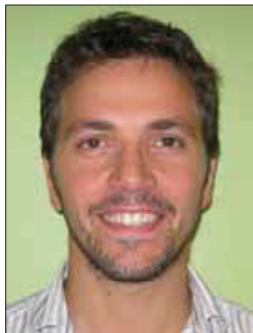


Predicción de las variaciones espaciales en la acústica de diferentes tipologías de iglesias



Umberto Berardi
DAU – Politécnico di Bari, via Orabona 4,
70125 Bari, Italy
u.berardi@poliba.it

PACS: 43.55.Br

Resumen

El artículo aborda la simulación acústica de diferentes tipologías de iglesias. Para retomar algunas indicaciones necesarias en el dimensionamiento de un edificio sacro, se ha elegido un análisis tipológico, definiendo algunos esquemas; para poder proceder con la simulación acústica de dichos esquemas, se han configurado algunas entre las más frecuentes organizaciones internas. El trabajo pretende realizar una confrontación entre diferentes formas, disposiciones internas y dimensiones, entendido como volumen de iglesias; obviamente esto ha originado limitaciones en la selección de algunos esquemas en detrimento de otros. El artículo tiene como fin la confrontación de algunas soluciones para extrapolar relaciones recíprocas entre arquitectura y acústica.

Abstract

This article deals with the acoustical simulation of different typologies of churches. To take into account again some necessary indications in the dimensioning of a sacred building, a typological analysis has been chosen, defining some schemes; to be able to proceed with the acoustic simulation of these schemes, some of the more frequent internal dispositions have been formed. This work intends to confront different shapes, internal dispositions and dimensions, and church volumes; obviously this has originated limitations in

the selection of given schemes and no other ones. This article tries to confront some solutions to extrapolate reciprocal relationships between architecture and acoustics.

1. Introducción

La acústica de las iglesias representa uno de los más nuevos campos de la acústica arquitectónica. Diferentes revistas publican periódicamente estudios que se están llevando a cabo en diferentes naciones para investigar el patrimonio de iglesias de diferentes estilos arquitectónico (Cirillo y Martellotta, 2005 y Sendra *et al.*, 1999). La predicción del comportamiento acústico de ambientes así únicos representa un nuevo paradigma no solo para las nuevas construcciones sino también por la restauración de edificios antiguos (Berardi *et al.*, 2009). Programas de simulaciones virtuales son disponibles para evaluar la acústica de estos espacios.

El presente artículo está dedicado a la simulación acústica de distintos tipos de iglesias. Después de un recordatorio acerca de algunas orientaciones para un edificio sagrado, se definieron algunos esquemas tipológicos. A fin de proceder a la simulación acústica virtual de estos diseños han sido configurados algunos esquemas de organización interna basados en análisis de los más frecuentes. El trabajo realizado presenta una comparación entre diferentes formas, tamaños y organización internas de iglesias.

2. Tipología arquitectónica

La historia de la arquitectura, la legislación reciente y algunas consideraciones de la Conferencia Episcopal Italiana (CEI) han sido los elementos básicos para la definición de las plantas arquitectónicas analizadas en este artículo.

2.1 El tamaño de las iglesias

El primer hecho a considerar para la evaluación acústica de la iglesia es el tamaño, porque el principal factor de influencia en la acústica de cualquier sala es su volumen. La elección del tamaño de una iglesia es un problema relacionado con la comunidad de fieles, es decir, la ocupación probable de la iglesia. El análisis de la historia de la arquitectura sacra muestra una inclinación innata hacia la modulación de las dimensiones, que siempre ha determinado la predilección por proporciones geométricas de las arquitecturas. El procedimiento constructivo en edificio históricos determina implícitamente la relación entre la anchura, la longitud y entre éstas y la altura de una iglesia.

Históricamente ciertas proporciones caracterizan los más frecuentes esquemas; en contraste, el tamaño de iglesias modernas parece establecido sobre razonamientos que escapan al sentido arquitectónico y religioso, o que, basándose en las posibilidades del progreso técnico y constructivo, están decididas muchas veces solo por el paradigma economi-

co o estético. El tamaño y las proporciones de nuevas iglesias, de hecho, están siempre determinados sobre oportunidades económicas, como se puede leer en las directrices “Parámetros para la asignación de contribuciones para edificio de culto” establecidas por la CEI (2007). En estas directrices se definen las áreas para cada parte de una parroquia, y en particular, la tabla 1 de este documento muestra las cifras para la construcción de iglesias. Basándose en estas indicaciones y con el objetivo de estudiar dimensiones estandarizadas y fácilmente comparables, se optó por simular acústicamente iglesias con volúmenes de 2500, 5000, 10000, 20000 y 50000 m³.

