

Estudio y rehabilitación acústica de la iglesia Sant Agustí de Vinaròs (Castelló)



PACS: 43.55-n; 43.55-Ka

Álvaro Romero⁽¹⁾, Enrique A. Navarro⁽²⁾, Jaume Segura⁽²⁾

⁽¹⁾ Universitat Catòlica de València

⁽²⁾ IRTIC – Universitat de València

jaume.segura@uv.es

Resumen

En la actualidad existen un gran número de iglesias que no se utilizan para el culto y que han pasado a tener un uso cultural e incluso lúdico. Las condiciones acústicas de las iglesias originales no son las óptimas para estos nuevos usos, por lo que es necesaria una adaptación.

En este trabajo se presenta un estudio acústico de una iglesia de tamaño medio y su adaptación como sala de uso múltiple. Este estudio se ha realizado con la finalidad de evaluar la acústica actual y presentar una propuesta para su actuación posterior.

Abstract

Nowadays there are many churches that are not used for worship, but they are now used for cultural or leisure performances. The acoustic conditions of the original buildings are not the optimum for these new uses. For this reason it is necessary an adaptation or rehabilitation.

In this work, an acoustical study of a medium size church is presented and its rehabilitation as a multiple-use room. The main aims of this study are to evaluate the actual acoustic conditions and to present a proposal for later rehabilitation.

1. Introducción

La rehabilitación de iglesias para uso no estrictamente litúrgico es un campo de aplicación acústica abierto y en que se han invertido muchos esfuerzos para ofrecer al público un

entorno donde escuchar determinado tipo de música. Para la realización de este tipo de proyectos de rehabilitación se pueden usar diferentes técnicas, entre ellas las más conocidas son las de realizar modelos a escala para el estudio acústico o las de simulación. Cabe puntualizar en este contexto que las técnicas de simulación acústica son bastante menos costosas a la hora de realizar un proyecto de rehabilitación acústica, por lo que están ampliamente extendidas en la actualidad.

Desde los años 80 y con el gran desarrollo de los ordenadores y de los métodos numéricos aplicados a la acústica de salas, se han generado una serie de herramientas que han permitido esta reducción de costes en los proyectos de rehabilitación. Estas herramientas de modelización acústica suelen utilizar métodos numéricos basados en el trazado de rayos o en fuentes imagen, aunque también pueden aplicarse el método de los elementos de contorno (BEM) [1], [2], [3], el método de los elementos finitos (FEM) [4], [5], diferencias finitas en dominio del tiempo o la frecuencia (FDTD o FDFD) [6], [7], [8], etc. Incluso es posible aplicar técnicas combinadas para optimizar tiempos de cálculo y precisión en los resultados obtenidos [9]. La mayor parte de estas técnicas numéricas son de aplicación en el campo de la acústica y permiten la predicción de parámetros característicos de una sala, como el tiempo de reverberación, el EDT ('Early Decay Time'), la claridad (C50 para la palabra y C80 para la música), etc.

El método de trazado de rayos está basado en los principios generales de la acústica geométrica [10], por lo que presenta las limitaciones que caracterizan esta teoría, aunque, a diferencia del conocido como método de las

fuentes imágenes, sí que pueden tener en cuenta la difusión en las reflexiones cuando el sonido incide sobre superficies rugosas. La forma de proceder en este método es muy sencilla, y se basa en suponer que el sonido es radiado desde una fuente sonora en forma de rayos o partículas sonoras en todas las direcciones según un determinado cono con un ángulo sólido cuyo valor depende de la precisión deseada. Cada una de estas partículas es portadora de una parte de la potencia sonora emitida por la fuente. Siguiendo trayectorias rectilíneas, dicha energía se propaga a la velocidad del sonido. Cada vez que un rayo incide sobre una pared u obstáculo del recinto se refleja en él, desviándose hacia una nueva dirección. La correspondiente energía disminuye en función del coeficiente de absorción del material que forma dicha pared u obstáculo. Por medio de ciertos detectores (micrófonos virtuales), los citados rayos pueden ser detectados en cualquier punto de la sala estudiada. Toda la información que transmiten estos detectores puede ser anotada para un posterior análisis: tiempo de impacto, dirección de incidencia, fracción de la potencia de la fuente sonora, etc. Después de trazar todos los rayos y procesar toda la información correspondiente a una determinada simulación, se puede reconstruir la respuesta impulsiva pertinente en el detector considerado [11] [12]. Un inconveniente de este método es el error en los resultados asociado con la discretización implícita del frente de ondas. En la actualidad existen numerosos programas de simulación o software que aplican variantes del método de trazado de rayos tales como EPIDAURE que se ha utilizado en este estudio, RAYNOISE, MODELER, CATT, etc.

La aparición de nuevas formas geométricas para la creación de campos sonoros, ha obligado a desarrollar diferentes programas que faciliten una aproximación al comportamiento acústico de los recintos. A partir de estos programas se pueden obtener valores de difusión sonora, ecogramas, tiempos de reverberación, etc., que permiten evaluar objetivamente la calidad sonora del recinto. Este procedimiento facilita extraordinariamente el cálculo, aunque sus limitaciones están ligadas a las hipótesis y simplificaciones en las que se fundamenta el modelo de simulación empleado. En general, los sistemas de simulación emplean la teoría de la acústica geométrica mediante modelos de rayos que inciden y se reflejan sobre superficies, para longitudes de onda menores que las dimensiones de las superficies del recinto, y considerando campos sonoros incoherentes. Todos los procedimientos de simulación pretenden conocer el comportamiento del campo sonoro en un recinto nuevo o remodelado, sin haberse construido, con el fin de obtener el valor óptimo del mismo. El trazado de rayos en una mesa de dibujo e incluso el trabajo con modelos puede reemplazarse, y de hecho así se hace, por un ordenador con el software apropiado. En los cálculos por ordenador todos los rayos sonoros y sus reflexiones, así como todas las superficies límites reflectantes están expresados por representaciones analíticas de líneas rectas y (casi siempre) superficies planas. Al aplicar el ordenador al

trazado de rayos se puede enriquecer la forma manual, que estaba basada en la teoría geométrica, con una aproximación estadística [13].

En el presente trabajo se ha realizado un estudio acústico con la finalidad de presentar una posible propuesta global para la rehabilitación y acondicionamiento acústico de la iglesia de “Sant Agustí” situada en la localidad de Vinaròs (Castelló). Esta iglesia originalmente usada para usos litúrgicos fue posteriormente readaptada como sala de audiciones. Se observa un profundo deterioro de gran parte del material utilizado como solución en la primera propuesta de acondicionamiento. Con los planos del edificio facilitados por el Ayuntamiento de Vinaròs se ha construido el modelo 3D que permite la simulación del comportamiento acústico de la iglesia, y de ese modo poder realizar la propuesta de rehabilitación y acondicionamiento acústico de la sala para poder ser utilizada como auditorio o sala polifuncional.

2. Historia y características constitutivas

La iglesia de “Sant Agustí” forma parte de los restos del antiguo convento de los Padres Agustinos que data del siglo XVI. Es un edificio de estilo barroco, que tiene forma de cruz latina, con tres capillas laterales por banda entre contrafuertes comunicados entre sí; crucero con cúpula sobre tambor y pechinas, y presbiterio techado con bóveda de aristas, al igual que las capillas laterales de la nave, que en la actualidad están totalmente vacías. A los pies del templo, se levanta un coro sobre elevado. Al exterior muestra una cubierta de tejas, de la que sobresale su rica cúpula policromada. La fachada destaca por su composición simétrica. A ambos lados de la entrada se levantan dos torres campanario con puerta propia que enmarca el lienzo central, coronado por un perfil moldurado, con su portada de acceso adintelado (figura 1).



Figura 1: Fachada de “Sant Agustí”.

