

LA ENERGÍA ACÚSTICA EN EL INTERIOR DE UN RECINTO: ESTUDIO DEL MODELO μ EN IGLESIAS POSTCONCILIARES DE M. FISAC

PACS: 43.55.Gx

M. Galindo¹; A. Bueno; A. L. León; E. Alberdi.
Universidad de Sevilla, ¹Dpto. Física Aplicada II, Dpto. de Construcciones Arquitectónicas I, ETS Arquitectura, IUACC.
Avda. Reina Mercedes 2, 41012 Sevilla, España.
¹Tel. + 34 954556672. Fax: +34 954557892. Tel.: + 34 954556595. Fax: +34 954557018.
E-Mail: mgalindo@us.es, anabueno@arquired.es, leonr@us.es, ealberdi@us.es

ABSTRACT

The description of the acoustic energy within an enclosure has resulted in several theoretical models that demonstrate the infeasibility of the classical model in most rooms. In them, acoustic energy depends on the source-receiver distance. In this context, the energy model μ is applied in various Spanish catholic churches of the architect M. Fisac. The analysis shows the importance of the location of the source and the acoustic and architectural features of the room.

RESUMEN

La descripción de la energía acústica en el interior de un recinto se ha concretado en varios modelos teóricos que ponen de manifiesto la inviabilidad del modelo clásico en la mayoría de las salas. En ellos, la energía acústica depende de la distancia emisor-receptor. En este contexto, se aplica el modelo energético μ en varias iglesias católicas españolas del arquitecto M. Fisac. El análisis pone de manifiesto la importancia de la ubicación de la fuente así como las particularidades acústicas y arquitectónicas del recinto.

LOS MODELOS ENERGÉTICOS

Existen numerosos modelos que intentan describir la energía acústica en el interior de un recinto. Una revisión de los mismos se puede encontrar en [1] – [3].

De acuerdo con la teoría clásica, en condiciones de campo difuso, se asume que una excitación impulsiva en un recinto se extingue siguiendo una ley exponencial. En tales condiciones, la densidad de energía instantánea normalizada respecto al valor de la energía integrada del sonido directo a 10 m de distancia, valdrá:

$$\varepsilon(t) = \frac{400\pi c}{V} e^{-\frac{13,82t}{T_r}} \quad (1)$$

donde c es la velocidad del sonido, V el volumen del recinto y T_R el tiempo de reverberación. De esta manera, los parámetros energéticos se podrían expresar exclusivamente en término de T_R y V .

Con esto, se puede demostrar, que el nivel de presión sonora en el interior de un recinto, para una fuente omnidireccional a una distancia r es:

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{A} \right), \quad (2)$$

lo que supone una atenuación del nivel de presión sonora a medida que aumenta la distancia emisor-receptor, para terminar manteniéndose en un nivel constante.

Como ejemplo, el valor de la Fuerza Sonora G que se obtiene a partir del nivel de presión sonora de referencia en campo libre a 10 m, es:

$$G = L_p - L_{p10} = 10 \log \left(\frac{100}{r^2} + \frac{31200 T_R}{V} \right) \quad (3)$$

El principal inconveniente de la teoría clásica es que, más allá del radio acústico, en la mayoría de recintos, la atenuación del nivel de presión sonora y de cualquier otro parámetro energético es menor (o mayor) que la que presentan los valores medidos (Fig. 1).

Las atenuaciones se localizarán a partir de la distancia crítica D_c , donde el nivel de presión sonora del sonido directo es igual al nivel reverberado:

$$D_c = 0,14 \sqrt{QR}, \quad (4)$$

donde Q es el factor de directividad de la fuente sonora y R la constante del recinto, que depende de la superficie total de la sala S y del coeficiente de absorción medio $\bar{\alpha}$:

$$R = \frac{S\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}}. \quad (5)$$

Barron y Lee [4] propusieron un modelo que daba cuenta de este comportamiento en el caso de auditorios y salas de conciertos, donde la presencia de un plano muy absorbente (el de la audiencia), entre otras razones, alejaban su comportamiento del modelo de campo difuso. Posteriormente extendieron este comportamiento a recintos de dimensiones proporcionadas con alta difusión. El modelo asume que la energía reflejada también depende de la distancia fuente-receptor.

