



INITIAL ACOUSTIC MODEL TO SIMULATE THE SOUND FIELD OF THE CATHEDRAL OF SEVILLE

Reference PACS: 43.55.Gx, 43.55.Ka

Álvarez, Lidia; Alonso, Alicia; Galindo, Miguel; Zamarreño, Teófilo; Girón, Sara

Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Universidad de Sevilla, Avda. Reina Mercedes, 2, E. T. S. de Arquitectura, 41012 Sevilla, SPAIN.

calvarez6@us.es, aliciaalonso@us.es, mgalindo@us.es, teofilo@us.es, sgiron@us.es

ABSTRACT

The cathedral of Seville is one of the most emblematic heritage buildings of the city, world heritage and the largest gothic cathedral in the world. It is divided into 5 naves; the central nave contains the choir and the main chapel, and in the outer naves, chapels open along its entire contour. In this work, a 3D model of this liturgical space has been created in order to simulate the sound field. The virtual model created is calibrated, from experimental measurements of T30, through an iterative process. From this point, the simulated and measured results for the rest of the commonly used acoustic parameters are analysed.

RESUMEN

La catedral de Sevilla es uno de los edificios patrimoniales más emblemáticos de la ciudad, patrimonio de la humanidad, y la mayor catedral gótica del mundo. Se articula en 5 naves; la central alberga el coro y la capilla mayor, y en las exteriores se abren capillas en todo su contorno. En este trabajo se elabora un modelo 3D de este espacio litúrgico para simular el campo sonoro. El modelo virtual creado se calibra, a partir de las medidas experimentales de T30, mediante un proceso iterativo. A partir de ahí se analizan los resultados simulados y medidos del resto de los parámetros acústicos habituales.

INTRODUCCIÓN

Aunque la propagación del sonido en los recintos existentes o concebidos para la presentación de la música sinfónica ha constituido el objetivo primordial de la acústica de salas y de la práctica acústica de las últimas décadas [1], también las propiedades acústicas de los espacios religiosos han recibido gran atención en la comunidad científica internacional [2]. El interés está tanto en los edificios contemporáneos de culto, en los que se cuida la inteligibilidad del mensaje entre celebrante y los fieles [3], y que se han concebido con un cierto carácter multifuncional, como en la acústica de los espacios existentes clásicos, de gran valor histórico y patrimonial [4], ya que éstos se renuevan con fines culturales que comparten con usos litúrgicos.

Sin pretender ser exhaustivos destacan en este ámbito, el pionero trabajo de Raes et al. [5], comparando los tiempos de reverberación de dos basílicas romanas, estructuralmente muy diferentes, también Shankland et al. [6], amplían el estudio anterior incorporando la basílica de San Pedro, Tzekakis, estudia varias iglesias ortodoxas de Tesalónica [7], Fearn et al. algunas iglesias europeas occidentales [8], y Lewers presenta algunas características sonoras de la catedral de San Pablo en Londres [9]. A partir de estos primeros trabajos proliferan otros estudios más avanzados sobre las condiciones acústicas de iglesias en otros países, destacan la recopilación de Desarnaulds et al. de más de 150 iglesias suizas de diferentes épocas, [10], el estudio de iglesias portuguesas llevado a cabo por Carvalho [11], y también los tratamientos de las superficies para mejorar la inteligibilidad de la palabra y el apoyo electroacústico en mezquitas, con las contribuciones de Hammad [12], y Adel [13], entre otros.



Figura 1. Imagen interior de la Catedral de Sevilla.

La complejidad y características del campo sonoro de los espacios litúrgicos interesan asimismo al equipo investigador italiano liderado por E. Cirillo, al estudiar una tipología de iglesias italianas (iglesias románicas de la región de Apulia) [14], cuyos resultados extienden a otros espacios eclesiales de diferentes tipologías y volúmenes [15]. Los esfuerzos de este grupo en relación a la acústica de espacios religiosos católicos han abarcado múltiples aspectos: teóricos objetivos [16], subjetivos [17], y prácticos [18].