La iglesia sufrió un gran deterioro en el año 1936, utilizándose eventualmente para el culto, y se cerró al público en el año 1975. En los años 80 la antigua iglesia fue acondicionada y rehabilitada funcionalmente como

auditorio, siendo actualmente el Auditorio Municipal **“Wenceslao Aiguals de Izco” (Wenceslao Aiguals de Izco nacido en Vinaròs (1801)** fue novelista, político, dramaturgo, periodista, editor y poeta).

La iglesia de “Sant Agustí” tiene una superficie de unos 400 m², teniendo adosada la Capilla de “Santa Victoria” en la que se encuentran las dependencias del Museo Municipal. La planta de la iglesia tiene una longitud de 29’3 m desde la puerta de entrada al ábside, una anchura de 16 m contando el ancho de las capillas laterales y una altura de 13’15 m desde el suelo hasta la bóveda, y 23’1 m hasta la parte central y más elevada de la cúpula. Por tanto el volumen de la iglesia es de unos 4900 m³ aproximadamente. El patio de butacas tiene una superficie de 72 m² y consta de 14 filas de 13 butacas cada una de ellas (figura 2).



Figura 2: Patio de butacas y coro.

3. Modelización y simulación: estado previo

Para modelizar la iglesia de “Sant Agustí” de Vinaròs se ha utilizado el formato requerido por el método de trazado de rayos [10] que utiliza el programa informático EPIDAURE [14], [15], con el fin de predecir el comportamiento acústico y realizar una propuesta global válida para su rehabilitación y acondicionamiento acústico.

El proceso de modelización de una sala consiste en definir todas las superficies que están presentes en la misma, cualquiera que sea su forma y dimensiones, especificando las coordenadas de sus respectivos vértices [16]. En el caso de la iglesia de “Sant Agustí” de Vinaròs, las coordenadas han sido calculadas a partir del plano de planta facilitado por la Regidoria de Cultura del Ayuntamiento de Vinaròs y de las medidas realizadas mediante un sensor de ultrasonidos de las cotas de alzado, necesarias para realizar el modelo en 3D que permiten la simulación del comportamiento acústico de la sala, y de ese modo poder realizar la propuesta de materiales

adecuada para la rehabilitación y acondicionamiento acústico de la iglesia para poder ser utilizada como auditorio (figuras 3 y 4).

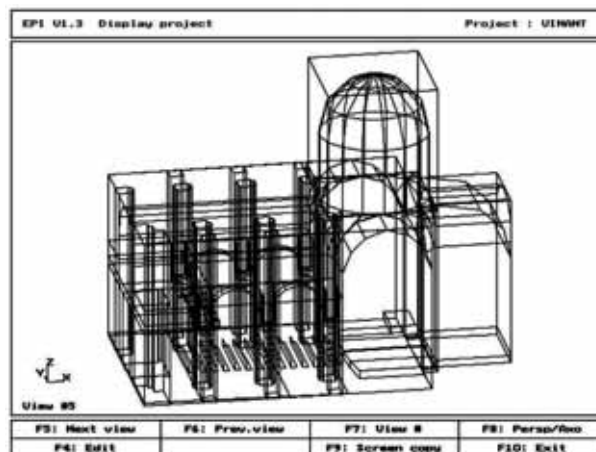


Figura 3: Iglesia modelizada

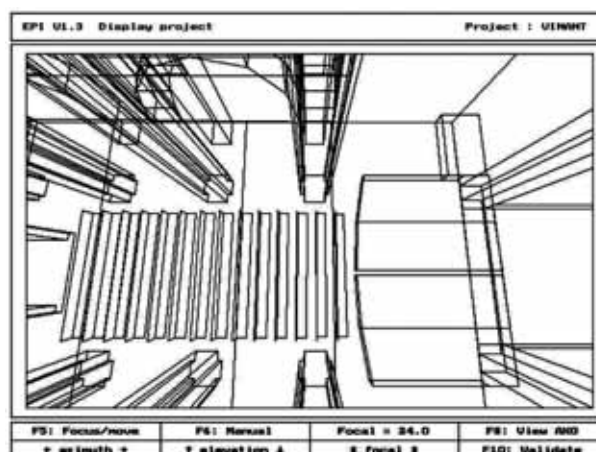


Figura 4: Vista superior iglesia modelizada.

Como cada una de las superficies que componen la iglesia está constituida por un determinado material, es necesario proporcionar los valores correspondientes de los coeficientes de absorción α de cada uno de ellos. Finalmente para completar el proceso de modelización, es necesario especificar también la posición y características de las fuentes sonoras presentes en el recinto, así como las posiciones de los respectivos receptores.

Una vez realizado el proceso de modelización, ya se está en disposición de lanzar un determinado número de rayos (en número suficientemente alto si se pretenden obtener resultados válidos) procedentes de las fuentes sonoras que se quieren tomar en consideración en el proceso y calcular los valores de los diferentes parámetros acústicos que caracterizan esa configuración concreta. En cada uno de los cálculos que se realizaron en el presente estudio se lanzaron un total de 10000 rayos, considerando en cada caso un total de 10 reflexiones. Esta elección presentaba una fórmula de

compromiso en la obtención de resultados satisfactorios para un tiempo de cálculo razonable. Después de trazar todos los rayos y procesar toda la información correspondiente a una determinada simulación, se puede reconstruir la respuesta impulsiva pertinente en el detector considerado [11], [12].

Se procede a modelizar con todo cuidado la iglesia originariamente, antes de realizar cualquier tipo de intervención. Se definen las superficies y se estructuran en grupos, atribuyendo a cada una de las superficies o grupos el tipo de material del cual están constituidas. Se han considerado un total de cinco materiales fundamentalmente en la iglesia originaria. La configuración de materiales para la modelización de la iglesia originaria es la que tiene parquet para el suelo del patio de butacas, que presenta una ligera inclinación para que las butacas traseras vayan teniendo mayor altura cada vez; enlucido de yeso (y vermiculita) para las capillas laterales, toda la vuelta central y laterales de la iglesia y para los muros anteriores y posteriores de la sala, así como las bóvedas y la cúpula; madera ordinaria para la parte del coro, para la puerta de entrada y para el suelo del escenario; moqueta para los pasillos laterales y el pasillo entre el escenario y la primera fila de butacas. Los valores de los correspondientes coeficientes de absorción α , para las frecuencias comprendidas en las bandas de octava entre 125 y 4000 Hz, se han tomado inicialmente de la bibliografía [13], excepto en algún caso concreto, en el que se toman los valores de a de las especificaciones del fabricante.

A continuación se definen las características de la fuente sonora, su posición y orientación, que podrían corresponder a la boca de una persona situada en el centro del escenario, en la posición $(X,Y,Z) = (19'23, 7'90, 2'30)$ m, con una determinada potencia sonora. A estos efectos y los subsiguientes, cabe advertir que el origen de coordenadas $(0,0,0)$ elegido para modelizar la sala se ha situado a nivel del suelo en el extremo izquierdo de la entrada a la iglesia vista desde el escenario. Las características acústicas de la fuente son:

| | |
|---|--|
| Posición : | X = 19.23 Y = 7.90 Z = 2.30 |
| Orientación : | Azimuth = 0.00° |
| | Elevación = 0.00° |
| | Rotación = 0.00° |
| Ángulos límites : | Azimuth : entre 0.00° y 360.00° |
| | Elevación : entre -90.00° y 90.00° |
| Retardo en la emisión : | 150 ms |
| Parámetros acústicos (para las seis bandas de octava entre 125 y 4.000 Hz): | |
| Frecuencia : | 125 250 500 1.000 2.000 4.000 Hz |
| Nivel Sonoro a 1 m : | 0.0 73.0 76.0 79.0 82.0 85.0 dB |
| Potencia : | 73.1 76.1 79.1 82.1 85.1 88.1 dB |
| Horizontal -3 dB : | 35.00° para todas las bandas de octava |
| Vertical -3 dB : | 45.00° para todas las bandas de octava |

