

LA ACÚSTICA VIRTUAL APLICADA A LA RESTAURACIÓN DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO: LA CATEDRAL DE VALENCIA

VIRTUAL ACOUSTICS APPLIED TO THE RESTORATION OF ARCHITECTURAL HERITAGE: THE CATHEDRAL OF VALENCIA

Elena Díaz Rubio, Alicia Giménez Pérez
Universitat Politècnica de València



Medición acústica de la Catedral de Valencia. Fuente: Autores / Acoustic measurement of the Cathedral of Valencia. Source: Authors

Palabras clave: Conservación, reпрistinación, recintos de culto, acústica arquitectónica, sonoridad

La Catedral de Valencia (España) es el resultado de múltiples intervenciones y ampliaciones realizadas a lo largo de su historia. La reпрistinación parcial del templo en las últimas décadas ha generado una nueva configuración espacial y una variación en los revestimientos, influyendo en la acústica del recinto. Los edificios de culto presentan una sonoridad característica que debe ser objeto de especial protección, por lo que resulta importante determinar las variaciones que, en cuanto a calidad acústica, hayan podido producirse. Para ello, a través de simulaciones acústicas, se ha realizado un estudio comparativo del comportamiento acústico antes y después de la reпрistinación realizada. Esta metodología permite predecir el resultado acústico de cualquier intervención antes de su ejecución práctica. Con ello, se presenta una nueva variable a la hora de afrontar la restauración del patrimonio: la acústica arquitectónica.

Keywords: Heritage conservation, reпрistination, places of worship, architectural acoustics, sonority

The Cathedral of Valencia (Spain) is the result of multiple interventions carried out throughout its history. In order to recover the appearance that it had centuries ago, a partial reпрistination has been made generating a new spatial configuration and variations in the coatings that influence the acoustics of the room. Religious buildings have a characteristic sound that must be the object of special protection, so it is important to determine the variations that, in terms of acoustic quality, may have occurred. To do this, through acoustic simulations, a comparative study of the acoustic behavior before and after the reпрistination has been performed. This methodology opens the possibility to predict the acoustic result of any intervention before its implementation. With this, architectural acoustics is proposed as a new tool to deal with the restoration of heritage.

1. INTRODUCCIÓN

La Catedral de Valencia (España), cuyas obras empezaron en 1262 bajo la dirección de Arnau Vidal, ha sufrido múltiples transformaciones y ampliaciones a lo largo de su historia. El primitivo templo, levantado en estilo gótico, destacaba por su austeridad y simplicidad decorativa. El primer añadido de la estructura original fue la Puerta de los Apóstoles, construida a principios del siglo XIV en estilo gótico francés. En 1356, se levantó el Aula Capitular, hoy en día Capilla del Santo Cáliz, donde puede apreciarse un gótico tardío con la incipiente influencia del primer Renacimiento. En 1381, se construyó el emblemático campanario, la Torre del Miguelete. Tanto el Aula Capitular como la Torre del Miguelete permanecieron exentos hasta que, en 1458, se prolongaron las tres naves de la estructura primitiva, quedando estas edificaciones integradas en el templo. En

1. INTRODUCTION

The Cathedral of Valencia (Spain), whose works began in 1262 under the direction of Arnau Vidal, has undergone multiple transformations and extensions throughout its history. The primitive temple, built in the Gothic style, stood out for its austerity and decorative simplicity. The first addition to the original structure was the Door of the Apostles, built in the early 14th century in the French Gothic style. In 1356, the Chapter Hall was built, today the Chapel of the Holy Chalice, where you can see a late Gothic style with the incipient influence of the Early Renaissance. In 1381, the iconic bell tower "El Miguelete" was built, inspired by Western and Catalan models. Both the Chapter Hall and the bell tower remained exempt until, in 1458, the three naves of the primitive structure were extended, leaving these buildings integrated into



2. Evolución constructiva de la Catedral de Valencia (s. XIII - s. XVIII). Fuente: Autores

2. Construction evolution of the Cathedral of Valencia (S.III - S.VIII). Source: Authors



3



4



5

el siglo XVI, la nueva tendencia artística del Renacimiento quedó reflejada en el interior de la catedral en el retablo del altar mayor y en la Capilla de la Resurrección. En este mismo estilo, aunque en su etapa manierista, se construyó en el exterior de la catedral la arcada noroccidental, llamada *Obra nova*. En el siglo XVII, el Barroco quedó admirablemente representado en la decoración del altar mayor y el presbiterio, en la antigua capilla de San Pedro y en la monumental portada principal (Vilaplana Zurita 1997). En el siglo XVIII, comenzó un proceso de renovación total del interior de la catedral y parte del exterior, con el que se pretendía dar uniformidad arquitectónica al interior del templo y adecuar la obra de estructura gótica a los cánones estéticos clasicistas (Cortés Meseguer 2014). La transformación neoclásica puede considerarse como el fin de la evolución

the temple. In the 16th century, the new artistic trend of the Renaissance was reflected inside the Cathedral in the altarpiece of the main altar and in the Chapel of the Resurrection. In the same style but in the Mannerist period, the northwestern arcade, called *Obra nova*, was built outside the Cathedral. In the 17th century, the Baroque was admirably represented in the decoration of the main altar and the presbytery, the old chapel of San Pedro, and the monumental main portal (Vilaplana Zurita 1997). In the 18th century, a process of a total renovation of both the interior and part of the exterior of the Cathedral began with the objective of providing architectural uniformity to the interior of the temple and adapt the work of Gothic structure to the classicist aesthetic canons (Cortés Meseguer 2014). The neoclassical transformation

