Kürer, R. (1971).** A simple measuring procedure for determining the "center time" of room acoustical impulse responses. *7th Intern. Congress on Acoustics*.
- Marshall, A. H. (1967).** *A note on the importance of room crosssection in concert halls*. J. Sound Vib.
- Puchades, H. A. (1999).** *ABC de la acústica arquitectónica*. España: Grupo Editorial CEAC.
- ODEON Room Acoustic Software. (2009).** User Manual. Dinamarca.
- S. Muñoz, J. J.** *Resultados de la Corrección Acústica de un Recinto Eclesial tras su Rehabilitación como Espacio Escénico*. Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción. Acustica 2004 Guimaraes- Portugal.
- Salgado, A. B. (2003).** *Validación de software para predicción de acustica de salas y aplicación al diseño de aulas*. ETSIT, Vigo.
- Thiele, R. (1953).** *Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallruckwurfe in Raumen*. Acustica 3.
- Universitat de Valencia.** *Edificio de La Nau*. Edita Vicerrectorado de Cultura, Universitat de Valencia.
- TC Cuadernos.** *Rehabilitación del edificio "La Nau"*. Ediciones Generales de la Construcción.

Pau Serrano Rodrigo. P.F.G. *Estudio por técnicas de Ray Tracing sobre la adecuación de las simulaciones acústicas a recintos al aire libre. Estudio del Claustro de Llutxent.*

Pau Serrano Rodrigo. T.F.M. *Estudio por técnicas de Ray Tracing sobre la eficacia de intervenciones acústicas en recintos eclesiásticos. Estudio de la Iglesia del monasterio de Sta Maria de la Valldigna.*

<http://www.uv.es/cultura/c/edificilanau/edificilanaucast.htm>