Por lo que respecta a los receptores, se consideraron un total de 16 receptores, 12 de ellos regularmente distribuidos en el patio de butacas, tres receptores en las butacas primera (a), séptima (b) y treceava (c) de las filas primera, quinta,

novena y catorceava. Dos detectores simétricamente posicionados en el escenario a ambos lados de la fuente (Ed y Ei, Escenario derecha e izquierda) y dos detectores más en el coro, a ambos lados (Cd y Ci, Coro derecha e izquierda). En la figura 5 se representan las posiciones de cada uno de los 16 receptores considerados, así como la posición de la fuente:

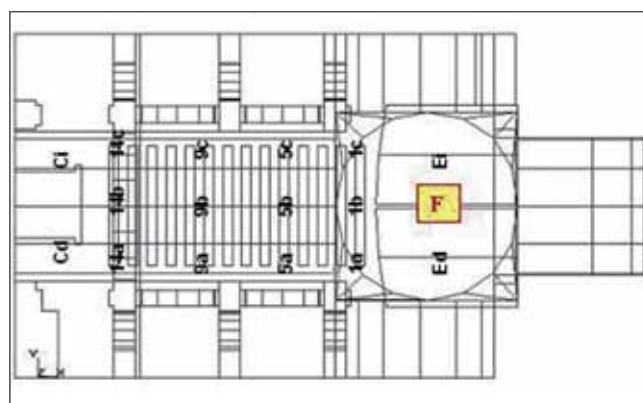


Figura 5: Posición de los 16 receptores.

El número de receptores utilizados es más que suficiente para caracterizar con detalle la respuesta acústica de la iglesia.

En el programa informático EPIDAURE también hay que introducir datos referentes al medio de propagación, como son la humedad relativa (%), la temperatura ambiente (°C) y la absorción del aire (dB / 100 m). Finalmente cabe destacar que para llevar a cabo la modelización de la iglesia de “Sant Agustí” se han considerado un total de 530 superficies diferentes.

Tras el estudio de los resultados obtenidos de la modelización de la iglesia de “Sant Agustí” de Vinaròs en su estado originario, se puede llegar a la siguiente conclusión global: la iglesia ofrece unas pobres condiciones acústicas, tanto para uso de la palabra, uso musical, como para su uso polifuncional.

Por un lado los tiempos de reverberación obtenidos oscilan entre los valores de 1'3 y 1'9 s, cuando el tiempo óptimo de reverberación para una sala cuyo volumen es de 4900 m³, debiera oscilar entre 0'9 y 1'3 s [16], [17], [18], [19], [20]. Este alto tiempo de reverberación es debido a la alta reflectividad que poseen las paredes y el techo de yeso y vermiculita. También se debe tener en cuenta las posibles focalizaciones que puedan aparecer debidas a la cúpula, a las bóvedas y al ábside. Todo esto da origen a una distribución no uniforme en la sala, tanto de los niveles de presión sonora, como de los índices de definición y claridad.

Así los niveles de presión sonora en la sala ofrecen una distribución típica de descenso en los receptores cada vez

La nueva generación de sonómetros

No es solo una novedad. Es la nueva generación de sonómetros, una nueva presencia en el mundo del ruido ambiental y las vibraciones.

Sin complejidades, está diseñado para hacer la vida más fácil; sin exigencias, trabaja para usted; y además, se adapta a cualquier idioma.

Hecho a su medida

Con más de 60 años como pioneros dentro del mundo del sonido y la vibración, Brüel & Kjær presenta su 4ª generación innovadora de instrumentos manuales para la medida de vibraciones y sonido.

El desarrollo de esta última generación -centrada en el Tipo 2250 - está inspirado completamente en las exigencias de usuarios que participan en seminarios y reuniones en todo el mundo. El hardware ha sido diseñado para cumplir las exigencias específicas ergonómicas de los usuarios, y el software de aplicación abarca todo sobre ruido ambiental, resolución de problemas, salud laboral y control de calidad.

Los paquetes de programas de software se pueden adquirir de forma separada, por lo que usted conseguirá lo que necesita justo cuando lo necesite y además será más fácil adaptarnos a sus exigencias si éstas cambian. De esta forma, la plataforma le asegura su inversión ahora y en el futuro.

Creado, construido y hecho para usted personalmente, verá como el 2250 marca una gran diferencia en su trabajo y en todas sus tareas de medición.

¡Consúltenos!

Para más información, contacte con Brüel & Kjær Ibérica, S.A.

Sede social:

Teide, 5 28700 San Sebastián de los Reyes (Madrid)
Tel.: 91 6590820 Fax: 91 6590824

Delegación:

Valencia, 84-86 interior 08015 Barcelona
Tel.: 93 2264284 Fax: 932269090

www.bksves.com email: bruelkjaer@bksv.com

Tipo 2250

Brüel & Kjær 

PULSE *multi-analizadores*



Tipo 2260

2260 *investigator*

Las nuevas unidades de adquisición 3560-L y 3560-B se añaden a la **familia PULSE** haciendo posible elegir el modelo exacto que usted necesita.

Desde la medida más sencilla, de un solo canal, hasta las tareas de holografía acústica más complejas en tiempo real multicanal, todas las aplicaciones de acústica y vibraciones están cubiertas con PULSE, un sistema abierto, flexible y 100% compatible con otras aplicaciones.

Con más de 5.000 sistemas vendidos (cifras de abril 2004), PULSE se ha convertido en la plataforma de análisis de ruido y vibraciones de más éxito y mayor crecimiento en el mercado.

2260 Observer es un sonómetro y analizador portátil capaz de realizar todas las medidas y análisis que normalmente se utilizan en la evaluación de ruido en comunidades y entornos de trabajo. 2260 Observer cumple la nueva norma sobre sonómetros IEC 61672, así como las normas IEC anteriores (60651 y 60804) y las normas ANSI más recientes, además de tener la aprobación de modelo.

Todos los parámetros de banda ancha y valores estadísticos se miden en paralelo, de forma que no se pierde ningún detalle: todos los parámetros están ahí, y sólo hay que elegir qué es lo que se desea examinar, ahora o más tarde.

más alejados de la fuente sonora. Esto es debido a que la intensidad sonora decrece con la distancia, como es sabido, en condiciones de campo libre. Es por este motivo por el que se deberán reforzar las reflexiones en las últimas filas, creando un campo difuso más uniforme en toda la zona ocupada por el público y el escenario. Se observa que los niveles de presión sonora llegan a decrecer hasta 10 dB entre los receptores situados en el escenario y los situados en las últimas filas.

Los valores para el índice de definición D50 están comprendidos entre el 12 y el 43 %. Valores deficientes, si se compara con el intervalo del 40 al 60 % que se recomienda para asegurar una buena inteligibilidad y para que la palabra no pierda nitidez y pueda ser oída de una manera adecuada en todas las partes de la iglesia [16]. Bien es cierto que los valores obtenidos en los receptores del escenario oscilan entre 50 y 60 %, lo que parece lógico al estar esos receptores tan cerca de la fuente sonora. De forma idéntica, analizando los valores del índice de claridad C80, se llega a la conclusión de que los resultados no son los más deseables. Aunque los valores para las filas delanteras pueden considerarse como aceptables, los resultados de las filas traseras son totalmente inaceptables [16].

Para los valores del índice de transmisión de la palabra STI y para el índice rápido de transmisión de la palabra RASTI, los resultados obtenidos califican a la iglesia en su estado originario como una sala débil o regular en cuanto a sus cualidades acústicas. Los valores tanto del índice STI como del índice RASTI, están comprendidos entre 0'45 y 0'60. Estos índices se miden en unidades arbitrarias entre 0 y 1 y muestran el grado de inteligibilidad en la iglesia [17], [16], [18]. Los resultados muestran una inteligibilidad regular para uso de la iglesia como sala destinada a la palabra.

