

LA ACÚSTICA DEL CRUCERO DE LA CATEDRAL DE SEVILLA EN LAS GRANDES CELEBRACIONES

Alicia Alonso, Rafael Suárez, Juan J. Sendra, Lidia Álvarez

Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción. Universidad de Sevilla
{ aliciaalonso@us.es, rsuarez@us.es, jsendra@us.es, calvarez6@us.es }

Resumen

La catedral de Sevilla es el más valioso representante del patrimonio cultural en la ciudad, modelo del tipo catedralicio español que fue exportado a Iberoamérica. A diario, con motivo de la actividad litúrgica desarrollada en su interior, el templo se convierte en un lugar de culto y oración, y ocasionalmente compatibiliza esta actividad principal con la celebración de grandes ceremonias organizadas para una gran afluencia de público, como festividades religiosas y conciertos. La organización espacial de la catedral responde al denominado “modo español”, en el que el coro se ubica en mitad de la nave central, generando una fragmentación de la misma en dos espacios, que deriva en una falta de visibilidad y de profundidad para alojar al público. De ahí que se haya adoptado una nueva configuración espacial en el crucero de la catedral, que permite aumentar notablemente la capacidad de asistentes a esas grandes ceremonias.

En este trabajo se realiza una valoración acústica de ese acondicionamiento del crucero, a partir del análisis de la simulación de los modelos acústicos generados, calibrados previamente tras la medición realizada in situ, que responden a las organizaciones espaciales y de situación de la audiencia normalmente adoptadas.

Palabras-clave: acústica de iglesias, catedral de Sevilla, catedrales de Andalucía, patrimonio inmaterial, patrimonio cultural.

Abstract

The Cathedral of Seville, whose Spanish typology was exported to Latin America, is the most valued example of the city's cultural heritage. With the daily practice of the liturgy, the building is mainly used for worship and prayer, occasionally combining this with the celebration of major ceremonies, such as religious festivities and concerts, organized for a large audience. Spatially, the Cathedral is organized in the so-called "Spanish style" with the choir located in the middle of the nave, dividing it into two spaces, leading to a lack of visibility and depth for accommodating the public. Hence, a new spatial configuration of the cathedral transept was adopted and significantly increased audience capacity for such ceremonies.

In this paper, an acoustic assessment of the adaptation of the transept is performed, based on the analysis of simulation of the acoustic models generated. These had been previously calibrated after in-situ measurements, corresponding to the usual spatial organization and location of the audience.

Keywords: whorship acoustics, cathedral of Seville, cathedrals of Andalusia, intangible heritage, cultural heritage.

PACS no. 43.55.Gx, 43.55.Ka

1 Introducción

La catedral de Sevilla, edificada en un solar de superficie rectangular de 116 metros de largo por 76 metros de ancho [1], que siglos atrás estuvo ocupado por una antigua mezquita aljama, se convierte en el monumento más representativo de la ciudad. Esta destacada categoría, junto con el hecho de ser el edificio gótico con mayor superficie del mundo, promueve el desarrollo en su interior de magnas celebraciones y ceremonias, para las cuales, además del tradicional escenario litúrgico ubicado en la Capilla Mayor y coro, se establecen nuevas configuraciones espaciales que nunca antes habían sido analizadas. La concepción del templo como un espacio de gran valor histórico y patrimonial, no lo exime de poseer un cierto carácter multifuncional, por lo que en su interior, además de celebrarse la liturgia diaria, se conmemoran las fiestas, las representaciones de dramas, las reuniones de los diferentes gremios y corporaciones locales, siendo la situación de la audiencia el principal aspecto que configura el espacio.

A lo largo de la historia, la preparación del espacio catedralicio hispalense para los eventos multitudinarios: coronaciones, bodas, defunciones, sínodos, magnos conciertos, ha requerido, en la mayoría de las ocasiones, de montajes efímeros con la introducción de una ornamentación específica [2], la cual, ya fuese por los materiales utilizados, la disposición de la misma o la invasión del interior por la gran asistencia de público, aumentaba notablemente la absorción sonora.

La preocupación por las condiciones acústicas en los lugares de culto por parte de la comunidad científica se ha incrementado durante las últimas décadas, dando lugar a diversas investigaciones centradas en el estudio del campo sonoro de dichos espacios [3] [4]. Uno de los motivos que ha potenciado esta actividad es la importancia de la concepción acústica en este tipo de edificios, ya que desde su origen fueron concebidos como lugares de asamblea y reunión, así como de desarrollo de la música coral e instrumental.