La energía integrada desde el instante t hasta el infinito puede calcularse integrando la expresión (1) sobre dicho intervalo:

$$i(t) = \int_t^\infty \varepsilon(t') dt' = \int_t^\infty \frac{400\pi c}{V} e^{-\frac{13,82t'}{T_R}} dt' = \frac{31200 T_R}{V} e^{-\frac{13,82t}{T_R}} \quad (6)$$

Para predecir el nivel total de presión y las relaciones de energía inicial/final, la energía sonora se divide en tres componentes: el sonido directo (d), el sonido reflejado inicial (desde 0 hasta

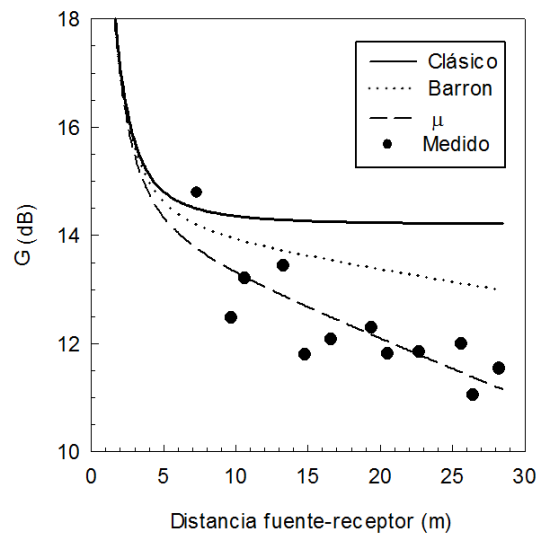


Figura 1. Fuerza Sonora frente a la distancia fuente-receptor. 1 kHz. Iglesia gótica –mudéjar de San Marcos, Sevilla.

80 ms, e) y el final (desde 80 ms hasta ∞ , l). El instante $t=0$ corresponde al instante de la llegada del sonido directo, pues la energía reflejada no puede llegar antes que este.

$$d = \frac{100}{r^2}$$

$$e = \frac{31200T_R}{V} e^{-\frac{0,04r}{T_R}} \left(1 - e^{-\frac{1,11}{T_R}} \right) \quad (7)$$

$$l = \frac{31200T_R}{V} e^{-\frac{0,04r}{T_R}} e^{-\frac{1,11}{T_R}}$$

Por tanto el valor de G , propuesto por Barron (G_B) recoge atenuaciones en el campo reverberado con la distancia fuente-receptor que no presenta el modelo clásico:

$$G_B = L_p - L_{p_0} = 10 \log \left(\frac{100}{r^2} + \frac{31200T_R}{V} e^{-\frac{0,04r}{T_R}} \right) \quad (8)$$

Zamarreño *et al.* [1] dieron cuenta de atenuaciones de la energía reflejada mayores que las propuestas por el modelo de Barron, como ocurre en iglesias, catedrales, mezquitas, espacios de grandes volúmenes y/o proporciones muy diferentes (ver Fig. 1). Por este motivo elaboraron un modelo basado en el modelo de Barron, conocido como el modelo μ , que, manteniendo el sonido directo y el reflejado final, recoge una menor aportación de energía en la energía temprana debida a una menor cantidad de reflexiones en los primeros 80 ms. El sonido reflejado inicial propuesto es:

$$e_\mu = \frac{31200T_R}{V} e^{-\frac{\mu r}{T_R}} \left(1 - e^{-\frac{1,11}{T_R}} \right), \quad (9)$$

El valor del coeficiente μ se obtiene a partir de regresiones no lineales de los valores medidos. Para dar cuenta de estas atenuaciones, se escogió un parámetro acústico que presentará grandes variaciones con respecto a la distancia fuente-receptor: la Claridad (C_{80}). Una vez calculado los parámetros acústicos energéticos se podrán calcular en función de tres características del recinto: T_R , V y μ .

El valor del parámetro μ recoge, por tanto, las particularidades acústicas específicas de la sala y puede ser aplicado a cualquier tipo de recinto. Así cuando se aplica a grandes teatros el valor del coeficiente será el propuesto por Barron (0,04).

El principal inconveniente del modelo es la necesidad de realizar mediciones *in situ* en recintos ya ejecutados. No obstante esta aparente limitación se salva en gran parte cuando se enmarca su estudio en una determinada tipología, que permite la recopilación de valores del coeficiente μ y por tanto una estimación a priori del comportamiento acústico de los recintos en función de sus características arquitectónicas y acústicas.