4. Recomendaciones para la corrección

La propuesta global realizada en la iglesia de “Sant Agustí” de Vinaròs pretende mejorar la respuesta acústica de la sala, pero respetando lo máximo posible la estructura y estética de la iglesia. Cabe decir que la iglesia tal y como se encuentra en su estado actual ya había sido sometida a un proceso de acondicionamiento, es por ello el ligero desnivel en el patio de butacas, así como la instalación de parqué, moqueta y material absorbente en la bóveda, en la cúpula y en el ábside. Este material absorbente se ha deteriorado, tanto en su función como estéticamente, debido a problemas de humedad. En este trabajo, no se ha considerado este material absorbente en la modelización, sino que se considera la iglesia en su estado originario, sin este material absorbente, aunque si se consideran la inclinación del patio de butacas, el parqué y la moqueta del suelo. El hecho de no considerar el material absorbente es fundamentalmente por razones estéticas, ya que las placas de material absorbente, a nuestro juicio, rompen la estética propia del edificio.

Por tanto, en la propuesta global de rehabilitación y acondicionamiento acústico se ha tenido en cuenta primeramente la conservación en la medida de lo posible de la estructura original, actuando sobre ella de forma reversible, es decir, implementando diversos objetos que pueden ser retirados después de las actuaciones, si se desea, dando un variado juego de posibilidades.

Tras el estudio de diversas actuaciones realizadas en diferentes iglesias [17], [21], [22], [23], [24], [25], [11], [12], [26] y el análisis de diferentes posibilidades para la iglesia de “Sant Agustí”, la propuesta es la más óptima de todas ellas y consta de las siguientes correcciones en su modelización:

El suelo inclinado del patio de butacas se mantiene, pero el suelo pasa a ser de madera ordinaria; los pasillos laterales y el pasillo frontal del patio de butacas son de moqueta; el suelo de los pasillos de las capillas y del escenario es de parquet; las paredes de las capillas, del ábside, de las bóvedas, de la cúpula, de las paredes y de los frisos sigue siendo al igual que en la modelización originaria de yeso y vermiculita; la balaustrada del coro, y la puerta de acceso a la iglesia son de madera.

Se modela la instalación de cortinajes móviles de terciopelo fruncido enfrente de los arcos de las capillas laterales y cubriendo la base de la cúpula, de forma que además de servir como material absorbente, provoca un mayor número de reflexiones sobre el público, evitando el acoplamiento de las capillas y la focalización procedente de los rayos reflejados en la cúpula, evitando así retardos o focalizaciones no deseadas que aumentan el tiempo de reverberación.

En el fondo del escenario se instalan cuatro paneles de madera ordinaria, formando una concha acústica que se antepone al ábside, estos paneles pueden estar provistos de ruedas para poder desplazarlos. Los paneles (figura 6) tienen todos ellos una altura de 7 m y un ancho de 1'74 m los que quedan en el centro (a) y 1'86 m los que quedan hacia el exterior (b). Con esta medida se palián las reflexiones procedentes del ábside y sus posibles focalizaciones, y además permite reflexiones tempranas tanto al público, como a los intérpretes que pueden escucharse mejor.

Sobre el escenario se cuelgan tres láminas de vidrio transparente con diversas inclinaciones formando otra concha acústica (figura 6), de modo que no impiden la visión, pero hacen llegar el sonido antes al público ya que las reflexiones se producen con mayor antelación y van dirigidas de forma más directa al público.

Además, en la modelización se instala una cuarta lámina de vidrio a los pies del coro, debajo de la balaustrada, encima de la puerta de acceso, con una inclinación que produce reflexiones de los rayos sonoros sobre el patio de butacas, fomentando las primeras reflexiones en las últimas filas. Las láminas tienen dimensiones diferentes, las tres situadas sobre

el escenario tienen un ancho de 7 m y una profundidad de 1'91 m (c), 3'1 m (d) y 2 m (e); y la lámina del coro tiene unas dimensiones de 1'2 x 6'4 m (f).

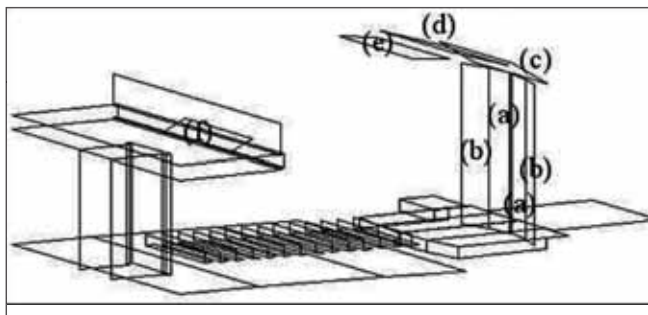


Figura 6: Esquema con las placas de madera y las láminas de vidrio.

Se modela también un cambio en el tipo de butacas, que en la modelización anterior a la propuesta de acondicionamiento acústico estaban forradas con un acolchado de tipo medio y se sustituyen por butacas con un

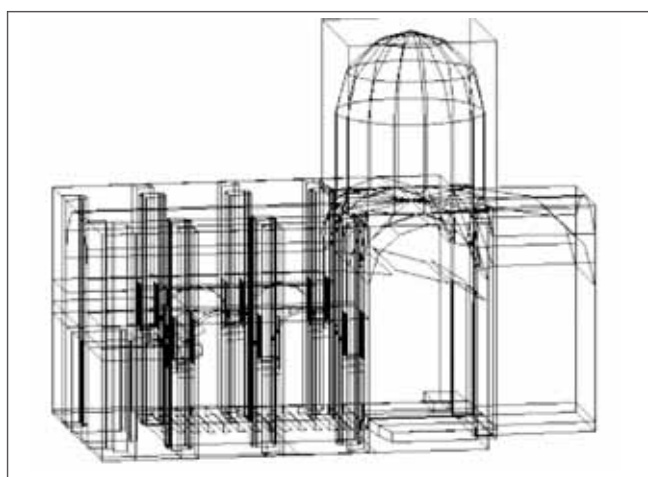


Figura 7: Modelización con la implementación de los elementos de la propuesta.

acolchado de mayor absorción sonora. Con esta medida se aumenta la absorción acústica del patio de butacas, que es hacia donde se han redirigido las reflexiones, y es el lugar donde se ubica el público. El número y filas de butacas quedaría como en el estado originario: 14 filas de 13 butacas cada una de ellas (figura 7).

En la tabla 1 se reproducen los valores de las superficies consideradas en cada uno de los materiales considerados en la propuesta de rehabilitación y acondicionamiento acústico, así como los correspondientes valores de los coeficientes de absorción α , para las octavas de frecuencia entre 125 y 4000 Hz, tomados de la bibliografía [13], excepto en algún caso concreto, en el que se toman los valores del coeficiente de absorción de las especificaciones del fabricante.

La fuente y los receptores siguen siendo los considerados con anterioridad, con sus mismas denominaciones y características.

Una vez modelada la iglesia con la propuesta de rehabilitación y acondicionamiento acústico se procede a realizar los cálculos. Se vuelven a lanzar un total de 10000 rayos, considerando en cada caso un total de 10 reflexiones.

5. Resultados

A continuación se muestran de forma comparativa los resultados obtenidos para la modelización mediante el programa informático EPIDAURE [15] de la iglesia de “Sant Agustí” de Vinaròs, en su estado originario y después de aplicar la propuesta global de rehabilitación y acondicionamiento acústico. En primer lugar se muestra el tiempo de reverberación calculado de tres formas diferentes (Sabine, Eyring y general o estadística), el nivel de presión sonora, los índices de definición D50 y claridad C80, el índice STI y el índice RASTI.