Las singulares características acústicas de los enormes y complejos espacios reverberantes como son las catedrales, han suscitado en estos años también el interés de los investigadores: existencia de espacios acoplados en la catedral de San Pablo (Londres) [19]; también la identificación de volúmenes acoplados en la basílica de San Pedro (Roma) [20]; y ajustes de acústica variable en la catedral de Boston (Estados Unidos) [21]; son algunos ejemplos.

Más recientemente, la fascinación por las capacidades de predicción de los modelos de simulación digital basados en la acústica geométrica ha alcanzado también a los recintos de culto [22, 23]. Estas poderosas herramientas de simulación permiten estudiar virtualmente el comportamiento acústico del espacio a futuro, antes de construirlo, y producir señales audio del mismo a partir de las respuestas al impulso binaurales sintéticas. También con estas técnicas de predicción resulta plausible controlar los experimentos de manera más enfocada, reduciendo el número de variables implicadas, lo que permite desentrañar las causas de los fenómenos, y ayudar a corroborar ciertas hipótesis [20]. Las posibilidades de recreación de situaciones acústicas pasadas permiten también llevar a cabo lo que se llama arqueología acústica, y posibilita incorporar en los grandes lugares de culto, de gran valor patrimonial, las características acústicas como otro importante aspecto de su patrimonio intangible.

En este trabajo se analiza el proceso de creación, ajuste, y validación del modelo computacional 3D de la catedral de Sevilla, teniendo en cuenta una única posición de la fuente de todas las consideradas en los ensayos experimentales, y analizando exclusivamente los resultados de los parámetros acústicos monaurales. Estos resultados constituyen el comienzo de un ambicioso trabajo sobre este espacio catedralicio que pretende incorporar la simulación de las respuestas al impulso binaurales y tridimensionales, y la implementación de auralizaciones, para recrear el comportamiento acústico del espacio y para su posible utilización en la valoración subjetiva de la percepción acústica del mismo.

DESCRIPCIÓN DE LA CATEDRAL

La catedral gótica cristiana de Sevilla, también conocida como “Santa María de la Sede”, se sitúa al sur del centro histórico de la ciudad andaluza. El solar en el que se encuentra estaba ocupado por una antigua mezquita aljama, la cual, tras la conquista, fue cristianizada y posteriormente derribada con el fin de construir el edificio gótico en la misma superficie rectangular de 116 metros de largo por 76 metros de ancho [24]. Ciertos historiadores datan el inicio de las obras en 1401, sin embargo, no existe testimonio escrito hasta 1433 [25]. El proceso constructivo, iniciado desde el trascoro hasta la cabecera, fue dirigido por diferentes maestros a lo largo de los años.

El espacio interior del templo gótico, se articula en cinco naves orientadas al este, siendo las más altas la nave del crucero y la nave central, llegando casi a los 40 metros de altura libre. Su estructura cuenta con 60 pilares de mampostería revestidos de piedra, 32 de ellos exentos,

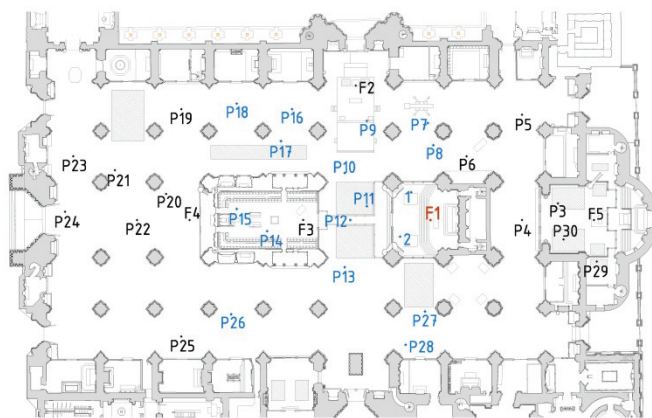


Figura 2. Plano de planta de la catedral mostrando las posiciones de fuente (F) y los puntos receptores (P).

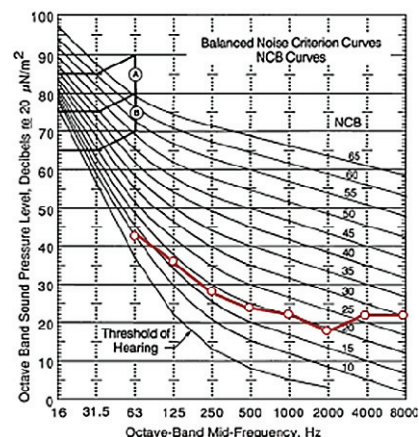


Figura 3. Espectro de ruido medido valorado sobre las curvas NCB.

