

La acústica en iglesias medievales de la mesta: propuestas de corrección acústica de la iglesia de Santiago en Dos Torres (Córdoba).

Suárez, R.; Sendra, J.J.; Navarro, J., León, A.L.

*Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción. E.T.S. de Arquitectura. Av. Reina Mercedes, 2.
41012 Sevilla. España.
jsendra@us.es*

RESUMEN: Tras la conquista cristiana aparecen, en el norte de la provincia andaluza de Córdoba, una serie de iglesias sencillas de una nave dividida por arcos transversales y cubierta de techumbre de madera a dos aguas, rematadas por un ábside. Estos modelos arquitectónicos se difundieron durante los siglos XIV a XVI por la comarca gracias a las cañadas ganaderas, por lo que se les denominan “de la mesta”, por su relación con las cañadas que se extendieron por Castilla, La Mancha, Extremadura y Norte de Andalucía. El objetivo de este trabajo es el estudio de las condiciones acústicas de este tipo eclesial, a partir de la medición acústica y de la simulación informática realizada para una de ellas: la iglesia de Santiago en Dos Torres (Córdoba), la cual ha sido recientemente rehabilitada para adaptarla a un uso cultural. Asimismo se proponen nuevas soluciones arquitectónicas para corregir deficiencias acústicas y lograr una mejor adecuación al uso teatral y musical.

ABSTRACT: After the Christian conquest, in the north of the Andalusian province of Córdoba, a series of single churches of one nave divided by cross arches together with a wood ceiling of two slopes and an apse appeared. These architectural models spread during XIVth and XVIth centuries in the region due to the drover's roads, from what they are called “de la mesta”, for its relation with the drover's roads that spread in Castile, La Mancha, Extremadura and north Andalusian. The aim of this work is to study the acoustic conditions of these architectural model, starting from values measured in situ and by means of computer simulations in one of them: the Santiago Church in Dos Torres (Córdoba), which has been recently restored for cultural activities. In the same way we propose architectural solutions to correct some acoustic disfunctions and to obtain a better adaptation for theatrical and musical uses.

1. INTRODUCCIÓN

Las iglesias “de la mesta” están concebidas a partir del sentido práctico de la simplificación, siendo la sección transversal la que genera, por repetición y traslación, un espacio lineal: esta es la forma más habitual de la arquitectura para concebir un espacio interior complejo. El resultado es una serie de iglesias con distintos números de vanos, que van desde las más pequeñas de 3 vanos, a las iglesias de 7 vanos, presentando la iglesia de Santiago en Dos torres 5 vanos. Estos espacios lineales compuestos por agregación de vanos se acotan mediante la incorporación de soluciones de límite, como son los ábsides. La iglesia de Santiago se restaura en el año 1997 para su adaptación a teatro y cine, acogiendo actividades culturales de teatro y musicales, principalmente de tipo coral (figura 1).



Figura 1. Interior de la iglesia tras la restauración.

2. ANÁLISIS ACÚSTICO DEL ESTADO ACTUAL Y PREVIO.

La medición acústica se realizó con el área de audiencia ocupada por butacas con un bajo porcentaje de superficie tapizada. Se tomaron once puntos de medida: diez en la nave y uno en el coro, a una altura de 1.20 m sobre el suelo. La fuente se colocó en el escenario, a una altura de 1.50 m sobre el entarimado de madera. El análisis acústico se realiza tanto sobre la configuración actual de la iglesia (estado actual), como para la configuración anterior a la rehabilitación (estado previo sin la absorción sonora que proporcionan las butacas), para conocer el comportamiento acústico de este tipo eclesial.

2.1 Tiempo de reverberación.

Se realizaron las detonaciones para el registro de la respuesta impulsiva en la fuente, obteniéndose los valores del tiempo de reverberación, para los distintos puntos, en bandas de octava. Con la ayuda de un modelo informático, realizado con el programa CATT-Acoustic versión 7.2, y el empleo de la fórmula de Sabine, se realiza una predicción teórica de los valores del tiempo de reverberación de la iglesia con público sentado en butacas en la nave para el estado actual y con público sentado en bancos de madera para el estado previo. Estos valores se comparan con los valores óptimos teóricos, tanto para la palabra como para la música, propuestos por Beranek [1].