constructiva de la catedral, tras el cual tuvo lugar un periodo de paz arquitectónica, en el que únicamente se llevaron a cabo pequeñas obras de mantenimiento (Cortés Meseguer 2014). En la figura 2, se muestra la evolución constructiva de la catedral, desde el templo gótico originario hasta la renovación neoclásica del siglo XVIII. En las figuras 3-5, puede apreciarse el estado de la catedral en el año 1917, tras el proceso de renovación llevado a cabo en el interior del templo. Tras los estragos de la Guerra Civil (1936-1939), se llevaron a cabo intervenciones en el interior del templo con el objetivo de paliar los destrozos sufridos y dotarlo de una mayor funcionalidad. En 1940, con la reforma de Traver, se eliminaron el coro y los órganos, dejando diáfano el cuerpo central. Esta intervención provocó la pérdida del revestimiento

can be considered as the end of the constructive evolution of the Cathedral, after which a period of architectural peace took place, in which only minor maintenance works were carried out (Cortés Meseguer 2014). In figure 2, the constructive evolution of the Cathedral is shown, from the original Gothic temple to the neoclassical renovation of the 18th century. In figures 3-5, you can see the state of the Cathedral in 1917, after the renovation process carried out inside the temple. After the ravages of the Civil War (1936-1939), a series of interventions were carried out inside the temple in order to alleviate the damage suffered and increase the functionality. In 1940, with the reform of Traver, the choir and organs were eliminated, leaving the central body diaphanous. This intervention caused the loss of the neoclassical cladding in

neoclásico en el tercer tramo de la nave central (fig. 6). En este momento, se planteó el debate sobre si se debía revestir en estilo neoclásico o si debía dejarse vista la arquitectura gótica originaria. En 1944, con la intervención realizada por Alejandro Ferrant (1897-1976), se reconstruyeron la Sacristía y la Antesacristía. Esta intervención marcaría el criterio de descubrimiento de la arquitectura gótica originaria (Cortés Meseguer 2014). Tras un periodo de dudas y polémica, en 1972 comenzaron las obras para recuperar la arquitectura gótica primitiva en el interior de la catedral. Bajo la dirección de Fernando Chueca (1911-2004), se retiró la mayor parte del estuco neoclásico que había revestido la catedral desde la renovación del siglo XVIII, permaneciendo en este estado hasta nuestros días (fig. 7) (Nuñez Sanmartín 2017).



6

the third section of the central nave (fig. 6). At this time, a controversial debate started on whether the neoclassical style should be clad or the original Gothic architecture should be left visible. In 1944, with the intervention made by Alejandro Ferrant, the Sacristy and the Pre-Sacristy were rebuilt. This intervention would mark the criterion of uncovering the original Gothic architecture (Cortés Meseguer 2014). After a period of doubt and controversy, the works began to recover the primitive Gothic architecture inside the Cathedral in 1972. Under the direction of Fernando Chueca, most of the neoclassical stucco that had covered the Cathedral since the renovation of the 18th century was removed, remaining in this state until today (fig. 7) (Nuñez Sanmartín 2017). In 1999, a process of conservation and



7

3. Interior de la Catedral de Valencia, 1917. Fotografía tomada desde la nave de la Epístola hacia el crucero
 3. Interior of the Cathedral of Valencia, 1917. The photograph was taken from the nave of the Epistle towards the transept.

4. Interior de la Catedral de Valencia, 1917. Fotografía tomada desde el coro hacia el presbiterio
 4. Interior of the Cathedral of Valencia, 1917. The photograph was taken from the choir towards the presbytery

5. Interior de la Catedral de Valencia, 1917. Fotografía tomada desde el transepto hacia la nave del Evangelio
 5. Interior of the Cathedral of Valencia, 1917. The photograph was taken from the transept towards the Gospel nave

Fuente / Source: Arxiu Mas, Fundació Institut Amatller d'Art Hispànic

6. Interior de la Catedral de Valencia tras la intervención de Traver, 1955
 6. Interior of the Cathedral of Valencia after the intervention of Traver, 1955

Fuente / Source: Arxiu Gudiol, Fundació Institut Amatller d'Art Hispànic

7. Interior de la Catedral de Valencia en la actualidad
 7. Interior of the Valencia Cathedral today

Fuente: Autores / Source: Authors



8



9

8. Vista de la cúpula barroca del presbiterio antes de su retirada. Fuente: S. Vila Ferrer

8. View of the baroque dome of the presbytery before its removal. Source: S. Vila Ferrer

9. Vista de la cúpula gótica originaria decorada con los frescos renacentistas en la actualidad. Fuente: Autores

9. View of the original Gothic dome decorated with Renaissance frescoes today. Source: Authors

En 1999, se inició en el interior de la catedral un proceso de conservación y limpieza. En el año 2004, durante las labores de mantenimiento realizadas en el presbiterio, se descubrieron unos frescos renacentistas de gran valor artístico e histórico (Nuñez Sanmartín 2017). Estos frescos, realizados por los pintores Francesco Pagano (†1506) y Paolo de San Leocadio (1447-1520) en el siglo XV, habían quedado ocultos tras la construcción de la bóveda barroca del ábside en el siglo XVII (fig. 8) (Company 2006). En el proyecto de intervención, se tomó la determinación de retirar únicamente aquellos elementos necesarios para la restauración de los frescos que fueran susceptibles de volver a montarse. Así, se mantuvo la decoración barroca en las ventanas, en el antepecho sobre la cornisa, en los nervios y en la clave, puesto que resultó

cleaning began inside the Cathedral. In 2004, during the maintenance work carried out in the presbytery, some Renaissance frescoes of great artistic and historical value were discovered (Nuñez Sanmartín 2017). These frescoes, made by the Renaissance painters Francisco Pagano and Pablo de San Leocadio in the 15th century, had been hidden after the construction of the Baroque vault of the apse in the 17th century (fig. 8) (Company 2006). In the intervention project, it was determined to remove only those elements necessary for the restoration of the Renaissance frescoes that could be reassembled. Thus, the baroque decorations on the windows, the sill on the cornice, the ribs, and the keystone were maintained to guarantee their integrity (fig. 9) (Vila Ferrer 2006). The actions carried out inside the Cathedral