Características	μ
Valor de referencia para una iglesia	0,08
Elementos difusores (decoraciones, pequeños pilares y techo)	+0,08
Volúmenes adicionales entre el emisor y el receptor	+0,08
Difusores adicionales (grandes pilares o capillas a lo largo de las paredes)	+0,08
Bóvedas altas o cúpulas en tambor	+0,08

Tabla 1. Valor del parámetro μ para iglesias.

En este sentido, Berardi et al. [3] calcularon diferentes valores del parámetro μ para iglesias de varios estilos. A partir de este análisis tipológico, se pudo inferir un valor de referencia para el parámetro μ , de valor doble al propuesto por Barron para la energía reflejada inicial, que va aumentando en función de las características específicas de cada configuración formal, acústica y estilística (Tabla 1).

LAS IGLESIAS ANALIZADAS

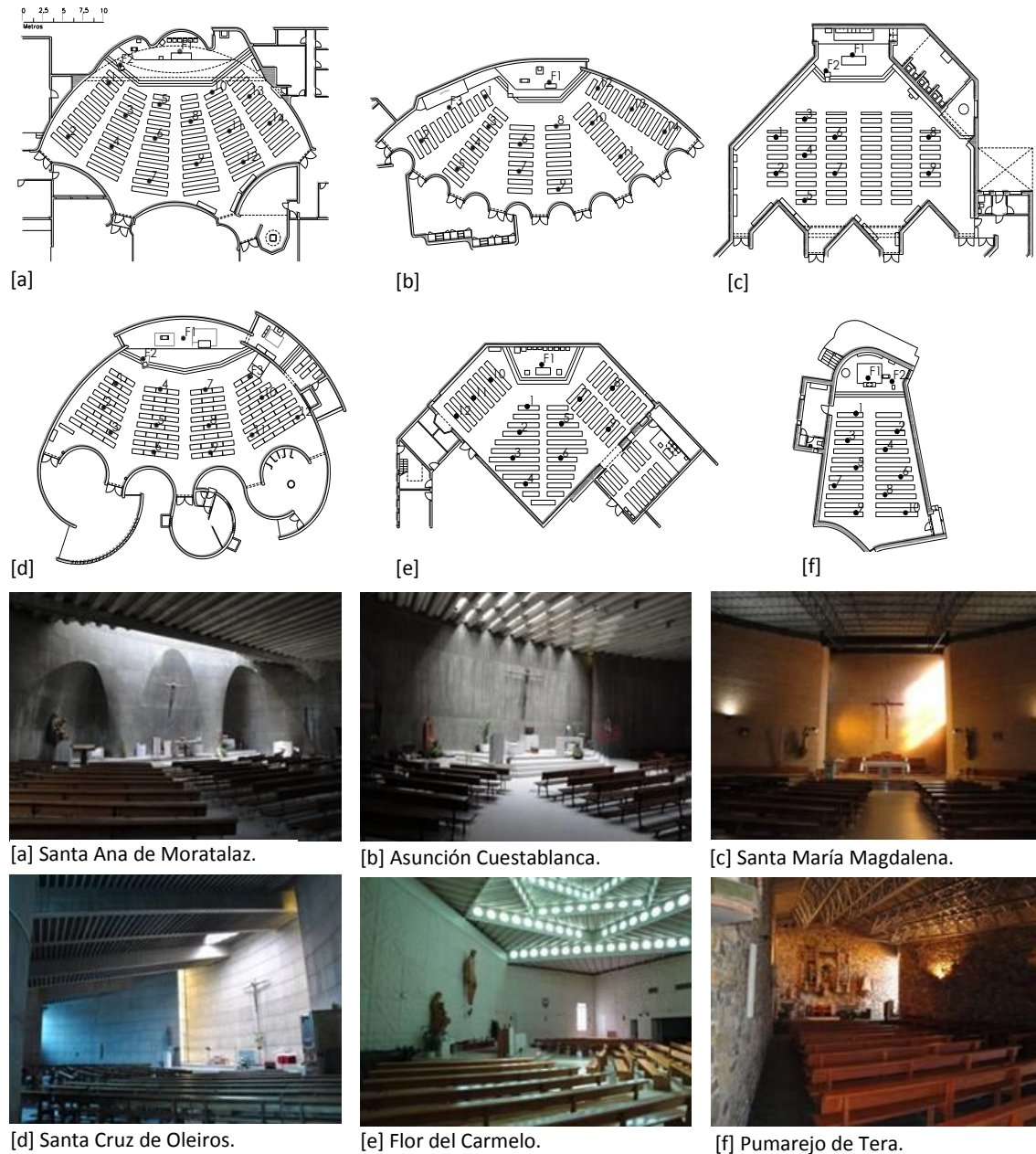


Figura 2. Iglesias objeto de estudio. Planta y vista interior hacia el presbiterio.