Tabla 1: Coeficiente de absorción en función de la frecuencia para cada material

| Material | Superficie (m ²) | Coeficiente de absorción α | | | | | |
|---------------------|------------------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 125 | 250 | 500 | 1.000 | 2.000 | 4.000 |
| Enlucido | 2.898'04 | 0'120 | 0'100 | 0'070 | 0'090 | 0'070 | 0'040 |
| Madera ordinaria | 592'65 | 0'200 | 0'160 | 0'130 | 0'100 | 0'060 | 0'050 |
| Parquet | 280'59 | 0'200 | 0'150 | 0'120 | 0'100 | 0'100 | 0'070 |
| Láminas de vidrio | 60'96 | 0'180 | 0'060 | 0'040 | 0'030 | 0'020 | 0'020 |
| Butacas tapizadas | 73'43 | 0'360 | 0'430 | 0'470 | 0'440 | 0'490 | 0'490 |
| Moqueta | 356'80 | 0'130 | 0'060 | 0'130 | 0'200 | 0'460 | 0'700 |
| Terciopelo fruncido | 233'69 | 0'070 | 0'310 | 0'490 | 0'810 | 0'660 | 0'540 |

- *Tiempo de reverberación*

Se ha obtenido el tiempo de reverberación global de la iglesia de tres formas diferentes, mediante la fórmula de Sabine, mediante la fórmula de Eyring y de forma estadística o general.

Se puede comprobar que el tiempo de reverberación general o estadístico antes de la propuesta de rehabilitación y acondicionamiento acústico está comprendido entre los valores de 1'49 y 1'88 s. Por tanto, el tiempo de reverberación de la iglesia originaria es elevado para los usos a los que se quiere destinar. Además los tiempos de reverberación a bajas frecuencias son menores a los de frecuencias medias, cuando lo deseable es lo contrario para dar calor a la sala.

Por otra parte, se comprueba que al simular la propuesta el tiempo de reverberación general o estadístico toma valores entre 0'96 s y 1'36 s. Aquí el tiempo de reverberación de la iglesia una vez realizada la propuesta de rehabilitación y acondicionamiento acústico sería el adecuado, ya que estos valores estarían muy próximos a los del intervalo de 0'9 s a 1'3 s. Además los tiempos de reverberación a bajas frecuencias son mayores a los de frecuencias medias, en torno a un 20 %. Por tanto, este hecho favorable, contribuye a aportar mayor calidez acústica a la sala. En la siguiente figura 8 se muestran las curvas tonales con TR Sabine (o), TR Eyring (x) y TR general (estadístico) (*):

En los tres casos se puede comprobar que el tiempo de reverberación después de aplicar la propuesta de rehabilitación y acondicionamiento acústico mejora, reduciéndose y adaptándose mejor al tiempo óptimo de reverberación de la iglesia que estaría entre 0'9 s y 1'3 s. Así pues los tiempos de reverberación antes de la propuesta están entre los valores de 1'31 s y 1'88 s y después de la propuesta entre 0'80 s y 1'36 s, lo que confirma la mejora.

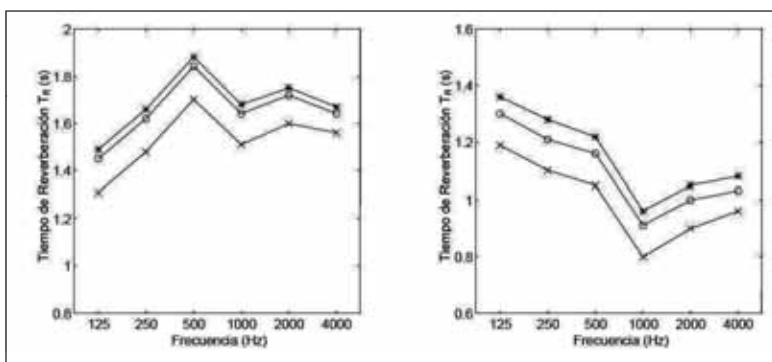


Figura 8: *Tiempos de reverberación “Sant Agustí” antes y después propuesta.*

- *Nivel de presión sonora (dB)*

El nivel de presión sonora L_p (dB) también experimenta una mejora notable tras la propuesta de distribución y acondicionamiento acústico, pues pasa a adoptar una distribución más uniforme. El campo sonoro antes tiene un comportamiento similar a como si fuese campo libre, mientras que después de la propuesta el campo pasa a ser más homogéneo en toda la sala. Por tanto, pasa a adoptar la condición de campo difuso.

Todo esto se puede comprobar tanto en los valores obtenidos en los 16 receptores, que oscilan entre 71'7 dB y 61'5 dB antes de la propuesta y entre 77'0 dB y 69'0 dB tras realizar la propuesta, así como en los mapas de distribución sonora (figura 9):

- *Definición D50 (%)*

En cuando al índice de definición, también se notan cambios en los resultados obtenidos antes y después de la propuesta de rehabilitación y acondicionamiento acústico. Pasando de tomar valores comprendidos en el intervalo de [12 – 43] % a tomar valores comprendidos entre [39 y 79]%, que dotan a la iglesia de una mejor inteligibilidad de la palabra. Una sala de estas

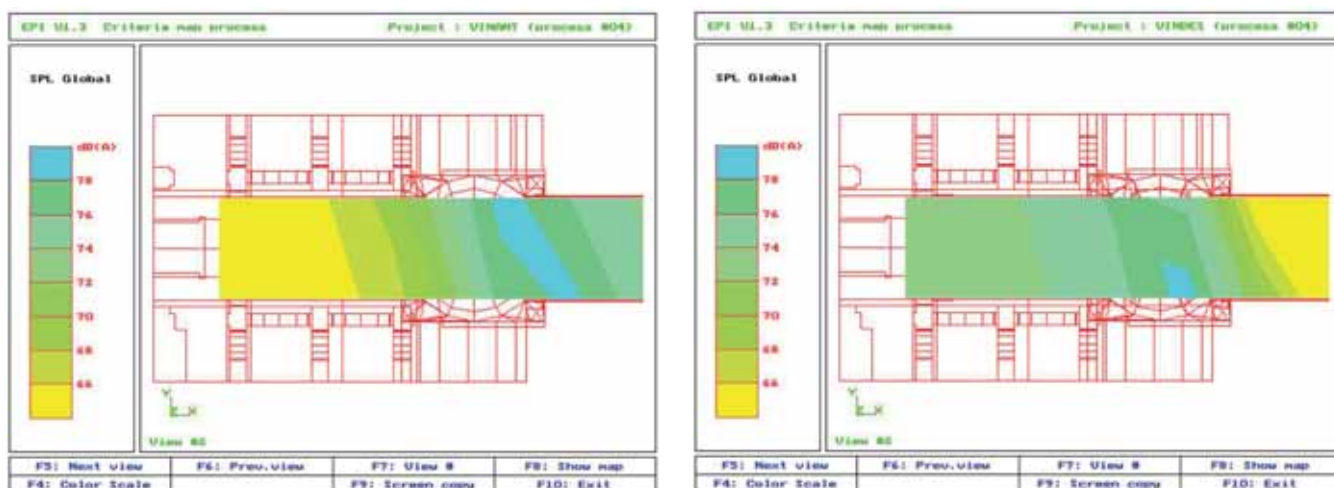


Figura 9: *Distribución Nivel Presión Sonora global después de la propuesta.*



Laboratorio de Ensayos Centro Tecnológico Ingeniería Acústica

Somos especialistas en Ingeniería y Control de Ruidos. Ofrecemos servicios y **desarrollos tecnológicos** en el campo de la acústica aplicada, con un servicio integral de calidad en la **prevención y solución de problemas** de ruidos y vibraciones.

Personal **altamente cualificado** y con amplia experiencia en la realización de mapas de ruido, estudios y proyectos acústicos, certificaciones y auditorías acústicas. Disponemos de tecnología de última generación y sistemas de gestión, que nos permite garantizar actuaciones de gran efectividad y calidad en materia acústica **medioambiental, industrial y arquitectónica**.



