

AJUSTE POR TÉCNICAS DE RAY TRACING DE UN MODELO VIRTUAL DE LA INTERVENCIÓN ACÚSTICA EN LA IGLESIA DEL MONASTERIO DE SANTA MARIA DE LA VALLDIGNA

43.55.KA SIMULACIÓN POR ORDENADOR DE LA ACÚSTICA EN RECINTOS, MODELOS

Llopis Reyna, Ana; Serrano Rodrigo, Pau; Guillen Guillamón, Ignacio; Gómez Lozano, Vicente
Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universitat Politècnica de València
Camino de Vera s/n. 46022 Valencia. 0034-963877524. allopisr@fis.upv.es

ABSTRACT

Nowadays many ecclesiastical enclosures are not in use and therefore they present an important state of deterioration. To prevent this and trying to remain them as part of our heritage, we propose to give them some different uses from those for which they were initially projected. The acoustic parameters of the “Monestir cistercenc Mare de Déu de la Valldigna” are studied through simulation methods by ray tracing techniques. This study was performed before and after an ephemeral acoustical project with a relatively low economic budget. The aim was to test the suitability of the proposed intervention to convert the church into a place for performing chamber music concerts.

RESUMEN

Actualmente es usual encontrarse con antiguos recintos eclesiásticos en desuso, y como consecuencia en un estado avanzado de deterioro y abandono. Para evitar esto y tratar de que sigan formando parte de nuestro patrimonio histórico y arquitectónico, se propone darles algunos usos distintos de aquellos para los cuales fueron proyectados. En este trabajo se estudian los parámetros acústicos de la iglesia del “Monestir cistercenc Mare de Déu de la Valldigna” a través de una simulación acústica mediante trazado de rayos. Este estudio se llevó a cabo antes y después de un acondicionamiento acústico efímero, previsto para albergar una serie de conciertos de música de cámara, con un bajo coste económico. El objetivo principal es comprobar la idoneidad de la intervención propuesta para llevar a cabo actuaciones musicales.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día es muy frecuente encontrarse con antiguos recintos eclesiásticos de alto valor patrimonial e histórico, en un estado avanzado de deterioro y abandono debido principalmente a encontrarse fuera de uso [1]. Estas edificaciones de gran valor, deberían ser conservadas en buen estado y esto supone un esfuerzo económico importante para su mantenimiento difícilmente justificable si no presentan actividad. Para ello se plantea que alberguen un uso diferente para el cual fueron diseñadas y de esta forma poder costear su conservación.

En esta comunicación, se realiza el estudio de la iglesia del “Monestir cistercenc de la Mare de Déu de la Valldigna”, proyectando una intervención acústica provisional, para la adecuación de este espacio como sala de audición de conciertos, con un coste económico reducido y manteniendo intacto el patrimonio arquitectónico y cultural de la misma. Esta intervención fue proyectada por el grupo de Acústica Arquitectónica y del Medio Ambiente de La Universidad Politécnica de Valencia.

La principal dificultad para el acondicionamiento acústico de las iglesias son sus propias características arquitectónicas, ya que el elevado volumen en relación a su ocupación en planta, y el uso tradicional de materiales de revestimientos acústicamente reflectantes, causan que su comportamiento acústico no se adecúe a determinados tipos de audición, presentando un tiempo de reverberación excesivamente largo y, por tanto, una insuficiente claridad musical, además de una deficiente inteligibilidad de la palabra.

El estudio de la intervención planteada, se realiza a través del software de simulación Odeón Room Acoustic Program [2], con el que se han obtenido los valores en los que se basan las conclusiones de este estudio.

METODOLOGÍA

Este estudio se basa en una simulación acústica mediante trazado de rayos sobre un modelo tridimensional virtual. Estos modelos reproducen los fenómenos acústicos que suceden en un recinto con un alto grado de fiabilidad. Aquí se ha utilizado la simulación como la herramienta de análisis que ha permitido obtener diferentes datos que hacen posible el estudio completo de la respuesta acústica de la iglesia y el efecto de la intervención planteada.

Para ello, primero se realizó un modelo geométrico tridimensional (*Fig. 1*) del recinto de estudio. Un modelo simplificado de la geometría interior de la iglesia. Se exportó al software Odeon y se le asignaron los correspondientes coeficientes de absorción y difusión (para cada banda de octava comprendida entre los 125 Hz y 4.000 Hz) de cada una de las superficies.