El tiempo de reverberación obtenido de la medición refleja una importante absorción sonora a todas la frecuencias debido a la presencia de las butacas, estando la curva tonal dentro de la banda tonal óptima. En la hipótesis de estado previo, la iglesia presenta una falta de absorción sonora al eliminar las butacas, estando la curva tonal cercana a la óptima para la música, con valores algo elevados a bajas frecuencias (figura 5).

Dado el gran número de iglesias existentes en la comarca con este tipo arquitectónico, y para poder extrapolar estos valores, se analiza la influencia del número de tramos de la nave en el tiempo de reverberación. Se parte de un tramo de iguales proporciones al de la iglesia de Santiago, con un coeficiente de absorción sonora medio similar, y se comparan los incrementos del tiempo de reverberación, al aumentar el número de tramos, con los óptimos calculados según el volumen en cada caso, tanto para el uso musical como para la palabra [2],

para iglesias con un número de tramos comprendido entre 3 y 7 (figura 2). El crecimiento en el tiempo de reverberación es algo superior a los considerados como óptimos, pero la relación entre ambos crecimientos es prácticamente constante, por lo que dados los valores obtenidos para esta iglesia en su estado previo, se puede considerar que este tipo eclesial presenta unos valores de reverberación cercanos a la curva tonal óptima para la música, independientemente del número de tramos que presente la iglesia. En las iglesias que se encuentran abiertas al culto, el ajuar litúrgico supone un aumento de la absorción sonora, lo que produce en general un mayor ajuste de la curva tonal a la óptima para la música.

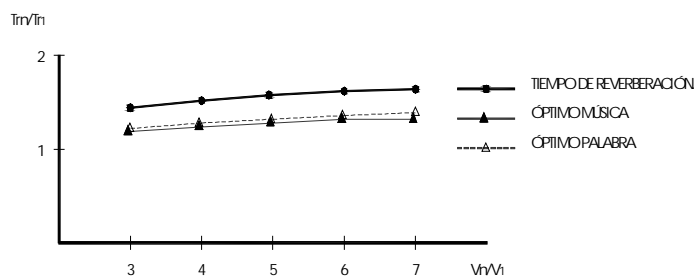


Figura 2. Incremento del tiempo de reverberación con el número de tramos y óptimos.

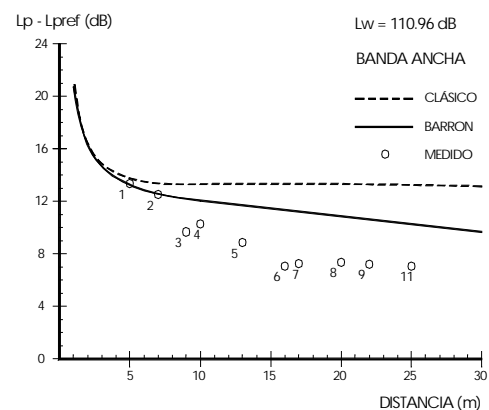


Figura 3. Comportamiento del campo acústico frente a la distancia.

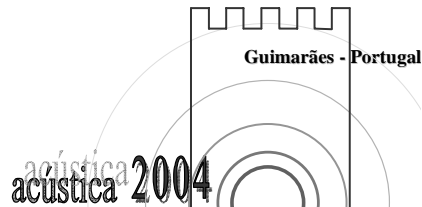
2.2 Distribución sonora.

El estudio de la distribución sonora se ha realizado a partir de la emisión con una fuente sonora omnidireccional y una potencia de emisión de 110.96 dB. Se detecta un importante nivel de primeras reflexiones laterales, pero apenas si existe contribución a las reflexiones del techo de madera, debido a la sombra acústica que provocan los arcos diafragmas. Existe una bajada sensible del sonido reverberante en la zona del coro, con una disminución de la cantidad de reflexiones, de nivel sonoro y de sonoridad.