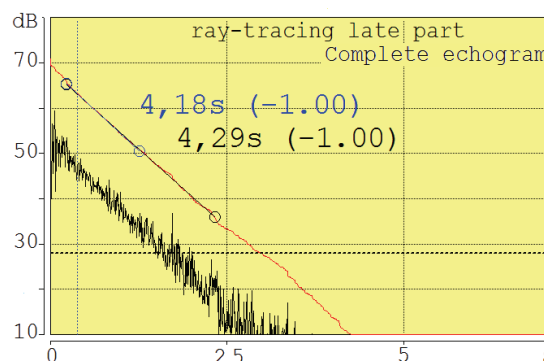
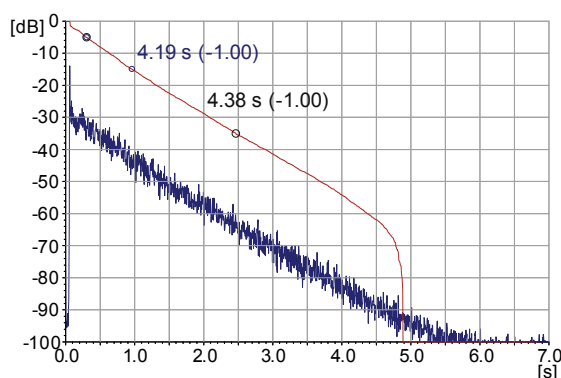


Figura 4. Curva de energía e integral de Schroeder, medidas (izquierda) y simuladas (derecha) para el punto 13 filtradas a 1 kHz.

sobre los cuales descansan las 68 bóvedas de crucería que cubren las diversas naves. La catedral presenta solería de mármol blanco y azul grisáceo. Ver Figura 1.

El coro, situado en la nave central, cuenta con una sillería de madera tallada por diversos artistas. Su entrada está delimitada por una gran reja renacentista, y los tres lados restantes están cerrados por muros de cantería, en los que se localizan cuatro capillas de alabastro abiertas a las naves laterales. El órgano está formado por dos grandes cajas situadas sobre los muros laterales, a ambos lados del coro. En la cabecera del templo se sitúa la Capilla Real, donde se celebra diariamente la liturgia. Forma un amplio, recinto cerrado por un ábside semicircular y cubierto por una solemne cúpula. Una gran reja cubierta con densas cortinas delimita la entrada a la misma.

En definitiva, la catedral se convierte en un lugar de culto y oración en el que en ciertas ocasiones se llevan a cabo grandes ceremonias y festividades que la transforman en un gran teatro sacro.

TÉCNICA EXPERIMENTAL

Las respuestas impulsivas (RI) se han obtenido siguiendo las recomendaciones de la norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010 [26]. Se han considerado 5 posiciones de fuente diferentes, que se corresponden con las ubicaciones habituales de los principales focos sonoros en las diferentes celebraciones que tienen lugar en el templo. Se fijaron un total de 28 posiciones de micrófonos distribuidas por toda la zona de audiencia, aprovechando la simetría del recinto (ver Figura 2), se han dispuesto 24 receptores en la parte de la izquierda y 4 en la derecha para que actúen como controladores. Se presenta aquí el estudio realizado para la posición de la fuente F1, ubicada en el altar mayor a 1,50 metros sobre el suelo.

Para cada posición de la fuente se han estudiado las posiciones del micrófono en el conjunto de puntos recepción en los que se recibe sonido directo. En cada punto de recepción, situado a 1,20 metros del suelo, se registraron las respuestas al impulso a partir de barridos de señales sinusoidales, en las que la frecuencia incrementa exponencialmente con el tiempo. El rango de frecuencias se ajustó para cubrir las bandas de octava comprendidas entre 63 y 16.000 Hz, así como la duración del barrido, para conseguir una relación señal-ruido superior a 45 dB para las bandas de octava de interés.