Se ha evaluado el modelo energético sobre seis iglesias que el arquitecto M. Fisac proyectó con posterioridad a la celebración del Concilio Vaticano II (1962-1965). La reforma litúrgica promovida por este concilio constituyó un punto de inflexión en su trayectoria arquitectónica

religiosa, ya que, a partir de este momento, Fisac abandona las razones y argumentos de proyecto que caracterizaron su arquitectura eclesial preconiliar, y las nuevas determinaciones litúrgicas se convierten en elementos definidores del espacio religioso.

Sus iglesias postconciliares presentan una disposición asamblearia en planta (para facilitar la participación plena y activa de los fieles), en torno al presbiterio (donde hay varios focos de atención a lo largo de las celebraciones: altar, ambón, sede, etc.), y las condiciones acústicas tienen repercusión formal en el proyecto (por la importancia que el concilio otorgó a la palabra y a la predicación).

Al igual que sus creaciones arquitectónicas de otros usos, sus edificaciones religiosas también reflejan los rasgos constructivos y estructurales que caracterizan e identifican una trayectoria arquitectónica marcada por la investigación.

En este contexto, las seis iglesias postconciliares analizadas en la presente comunicación (ver Tabla 2), se caracterizan por la adecuación a la nueva liturgia; por la austeridad y la sobriedad, propias de las circunstancias económicas del momento; y, por último, integran los elementos claves que caracterizan la investigación del arquitecto.

Nº	IGLESIA	LOCALIDAD	VOLUMEN (m ³)	AFORO (personas)	T _{30,mid} (s)
1	SANTA ANA DE MORATALAZ	MADRID	3674	466	5,73
2	ASUNCIÓN CUESTABLANCA	MADRID	3188	325	4,12
3	SANTA MARÍA MAGDALENA	MADRID	4344	348	2,61
4	SANTA CRUZ DE OLEIROS	OLEIROS (LA CORUÑA)	3702	329	6,79
5	Ntra. Sra. FLOR DEL CARMELO	MADRID	2528	338	4,09
6	SANTIAGO	PUMAREJO DE TERA (ZAMORA)	1424	193	1,04

Tabla 2. Iglesias analizadas, volumen, aforo y tiempo de reverberación.

En la Figura 2, se presentan las plantas de cada iglesia, la localización de las fuentes sonoras y de los receptores, junto con una escala gráfica para estimar sus dimensiones. También se presentan seis fotografías del aspecto interior del recinto.

Bueno [5], [6] en su Tesis Doctoral, realizó propuestas de rehabilitación mediante simulaciones informáticas (TUCT) con objeto de mejorar las condiciones acústicas de las mismas y en especial la inteligibilidad debido a su carácter religioso, donde prima la comprensión del mensaje oral. Cada propuesta pretende, entre otros objetivos, reducir la energía de las reflexiones largas en los distintos puntos de recepción y lograr que la iglesia tenga un buen comportamiento sonoro, independientemente del grado de ocupación de la misma, de tal forma que su acústica no esté tan condicionada por el número de personas que la ocupen. Para conseguir lo anterior, la propuesta de rehabilitación acústica se apoya en un conjunto de actuaciones, orientadas, en su mayoría, a la implementación en el recinto de revestimientos absorbentes, dispuestos estratégicamente desde el punto de vista acústico y arquitectónico. El modelo μ también se aplicara a estas propuestas.

MEDIDAS EXPERIMENTALES

Las medidas acústicas *in situ* de cada iglesia que componen la muestra se han realizado siguiendo el procedimiento normalizado recogido en la norma UNE-EN ISO 3382-1 [7],

En el momento de la medición acústica las iglesias se encontraban vacías de público. Las condiciones ambientales de cada iglesia se monitorizaron durante el período de medida. Para más detalles de las medidas equipos e instrumentación consultar [6].