Para analizar el grado de difusión sonora en la iglesia, se han representado los niveles sonoros medidos respecto al nivel de referencia, en función de la distancia, y se han comparado con los valores previstos por el modelo clásico y el modelo de Barron (figura 3). Los niveles sonoros medidos se mantienen por debajo incluso de los previstos por el modelo de Barron, principalmente en los puntos más alejados de la fuente, debido a una falta de difusión del sonido, como se aprecia también en las variaciones existentes entre el tiempo de reverberación medido en diferentes puntos. La geometría simple de la iglesia, junto con la concentración de la absorción sonora en el plano de las butacas y la presencia de los arcos diafragma, no favorecen la difusión sonora.

2.3 Inteligibilidad.

Los índices RASTI de la medición, en los diferentes puntos, se representan en la figura 7, frente a la distancia de cada punto a la fuente. Esos índices (valor medio de 0.50) permiten



calificar la inteligibilidad como “aceptable”. Se evalúa la inteligibilidad con público en la iglesia mediante simulación informática, obteniendo una mejora sensible del índice RASTI, manteniéndose en la calificación de “aceptable” con un valor medio de 0.54 en el estado actual y de 0.45 en el estado previo. La inteligibilidad ofrece unos adecuados valores para la música, mientras que se muestra insuficiente para la palabra.

2.4 Ruido de fondo.

La medición efectuada del nivel de ruido de fondo en la iglesia da como resultado un nivel sonoro continuo equivalente ($L_{eq} = 33.1$ dBA), inferior al máximo recomendado para iglesias que es de 40 dBA. Para valorar el ruido en el interior de la iglesia, se ha comparado el espectro medido con las curvas NR, correspondiéndole un índice NR de 37, valor que es superior al margen recomendado entre 25 y 35. Este valor es debido a los niveles de altas frecuencias, ya que para el resto de octavas de frecuencia el nivel es muy inferior.

A partir de estos datos, se concluye que las condiciones acústicas de la iglesia en el estado actual son aceptables para el uso tanto musical como de la palabra, dentro de una solución de compromiso, mientras que las condiciones en el estado previo, se pueden considerar como aceptables para la música e inadecuadas para la palabra.

3. PROPUESTA DE INTERVENCIÓN.

El objetivo de que la iglesia presente unas condiciones acústicas idóneas tanto para el uso de la palabra como el musical, aconseja disminuir la absorción sonora en su estado actual, para aumentar así el tiempo de reverberación en la configuración musical.