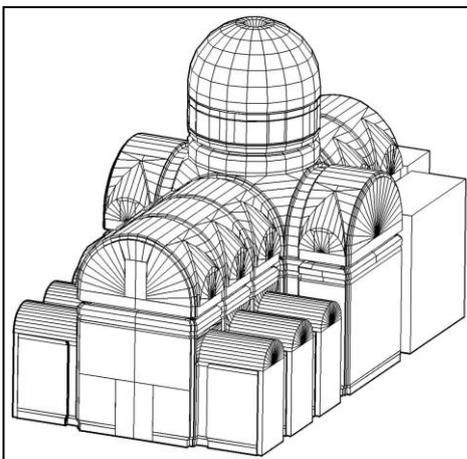


Fig. 1 Modelo 3D utilizado



Fig. 2 Estado del recinto en su medición

Posteriormente se realizó la simulación siendo iguales las características (Fig. 2) del modelo de la simulación (geometría y materiales) y las del recinto cuando se realizaron las mediciones para poder ser comparados.

Los resultados de esta primera simulación fueron comparados con mediciones in situ con objeto de realizar los ajustes necesarios para la validación del modelo. El ajuste se realizó introduciendo modificaciones en los coeficientes de absorción de los materiales de los que se tenía menos datos de su comportamiento acústico, en este caso el revestimiento mural. Se validó el modelo, cuando el tiempo de reverberación obtenido con la simulación no difería más de un 10 % del valor medido in situ. Las curvas tonales, tanto de la medición in situ como de simulación validada se pueden observar en la siguiente gráfica (Fig. 3).

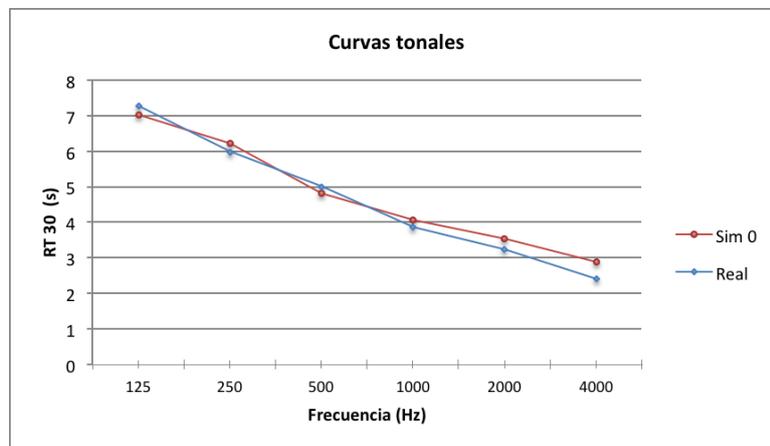


Fig. 3 Curvas tonales real y simulada

Con el modelo validado, se realizó el estudio de 3 situaciones, el recinto sin realizar la intervención (Sit 0), el recinto vacío después de la intervención (Sit 1) (Fig. 4) y por último, el recinto después de la intervención con público y músicos (Sit 2). Las tres simulaciones se realizaron en el mismo escenario, para el cual se definieron las siguientes características: temperatura interior: 20°C, humedad relativa: 50 %, densidad del aire: estándar, longitud de la respuesta impulsional: 9.000 ms, Número de rayos prefijado: 50.680 rayos, método de dispersión: Lambert con un coeficiente de difusión de 0,05 para todas las frecuencias.

La fuente se situó sobre el escenario, a una altura de 1,5 m y en el eje longitudinal de simetría de la iglesia, a una distancia de 1,5 m del principio de este. La fuente se definió como omnidireccional, con una ganancia de 90 dB, emitiendo una señal simulada de ruido rosa.

Se situaron 5 receptores, teniendo en cuenta las dimensiones del recinto y la situación del público. Cuatro, en el eje longitudinal de simetría de la iglesia, en la zona donde se sitúan los asientos centrales del público con una separación entre ellos de 5 m y el quinto, en una (ya que son simétricas) de las zonas laterales habilitadas también para la colocación del público. Todos ellos situados a una altura de 1,20 m.