En todas las iglesias, las fuentes sonoras (F) se situaron en el punto ocupado por el orador en el altar, ambón y, si existía, junto al órgano. Estos focos, como hemos señalado, fueron clave para incorporar las recomendaciones establecidas en el Concilio Vaticano II, que pasaron a ser elementos significativos de la liturgia cristiana. En el caso particular de la iglesia parroquial de Nuestra Señora Flor del Carmelo, no se situó la fuente en el ambón por su cercanía al altar.

Una vez realizadas las medidas y tras el cálculo de los parámetros acústicos, se realizaron las regresiones a partir de los valores medidos de C_{80} en cada una de las iglesias de la muestra con objeto de obtener el parámetro μ . Con objeto de evaluar la sala, se han admitido los valores promediados a frecuencias medias, tal como propone la norma [7].

En la Tabla 3 se presentan los valores del parámetro μ obtenidos por regresión y los del coeficiente de determinación (R^2) para cada iglesia, en la hipótesis vacía de fieles, con cada posición de fuente, en el estado actual (EA) y tras las propuestas de rehabilitación 1 y 2 (RE1 y RE2).

IGLESIA	FUENTE 1					
	μ (EA)	μ (RE1)	μ (RE2)	R^2 (EA)	R^2 (RE1)	R^2 (RE2)
SANTA ANA	0,0844	≈0	-	0,83	0,92	-
CUESTABLANCA	0,0081	0,0256	≈0	0,90	0,94	0,67
S.M. MAGDALENA	≈0	≈0	-	*	*	-
SANTA CRUZ	0,1628	0,0252	0,0133	0,95	0,97	0,98
FLOR DEL CARMELO	0,1209	≈0	-	0,92	0,93	-
PUMAREJO DE TERA	≈0	≈0	-	0,37	0,56	-
IGLESIA	FUENTE 2					
	μ (EA)	μ (RE1)	μ (RE2)	R^2 (EA)	R^2 (RE1)	R^2 (RE2)
SANTA ANA	0,0628	≈0	-	0,88	0,77	-
S.M. MAGDALENA	≈0	≈0	-	*	*	-
SANTA CRUZ	0,2006	0,0208	0,0075	0,92	0,89	0,84
PUMAREJO DE TERA	0,0021	0,0228	-	0,52	0,93	-
IGLESIA	FUENTE 3					
	μ (EA)	μ (RE1)	μ (RE2)	R^2 (EA)	R^2 (RE1)	R^2 (RE2)
CUESTABLANCA	0,0889	≈0	≈0	0,65	0,63	*
SANTA CRUZ	0,1368	0,0031	0,0129	0,88	0,80	0,82

* Estimación de valores de μ negativos.

Tabla 3. Valores del parámetro μ y del coeficiente de determinación R^2 .

A raíz de los resultados, lo primero que cabe destacar es que las propuestas de rehabilitación dan lugar a valores de μ cercanos a cero. El motivo de dicho comportamiento es que el aumento de la absorción sonora provoca un aumento de la distancia crítica, donde el nivel de presión sonora iguala al nivel reverberado, situándose entre los 7 y 11 metros. Teniendo en cuenta que las distancias fuente-receptor más lejanas están en torno a los 18 metros, nos encontramos todavía con una preponderancia del sonido directo, común a todos los modelos.

Por otra parte, la iglesia de Pumarejo de Tera, diseñada en el final de la carrera de M. Fisac, contó desde su diseño con un techo acústico que junto con su pequeño volumen dio lugar a buenas condiciones acústicas, de forma que su propuesta de rehabilitación sólo afecta a ligeros matices. Este es el motivo por el cual todavía predomina la aportación del sonido directo.

Mayor dificultad se encuentra al analizar la iglesia de Santa María Magdalena, pues aunque su mayor volumen y no muy alto valor del tiempo de reverberación sitúa la distancia crítica en torno a los 8 metros, la iglesia acabada en ladrillo visto de grandes paredes paralelas que se encuentran en grandes aristas, presenta eco flotante.