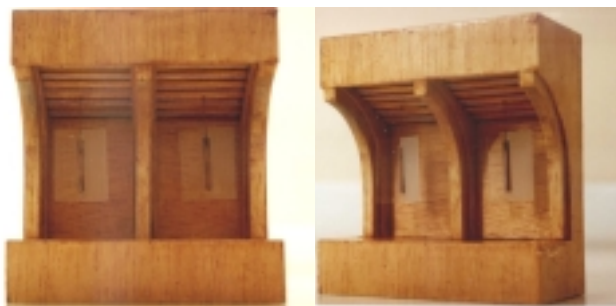
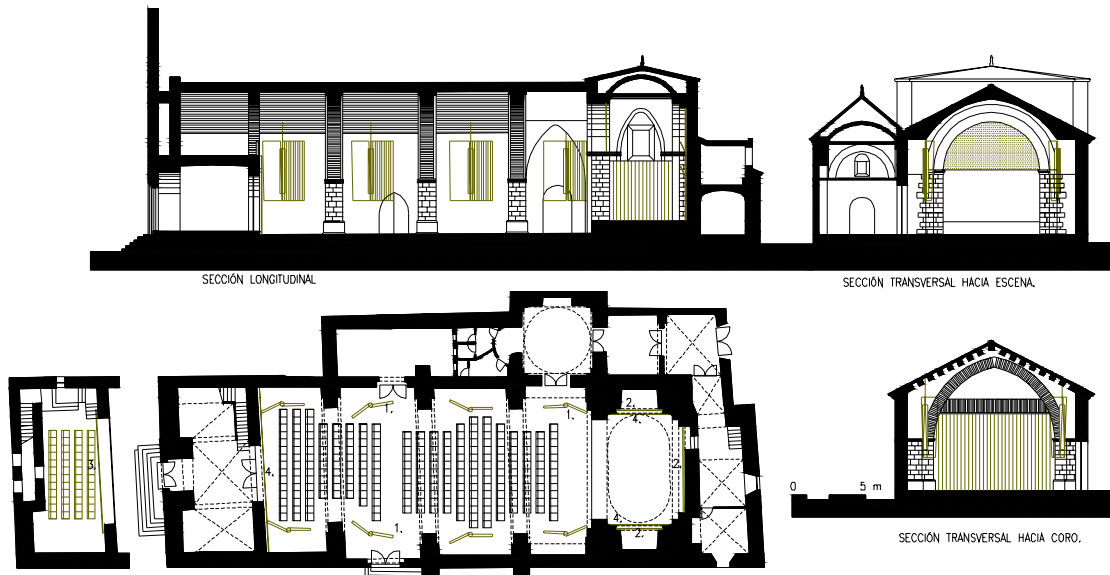
La necesaria mejora de la distribución sonora supone aumentar las primeras reflexiones, principalmente en el fondo de la nave, para conseguir un campo sonoro más uniforme que el existente en la actualidad, mediante el diseño de superficies reflectoras con una adecuada orientación, siguiendo los principios de la acústica geométrica. Estos reflectores se pueden ubicar en la parte superior o en los laterales de la iglesia.

Para disminuir la absorción sonora y aumentar el tiempo de reverberación en la configuración musical, se plantea disponer en el coro butacas móviles sobre guías, que se pliegan en esta configuración, utilizando este espacio como una cavidad reverberante acoplada a la sala [3]. Igualmente, se plantea recoger el cortinaje existente en la actualidad en la escena (arcos de fondo, laterales y embocadura) y disponer paneles de madera.

El aumento de nivel sonoro en el fondo de la nave se consigue mediante reflexiones laterales que provienen de unos reflectores verticales suspendidos, convenientemente dispuestos, de manera que hagan converger las reflexiones hacia los puntos más alejados de la fuente sonora. Esta luminarias-paneles se configuran como una piel translúcida de vidrio, que dejan entrever los fondos, entendiéndose como un elemento funcional, que se materializa mediante el mecanismo de repetición y rotación.

Para el uso de la iglesia para actividades asociadas a la palabra (configuración teatral), convendría disminuir los valores del tiempo de reverberación para adaptarlos a los valores óptimos. Para ello se despliegan las butacas del coro, los cortinajes laterales de la escena y se incorpora, en la pared de fondo de la nave, un cortinaje de algodón fruncido, aumentando la absorción sonora a medias y altas frecuencias.

Para conseguir aumentar la absorción sonora se plantea el empleo de paneles QRD, que permiten disminuir el tiempo de reverberación a la vez que supone una mejora del campo difuso, con una disminución de la pérdida de nivel sonoro con la distancia, que a bajas frecuencias se debe a un efecto de absorción, y que a medias y altas frecuencias se debe a la difusión[4]. Se incorporan paneles de *plexiglass omnifusor*, paneles QRD en dos dimensiones, formando parte de cada uno de los reflectores verticales.