La amplia espacialidad, el enorme volumen y la gran escala de estos complejos espacios reverberantes se convierten, a lo largo de la historia, en enemigos ante las diferentes exigencias acústicas, tanto para la palabra como para la música, siendo necesario, casi en la totalidad de los casos, intervenir en su interior mediante diferentes tipos de actuaciones [5], como la aportación de tratamientos absorbentes o la incorporación de un apoyo electroacústico para la palabra. Conviene destacar en este ámbito los estudios de Anderson y Lewer en los que se presentan algunas características sonoras en la catedral de San Pablo de Londres [6] [7], el análisis de Martellotta et al. sobre la existencia de espacios acoplados en la basílica de San Pedro de Roma [8] o los ajustes de acústica variable llevados a cabo por Keppler et al. en la catedral de Boston [9].

El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento acústico de la catedral de Sevilla cuando se traslada al crucero el escenario para celebrar grandes eventos con asistencia masiva de público, ya sean litúrgico-religiosos o musicales. Esta valoración acústica se realiza a partir de la simulación de modelos acústicos generados y calibrados previamente, tras la medición realizada in situ [10].

2 La catedral de Sevilla

2.1 Descripción del espacio catedralicio

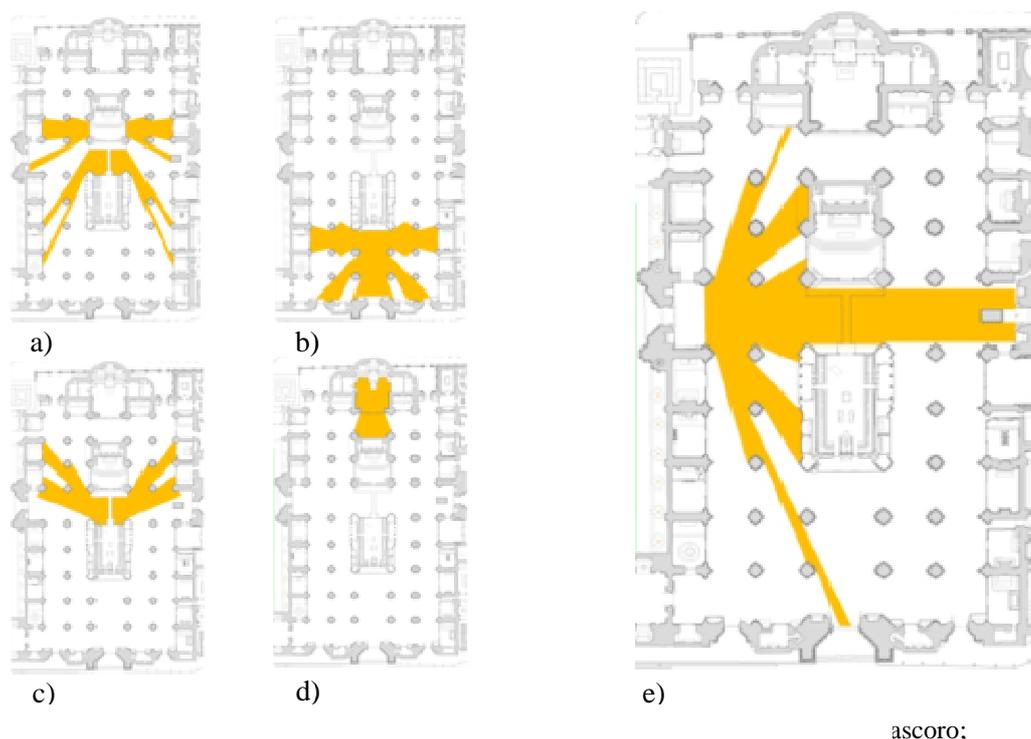
El templo se articula en cinco naves, siendo las más altas la nave del crucero y la nave central, llegando casi a los 40 metros de altura libre. La organización espacial del templo hispalense, modelo

del tipo catedralicio español que fue exportado a Iberoamérica, responde a su vez al denominado “modo español” [11], en el que el coro se ubica en mitad de la nave central.