inviabile su retirada garantizando su integridad (fig. 9) (Vila Ferrer 2006). Las actuaciones realizadas en el interior de la catedral abren el gran debate sobre cómo se debe abordar la restauración del patrimonio arquitectónico. Diversos autores han estudiado la idoneidad de estas actuaciones desde el punto de vista histórico, artístico o arquitectónico. En este sentido, Salvador Vila, arquitecto de la Catedral de Valencia, afirma que la actuación de retirada de la cúpula barroca «no desvirtúa los valores artísticos de la Catedral» y permite «la pervivencia de los elementos originales, con lo que, si así se decidiera posteriormente, sería factible su reconstrucción» (Vila Ferrer 2006). En contraposición, el autor Luis Cortés afirma que las actuaciones realizadas «distorsionan considerablemente la lectura del lenguaje arquitectónico», y manifiesta que «se deben respetar las

open a debate on how the restoration of the architectural heritage should be approached. Various authors have studied the suitability of these actions from a historical, artistic, or architectural point of view. In this sense, S. Vila, the architect of the Cathedral of Valencia, affirms that the removal of the Baroque dome “does not detract from the artistic values of the Cathedral” and allows “the survival of the original elements so, if it is decided later, its reconstruction would be feasible” (Vila Ferrer 2006). In contrast, we find the author L. Cortés, who affirms that the actions carried out “considerably distort the reading of architectural language” and states that “contributions from different periods that enriched their original values must be respected” (Cortés Meseguer 2014).

aportaciones de distintas épocas que hayan enriquecido sus valores originales» (Cortés Meseguer 2014).

2. LA SIMULACIÓN ACÚSTICA: OBJETIVO Y METODOLOGÍA

Sin embargo, no se han analizado las citadas actuaciones desde el punto de vista acústico, es decir, cómo han podido afectar a la calidad sonora del templo. Los edificios de culto, además de su valor histórico, artístico y arquitectónico, presentan una sonoridad característica que debe ser objeto de especial protección y preservación. Se trata de recintos patrimoniales donde la transmisión del sonido es un factor preferente (Planells Pérez 2017). Las repristinaciones realizadas, aparte del gran cambio artístico y arquitectónico que suponen, han generado una nueva configuración espacial y una variación

en los revestimientos, lo que influye directamente en el comportamiento acústico del recinto. Con ello, el objetivo de este estudio es determinar las variaciones que, en cuanto a calidad acústica, hayan podido producirse. Para ello, a través de simulaciones acústicas, se ha realizado un estudio comparativo del comportamiento acústico antes y después de las repristinaciones realizadas en las últimas décadas (1972 - actualidad). Además, una vez conocido el comportamiento acústico del recinto, puede predecirse el resultado acústico de cualquier intervención antes de su ejecución práctica. Con todo ello, se presenta una nueva variable a tener en cuenta a la hora de afrontar la restauración del patrimonio: la acústica arquitectónica. Con carácter previo a la realización de la simulación acústica de la catedral, ha sido necesario llevar a cabo una toma de datos exhaustiva, tanto de las características

arquitectónicas del espacio como de su comportamiento acústico. Se trata de una fase fundamental dentro de la metodología de trabajo seguido, puesto que es la base a partir de la cual se desarrolla toda la investigación.

Para determinar el comportamiento acústico de la catedral ha sido necesario realizar mediciones acústicas *in situ*. El proceso ha consistido en excitar la sala utilizando un sistema de emisión sonora y registrar la respuesta de la misma para, a partir de esta señal, determinar los valores de los parámetros acústicos objetivos mediante un *software* específico. En este estudio, se ha partido de la medición realizada por el Grupo de Investigación en Acústica Virtual UPV-UVEG, que se corresponde con el comportamiento acústico de la catedral en la actualidad. La metodología seguida se basó en los requerimientos establecidos en la norma UNE-EN