1. Panel reflector de vidrio 4+4 y panel QRD.
2. Panel madera 15 mm a 5 cm de la pared.
3. Butacas móviles.
4. Cortina de algodón 620 g/m² fruncida al 150%

Figura 4. *Propuesta de intervención.*

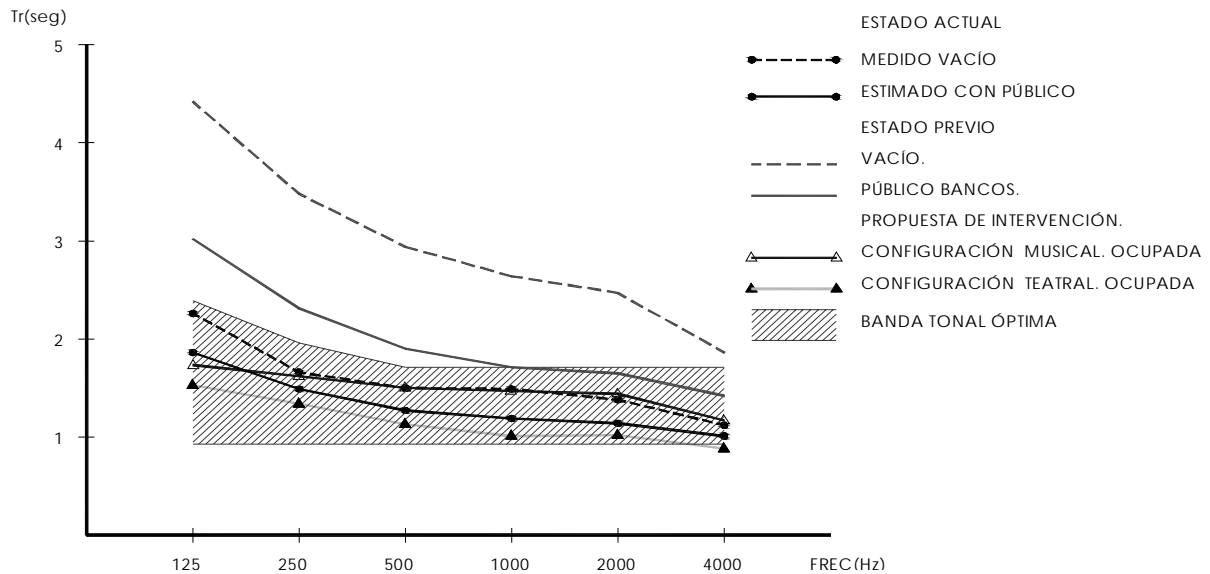
3.1. Tiempo de reverberación.

La disminución de la absorción sonora, para la configuración musical, hace que la curva tonal con público en butacas obtenida mediante simulación informática incorporando las propuestas arquitectónicas de corrección, sea similar a la medida para medias y altas frecuencias, con

valores del tiempo de reverberación algo inferiores a los valores considerados como óptimos (tabla 1 y figura 5). El aumento de la absorción sonora, hace que la curva tonal para la configuración teatral se adapte a la curva tonal óptima para la palabra, principalmente para los sonidos agudos.

Tabla 1. Coeficientes de absorción de los diferentes materiales, revestimientos y acabados.

MATERIAL	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Suelo cerámico	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07
Butacas vacías	0.35	0.45	0.57	0.61	0.59	0.55
Butaca ocupada	0.56	0.68	0.79	0.83	0.86	0.86
Revoco de cal	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.07
Piedra	0.02	0.02	0.06	0.08	0.04	0.05
Madera	0.16	0.16	0.13	0.10	0.06	0.05
Ladrillo	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.07
Madera 15 mm cámara	0.10	0.11	0.10	0.08	0.08	0.11
Bóveda	0.05	0.06	0.07	0.09	0.07	0.08
Panel omnifusor	0.30	0.21	0.28	0.53	0.21	0.36
Panel de cristal	0.17	0.07	0.04	0.03	0.03	0.02
Cortina algodón fruncida	0.14	0.35	0.55	0.72	0.70	0.85
Aire (2365 m ³)					0.008	0.021