Audiotec

Ingeniería y Control del Ruido

Tel. 902 37 37 99

www.audiotec.es



empresa
familiarmente
responsable



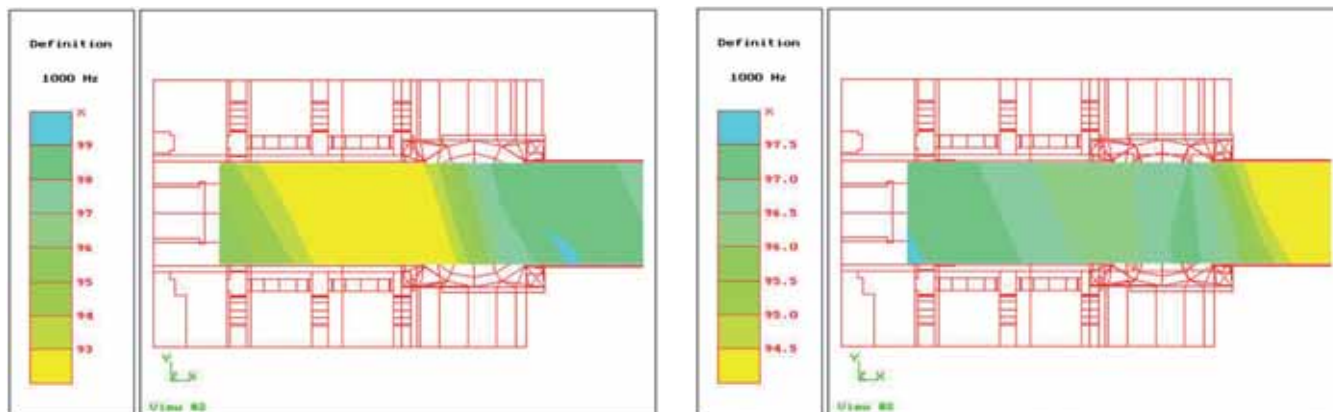


Figura 10: Distribución índice definición D50(%) antes y después de la propuesta .

características puede tomar de forma idónea valores entre el 50 % y el 75 %, lo cual se consigue en la mayoría de los receptores, excepto en los de la parte central del patio de butacas. En la figura 10 se muestran los mapas de distribución del índice de definición D50 para la banda de 1000 Hz:

Se observa una clara mejora en los valores en general, además de en los valores de los receptores situados en la parte central del patio de butacas. En la distribución se puede observar que para la banda de 1000 Hz, la mayor parte del patio de butacas presenta valores inferiores al 93 %, mientras que tras la propuesta de rehabilitación y acondicionamiento acústico los valores no son inferiores al 96 %. De este modo el sonido pasará a ser más claro, más limpio, pudiéndose distinguir claramente unos instrumentos de otros y escuchar cada nota distintamente, de forma que por ejemplo, será posible distinguir separadamente todas las notas de un pasaje rápido interpretado por una orquesta.

Este hecho también puede observarse si representamos los valores del índice de definición calculados en los 16 receptores, antes y después de realizar la propuesta (figura 11)

En la figura 11 se representan los índices de definición para cada receptor y para las seis frecuencias correspondientes a 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz. Se puede apreciar que antes de la propuesta los D50 son

inferiores al intervalo recomendado (40 – 60) % [16] para todos los receptores y todas las frecuencias, excepto para los receptores situados en el escenario (como cabe esperar). Sin embargo los índices D50 tras la propuesta sí están comprendidos en este intervalo, más aun, superándolo en algunos casos.

- Claridad C80 (dB)

El índice de claridad también aporta información sobre la mejora que se produce tras la propuesta global de rehabilitación y acondicionamiento acústico. Para una sala de las características de la iglesia de “Sant Agustí” el parámetro de claridad tendría valores ideales entre 3’1 y 9’1 dB. Se comprueba que antes de la propuesta los valores para el índice C80 en los 16 receptores están entre - 3 y + 3 dB, mientras que tras la propuesta el índice C80 pasa a tomar valores entre 0 y 9 dB, lo que produce una mejora en este parámetro [16]. En la figura 12 se muestra la distribución del índice C80 (dB) antes y después de la propuesta para la banda de 1000 Hz:

Así pues, una vez realizada la propuesta, las melodías y las armonías, es decir, los sonidos sucesivos y simultáneos, se percibirán distintamente, permitiendo la audición separada de los sonidos que emitan los diferentes instrumentos.

- Índice de Transmisión de la Palabra (STI)

El índice STI denota una clara mejora en los valores obtenidos tras la propuesta de rehabilitación y acondicionamiento acústico. De obtenerse valores comprendidos entre 0’45 y 0’61 antes de la propuesta en los 16 receptores, a tomar valores comprendidos entre 0’57 y 0’76. Es decir se pasa de una calificación acústica pobre de la iglesia a una calificación acústica buena. En la tabla 2 se muestran los valores obtenidos para el índice STI en los 16 receptores, antes y después de la propuesta global:

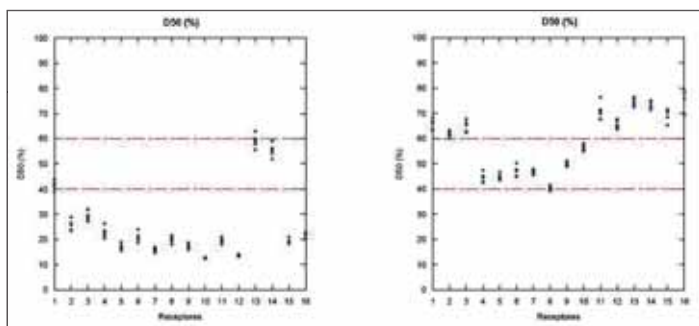


Figura 11: Índice definición D50(%) antes y después de la propuesta .



Revolucionando la acústica

Medida · Simulación · Monitorización

Alava Ingenieros le ofrece la más amplia gama de soluciones integrales para todas sus medidas acústicas:

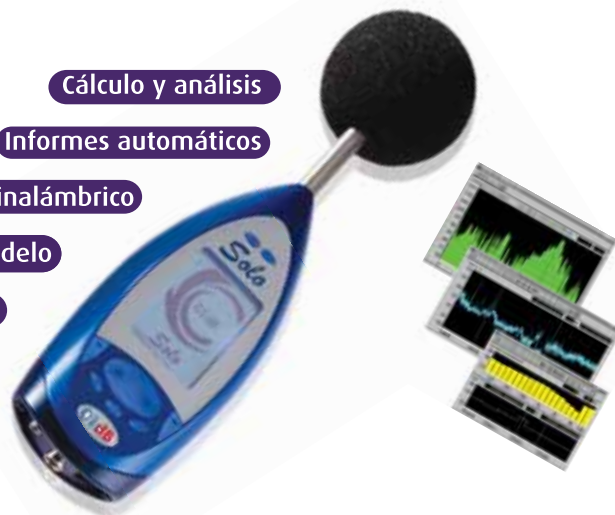
- Sonómetros
- Analizadores
- Asesoramiento técnico
- Cámaras de ensayo
- Predicción acústica
- Monitorización de ruido
- Servicio técnico
- Formación

¿Conoce el nuevo Solo?

El sonómetro más flexible del mercado, rendimiento optimizado a su medida. Elija sus aplicaciones y amplíelas en cualquier momento Ud. mismo. Ahorre recursos: disponga de los programas de cálculo y análisis más completos y sencillos de usar; informes detallados y configurables en segundos; grabe el audio de eventos en su memoria; ¡Imagina no llevar cables a sus ensayos y aún así emplear varios equipos a la vez? SOLO le ofrece esto y mucho más...