2. ACOUSTIC SIMULATION: OBJECTIVE AND METHODOLOGY

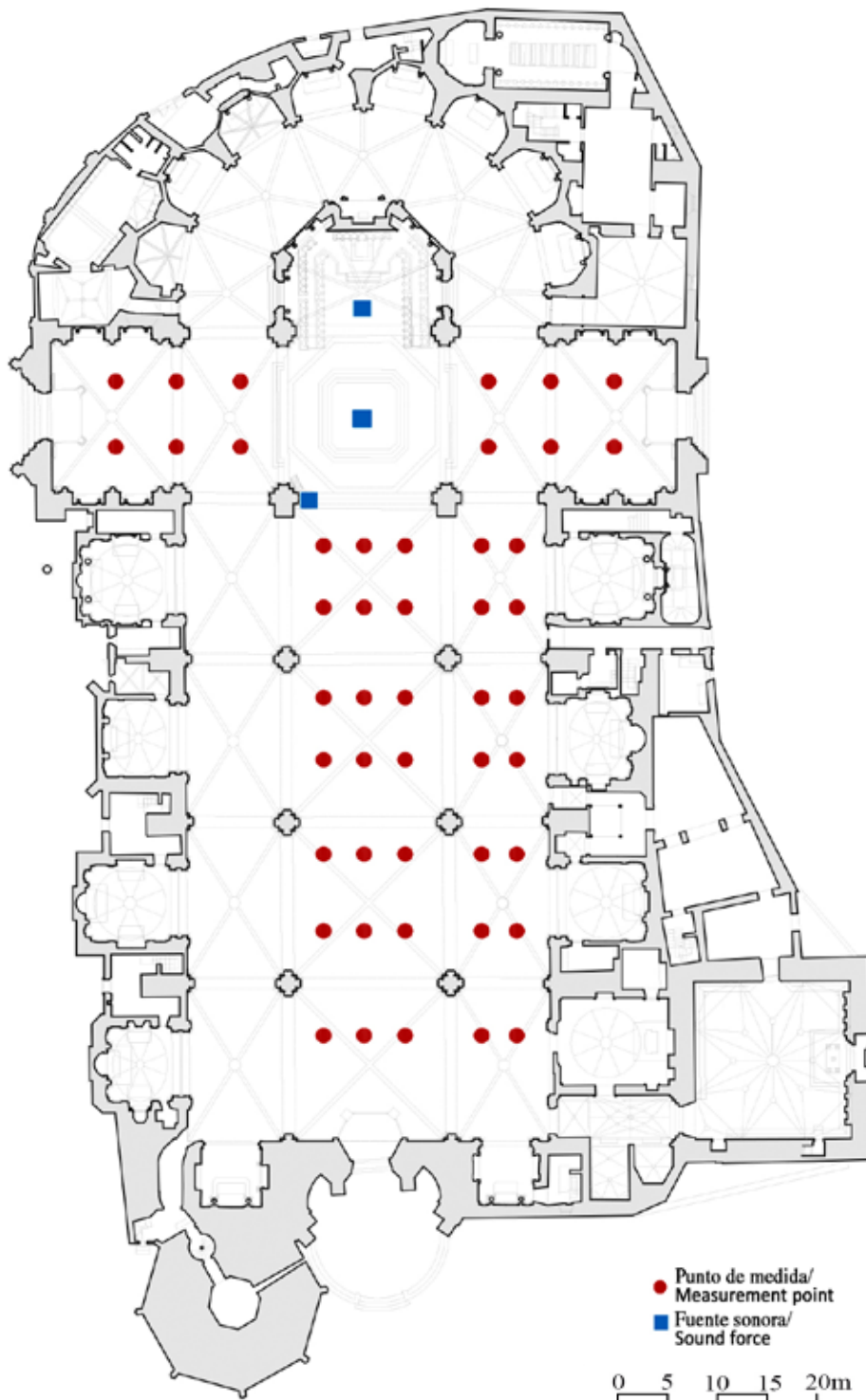
However, the aforementioned performances have not been analyzed from an acoustic point of view, that is, how they could have affected the sound quality of the temple. The buildings of worship, in addition to their historical, artistic, and architectural value, present a characteristic sound that must be the object of special protection and preservation. These are heritage sites where sound transmission is a preferential factor (Planells Pérez 2017). The repristinations carried out, apart from the great artistic and architectural change entailed, have generated a new spatial configuration and a variation in the coatings, which directly influences the acoustic behavior of the room. With this, the objective of this study is to determine the variations that, in terms of acoustic quality, may have occurred. To

this end, through acoustic simulations, a comparative study of the acoustic behavior before and after the repristinations of the last decades (1972 - present) has been performed. Furthermore, once the acoustic behavior of the room is known, the acoustic result of any intervention can be predicted before its practical implementation. With all this, a new variable is presented to take into account when tackling the restoration of heritage, architectural acoustics.

Before generating the acoustic simulation of the Cathedral, it was necessary to carry out an exhaustive data collection, both of the architectural characteristics of the space and its acoustic behavior. It is a fundamental stage within the proposed work methodology since it is the basis from which all research is developed.

In order to determine the acoustic behavior of the Cathedral, it is necessary to carry out acoustic measurements *in situ*. The

process consists of exciting the room using a sound emission system and recording its response to determine the values of the acoustic parameters objectives using a specific software. This study is based on the measurement carried out by the UPV-UVEG Virtual Acoustics Research Group, which corresponds to the current acoustic behavior of the Cathedral. The methodology followed was based on the requirements established by the UNE-EN ISO-3382-1 standard. In this case, it was decided to notably increase the number of minimum points recommended by the standard, in order to have enough information to do an exhaustive analysis of the acoustics of the room. In total, 3 positions of the source and 47 positions of the receptors were defined. The sources were located in the main altar, the choir, and the pulpit, while the receivers were located in the central nave and the transept (fig. 10) (Montell



10. Ubicación de las fuentes sonoras y los puntos de medida durante la medición acústica de la Catedral de Valencia

10. Location of sound sources and measurement points during the acoustic measurement of the Cathedral of Valencia

11. Fuente sonora utilizada durante la medición acústica de la Catedral de Valencia

11. Sound source used during the acoustic measurement of the Cathedral of Valencia

12. Esquema de conexiones del instrumental empleado en la medición acústica de la Catedral de Valencia

12. Connection diagram of the instruments used in the acoustic measurement of the Cathedral of Valencia

Fuente: Autores / Source: Authors

ISO-3382-1. En este caso, se optó por incrementar notablemente el número de puntos mínimos que recomienda la norma, con el objetivo de disponer de información suficiente para poder realizar un análisis exhaustivo de la acústica del recinto. En total, se establecieron 3 posiciones de la fuente y 47 posiciones de los receptores. Las fuentes se ubicaron en el altar mayor, en el coro y en el púlpito, mientras que los receptores se situaron en la nave central y en los cruceros (fig. 10) (Montell y otros, 2012).