2.2 La elección de una tipología de iglesia

Después del volumen, la definición de las tres dimensiones principales de las iglesias se llevó a cabo mediante la adopción de valores proporcionales entre ellos. Las simulaciones acústicas realizadas, cuyo objetivo fueron comparaciones entre diferentes diseños de los edificios de la iglesia, se han limitados a volúmenes rectangulares con el fin de simplificar el establecimiento de cada tipología. Se definieron cinco categorías de volumen con cinco tipos de planta, con una proporción cada vez mayor entre anchura y longitud: Rectángulo longitudinal largo, con la relación entre las dos dimensiones de 1:2; Rectángulo longitudinal, 1:1.3; Cuadrado, de iguales dimensiones longitudinales y transversales, 1:1; Rectángulo reverso, 1.3:1; Rectángulo reverso largo, 2:1 (Figura n°1).

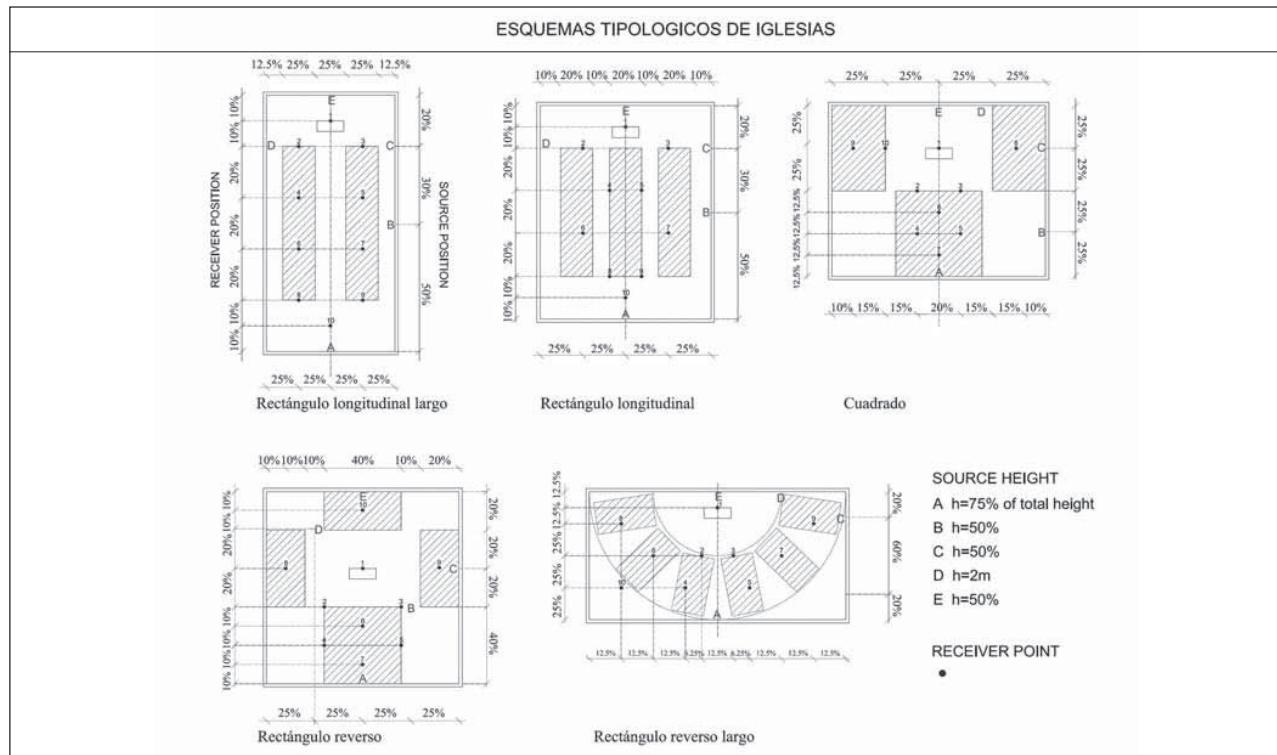


Figura n°1. Esquemas tipológicos de iglesias utilizadas en este estudio

La elección de las relaciones entre las dimensiones se hizo sobre la base del análisis estadísticas, basadas en estudios de arquitectura religiosa. Los diseños y proporción representan tanto las características arquitectónicas históricas y tradicionales (planta rectangular), como las tendencias más recientes (planta cuadrada y rectangular reversa). Para simplificar las comparaciones entre las diferentes categorías se ha asignado una altura constante entre el mismo volumen para cada planta.