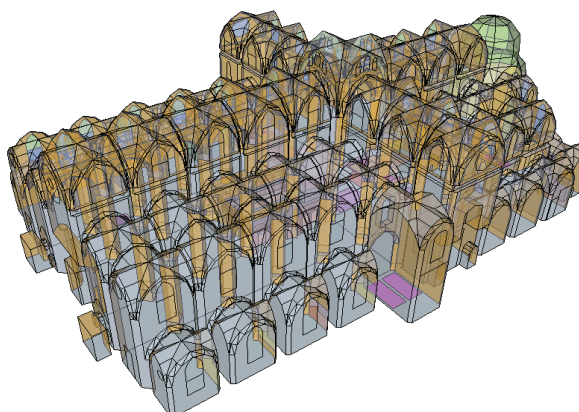


Figura 5. Modelo geométrico 3D de la Catedral de Sevilla.

Todos los ensayos experimentales se realizaron con el templo desocupado, en periodo nocturno. La temperatura y la humedad relativa variaron entre 25 y 25,5 °C y 55 y 58 %, respectivamente. El nivel del ruido de fondo se registró promediando durante 4 minutos con el analizador SVAN 958, de SVANTEK. El nivel sonoro continuo equivalente registrado fue de 30,7 dBA. En todo caso la relación señal-ruido se mantuvo muy por encima de 45 dB en todas las frecuencias de interés, valor mínimo requerido para medir con fiabilidad T30. En la Figura 3 se representa el espectro medido del ruido de fondo sobre las curvas NBC, que se puede valorar como NCB-30.

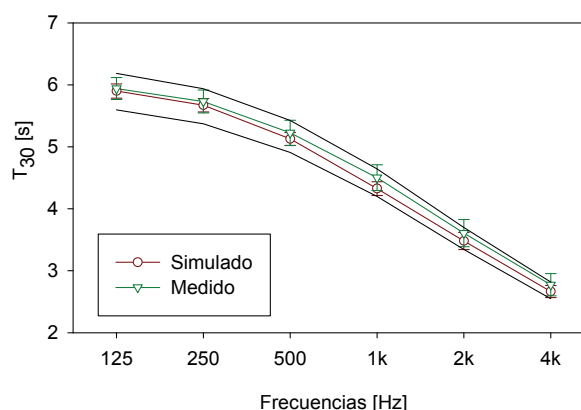


Figura 6. Tiempo de reverberación medido y simulado promediado espacialmente y dispersión espacial valorada por la desviación estándar asociada (barras verticales).

A modo de ejemplo en la Figura 4 se muestra la curva de energía y la integral de Schroeder, filtradas para la octava de 1 kHz, calculadas a partir de la RI medida en el punto 13, excitando la sala con la fuente situada en la posición F1. A partir de estas RI se derivan los valores de los principales parámetros acústicos: tiempo de reverberación (T30), tiempo de reverberación inicial (EDT), tiempo central (TS), definición (D50), claridad (C80), fuerza sonora (G), fracción de energía lateral precoz (JLF) e índice de transmisión de la palabra (STI).

El proceso de generación, adquisición y análisis de la señal se llevó a cabo con el programa WinMLS2004 mediante una tarjeta de sonido EDIROL UA-101. La señal barrido en frecuencia se reprodujo en el recinto usando una fuente omnidireccional AVM DO-12, siendo previamente amplificada con un amplificador de potencia B&K type 2734. La respuesta al impulso se capturó con un micrófono multipatrón Audio-Technica AT4050/CM5, en su configuración omnidireccional y bidireccional (figura de ocho), conectado a la fuente de polarización Earthworks-LAB 1.

SIMULACIÓN ACÚSTICA

Se ha creado un modelo geométrico virtual simplificado de la catedral de Sevilla para simular su comportamiento acústico, mostrado en la Figura 5. Dicho modelo está compuesto por 7.516 planos y tiene un volumen de 216.192 m³.