		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Estado actual	Medido butacas vacías.	2.26	1.66	1.50	1.49	1.38	1.12
	Estimado público en butacas.	1.86	1.49	1.27	1.19	1.14	1.01
Estado previo	Vacío	4.42	3.48	2.94	2.64	2.47	1.86
	Público en banco	3.02	2.31	1.90	1.71	1.65	1.42
Propuesta	Configuración musical. Público.	1.72	1.62	1.51	1.47	1.44	1.17
	Configuración teatral. Público.	1.53	1.34	1.13	1.01	1.02	0.88
Óptimo	Música	2.39	1.96	1.71	1.71	1.71	1.71
	Palabra	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93

Figura 5. Tiempos de reverberación (s) medidos y/o estimados en el estado actual, previo, propuestos y óptimos.

3.2 Distribución sonora.

Tanto para la configuración teatral como musical, se produce una disminución sensible de la caída de nivel sonoro con la distancia, respecto a lo que sucede en el estado actual. Esto es especialmente significativo para el uso musical, con un atenuación del nivel sonoro de tan solo 3 dB por cada 10 m.

Se han representando, los niveles de presión sonora global estimados en función de la distancia a la fuente, y se han comparado con los valores previstos por el modelo clásico y el modelo de Barron (figura 6). Al igual que en el estado actual, los niveles sonoros estimados se mantienen por debajo de los previstos por el modelo de Barron. No obstante, existe una mayor difusión del sonido en la configuración musical, por la menor caída de nivel sonoro.

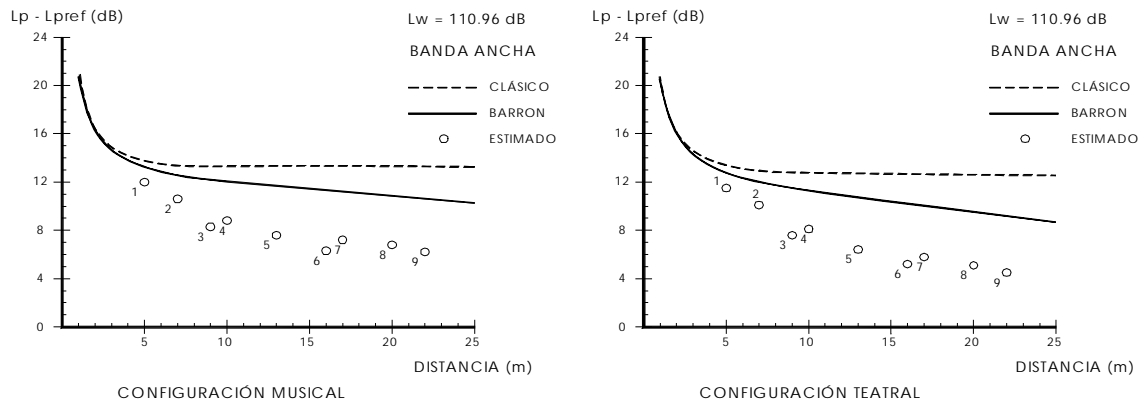


Figura 6. Comportamiento estimado del campo acústico frente a la distancia. Banda ancha.