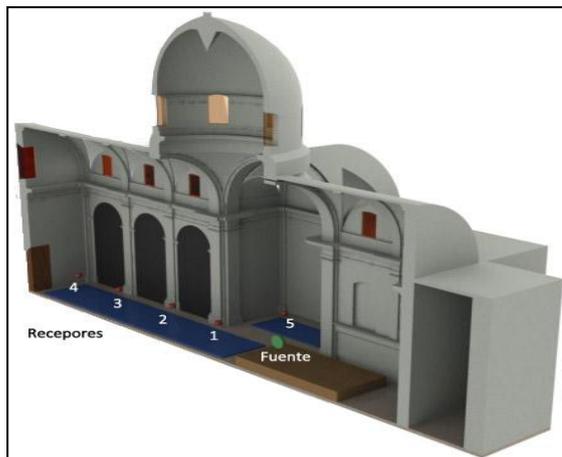


Fig. 4 Escenario de simulación Sit 1

En la intervención proyectada, se planteó como principal objetivo ajustar la curva tonal mediante una distribución de sistemas absorbentes en el recinto. Se propuso, en los accesos a las seis capillas laterales la instalación de 250 m² de cortinas de terciopelo fruncido en relación 1/2 con una densidad media de entre 0,40 y 0,50 kg/m² (*zona negra de la Fig 4*). También se tuvo en cuenta la colocación del escenario de madera (*zona marrón de la Fig 4*) y la colocación de una zona habilitada para los asientos del público (*zona azul de la Fig 4*).

Los coeficientes de absorción utilizados para cada uno de los materiales [2] en la simulación fueron los siguientes:

Material	Codigo	Coef.	Frecuencias					
			125	250	500	1000	2000	4000
Revestimiento mural	14301	Absorción	0,05	0,06	0,08	0,095	0,095	0,065
Vidrio de una hoja	10001	Absorción	0,18	0,06	0,040	0,030	0,020	0,020
Puerta de madera	10007	Absorción	0,14	0,10	0,060	0,080	0,100	0,100
Mármol o azulejo	2001	Absorción	0,01	0,01	0,010	0,010	0,020	0,020
Escenario madera	3000	Absorción	0,40	0,30	0,200	0,170	0,150	0,100
Bancos vacíos	14302	Absorción	0,55	0,50	0,150	0,100	0,050	0,050
Cortinas pesadas	8010	Absorción	0,14	0,35	0,550	0,720	0,700	0,650
Bancos ocupados	14303	Absorción	0,57	0,61	0,750	0,860	0,910	0,860
Orquesta y instrumentos	11000	Absorción	0,27	0,53	0,670	0,930	0,870	0,800

Tabla 1 Coeficientes de absorción de los materiales utilizados

Definidos todos los parámetros de la simulación se pasa a presentar los resultados obtenidos.

RESULTADOS

Se obtuvieron valores de los siguientes parámetros acústicos: RT30 (RT_{mid}; BR; Br), EDT, Ts, SPL, C80, D50, LF80 y STI, para las tres situaciones descritas (Sit 0, Sit 1, Sit 2). A continuación se presentan solo los más relevantes que nos dan información respecto a la audición musical y no sobre la inteligibilidad de la palabra.

Parámetros temporales

Los parámetros calculados con el RT se muestran en la siguiente tabla:

Parámetro	RT _{mid} (s)	BR	Br
Sit 0	4,44	1,49	0,72
Sit 1	3,29	1,25	0,8
Sit 2	2,35	1,69	0,8

Tabla 2 Parámetros temporales

Se observa que respecto el RT_{mid} se ha conseguido una notable mejora con la intervención planteada. Aunque no se ha conseguido llegar a los valores óptimos que oscilan entre 1,3 y 1,8 segundos [3] para música de cámara y barroca.

En los valores de la Calidez Musical, BR, podemos observar, que no se han conseguido mejoras, ya que es recomendable un valor de 1,25 [3] para unos tiempos de reverberación altos (2,2 s) y en la simulación 2 observamos que el valor aumenta hasta un 1,69. Un valor más alto que el de la simulación 1 (BR = 1,25) ya que el público reduce las frecuencias medias y altas, dejando las bajas prácticamente sin cambios. Por lo que no se tiene una buena respuesta a frecuencias bajas.

En los valores del Brillo, Br, el acondicionamiento de la sala hace que se acerque bastante al valor mínimo recomendado (0,87) [3], ya que se sube de un 0,72 a un 0,80. En consecuencia, se podría decir que la riqueza en armónicos de la sala sería corta, aunque suficiente. Se puede observar en este parámetro, que la presencia o no de público no influye en él, en este recinto, al contrario que en el BR como se acaba de describir. La relación entre las altas y medias frecuencias siguen siendo las mismas para la simulación 1 y 2.

En el cálculo del EDT_{mid}, se han obtenido unos valores muy similares a los de RT_{mid}, en cada una de las simulaciones, por lo que se puede considerar que la difusión de la sala es buena y que el acondicionamiento no ha influido en una pérdida de difusión [4].