Desde el punto de vista arquitectónico, el coro tiene un papel de primera magnitud en la generación y transformación de espacios en el interior del templo catedralicio. Su forma y ubicación introduce, en ocasiones, transformaciones importantes en la configuración espacial del edificio, como en el caso de la catedral sevillana, en la que genera una fragmentación de la nave central en dos zonas, que deriva a su vez en una falta de visibilidad y de profundidad para alojar al público. Desde su origen, se trata de un recinto privilegiado y reservado al clero, lo que le aporta un carácter privado y cerrado, en este caso, por muros de cantería en los que se localizan cuatro capillas de alabastro abiertas a las naves laterales, cuenta con una sillería de madera tallada y su entrada, más permeable, está delimitada por una gran reja renacentista.

La estructura de la catedral dispone de 60 pilares de mampostería revestidos de piedra, sobre los cuales descansan las 68 bóvedas de crucería que cubren el conjunto. Un combinado de piezas de mármol coloreado de blanco y azul materializan la solería interior.

2.2 Configuraciones espaciales



El gran valor patrimonial del templo, unido a sus grandes dimensiones, lo convierte en uno de los edificios más atractivos para desarrollar en su interior magnos conciertos y ceremonias multitudinarias. Sin embargo, su organización especial, al “modo español”, altera la concepción espacial original del templo y articula la planta a partir del espacio coral, generando en su nave central dos zonas diferenciadas donde alojar a los fieles dispuestos a escuchar la palabra, el canto o la música.

Históricamente la catedral ha adoptado diferentes escenarios para el desarrollo tanto de su actividad litúrgica como de grandes eventos, situándose espacialmente en su eje este-oeste configurado por la Capilla Real, la Capilla Mayor, el coro y el trascoro. No obstante, la celebración de magnas ceremonias supone una importante ocupación de público, por lo que los escenarios tradicionales no son la mejor opción, principalmente debido a la situación del coro que dificulta el acondicionamiento del espacio por la existencia de numerosas zonas carentes de contacto visual y sonido directo. El análisis de estas posibilidades de organización espacial, definidas en el plan director de la catedral hispalense (Figura 1), donde se sombrean aquellas zonas en las que existe visibilidad desde la fuente, justifica el hecho de adoptar una nueva configuración espacial en el eje transversal, en el crucero, la cual permite aumentar notablemente la superficie de las zonas aptas para la ubicación del público, llegándose a alcanzar la capacidad de 3.090 asistentes en la Toma de posesión de Ángel Asenjo como arzobispo coadjutor de Sevilla (Figura 2), cerca del doble de aforo del teatro de la Maestranza (1.800), uno de los más grandes de Andalucía.



Figura 2 –Toma de posesión de Ángel Asenjo (2009) como arzobispo de Sevilla.

Para acondicionar esta novedosa distribución espacial, se dispone un amplio escenario en el crucero del templo, perpendicularmente a la nave central, con el objetivo de aprovechar tanto la profundidad del crucero, como la de las naves laterales. Haremos a continuación una valoración acústica de la misma.

3 Metodología

En primer lugar, se ha procedido a realizar una medición in situ de las respuestas al impulso registradas en diferentes receptores distribuidos por la catedral, con la fuente situada en el crucero, concretamente en el lugar habitual donde tienen lugar las grandes celebraciones. A partir de esta medición, se han calculado los principales parámetros acústicos de acuerdo a la norma UNE-EN-ISO 3382 [12]. Posteriormente, se ha generado un modelo acústico de la catedral y calculado mediante simulación esos mismos parámetros acústicos. Las comparaciones de unos y otros parámetros, los calculados a partir de la medición y los obtenidos mediante la simulación, nos ha permitido calibrar este modelo acústico y ajustar los coeficientes de absorción y dispersión de los materiales y ornamentaciones de la catedral. Una vez calibrado este modelo inicial, se han elaborado dos nuevos modelos acústicos que reproducen sendas configuraciones espaciales que se han adoptado en dos magnos conciertos en la catedral.