Para la excitación de la sala, se utilizó un sistema de emisión sonora compuesto por una fuente dodecaédrica omnidireccional (DO12), un amplificador de potencia (M-1000), una tarjeta de sonido profesional (VXpocket v2) y un PC portátil. Para el registro de la respuesta de la sala a la excitación generada se utilizaron

and others 2012). For the excitation of the room, a sound emission system composed of an omnidirectional dodecahedral source (DO12), a power amplifier (M-1000), a professional sound card (VXpocket v2), and a laptop PC was used. For recording the response of the room, omnidirectional microphones (GRAS 40AK), with their corresponding power supplies (GRAS 12AA) and preamplifiers (GRAS 26AK), were used. During the measurement, the acoustic software WinMLS was used, which allows both recording the received signal as well as determining the acoustic parameters of the room (Montell et al. 2012). In figure 11, you can see the sound source used during the acoustic measurement. In figure 12, the connection diagram of the instruments used in the measurement process is shown.

micrófonos omnidireccionales (GRAS 40AK), con sus correspondientes fuentes de alimentación (GRAS 12AA) y preamplificadores (GRAS 26AK). Durante la medición se utilizó el *software* acústico WinMLS, el cual permite registrar y grabar la señal recibida, así como determinar los parámetros acústicos del recinto (Montell y otros 2012). En la figura 11, se puede observar la fuente sonora utilizada durante la medición acústica. En la figura 12, se muestra el esquema de conexiones del instrumental empleado en el proceso de medición.

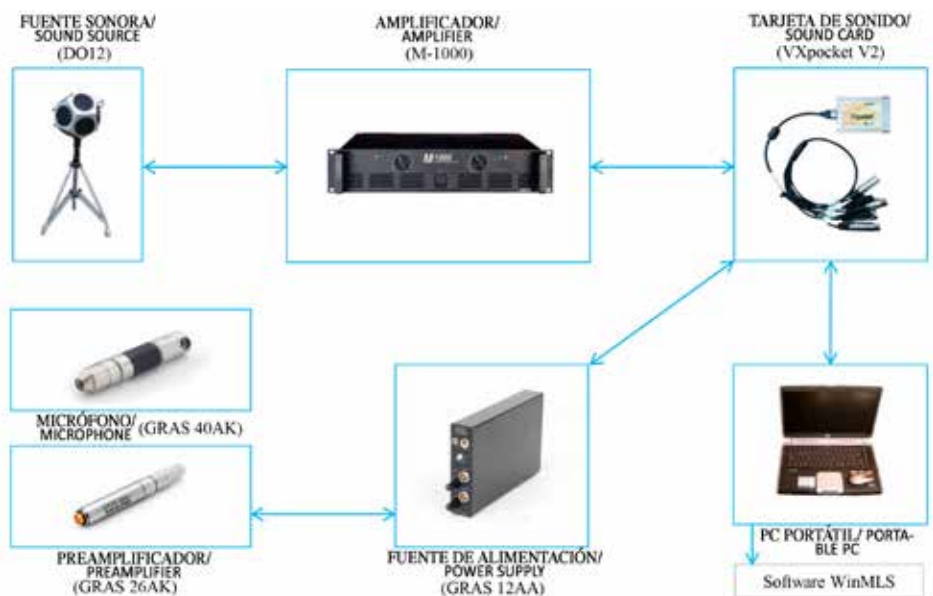
La información sobre la geometría del recinto se ha obtenido básicamente a partir de su planimetría, complementando y verificando la información con mediciones *in situ*. En concreto, se ha contado con una planta y una sección longitudinal por el eje central de la catedral incluidas en el Plan Director de



11

The information on the geometry of the enclosure has been obtained from its planimetry, complementing and verifying the information with *in situ* measurements. More specifically, we used a ground plan and a longitudinal section through the central axis of the cathedral included in the Master Plan of the Cathedral of Valencia carried out in 2000. These plans, based on the plans made by R. Moya and F. Pons Sorolla for the restoration project of 1978, correspond to the current state. To determine the state of the temple before the repristination work carried out in recent decades, we did an exhaustive search for documentation (writings, photographs, plans ...) of the state of the temple at that time. In this sense, we made use of the graphic restitution of the Cathedral of Valencia before the repristination of 1972 conducted by A.

12



Material	Frecuencias en bandas de octava/ Frequencies in octave bands [Hz]					
	125	250	500	1k	2k	4k
Mampostería de piedra/ Stone masonry	0,13	0,13	0,13	0,14	0,16	0,16
Pavimento de mármol/ Marble pavement	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Estuco/Stucco	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05
Puerta de madera/ Wooden door	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
Bancos de madera vacíos/ Empty wooden pews	0,05	0,08	0,10	0,12	0,12	0,12
Bancos de madera con audiencia/ Occupied wooden pews	0,24	0,40	0,78	0,98	0,96	0,87
Vidrieras/Stained glass	0,13	0,12	0,08	0,07	0,06	0,04
Retablo/Altarpiece	0,12	0,12	0,15	0,15	0,18	0,18
Bóvedas/Vaults	0,32	0,30	0,30	0,30	0,27	0,10
Promedio ábside/ Abside average	0,27	0,27	0,25	0,25	0,17	0,16

¹ Bork, 2005

² Vörländer, 2008

³ Cox and D'Antonio, 2009

⁴ Martellotta, 2009

⁵ Ajustado durante el proceso de calibración/Adjusted during the calibration process

13

13. Coeficientes de absorción de los materiales utilizados durante el proceso de calibración del modelo acústico

13. Absorption coefficients of the materials used during the acoustic model calibration process

14. Modelo acústico de la Catedral de Valencia

14. Acoustic model of the Cathedral of Valencia

15. Vista seccionada del modelo acústico de la Catedral de Valencia

15. Sectional view of the acoustic model of the Cathedral of Valencia

Fuente: Autores / Source: Authors

la Catedral de Valencia realizado en el año 2000. Estos planos se corresponden al estado actual, los cuales se realizaron tomando como base los planos realizados por Ramiro Moya Blanco (1914-1997) y Francisco Pons Sorolla (1917-2011) para el proyecto de restauración del año 1978. Para determinar el estado del templo antes de las labores de repriminación realizadas en las últimas décadas, se ha llevado a cabo una búsqueda exhaustiva de información (escritos, fotografías, planos...) de esa época. En este sentido, se ha contado con la restitución gráfica de la Catedral de Valencia antes de la respriminación de 1972 realizada por A. Núñez Sanmartín. En este estudio, se levantaron el alzado de las capillas laterales y el alzado de la sección transversal por el cimborrio (Núñez Sanmartín 2017).