El modelo se ha calibrado siguiendo un proceso iterativo mediante el cual se ajustan los coeficientes de absorción de los materiales menos conocidos hasta conseguir que el tiempo de reverberación simulado promediado espacialmente para cada una de las bandas de octavas

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

Material	Área [%]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Sillería*	65,1	0,13	0,13	0,13	0,14	0,16	0,16
Mármol Suelo	14,5	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Molduras*	5,3	0,13	0,13	0,13	0,14	0,16	0,16
Sillería Capilla*	2,8	0,10	0,10	0,10	0,12	0,14	0,14
Vidrieras	2,1	0,13	0,12	0,08	0,07	0,06	0,04
Retablos Madera	1,9	0,12	0,12	0,15	0,15	0,18	0,18
Órgano	1,4	0,12	0,14	0,16	0,16	0,16	0,16
Madera Coro	1,1	0,12	0,12	0,15	0,15	0,18	0,18

* Materiales usados para calibrar el modelo.

consideradas no difiera en más de 1 JND, just noticeable difference (5% para T) [26], del valor promedio medido experimentalmente. Aunque el JND tiene validez para los valores promedios de los parámetros, hemos aceptado dicho valor para cada banda de octava.

En la Figura 6 se representa el promedio espacial del T₃₀, tanto medido como simulado, con su desviación estándar correspondiente obtenida para cada banda de octava, así como los límites aceptados aplicando el criterio de 1 JND.

En la Tabla 1 se muestran los coeficientes de absorción asociados a los materiales cuyo porcentaje relativo de superficie es mayor al 1%. Los coeficientes de dispersión de estos materiales varían según sea el grado de irregularidades que presenta cada superficie, de modo que los materiales de superficie lisa tienen un coeficiente de scattering 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, y 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 [20].

El software utilizado para realizar la simulación acústica ha sido CATT-Acoustic v8k. Se ha utilizado el modo "cálculo detallado completo" basado en el Randomized Tail-corrected Cone-tracing, un método híbrido desarrollado a partir de algoritmos de predicción basados en los métodos de fuentes imagen, trazado de rayos y trazado de conos. Tanto el número de rayos como el tiempo de truncado empleados en la simulación se determinaron de forma manual, siendo 300.000 rayos y 7 s respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fijando la atención en las diferencias entre los valores promediados espacial y espectralmente, medidos y simulados, en términos de sus JND [20], [26], y recogidos en la Tabla 2, se aprecia como para la mayoría de los parámetros dichas diferencias son inferiores a 1 JND, y en ningún caso superan los 3 JNDs, lo que es un indicativo del buen funcionamiento del modelo. Los parámetros energéticos son los que presentan las diferencias más significativas.

Tabla 2. Valor promediado espacial y espectralmente de los parámetros acústicos estudiados, y diferencias JND.

Parámetros	Simulados	Medidos	JND
T ₃₀ [s]	4,73	4,86	0,56
EDT [s]	4,15	4,06	0,41
T _s [ms]	227,89	272,86	1,94
D ₅₀	0,37	0,26	2,28
C ₈₀ [dB]	-1,18	-3,63	1,64
J _{LF}	0,09	0,12	0,67
G [dB]	0,30	1,23	0,92
STI	0,52	0,48	-

En la Figura 7 se representan los valores medidos y simulados promediados espacialmente de los parámetros acústicos estudiados. Las barras de error muestran la dispersión espacial calculada a partir de la desviación estándar para cada banda de octava. Si se observan los valores medios del tiempo de reverberación inicial, puede comprobarse que, el comportamiento espectral del valor medido y simulado es muy similar, siguiendo la tendencia en frecuencia esperada, es decir, el EDT disminuye a medida que aumenta la frecuencia, sobre todo a partir de 2 kHz, donde se hace notoria la absorción del aire. En el resto de los parámetros, a nivel general, se obtienen valores simulados promediados espacialmente muy coincidentes con los medidos en medias y, especialmente, en altas frecuencias. Más deficientes resultados se obtienen para las bajas frecuencias, en especial para la banda de octava de 250 Hz. La fuerza sonora simulada, por ejemplo, difiere hasta en 5 dB de la medida experimental. En el caso de la fracción de energía lateral precoz las diferencias son aceptables en todas las bandas de octava. Además, las tendencias en frecuencia de los valores medidos y simulados son muy parecidas en todos los parámetros acústicos analizados.

Se observa también, que los valores de las desviaciones correspondientes a las simulaciones son del mismo orden, o menores, que las encontradas en las medidas experimentales. La mayoría de las desviaciones superan, para cada parámetro, frecuencia, fuente, medida in situ y simulado, un JND, por lo que en diferentes zonas de la catedral la sensación percibida será diferente.