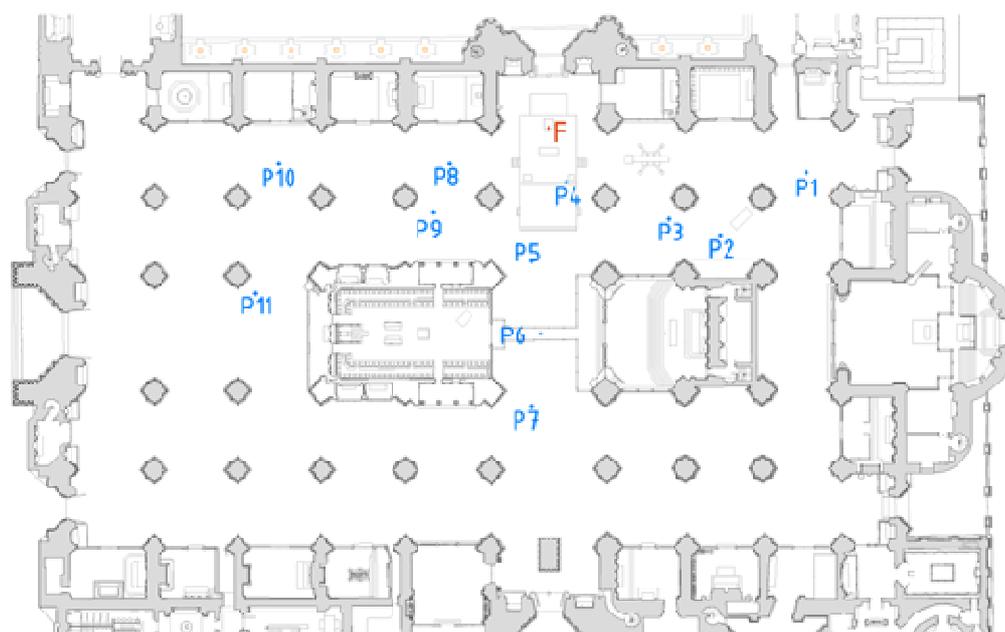


Figura 3 – Plano de planta de la catedral mostrando las posiciones de fuente (F) y los puntos receptores (P).

3.1 Medición in situ

Se ha realizado la medición acústica para una posición F de la fuente omnidireccional (AVM DO-12), ubicada a 1,50 metros sobre el suelo del escenario levantado en el crucero cuando se celebran grandes eventos, y para una serie de receptores distribuidos en las nave central y en las naves laterales anexas en los que se recibe sonido directo (Figura 3). Para cada uno de estos micrófonos multipatrón (Audio-Technica AT4050/CM5, en su configuración omnidireccional y bidireccional), situados a 1,20 metros de altura con respecto al plano de apoyo, se registraron las respuestas impulsivas obtenidas a partir de barridos de señales sinusoidales, en las que la frecuencia se incrementa exponencialmente con el tiempo.

Las mediciones acústicas se realizaron en periodo nocturno con el templo desocupado. Uno de los requerimientos para determinar la calidad de la señal registrada, y calcular con fiabilidad uno de los principales parámetros, T_{30} , fue la obtención de una relación señal-ruido superior a 45 dB en todas las bandas de octava de interés (125-4000 Hz), mediante el ajuste del nivel y duración de la señal de excitación.

Para la valoración de la reverberación de la catedral, tanto objetiva como subjetiva, se ha considerado el tiempo de reverberación evaluado sobre una caída de 30 dB (T_{30}) y el Early Decay Time (EDT), respectivamente. Se han valorado además la claridad (C_{80}) y el tiempo central (T_s), este último como indicador de la nitidez del sonido.

3.2 Simulación

Se ha elaborado un modelo acústico a partir de la geometría del espacio interior de la catedral, necesariamente simplificada por la desmesurada escala del monumento hispalense (216.000 m³ de volumen, aproximadamente), modelo que tiene un total de 7.500 superficies (Figura 4).

El software de simulación acústica empleado para el cálculo de los mismos parámetros acústicos en el modelo ha sido CATT-Acoustic (v8k).

Tras la calibración del mismo [10], una vez realizada la comparación de los valores de esos parámetros acústicos calculados a partir de la medición in situ y de la simulación, se han ajustado los coeficientes de absorción y de dispersión de diferentes materiales y ornamentaciones singulares, cuya información resulta primordial y no es posible obtener a partir de la bibliografía disponible. En la Tabla 1 se recogen los coeficientes absorción finalmente adoptados. Los coeficientes de dispersión varían según sea el grado de irregularidad que presenta cada superficie, de modo que los materiales con superficie lisa tienen un coeficiente de dispersión asociado que varía de 0,12 en la banda de 125 Hz a 0,17 en la de 4 kHz aumentando 0,01 en cada banda. Los de decoración moderada pasa de 0,20 en 125 Hz hasta 0,45 a 4 kHz aumentando 0,05 en cada banda, mientras que en los más irregulares varía de 0,30 en la banda de 125 Hz a 0,80 en la de 4 kHz aumentando 0,10 en cada banda [13].