Próximos seminarios gratuitos en toda España.
Infórmese en www.alava-ing.es

- Cálculo y análisis
- Informes automáticos
- Control remoto inalámbrico
- Aprobación de modelo
- Grabación de audio



ALAVA INGENIEROS, S.A.
MADRID · BARCELONA · ZARAGOZA · LISBOA

Edificio Antalia
Albasanz, 16
28037 MADRID
Tel. 91 567 97 40
Fax 91 570 26 61
alava@alava-ing.es
www.alava-ing.es



SGI 2201612

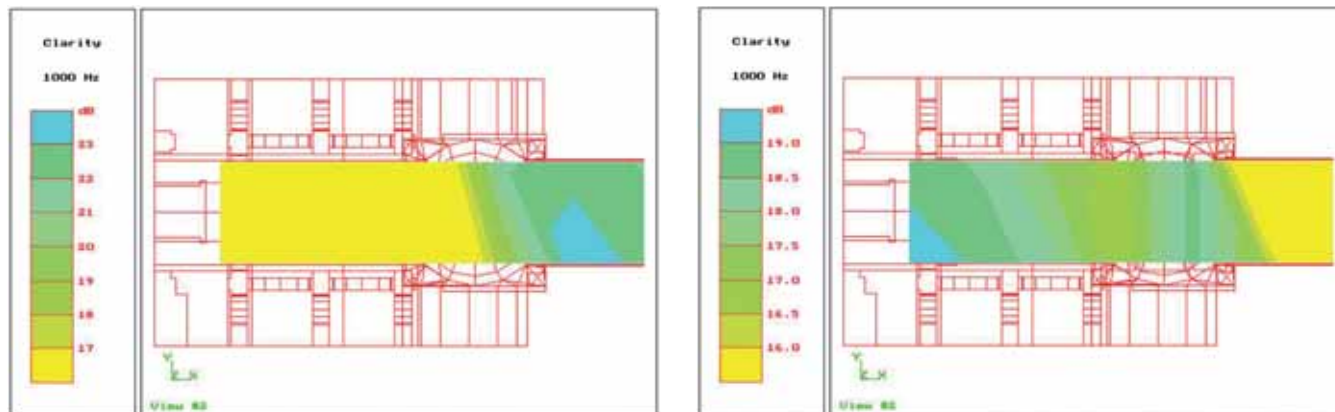


Figura 12: Distribución índice claridad C80 (dB) antes y después de la propuesta.

El índice STI toma un valor medio de 0'52 antes de la propuesta y de 0'65 después de la propuesta, lo que muestra la clara mejoría en la inteligibilidad de la iglesia, aumentando la nitidez de la palabra, pasando pues a ser una buena sala acústica.

El índice RASTI que es muy parecido al STI muestra resultados similares. En la figura 13 se muestran los mapas de distribución del índice RASTI tanto antes como después de la propuesta de rehabilitación y acondicionamiento acústico.

- Índice Rápido de Transmisión de la Palabra (RASTI)

El índice RASTI antes de la propuesta de rehabilitación y acondicionamiento acústico no sobrepasa el valor de 0'60 en el

Tabla 2: Índice STI antes y después propuesta

| Índice Transmisión de la Palabra STI | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------|--------------|-------------------------|--------------|
| Receptor (fila) | Antes de la propuesta | | Después de la propuesta | |
| | Valor | Calificación | Valor | Calificación |
| 1 | 0'54 | Regular | 0'65 | Buena |
| 2 | 0'51 | Regular | 0'64 | Buena |
| 3 | 0'52 | Regular | 0'65 | Buena |
| 4 | 0'47 | Regular | 0'57 | Regular |
| 5 | 0'48 | Regular | 0'58 | Regular |
| 6 | 0'47 | Regular | 0'58 | Regular |
| 7 | 0'49 | Regular | 0'60 | Buena |
| 8 | 0'46 | Regular | 0'60 | Buena |
| 9 | 0'45 | Regular | 0'63 | Buena |
| 10 | 0'55 | Regular | 0'64 | Buena |
| 11 | 0'51 | Regular | 0'71 | Buena |
| 12 | 0'54 | Regular | 0'68 | Buena |
| 13 | 0'61 | Buena | 0'70 | Buena |
| 14 | 0'59 | Regula | 0'69 | Buena |
| 15 | 0'61 | Buena | 0'76 | Excelente |
| 16 | 0'59 | Regula | 0'75 | Excelente |

Todo lo que
necesitas saber
sobre el mundo
del aislamiento
térmico, acústico
y de protección
contra el fuego

www.isover.net



Lo natural contra el ruido *arena*

El Aislamiento Acústico de tabiquería seca.
Con lana mineral *arena* conseguirá...

Aislamiento Acústico

Notable incremento frente a la tabiquería seca «vacía» gracias a la elevada elasticidad y máxima absorción del ruido.

Garantía de instalación

Producto flexible que se adapta totalmente a estructuras e instalaciones.

Altos rendimientos

Embalaje de alta compresión para gestionar menor volumen de producto.

Paneles compactos de corte fácil que evitan roturas y desperdicios en obra.

Incombustibilidad



www.isover.net
901 33 22 11
isover.es@saint-gobain.com

ISOVER
Construimos tu Futuro

Una marca Saint-Gobain

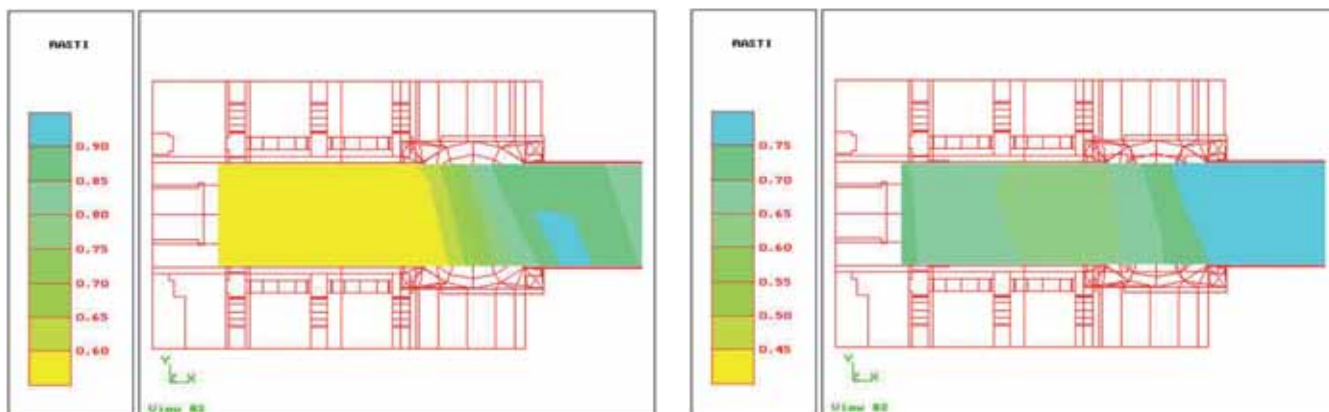


Figura 13: Mapa distribución índice RASTI después propuesta.

patio de butacas, mientras que tras la propuesta el índice RASTI oscilaría entre los valores de 0'60 y 0'70. Este índice pasa de calificar a la sala como débil o regular acústicamente a calificarla como buena acústicamente.

6.- Conclusiones

Las medidas correctoras propuestas para mejorar la calidad acústica de una sala pueden reducirse a dos fundamentalmente. Por un lado aumentando la absorción de la sala y por otro disminuyendo el volumen. En la propuesta global de rehabilitación y acondicionamiento acústico de la iglesia de “San Agustí” se ha hecho uso de ambas soluciones.

Por un lado se ha reducido el volumen de la iglesia, con el fin de disminuir el tiempo de reverberación, empleando cortinajes móviles de terciopelo fruncido, tanto cubriendo la cúpula, como las arcadas de las capillas laterales. Además con la implantación de las placas curvas en el fondo del escenario, también se ha eliminado la zona del ábside. De este modo, no solo se disminuye el volumen de la sala, sino que además se obtienen reflexiones más cortas o tempranas sobre la audiencia tratando de potenciar las reflexiones producidas por las paredes laterales y las láminas instaladas sobre el escenario, colgadas desde la cúpula o de su base, ya que estas reflexiones potencian la calidad acústica de una sala, produciendo una mayor sensación de intimidad. Además de este modo se evitan posibles focalizaciones procedentes de las superficies curvas como puede ser la cúpula, el ábside o las bóvedas de las capillas, que pueden producirse si la fuente se encuentra situada próxima a $r/2$ (siendo r el radio de curvatura de las superficies).