Con objeto de verificar la validez de la simulación, punto a punto y por frecuencias en la Figura 8 se representa el porcentaje de puntos de medida cuyas diferencias, expresadas en términos de JND, entre los valores medidos y simulados de cada parámetro, se encuentran por debajo de cierto umbral. Cuando se fija por debajo de 2 JNDs, valor normalmente considerado como aceptable para la simulación, vemos que, para la mayoría de los parámetros y a excepción de la banda de 250 Hz, más del 50% de los puntos se sitúan dentro de este rango. Teniendo en cuenta las grandes dimensiones del recinto y su complejidad arquitectónica, consideramos aceptable una diferencia de hasta 3 JNDs, y en este caso el número de puntos bajo dichas condiciones crece al 70%, llegando en algunos casos hasta el 100%. Esto pone de manifiesto que con el modelo 3D creado se reproducen de una manera bastante aproximada las características del campo acústico creado en el recinto ubicando una fuente sonora en la posición F1. Respecto a la inteligibilidad, medida con el índice STI, cabe destacar que los valores medidos y simulados son muy aproximados en la mayoría de los puntos receptores. El STI es aceptable cuando la distancia emisor-receptor es pequeña, donde la relación señal ruido es mayor, pero como es de esperar, va decayendo conforme aumenta dicha distancia, ver Figura 9.

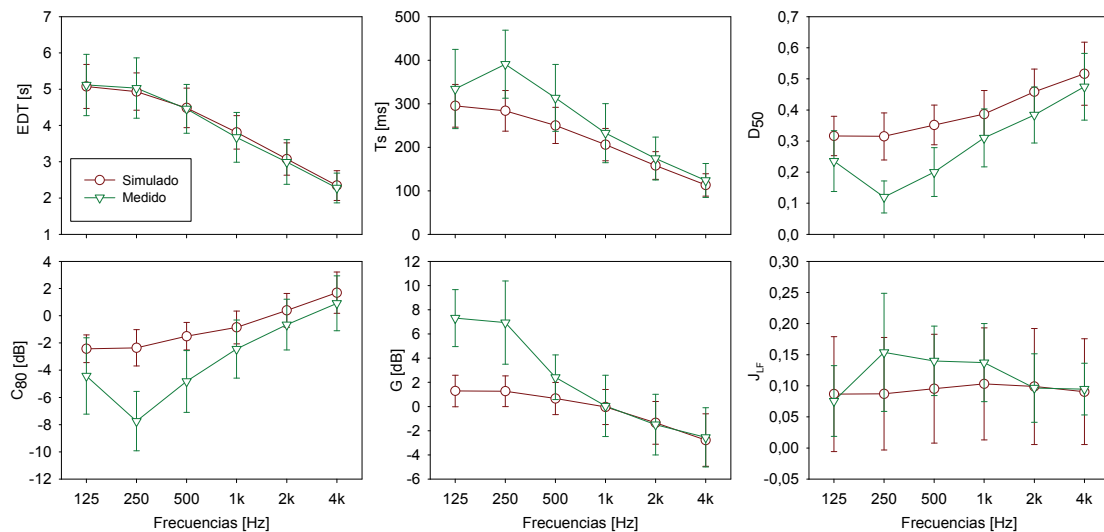


Figura 7. Comportamiento espectral simulado y medido de los parámetros acústicos estudiados, promediados espacialmente y su desviación estándar.