Partiendo de la información disponible, se ha levantado un modelo en 3D del espacio interior del templo en su estado

Núñez Sanmartín in 2017. In this study, the elevation of the side chapels and the elevation of the cross-section were raised by the dome (Núñez Sanmartín 2017).

Based on the information available, a 3D model of the interior space of the temple in the current state has been developed using AutoCAD and SketchUp design software. Due to the requirements of the acoustic software used in this study, we developed a simplified model formed by flat faces, with 3 or 4 vertices, oriented towards the interior of the enclosure and arranged by layers according to the actual materials. The final result is a 3D model made up of 3,265 surfaces and a volume of 55,925 m³ (figs. 14, 15).

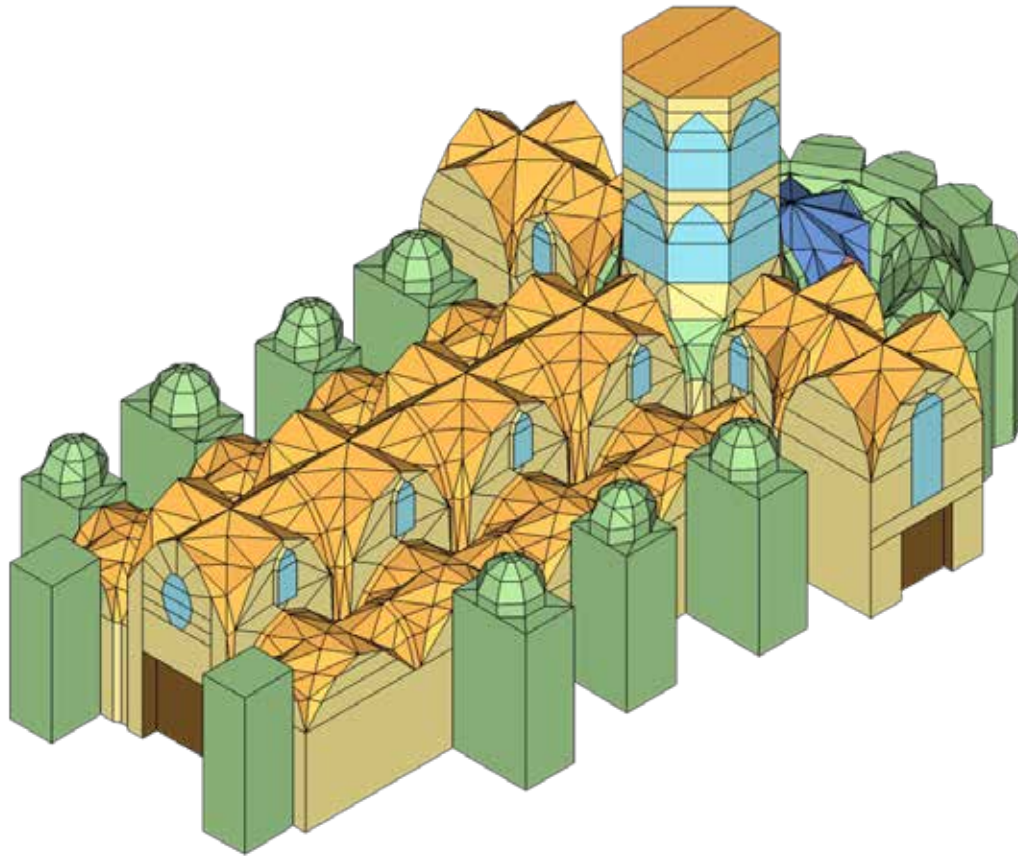
The 3D model of the interior of the Cathedral has been exported to the acoustic software Odeon for calibration and the subsequent acoustic simulations.

actual. Para ello, se han utilizado los *softwares* de diseño AutoCad y SketchUp. Debido a los requerimientos del *software* acústico empleado, se trata de un modelo simplificado formado por caras planas, de 3 o 4 vértices, orientadas hacia el interior del recinto y ordenadas por capas según los materiales reales. El resultado final es un modelo en 3D compuesto por 3,265 superficies y con un volumen de 55,925 m³ (figs. 14, 15).

El modelo en 3D del interior de la catedral se ha exportado al *software* acústico Odeon para realizar su calibración y posteriores simulaciones acústicas. El proceso de calibrado del modelo consiste en asignar unas características acústicas determinadas a cada una de las superficies teniendo en cuenta los materiales reales, de tal modo que el tiempo de reverberación simulado coincida o esté muy próximo al determinado experimentalmente. Para ello, se han establecido los coeficientes