En general, la parte de una sala ocupada por los intérpretes (escenario normalmente) debe tener zonas a su alrededor más reflectantes que la parte ocupada por la audiencia, de ahí la ubicación de las placas de madera y de las láminas de vidrio que proyectan el sonido hacia fuera del escenario, pero además

permite que los intérpretes puedan escucharse mejor entre sí. Se proporciona por tanto una mayor intimidad a la iglesia, tanto acústica como visual, lo que como se ha visto hace mejorar la calidad acústica de la sala.

Por otro lado, la instalación de los cortinajes móviles de terciopelo fruncido actúan aumentando la absorción de la iglesia, junto con el acolchado de las butacas (13 butacas por cada una de las 14 filas de las que consta el patio de butacas).

La propuesta se ha intentado realizar de forma que las actuaciones que se ejercieran sobre la iglesia no supusiesen un impacto sobre la construcción original. Para ello se pensó siempre en respetar la estructura eclesial. Es por este motivo por el que cada una de las soluciones tiene un carácter reversible, es decir, puede colocarse o no dependiendo del uso de la iglesia. Se pueden aprovechar las diferentes combinaciones dependiendo del estilo musical que se vaya a interpretar, conjugando los diferentes elementos, que pueden variar las características acústicas, ajustándose a las condiciones que se deseen para cada concierto, audición o conferencia. Así los cortinajes de terciopelo son móviles, las placas del fondo del escenario pueden estar soportadas por ruedas que permitan su desplazamiento con comodidad y las láminas de vidrio pueden ser descolgadas. Estas láminas se han pensado de vidrio transparente para que se pueda ver la iglesia a través de ellas y no supongan un obstáculo en el campo visual. Como las butacas ya estaban forradas, lo único es cambiar el tapizado por otro más absorbente.

Finalmente se van a realizar medidas de campo para comprobar la bondad de la propuesta. Estas medidas permitirán la verificación de esta propuesta global de rehabilitación y acondicionamiento acústico.

7.- Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la colaboración y apoyo del Ayuntamiento de Vinaròs.

8.- Referencias

- [1] Z. Ji; Q. Ma, Z. Zhang, “Application of the boundary element method to predicting acoustic performance of expansion chamber mufflers with mean flow”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 173, no. 1, p. 57-71, 1994, (doi: 10.1006/jsvi.1994.1217).
- [2] D. C. Smith and R. J. Bernhard, “Computation of Acoustic Shape Design Sensitivity Using a Boundary Element Method”, *J. Vib. Acoust.*, Vol. 114, no. 1, pp.12-17, 1992, (doi:10.1115/1.2930226).
- [3] T. W. Wu, and M. Ochmann, “Boundary Element Acoustics Fundamentals and Computer Codes”, *J. Acoust. Soc. Am.* Volume 111, no. 4, pp. 1507-1508, 2002.
- [4] F. Ihlenburg , *FINITE ELEMENT ANALYSIS OF ACOUSTIC SCATTERING*, New York:. Springer 1998.
- [5] I. Harari, T.J.R. Hughes, “Finite element methods for the Helmholtz equation in an exterior domain - Model problems”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* (ISSN 0045-7825), vol. 87, no. 1, p. 59-96, 1991.
- [6] E. A. Navarro, J. Segura, R. Sanchis, A. Soriano, “Solving 2D acoustic ducts and membranes by using FDTD method”, *Electronic Journal “Technical Acoustics”* (ISSN 1819-2408) , (2008), <<http://www.ejta.org>> 2008, 18.
- [7] R. Sanchís, E.A. Navarro, J. Segura, and M. Regalado, “Diferencias y analogías entre la aplicación del método DFD a ondas electromagnéticas y acústicas guiadas”, *Proc. XV Simposium Nacional de la URSL*, Vol. I, pp.655-656. Zaragoza.13-15 de Septiembre 2000.
- [8] W. Guan, H. Hu, and X. He, “Finite-difference modeling of the monopole acoustic logs in a horizontally stratified porous formation”, *J. Acoust. Soc. Am.* Volume 125, no. 4, pp. 1942-1950, 2009.
- [9] J. E. Summers, R. R. Torres, and Y. Shimizu, “Adapting a randomized beam-axis-tracing algorithm to modeling of coupled rooms via late-part ray tracing”, *J. Acoust. Soc. Am.* Volume 118, no. 3, pp. 1491-1502, 2005.
- [10] L. Cremer y H. A. Müller: *Principles and Applications of Room Acoustics*, Applied Science Publishers Ltd. England, 1982.
- [11] J. V. Garrigues y A. García: “Acondicionamiento acústico de la antigua capilla del Colegio Mayor Luis Vives de la Universitat de Valencia”, Laboratorio de Acústica. Departamento de Física Aplicada. Universitat de Valencia, 1999.
- [12] A. Vela: “Análisis de diferentes métodos de evaluación de la calidad acústica de un local. Aplicación al Teatro Gayarre de Pamplona”, Tesis doctoral. Facultad de Física de la Universitat de Valencia, 1996.
- [13] M. Recuero: *Acústica arquitectónica aplicada*, Paraninfo, 1999.
- [14] D. Maercke y J. Van Martín: “The prediction of echograms and impulse responses within the Epidaur software”, *Applied Acoustics*, vol. 38, pp. 93-114, 1993.
- [15] C.S.T.B.: *Epidaur. Prediction of auditorium acoustics*, User’s manual. Version 1.0. 0’1dB. Villeurbanne, 1994.
- [16] M. Recuero: *Acondicionamiento acústico*, Paraninfo, 2001.
- [17] J. J. Sendra, T. Zamarreño, J. Navarro y J. Algaba: *El problema de las condiciones acústicas en las iglesias: principios y propuestas para la rehabilitación*, IUCC, ETSA, servicio publicaciones Universidad de Sevilla, 1997.
- [18] J. Llinares, A. Llopis y J. Sancho: *Acústica arquitectónica y urbanística*, E.T.S. de Arquitectura, U.P.V., 1996.
- [19] M. Recuero y C. Gil: *Acústica arquitectónica*, E.U. de Ingenieros Técnicos de Telecomunicaciones, U.P.M., 1993.
- [20] F. Daumal: *Arquitectura acústica 2. Disseny*, Edicions U.P.C., 2001
- [21] J. J. Sendra y J. Navarro: “Proposals of intervention in the acoustical rehabilitation of churches”, 11th International FASE Symposium, Valencia 15-17 Nov., 1994.
- [22] J. Llinares, A. Llopis y J. Sancho: “Adecuación de la reverberación de una iglesia para su uso como sala de recitales”, *Proceedings de las Jornadas Nacionales de Acústica, Tecniacústica*, pp. 219-222. 1993.
- [23] A. Farina y A. Cocchi: “Utilizzo di ex-chiese come sale polifunzionali: la chiesa di S. Lucia a Bologna”, *Proceedings del XVIII Convegno Nazionale AIA*, L’Aquila, 18-20 Abril, 1990.
- [24] A. Farina y A. Cocchi: “Correzione acustica di ex-chiese riadattate per utilizzo concertistico: un esempio di progettazione di interventi non Sabiniani con l’ausilio del calcolatore”, *Proceedings de Acoustics and Recovery of Spaces for Music*, Ferrara 27-28 Oct., 1993.
- [25] D. L. Klepper: “The distributed column sound system at Holy Cross Cathedral, Boston, the reconciliation of speech and music”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 99 (1), pp. 417-425, 1996.
- [26] J. Segura y E. A. Navarro: “Acondicionamiento acústico del Aula Magna de la Facultad de Farmacia (Burjassot)”, Laboratorio de Acústica. Departamento de Física Aplicada. Universitat de Valencia, 2001.

CEES



“Muchas gracias por 40 años de confianza,
nuestros clientes son nuestra razón de ser.”

Equipo CESVA.