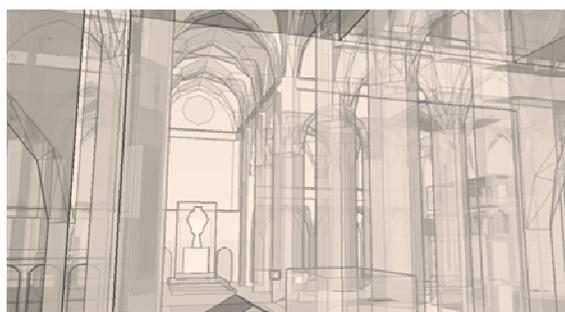


Figura 4 –Interior modelo geométrico de la catedral de Sevilla.

Una vez validado este modelo acústico de la catedral, se ha procedido a elaborar, a partir de él, otros dos modelos acústicos que corresponden a las configuraciones espaciales que se han adoptado para dos magnos conciertos: el Mesías de Händel y el Miserere de Eslava (Figura 5), éste último habitualmente celebrado en Semana Santa, con soluciones diferentes para albergar a una gran cantidad de público.

Se ha utilizado una versión posterior del software CATT-Acoustic (v9) para obtener los principales parámetros acústicos asociados a la actividad musical propia de esos conciertos.

Tabla 1. Coeficientes de absorción acústica asociados a los principales materiales utilizados.

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Piedra	0,13	0,13	0,13	0,14	0,16	0,16
Mármol Suelo	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Molduras	0,13	0,13	0,13	0,14	0,16	0,16
Sillería Capilla	0,10	0,10	0,10	0,12	0,14	0,14
Vidrieras	0,13	0,12	0,08	0,07	0,06	0,04
Retablos Madera	0,12	0,12	0,15	0,15	0,18	0,18
Órgano	0,12	0,14	0,16	0,16	0,16	0,16
Madera Coro	0,12	0,12	0,15	0,15	0,18	0,18
Sillas de madera (desocupadas)	0,12	0,12	0,15	0,15	0,18	0,18
Sillas de plástico (desocupadas)	0,06	0,10	0,10	0,20	0,30	0,20
Sillas ocupadas	0,24	0,40	0,78	0,98	0,96	0,87

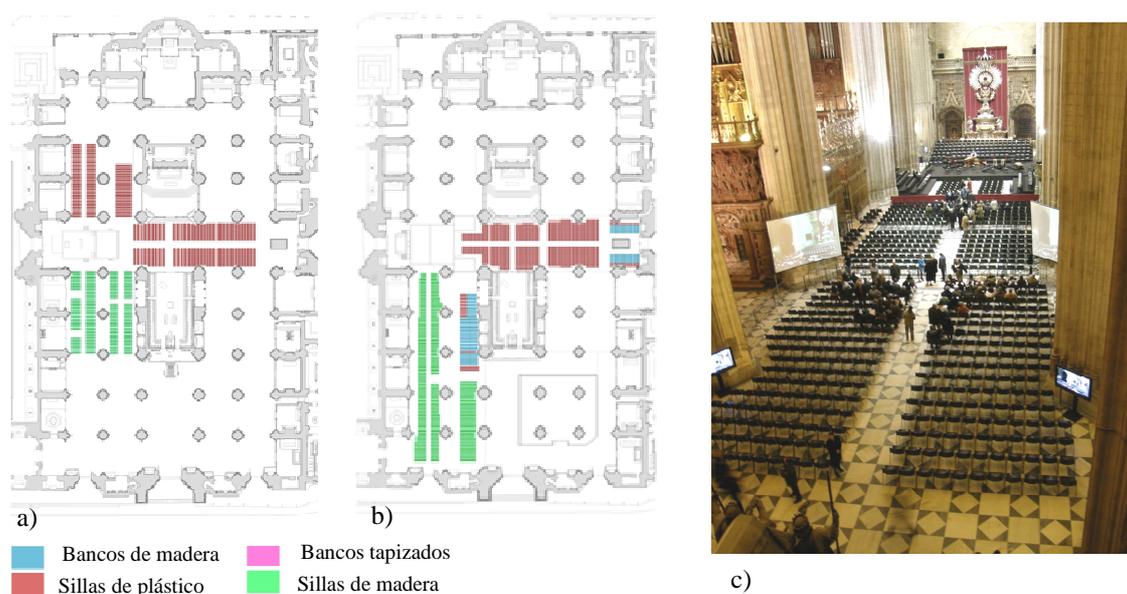


Figura 5 – Configuraciones espaciales adoptadas en la actualidad. a) Miserere de Semana Santa 2012; b) y c) Concierto del Mesías (Händel) 2007

4 Valoración y discusión de resultados

La finalidad del presente estudio es conocer el comportamiento acústico de estas dos configuraciones espaciales propias de las grandes celebraciones catedralicias, averiguar qué influencia tiene la presencia de una gran cantidad de público y valorar los resultados obtenidos de los principales parámetros acústicos.