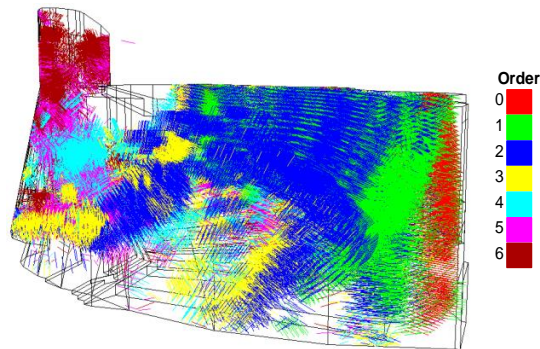


Figura 3. Trazado de rayos sonoros en el modelo informático de la iglesia de Santa Ana. Trascorridos los primeros 40 ms, frecuencia de 1000 Hz, fuente 1. Colores según orden de reflexión.

En el caso de la iglesia de Flor del Carmelo se obtienen atenuaciones con la distancia mayores que las esperadas en el modelo de Barron. El valor del coeficiente se atribuye a la forma del techo, cuyo efecto es similar al de una cúpula.

Las otras tres iglesias presentan una mayor similitud tanto en forma geométrica como en acabados, con mayor anchura que longitud: Santa Ana, Cuestablanca y Santa Cruz. Analizando las distintas posiciones de la fuente sonora en las iglesias (altar, ambón u órgano) podemos afirmar que el modelo energético depende de la ubicación de la fuente, pues se observan importantes variaciones del parámetro μ .

En la iglesia de Santa Ana las fuentes situadas en el altar y en el ambón se encuentran a distancias similares de las paredes de hormigón que el autor diseñó con formas convexas para remarcar los diferentes focos litúrgicos. Los valores de μ obtenidos son cercanos a los propuestos como valor de referencia por Berardi (ver Tabla 1). Este hecho puede atribuirse a la existencia del lucernario que absorbe una parte de la energía asociada al sonido directo y las primeras reflexiones cuando la fuente está situada junto al altar. En la Figura 3 podemos ver las reflexiones especulares, para la frecuencia de 1 kHz, en los primeros 40 ms a partir de la emisión del sonido, cuando la fuente está situada en el altar. Mientras el sonido directo está llegando a las paredes del fondo, en el altar y lucernario están teniendo lugar reflexiones de sexto orden.

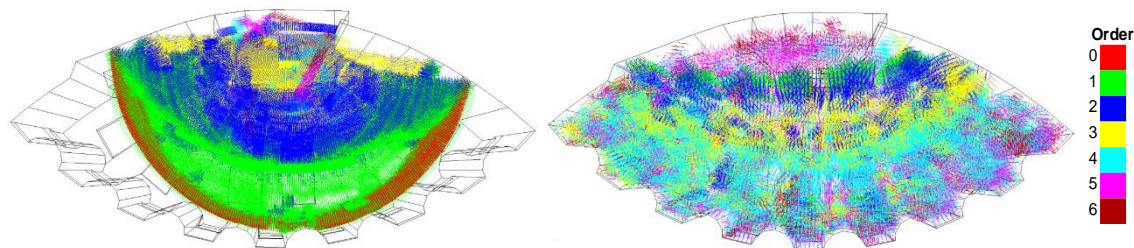


Figura 4. Trazado de rayos sonoros en el modelo informático de la iglesia de Cuestablanca. Trascorridos los primeros 40 ms (a la izquierda) y 80 ms (a la derecha), frecuencia de 1000 Hz, fuente 1. Colores según orden de reflexión.

En la iglesia de Cuestablanca pasamos de un modelo donde la energía temprana presenta muy poca atenuación en los primeros 80 ms con la fuente localizada en el altar, a una atenuación del orden del valor de referencia cuando la fuente se encuentra en el órgano. En este cambio de posición pasamos de tener la fuente según el eje transversal (corto) al eje longitudinal (largo). En el primer caso, la fuente está situada cerca de la pared del altar, muy reflectante, logrando que las reflexiones tempranas del primer orden lleven la energía en este intervalo temporal en la dirección delante-atrás. En la Figura 4 presentamos dos intervalos temporales para la banda de octava de 1000 Hz. A la izquierda podemos ver el frente de ondas esférico en los primeros 40 ms, a punto de incidir sobre la pared del fondo, y a la derecha la situación del frente de ondas, transcurridos los primeros 80 ms.