Parámetro	Sit 0	Sit 1	Sit 2
RT _{mid} (s)	4,44	3,29	2,35
EDT _{mid} (s)	4,53	3,39	2,39

Tabla 3 Valores de EDT_{mid}

Parámetros energéticos

Los valores registrados de niveles sonoros, SPL, demuestran que la variación entre un receptor y otro es mayor, cuanto más aumenta la distancia a la fuente. La diferencias entre los valores

del receptor más cercano (receptor 1) al más alejado (receptor 4) de la fuente en la situación 2 (con público), son en algunas frecuencias mayores de 5 dB, y por lo que por tanto serán perceptibles por el oído humano. Esta diferencia de nivel entre las primeras filas y las últimas se va haciendo mayor a medida que crece la frecuencia.

Frecuencia (Hz)	63	125	250	500	1.000	2.000	4.000	8000
Receptor 1 Máximo (dB)	69,4	69,5	67,8	66,5	65,1	65,1	64,9	62,9
Receptor 4 Mínimo (dB)	66,4	66,9	64,1	61,6	59,4	59,2	58,5	54,0
Diferencia (dB)	3,0	2,6	3,7	4,9	5,7	5,9	6,4	8,9

Tabla 4 **SPL** Valores. Diferencia entre el receptor 1 y 4

Los valores de la Claridad Musical, C_{80} , obtenidos entran dentro de las recomendaciones una vez realizado el acondicionamiento de la iglesia. Muy justo para la sala vacía ($-4 \geq C_{80} (3) \geq 0$ dB) [3], que correspondería al valor de la Sit 1 y más holgado respecto a la sala llena ($-2 \geq C_{80} (3) \geq 2$ dB) [5], que correspondería al valor de la Sit 2.

Parámetro	Sit 0	Sit 1	Sit 2
C_{80} (dB)	-5,73	-4,02	-0,8

Tabla 5 Valores C_{80}

Parámetros espaciales

Por último se detallan los datos obtenidos para el Factor de Energía Lateral, LF_{80} . Se observa que en ninguna de las simulaciones se llega al valor recomendado mínimo del 19% [5].

Parámetro	Sit 0	Sit 1	Sit 2
LF_{E4} (%)	16,50	17,20	16,37

Tabla 6 Valores LF_{E4}

El porcentaje de este parámetro aumenta, según la cantidad de reflexiones tempranas laterales que lleguen a cada receptor. En los valores de cada uno de los receptores por separado, en todas las simulaciones, hay dos receptores que cumplen este parámetro, el 2 y el 5. El resto de ellos no reciben las suficientes reflexiones laterales tempranas por el siguiente motivo en cada simulación:

- Situación 0. Las primeras y segundas reflexiones se deben perder en las capillas laterales, saliendo el sonido a la nave principal como una reflexión ya muy tardía.
- Situación 1 y 2. Al colocar las cortinas de terciopelo, material muy absorbente acústicamente, para evitar el excesivo tiempo de reverberación se ha provocado además, que las primeras reflexiones laterales se atenúen de forma excesiva y como consecuencia que los valores del LF en los receptores 1, 3 y 4 sean excesivamente bajos.

Por último, se presenta el siguiente gráfico de algunos de los mapas de color realizados, comparándolos con las 3 simulaciones realizadas. Todos los mapas de color, corresponden a la frecuencia de 1000 Hz.