El análisis de los resultados (Figuras 6a a 6d) se ha realizado en los mismos receptores utilizados en la medición in situ (Figura 3), los cuales reciben sonido directo de la fuente (F) ubicada en el escenario del crucero. Las grandes dimensiones geométricas de la catedral, así como el gran porcentaje de materiales con poca absorción, ya sea piedra (muros, pilares y bóvedas) o mármol (suelo), son responsables del elevado tiempo de reverberación (T_{30}) de este espacio (Figura 6a), con valores a medias frecuencias de 4,5-5 segundos con el templo desocupado. Los valores del EDT, relacionados con la sensación de reverberación, son unos 0,5 s inferiores a los de T_{30} a esas mismas frecuencias.

El acondicionamiento adoptado tradicionalmente para la celebración del Miserere de Semana Santa (Figura 5a), con una ocupación total de 1800 asistentes sentados, supone un incremento notable de la absorción sonora, que reduce el tiempo de reverberación, a medias frecuencias, en 0,7 s en la valoración objetiva (T_{30} , Figura 6a), y hasta 0,9 segundos en la valoración subjetiva (EDT, Figura 6b). Sin embargo, excepto en las frecuencias más altas, en las que también influye considerablemente la absorción del aire, los valores obtenidos superan claramente a los recomendados por Beranek [14] para música religiosa que, a medias frecuencias, serían del orden de 2,8 s.

Por otra parte, la configuración adoptada para el concierto del Mesías, con una ocupación mayor que la anterior, de hasta 2172 personas distribuidas a lo largo de todo el crucero y las naves laterales (Figura 5b), supone una reducción del T_{30} en 0,9 segundos y del EDT en 0,8 segundos, a medias frecuencias, con respecto a los obtenidos en las medidas experimentales, aunque se siguen superando esos valores recomendados por Beranek (Figuras 6a y 6b).

En la valoración de los restantes parámetros energéticos, para la disposición del Miserere (Figura 5a), los valores de claridad (C_{80} , Figura 6c) experimentan mejoras gracias a la presencia de público, especialmente en aquellos receptores ubicados en el crucero, con un incremento de 3 JNDs (P4, P6, P7 y P11), en los términos expresados por la norma ISO, llegando incluso a 5 JNDs en el receptor P5, situado en las primeras filas de audiencia frente al escenario que se sitúa en el crucero, donde se alcanzan 2,8 dB. De la misma manera, los valores del tiempo central (T_s , Figura 6d), indicador de la nitidez del sonido, disminuyen casi en la totalidad de los receptores, con decrementos superiores a 5 JNDs. Estos decrementos de T_s se elevan a 7 JNDs cuando aumenta la superficie de audiencia en la configuración del Mesías, mejorando la nitidez del sonido.

Si bien del análisis de los parámetros temporales previamente analizados, se deduce que resulta ligeramente más favorable la configuración del Mesías, ya que presenta una mayor superficie de área de audiencia, (Figura 5b), del análisis de los parámetros energéticos se concluye que existen valores bastante desfavorables a partir de distancias superiores a 30-40 metros. Resulta pues evidente que, a medida que la distancia foco sonoro-receptor aumenta, existe un deterioro de las condiciones acústicas. Por lo tanto, conviene evitar una disposición similar a la del concierto del Mesías, en la que se aprovecha la profundidad de toda la nave lateral, y apostar por una distribución simétrica del público, más cercana a la fuente sonora, que funciona mejor y proporciona resultados más favorables a un mayor porcentaje de los asistentes.

A pesar de que las configuraciones espaciales analizadas están relacionadas con eventos musicales, no hay que olvidar que la catedral es un espacio en el que se desarrollan eventos litúrgicos en los que prima la palabra sobre la música. El uso de la palabra requiere la utilización de elementos de apoyo electroacústico para poder acondicionar satisfactoriamente toda la superficie de audiencia, ya que gran parte de la misma está en condiciones acústicas desfavorables y con muchos puntos alejados de la fuente, donde resultaría imposible escuchar con definición el discurso sin la existencia de dicho sistema de refuerzo del sonido.