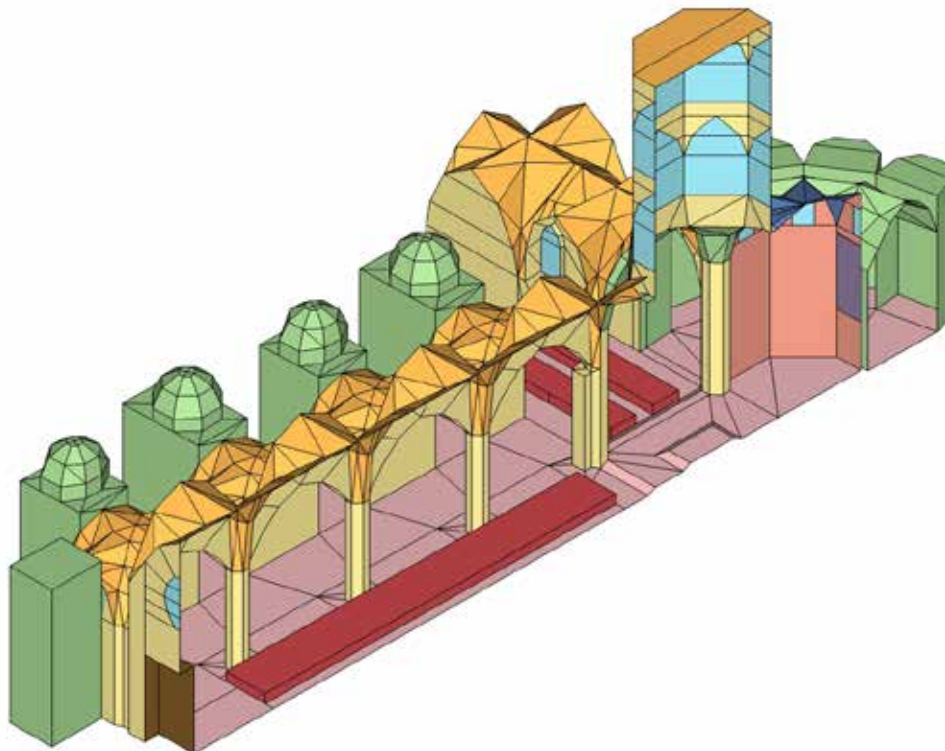
The process of model calibration consists of assigning certain acoustic characteristics to each of the surfaces taking into account the actual materials, in such a way that the simulated reverberation time coincides or is very close to that determined experimentally. To do this, the absorption coefficients indicated in figure 13 have been established depending on the type of material, taking as a reference the values obtained through standardized tests (Vörländer 2008; Cox & D'Antonio 2009; Bork 2005; Martellotta 2009). In figure 16, a comparison between the average values of the reverberation time per frequency in the measurement and in the simulation can be observed, showing a high degree of coincidence.

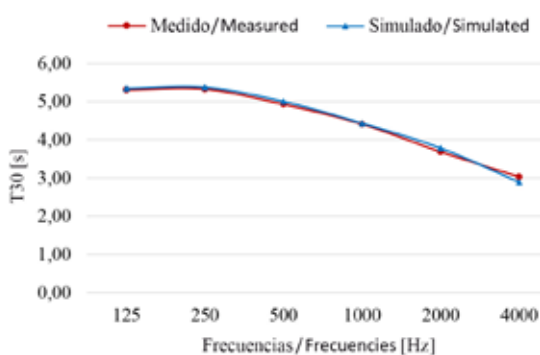
Once the acoustic model of the Cathedral in the current state has been calibrated, the necessary modifications have been



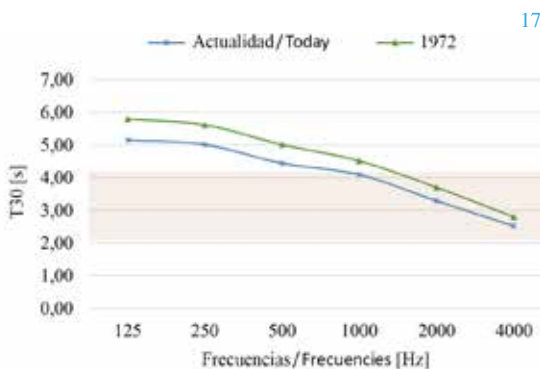
14

15





16



17

de absorción que se indican en la figura 13 en función del tipo de material, tomando como referencia los valores obtenidos mediante ensayos normalizados (Vörländer 2008; Cox & D'Antonio 2009; Bork 2005; Martellotta 2009). En la figura 16, se puede observar una comparativa entre los valores promedio del tiempo de reverberación por frecuencias en la medición y en la simulación, con un alto grado de coincidencia.

Una vez calibrado el modelo acústico de la catedral en su estado actual, se han realizado las modificaciones necesarias para simular el comportamiento acústico del templo antes de las reoprstinaciones realizadas en las últimas décadas, teniendo en cuenta tanto la retirada de los revestimientos neoclásicos como la de la bóveda barroca.

3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Para evaluar los resultados obtenidos, es necesario determinar qué valores acústicos resultan óptimos para los usos

habituales de la catedral. En este sentido, existen diversos estudios cuyo objeto es correlacionar la calidad acústica en salas con la impresión subjetiva del oído humano en busca de obtener valores óptimos para los distintos tipos de audición. En este ámbito de investigación, F. Martellotta realizó un estudio experimental sobre las condiciones de escucha preferidas por los oyentes en iglesias católicas. En este estudio, se seleccionó una muestra de oyentes que valoraron la acústica de diferentes iglesias mediante la realización de encuestas. El análisis de los datos obtenidos permite relacionar las calificaciones subjetivas de los oyentes con parámetros acústicos objetivos. Como conclusiones de esta investigación, se determinó que para la música de órgano y el canto coral los valores óptimos del tiempo de reverberación se sitúan entre 2,1 y 4,2 segundos (Martellotta 2008).

En la figura 17, se muestra una comparativa del comportamiento acústico de la catedral en la actualidad y

made to simulate the acoustic behavior of the temple before the reoprstinations carried out in recent decades, considering both the removal of the neoclassical coatings and the baroque vault.

3. RESULTS AND CONCLUSIONS

To evaluate the results obtained in our analysis, it is necessary to determine which acoustic values are optimal for the usual uses of the Cathedral. In this sense, there are various studies whose objectives are to correlate the acoustic quality in rooms with the subjective impression of the human ear in order to obtain optimal values for the different types of hearing. In this field of research, F. Martellotta carried out an experimental study on the listening

conditions preferred by listeners in Catholic churches. In this study, a sample of listeners who assessed the acoustics of different churches was selected by conducting surveys. The analysis of the data allows relating the subjective ratings of the listeners with objective acoustic parameters. As conclusions of this research, he determined that for organ music and choral singing the optimal values of the reverberation time are between 2.1 and 4.2 seconds (Martellotta 2008).