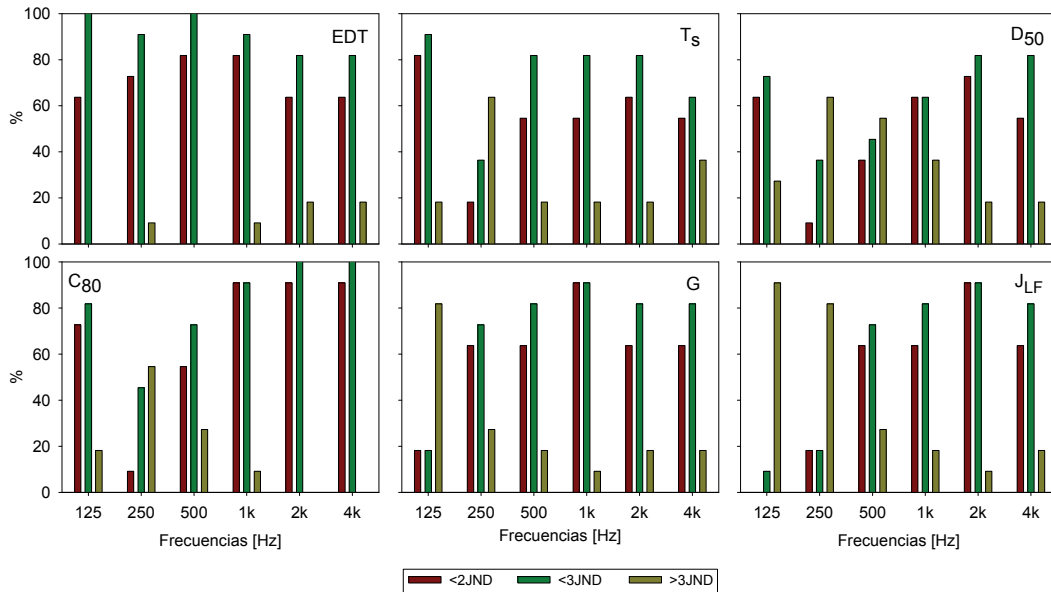


Figura 8. Porcentaje de puntos de medida cuyas diferencias JND entre los valores medidos y simulados se encuentran dentro de cada rango, para cada parámetro.

CONCLUSIONES

Se ha generado y calibrado un modelo de la catedral de Sevilla, patrimonio de la humanidad y la mayor catedral gótica del mundo, con objeto de simular el comportamiento del campo sonoro en su interior. La calibración se basa en un ajuste de los coeficientes de absorción de los materiales menos conocidos, hasta conseguir que el tiempo de reverberación simulado promediado espacialmente para cada una de las bandas de octavas consideradas no difiera en más de 1 JND del valor promedio medido experimentalmente.

Cuando se evalúa el valor medio en frecuencia de cada parámetro los resultados obtenidos son altamente satisfactorios. Al estudiar sus valores promediados espacialmente en cada banda de octava, se observa que la aproximación entre los valores medidos y simulados es, en general, bastante aceptable, presentando menores similitudes a bajas frecuencias. Por último, las diferencias entre valores medidos y simulados en cada punto receptor expresadas en términos del JND para cada banda de octava, se encuentran por debajo del umbral admitido para este espacio, 3 JND. Por lo tanto, puede aceptarse como buena la simulación implementada del campo acústico del templo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quieren expresar su más sincero agradecimiento al Deán y al arquitecto conservador de la catedral de Sevilla, por facilitarnos el acceso para la realización de las medidas. También agradecen a J. R. Barroso Morales la valiosa ayuda prestada en las medidas acústicas y a J. A. Garrido Alcázar su disponibilidad, colaboración, y su cuidada labor fotográfica de este espacio. Este trabajo ha sido financiado por fondos FEDER a través del I+D+I concedido por el Ministerio de Ciencia e Innovación (ref. BIA2010-20523).

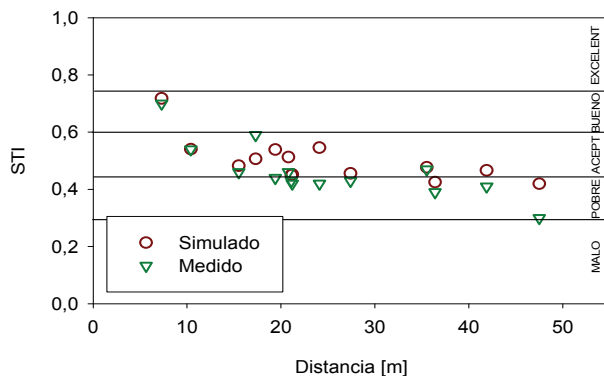


Figura 9. Variación del STI simulado y medido en función de la distancia a la fuente.