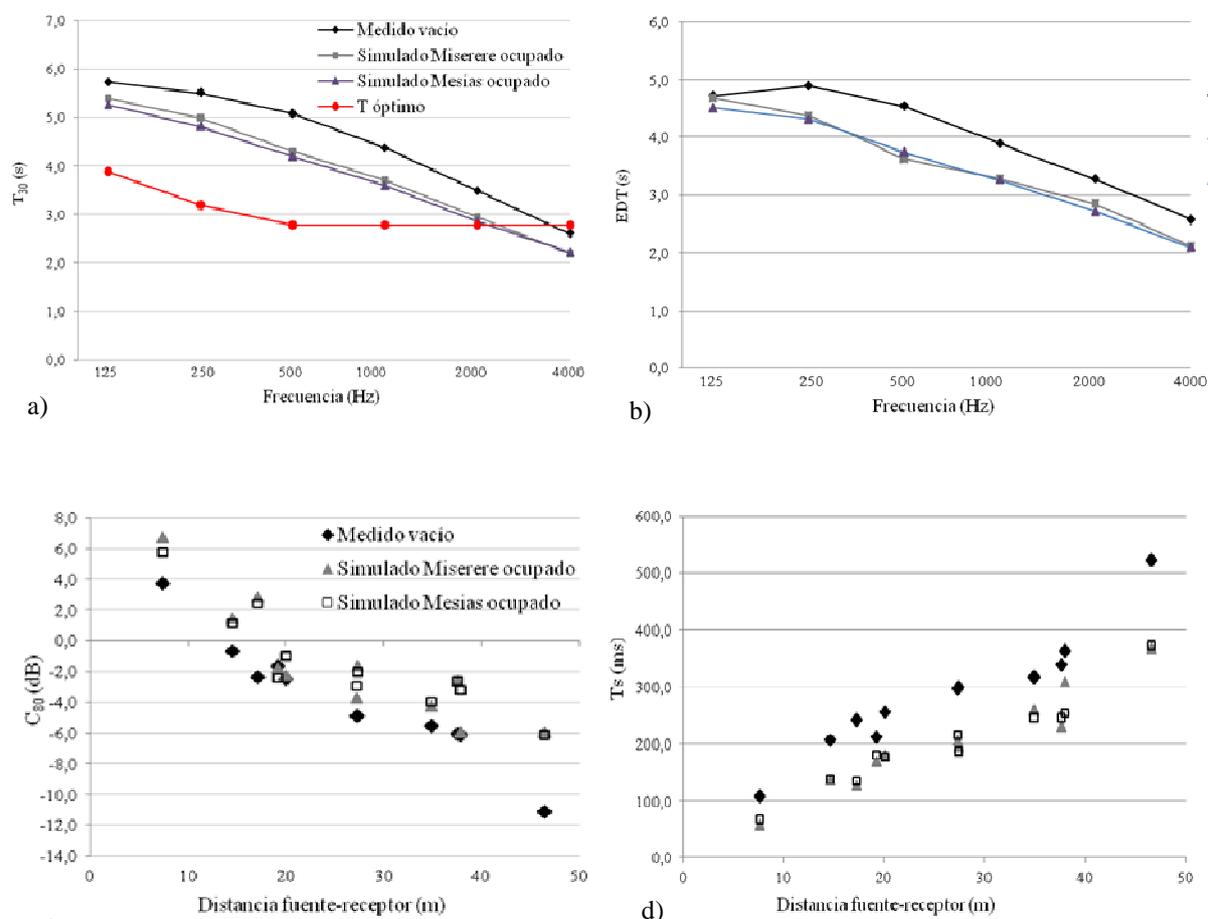


Figura 6 – Comportamiento espectral simulado y medido de los parámetros acústicos estudiados: a) T_{30} ; b) EDT; c) C_{80} ; d) T_s

5 Conclusiones

La organización espacial al “modo español”, con la disposición del coro en el centro de la planta de la catedral, crea una división del espacio interior que fuerza la búsqueda de una nueva organización espacial para grandes eventos, donde resulta necesario disponer una mayor cantidad de público con visibilidad y sonido directo.

La utilización del crucero en las grandes celebraciones ha sido la solución adoptada en recientes eventos musicales, como la celebración del Miserere de Semana Santa o el concierto del Mesías de Händel. A partir del modelo acústico inicial de la catedral, elaborado y calibrado tras la realización de los ensayos experimentales, se ha simulado y posteriormente valorado el comportamiento acústico de otros dos modelos acústicos que reproducen la configuración espacial y de público en estas dos grandes celebraciones.