Figure 17 shows a comparison of the current acoustic behavior of the Cathedral and in its state prior to the reoprstinations carried out in 1972. In this case, the simulation of both states has been done considering the occupied room, in order

16. Comparativa del tiempo de reverberación promedio medido y simulado


16. Comparison of the measured and simulated average reverberation time

17. Comparativa del tiempo de reverberación promedio de la Catedral en 1972 y en la actualidad


17. Comparison of the average reverberation time of the Cathedral in 1972 and today

Fuente: Autores / Source: Authors

en su estado anterior a las reoprístinaciones realizadas en las últimas décadas (1972). En este caso, la simulación de ambos estados se ha realizado considerando la sala ocupada, con el fin de poder comparar los resultados con los valores óptimos mencionados. Pese a que a bajas frecuencias la respuesta de la catedral está lejos de los valores acústicos óptimos, se puede observar que con las actuaciones realizadas se ha producido una notable mejoría. Así, sin tener en cuenta componentes históricos, artísticos o arquitectónicos, desde el punto de vista acústico las actuaciones realizadas resultan favorables.

A partir del estudio realizado, se podrá determinar de manera relativamente sencilla el resultado acústico de cualquier posible intervención que se pretenda llevar a cabo en la catedral antes de su realización práctica. Asimismo, se plantea la posibilidad de proponer mejoras acústicas con elementos arquitectónicos efímeros para usos específicos. 

to be able to compare the results with the optimal values mentioned. Despite the fact that at low frequencies the response of the Cathedral is far from the optimal acoustic values, it can be observed that the actions carried out have produced a notable improvement. Thus, without taking into account historical, artistic, or architectural components, from the acoustic point of view, the implemented actions are favorable.

From our study, the acoustic results of any possible intervention in the Cathedral can be determined in a relatively simple way before its practical realization. Likewise, the possibility of proposing acoustic improvements with ephemeral architectural elements for specific uses is raised. 

AGRADECIMIENTOS ACKNOWLEDGMENTS:

Este estudio ha sido subvencionado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través de los proyectos de investigación BIA2012-36896 y BIA2016-76957-C3-3-R. Agradecemos a la Catedral de Valencia por posibilitar el acceso para la medición acústica, en particular al canónigo Jaime Sancho. Asimismo, agradecemos a Jaume Segura, Salvador Cerdá, Rosa Cibrián, Arturo Barba, Radha Montell, Ana Planells, Joaquín Navasquillo y Radu Lacatis por su colaboración / This study has been funded by the Ministry of Science and Innovation through the research projects BIA2012-36896 and BIA2016-76957-C3-3-R. We are grateful to the Cathedral of Valencia for allowing access for acoustic measurement, in particular to Canon Jaime Sancho. We also thank Jaume Segura, Salvador Cerdá, Rosa Cibrián, Arturo Barba, Radha Montell, Ana Planells, Joaquín Navasquillo, and Radu Lacatis for their collaboration.

BIBLIOGRAFÍA / REFERENCES

BORK, I. (2005). Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation—Part II: Calculations. *Acta Acustica united with Acustica*, 753-763.

COMPANY, X. (2006). Ángeles de azul y oro en la Catedral de Valencia. Estudio histórico y análisis estilístico. En / In *Los Ángeles Músicos de la Catedral de Valencia. Estudios previos* (págs. 43-94). Valencia: Generalitat Valenciana.

CORTÉS MESEGUER, L. (2014). *La construcción del proyecto neoclásico de la Catedral de Valencia*. (Tesis doctoral / doctoral thesis, Universitat Politècnica de València). (<https://riunet.upv.es/handle/10251/43073?show=full>)

COX, T. J., & D'ANTONIO, P. (2009). *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. Londres y Nueva York: Taylor & Francis.

MARTELLOTTA, F. (2009). Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1175-1186. (<https://asa.scitation.org/doi/full/10.1121/1.3192346>)

MARTELLOTTA, F. (2008). Subjective study of preferred listening conditions in Italian Catholic churches. *Journal of Sound and Vibration*, 378-399. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X08002514>)

MONTELL, R., GIMÉNEZ, A., CERDÁ, S., SEGURA, J., CIBRIÁN, R., & BARBA, A. (2012). Influencia de la localización de la fuente sonora en los parámetros acústicos en la Catedral Metropolitana de Valencia. *VIII Congreso Iberoamericano de acústica*. (<http://sea-acustica.es/fileadmin/publicaciones/136.pdf>)

NUÑEZ SANMARTÍN, A. (2017). *Análisis, estudio y restitución gráfica de la Catedral de Valencia antes de la reoprístinación de 1972*. (Trabajo Final de Grado / end-of-degree project, Universitat Politècnica de València). (<https://riunet.upv.es/handle/10251/111005>)

PLANELLÉS PÉREZ, A. (2017). *La acústica virtual en el estudio del patrimonio arquitectónico de la Basílica de Santa María y el Misteri d'Elx*. (Tesis doctoral / doctoral thesis, Universitat Politècnica de València). (<https://riunet.upv.es/handle/10251/90520>)

VILAPLANA ZURITA, D. (1997). *La Catedral de Valencia*. Valencia: Everest.

VILA FERRER, S. (2006). Recuperación de la bóveda del ábside de la Catedral de Valencia. En / In *Los Ángeles Músicos de la Catedral de Valencia. Estudio previos* (págs. 253-272). Valencia: Generalitat Valenciana.

VÖRLANDER, M. (2008). *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. Berlín: Springer.