RASTI

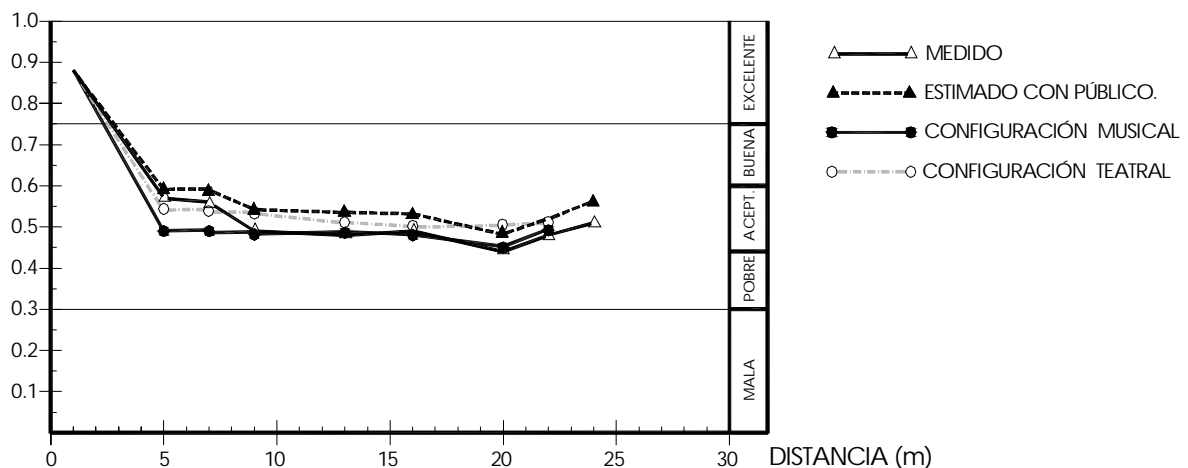
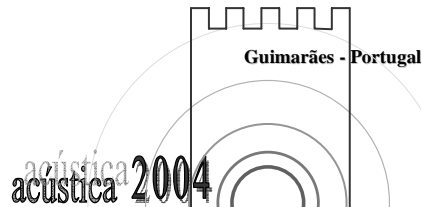


Figura 7. Índice RASTI frente a la distancia. Estimado con público en sillas.

3.3 Inteligibilidad.

Para las dos configuraciones, los valores de inteligibilidad se mantienen en los márgenes obtenidos anteriormente para la simulación del estado actual con público, con una calificación



de "aceptable", valores RASTI medios de 0.48 para la configuración musical y de 0.52 para la configuración teatral, como se observa en la figura 7.

4. CONCLUSIONES.

Con las nuevas propuestas arquitectónicas efectuadas para la corrección acústica, la iglesia, para cada de las configuraciones establecidas, presentará un tiempo de reverberación adecuado tanto para la interpretación musical como para la audición de la palabra, con curvas tonales adaptadas a las curvas tonales óptimas para los referidos usos. La distribución sonora será homogénea en la iglesia, con una disminución de la caída del nivel sonoro con la distancia, respecto del estado actual, no siendo previsible la existencia de zonas de concentración sonora. Además este espacio presentará una adecuada intimidad acústica y claridad musical. Los valores del índice RASTI permiten calificar la inteligibilidad como "aceptable" para las dos configuraciones consideradas.

En consecuencia, de ser realizadas las correcciones acústicas propuestas, la iglesia presentaría unas favorables condiciones acústicas, tanto para su uso musical como para la palabra, de acuerdo a cada una de estas configuraciones. Estas favorables condiciones acústicas, unido a su adecuado tamaño, supondrían que, en el aspecto musical, este espacio sería apropiado para la interpretación de música de cámara y coral polifónica, que permita la audición de las líneas musicales interpretadas.

REFERENCIAS.

-
- [1] Beranek, L, *Acoustics*. Acoustical Society of America, Nueva York 1993, pp. 425-426.
Los valores del tiempo de reverberación para la frecuencia de 500 Hz son:
Música religiosa : $Tr = 0.55 \log V - 0.14$
Palabra : $Tr = 0.33 \log V - 0.15$
La corrección para la música religiosa, en función de las frecuencias es de 1.40 para 25 Hz y 1.15 para 250 Hz.
 - [2] Se ha considerado como volumen de referencia, un volumen de un tramo de dimensiones 5.5 x 11.2 x 8.0 m, que presenta un tiempo de reverberación óptimo para la música de 1.34 s y de 0.73 s para la palabra.
 - [3] Carrión Isbert, A. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Edicions UPC, Barcelona 1998, p. 317.
 - [4] Desarnaulds, V. y Monay, G. "*Utilisation des diffuseurs de Schröder dans les salles polyvalentes a plafond haut*", en Proceedings.11th Int. FASE symposium, Valencia 1994, pp. 135-138.