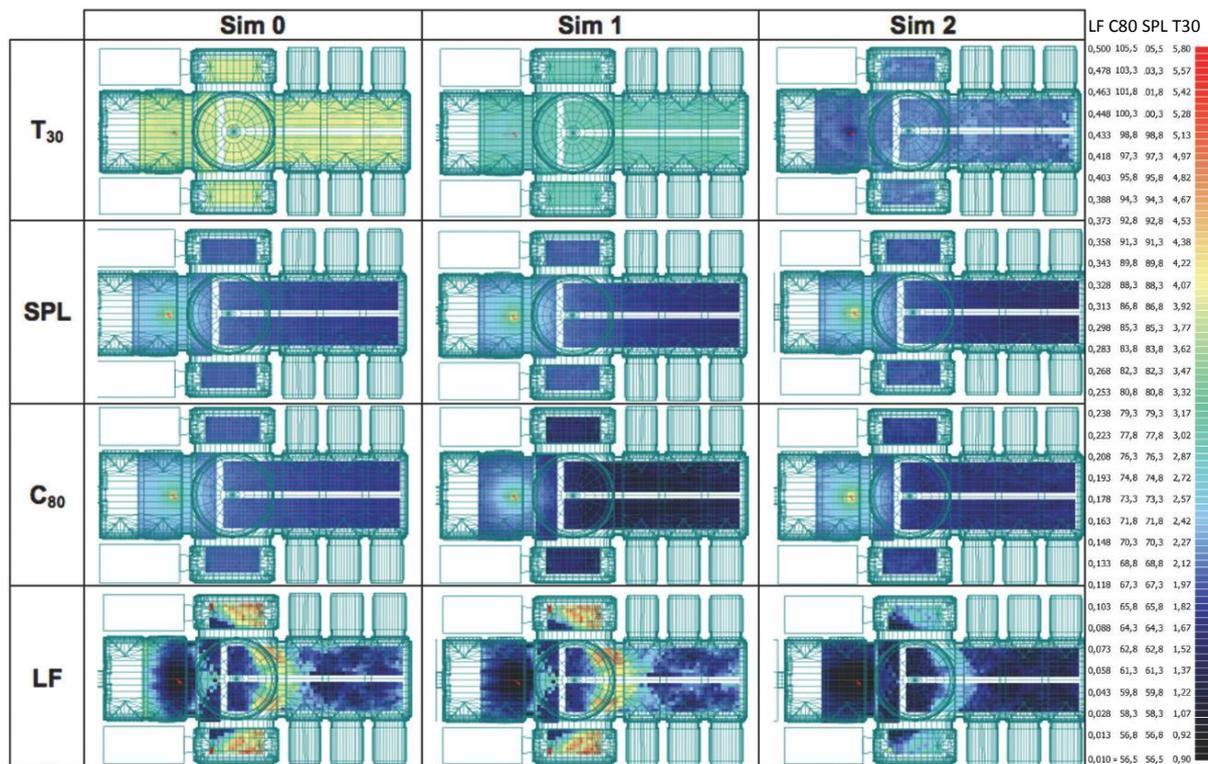


Fig. 5 Mapas de colores de los principales parámetros a 1000 Hz

CONCLUSIONES

Como conclusión global, se expone que con una intervención sencilla, práctica y con un coste económico relativamente bajo, se puede llegar a mejorar en gran medida la calidad acústica de la Iglesia de la “Mare de Deu de la Vallidigna”, teniendo además en cuenta la dificultad de intervenir en este tipo de recintos por su condición patrimonial e histórica.

Se ha podido comprobar que se puede mejorar los valores de los parámetros acústicos en la iglesia, aunque también queda plasmada la dificultad de llegar a los valores óptimos para la audición musical en este tipo de recintos.

Los materiales tan reflectantes que constituyen el revestimiento de la iglesia, provocan que el **RT** sea muy elevado, pudiéndolo reducir con una intervención económica, pero sólo hasta cierto valor. Este valor resulta aun algo elevado para una correcta audición musical de calidad, y con ello también otros valores como la Calidez Musical, **BR** y el **EDT** quedan algo fuera de los márgenes al uso. Ello lleva a que parámetros como la Claridad Musical, **C₈₀** o la Definición no lleguen a los mínimos recomendados. En cualquier caso, lo cierto es que la sensación subjetiva de la mejora de la calidad del recinto será percibida en gran medida por el público.

Se aprecia la dificultad de conseguir los valores óptimos exactos para el tipo de música que se pretende interpretar en la iglesia, sin dañar o modificar las características arquitectónicas y artísticas de la iglesia. Cabría pensar en el diseño de elementos absorbentes singulares en bajas frecuencias para mejorar las condiciones de audición en cuanto a la Calidez Musical, **BR**.

Dicho todo esto, hay que tener en cuenta, que aunque no se llega a tener una audición perfecta, con una pequeña actuación se puede conseguir una mejora importante en su calidad acústica. Por otra parte, probablemente estos pequeños desfases en los parámetros acústicos obtenidos, se vea compensada por la impresión espacial y arquitectónica del bello espacio en que se realiza el concierto, donde posiblemente al público le compense esta diferencia, consiguiendo así, darle una funcionalidad a este tipo de edificios de alto valor histórico y patrimonial y conseguir así su conservación.

REFERENCIAS

- [1] Llinares, J.; Llopis, A.; Sancho, J. (1993). *Adecuación de la reverberación de una iglesia para su uso como sala de recitales*. Tecniacustica. Valladolid
- [2] ODEON Room Acoustic Software. (2009). *User Manual*. Denmark.
- [3] Beranek, L. (1962). *Music, Acoustics and Architecture*.
- [4] Carrion, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Catalunya: Edicions UPC.
- [5] Marshall, A. H. (1967). *A note on the importance of room cross-section in concert halls*. J. Sound Vibration