El análisis de los resultados obtenidos permite confirmar que la incorporación masiva de público en el crucero, de acuerdo a algunas de las dos configuraciones mostradas, supone un importante aumento de la absorción sonora y, por lo tanto, una mejora sustancial de las condiciones acústicas de la catedral para la celebración de conciertos o la interpretación de música religiosa. Respecto a la medición

realizada in situ con la catedral vacía de público, el tiempo de reverberación (T_{30}) disminuye entre 0,7 y 0,9 s, según el tipo de configuración espacial y de público, con valores a medias frecuencias de 4,0 s para el Miserere y 3,8 s para el Mesías. De una forma subjetiva, la sensación de la reverberación, valorada por el EDT, cuyos valores se estiman también en 3,5 s tanto para el Miserere como para el Mesías, también disminuyen entre 0,9 y 0,8 s, respectivamente, con respecto a la medición realizada in situ. Del mismo modo, gracias al aumento de absorción sonora, los parámetros energéticos alcanzan unos valores más adecuados, principalmente en aquellas zonas de audiencia ubicadas a una distancia de la fuente sonora inferior a 30 metros.

En cualquier caso, no resultan de por sí suficiente estas dos formas de acondicionamiento del crucero para lograr unas condiciones acústicas idóneas para la celebración de grandes eventos musicales, y habría que acompañarlas de otras medidas correctoras para mejorar las condiciones acústicas.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo quieren expresar su más sincero agradecimiento a Alfonso Jiménez, maestro mayor de la catedral de Sevilla, Francisco Pinto e Isabel Pérez por facilitarnos documentación de gran utilidad para la elaboración planimétrica y levantamiento de modelos de los escenarios configurados. Este trabajo ha sido financiado por fondos FEDER a través del proyecto del Plan Nacional I+D+i concedido por el Ministerio de Ciencia e Innovación (ref. BIA2010-20523).

Referencias

-
- [1] Cardoso, D. A. *Sevilla, el casco antiguo. Historia, arte y urbanismo*, Ediciones Guadalquivir, 2006.
 - [2] Torre Farfán, F. d. I. *Fiestas de la Santa Iglesia Metropolitana y Patriarcal de Sevilla al nuevo culto del Sr. Rey San Fernando*. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Sevilla, Sevilla (España), 1995.
 - [3] Karabiber, Z. A new approach to an ancient subject: CAHRISMA project, on de CD –ROM: Garmisch-Partenkirchen, July 4-7, *Seventh International Congress on Sound and Vibration*, Germany, 2000.
 - [4] Magrini, A.; Ricciardi, P. An experimental study of acoustical parameters in churches, *International J. Acoustics and Vibration*, 7(3), 2002, pp. 177-183.
 - [5] Suárez, R.; Sendra, J.J.; Navarro, J.; León, A.L. The acoustics of the Cathedral-Mosque of Córdoba. Proposals for architectural intervention, *Acta Acustica united with Acustica*, 90(2), 2005, pp. 362-375.
 - [6] Anderson, J. S.; Bratos-Anderson, M. Acoustic coupling effects in St Paul's Cathedral, London, *J. Sound Vib.*, 236(2), 2000, pp. 209-225.
 - [7] Lewers, T.; Anderson J. S. Some Acoustical Properties of St Paul's Cathedral, London, *J. Sound Vib.*, 92(2), 1983, pp. 285-297.
 - [8] Martellotta, F. Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome, *J. Acoust. Soc. Am.* 126(3), 2009, pp. 1175-1186.
 - [9] Klepper, D. L. The distributed column sound system at Holy Cross Cathedral, Boston, the reconciliation of speech and music, *J. Acoust. Soc. Am.* 99, 1996, pp. 417-425.
 - [10] Álvarez, L.; Alonso A.; Galindo, M.; Zamarreño, T.; Girón, S. Modelo acústico inicial para simular el campo sonoro de la catedral de Sevilla, *ISVA*, Valencia 24-25 Noviembre, pp. 106-113, 2011
 - [11] Navascués P. *Teoría del coro en las catedrales españolas*, Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, Madrid (España), 1998
 - [12] UNE-EN-ISO 3382-1:2010: Acústica, Medición de parámetros acústicos en recintos, parte 1: salas de espectáculos. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, 2010.
 - [13] Martellotta, F. Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome, *J. Acoust. Soc. Am.* 126(3), 2009, pp. 1175-1186.
 - [14] Beranek, L. *Acoustics*. Acoustical Society of America, Nueva York, 1993.