REFERENCIAS

- [1] L.L. Beranek, "Concert hall acoustics," *J. Acoust. Soc. Am.* 92(1), 1-39 (1992).
- [2] E. Cirillo, F. Martellota, "Worship, Acoustics and Architecture," Multiscience, Brentwood UK, (2006).
- [3] M. K. Abdelazeed, R. N. Hammad, A. A. Mustafa, "Acoustics of King Abdullah mosque," *J. Acoust. Soc. Am.* 90(3), 1441-1445 (1991).
- [4] Z. Karabiber, "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).
- [5] A. C. Raes, G. Sacerdote, "Measurement of the acoustical properties of two Roman basilicas," *J. Acoust. Soc. Am.* 25(5), 925-961 (1953).
- [6] R. S. Shankland, H. K. Shankland, "Acoustics of St. Peter's and patriarchal basilicas in Rome," *J. Acoust. Soc. Am.* 50(2), 389-396 (1971).
- [7] E. Tzekakis "Data on the acoustics of the byzantine churches of Thessaloniki," *Acustica* 43(2), 275-279 (1979).
- [8] R. Fearn, "Reverberation in Spanish, English, and French churches," *J. Sound Vib.* 43(3), 562-567 (1975).
- [9] T. H. Lewers, J. S. Anderson, "Some acoustical properties of St. Paul's cathedral, London," *J. Sound Vib.* 92(2), 285-297 (1984).
- [10] V. Desarnoulds, K. Eggenschwiler, S. Bossoney, "Studie zur Raumakustik von Schweizer Kirchen" ("Acoustic study of Swiss churches"), Proceedings of DAGA, Zürich, 710-711 (1998).
- [11] A. P. O Carvalho, "Relations between rapid speech transmission index (RASTI) and other acoustical and architectural measures in churches," *Appl. Acoust.* 58(1), 33-49 (1999).
- [12] R. N. Hammad, "RASTI measurements of mosques in Amman, Jordan," *Appl. Acoust.* 30(4), 335-345 (1990).
- [13] A. A. Adel, "Measurement of acoustical characteristics of mosques in Saudi Arabia," *J. Acoust. Soc. Am.* 113(3), 1505-1517 (2003).
- [14] E. Cirillo, F. Martellota, "An improved model to predict energy-based acoustic parameters in Apulian-Romanesque churches," *Appl. Acoust.* 64(1), 1-23 (2002).
- [15] E. Cirillo, F. Martellotta, "Sound propagation and energy relations in churches," *J. Acoust. Soc. Am.* 118(1), 232-248 (2005).
- [16] F. Martellotta, "A multi-rate decay model to predict energy-based acoustic parameters in churches," *J. Acoust. Soc. Am.* 125(3), 1281-1284 (2009).
- [17] F. Martellotta, "The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces," *J. Acoust. Soc. Am.* 128(2), 654-663 (2010).
- [18] F. Martellotta, M. D'Alba, "On site validation of sound absorption measurements of occupied pews," *Appl. Acoust.* 72(12), 923-933 (2011).
- [19] J. S. Anderson, M. Bratos-Anderson "Acoustic coupling effects in St Paul's Cathedral, London," *J. Sound Vib.* 236(2), 209-225 (2000).
- [20] F. Martellotta, "Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome," *J. Acoust. Soc. Am.* 126(3), 1175-1186 (2009).
- [21] D. L. Klepper, "The distributed column sound system at Holy Cross Cathedral, Boston, the reconciliation of speech and music," *J. Acoust. Soc. Am.* 99(1), 417-425 (1996).
- [22] M. Galindo, T. Zamarreño, S. Girón, "Acoustic simulations of Mudejar-Gothic churches," *J. Acoust. Soc. Am.* 126(3), 1207-1218 (2009).
- [23] J. Segura, A. Giménez, J. Romero, S. Cerdá, "A comparison of different techniques for simulating and measuring acoustic parameters in a place of worship: Sant Jaume Basílica in Valencia, Spain," *Acta Acustica-Acustica* 97(1), 155-170 (2011).
- [24] D. A. Cardoso, "Sevilla, el casco antiguo. Historia, arte y urbanismo," Ediciones Guadalquivir (2006).
- [25] A. Jiménez, "Cartografía de la montaña hueca: notas sobre los planos históricos de la Catedral de Sevilla," Cabildo Metropolitano de la Catedral de Sevilla, (1997).
- [26] 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).