Sin embargo, cuando la fuente se sitúa junto al órgano, al ser este de madera y, por tanto, más absorbente que el hormigón, disminuye la energía de las primeras reflexiones, y el resto de la

energía evoluciona con una direccionalidad cercana a la perpendicular al eje de simetría. En la Figura 5 presentamos el frente de ondas cuando han transcurrido los primeros 40 y 80 ms.

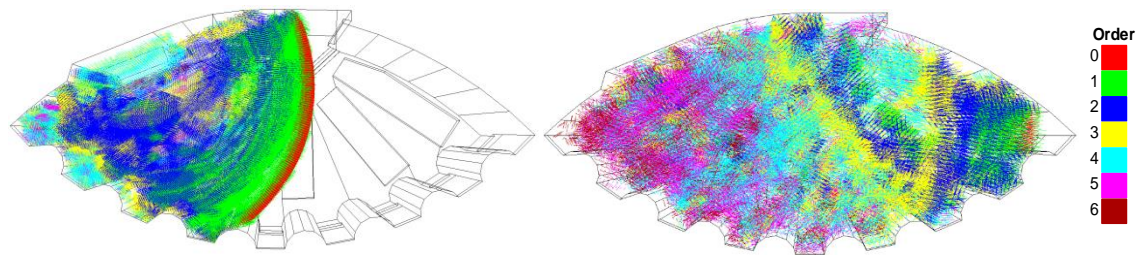


Figura 5. Trazado de rayos sonoros en el modelo informático de la iglesia de Cuestablanca. Trascurridos los primeros 40 ms (a la izquierda) y 80 ms (a la derecha), frecuencia de 1000 Hz, fuente 3. Colores según orden de reflexión.

Por último en la iglesia de Santa Cruz encontramos mayores atenuaciones de la energía temprana que la propuesta por el valor de referencia, con cambios en las tres posiciones de fuentes. En esta iglesia la distancia crítica es la menor de todas, en torno a los cuatro metros, por lo que la mayoría de los receptores se encuentra en el campo reverberante.

CONCLUSIONES

Se ha analizado el modelo energético μ en seis iglesias postconciliares del arquitecto M. Fisac. El carácter direccional de las primeras reflexiones, junto con la ubicación de la fuente y las posiciones de los receptores en estas iglesias, tan abiertas por su carácter asambleario, provoca diferentes comportamientos energéticos que hacen inviable la caracterización de cada recinto mediante un único parámetro μ .

En la iglesia de Cuestablanca se presentan valores del parámetro que van desde el modelo clásico, cuando la fuente se sitúa en el altar, a atenuaciones de la energía temprana mayores que las propuestas por el modelo de Barron, cuando la fuente se sitúa en el órgano.

Este comportamiento energético, dependiente de la posición de la fuente, en este tipo de iglesias, curiosamente coincide con la intención del Concilio Vaticano II, que sugería evitar la unidireccionalidad de la liturgia preconciliar, resaltando los distintos focos litúrgicos.

En el estado rehabilitado el aumento de absorción provoca un aumento de la distancia crítica, por lo que nos encontramos fundamentalmente dentro del campo directo.

REFERENCIAS

- [1] T. Zamarreño, S. Girón, M. Galindo. "Acoustic energy relations in Mudejar-Gothic churches". *J. Acoust. Soc. Am.* 121, 234-250 (2007).
- [2] F. Martellotta. "A multi-rate decay model to predict energy-based acoustic parameters in churches". *J. Acoust. Soc. Am.* 125, 1281-1284 (2009).
- [3] U. Berardi, E. Cirillo, F. Martellotta. "A comparative analysis of acoustic energy models for churches". *J. Acoust. Soc. Am.* 126(4), 1838-1849 (2009).
- [4] M. Barron and L. J. Lee, "Energy relations in concert auditoriums. I," *J. Acoust. Soc. Am.* 84, 618-628 (1988).
- [5] A. M. Bueno. "El sonido en la arquitectura religiosa de M. Fisac tras el Concilio Vaticano II. Propuestas de rehabilitación acústica. Tesis Doctoral. (2014).
- [6] A. M. Bueno, A. L. León, M. Galindo. "Acoustic Rehabilitation of the Church of Santa Ana in Moratalaz, Madrid". *Archives of Acoustics* 37, 435-446 (2012).
- [7] UNE-EN-ISO 3382-1:2010: Acústica, Medición de parámetros acústicos en recintos, parte 1: salas de espectáculos. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, (2010).