2.3 La organización interna de los lugares de culto

Después de tamaño y de la tipología, ha sido necesario definir la organización interna de cada planta. Las relaciones de tamaño de las diversas plantas implícitamente contienen información sobre la organización interna mas probable, como si la organización es elemento ligado a la forma. De todos modos, se han asignado las siguientes organizaciones internas a cada planta:

- a la planta rectangular longitudinal larga se ha asignado un patrón con la posición longitudinal de los asientos y el altar en el extremo del lado largo;
- a la planta longitudinal se ha asignado una disposición longitudinal, con el altar colocado en la parte inferior, pero con la ocupación de los fieles en zonas laterales y en el centro;
- a la planta cuadrada se ha asignado un sistema central, con el altar colocado en el centro, y con la congregación en los cuatro lados alrededor;
- a la planta rectangular reverso se ha asignado un sistema central con la congregación ortogonalmene dispuesta alrededor del altar en tres lados;
- a la planta reverso larga se ha asignado un modelo radial central con bancos colocados a lo largo de semi-circunferencias alrededor del altar.

Definida la posición interna de los bancos y el altar, se ha determinado la posición de las fuentes de sonido musical,

que en las iglesias son principalmente el coro y el órgano (Figura n°2). La ubicación del la fuente está generalmente sujeta a varias opciones, como evidencian los estudios de Desarnaulds (2002). Se han elegido 5 posiciones de la fuente sonora para cada planta:

- posición A: sobre la entrada y en frente del altar, en el lugar que a menudo se tomaba antes de Concilio Vaticano II, con el órgano colocado en una plataforma que enmarca la puerta principal;
- posición B: en el centro de la sala, por encima de los fieles, generalmente situados en la tribuna de la mujer o suspendido por un lado;
- posición C: entre el altar y el montaje, en la situación que se considera más apropiada por la reforma litúrgica, por la que el coro y el órgano son una parte integrante de la asamblea y deben ser colocados en el aula entre el presbiterio y la congregación;
- posición D: al lado del altar en la parte inferior del presbiterio en posición disimétrica;
- posición E: en línea en el ábside detrás del altar en posición arquitectónicamente viable para la presencia de la cabecera.

La altura de la fuente en cada posición (Figura n°1) es diferente desde 2 m por la posición D hasta el 75 % de la altura total de la iglesia por la fuente en la posición A.

2.4 La elección de los materiales en las iglesias

En el proyecto europeo de investigación Cahrisma, dedicado a la acústica de diferentes lugares de culto, se estudió la acústica de la iglesia de Santa Sofía en Estambul (Weitze *et al.*, 2002). Con este estudio, basado en la investigación histórica junto con simulaciones de software, se ha demostrado cómo el mismo edificio en su historia ha tenido dos acústicas diferentes, con una diferencia de tiempo de reverberación de más de 2 segundos, por la presencia al menos

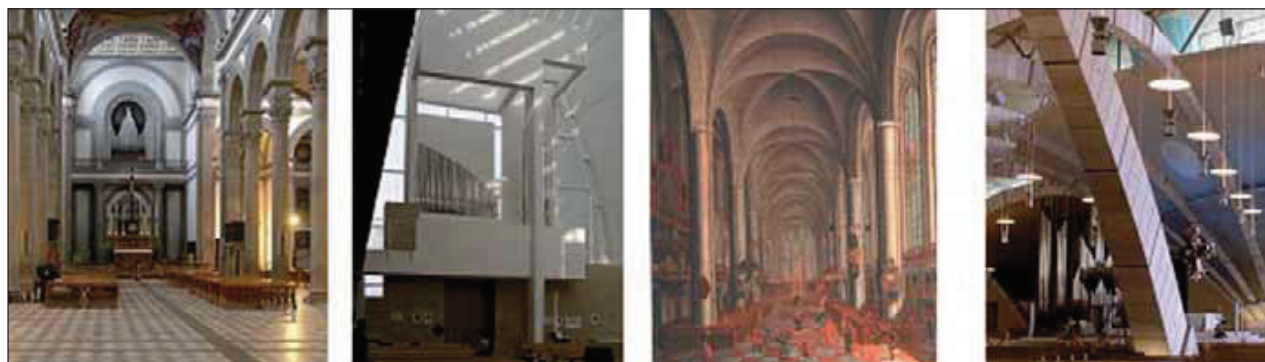


Figura n°2. Organos situados en diferentes sitios: en la iglesia renacentista de San Lorenzo, en Florencia (I), detrás del altar y en la moderna Dives in Misericordia de Roma (I) en la puerta principal, en posición lateral en la iglesia del siglo XVIII de San Miguel en Lüneburg (D) y en la nueva iglesia de Padre Pio en San Giovanni Rotondo (I)

de la moqueta. Esto pone de relieve la importancia que los distintos materiales tienen sobre la acústica de una iglesia. Este apartado recoge brevemente las características acústicas de los principales materiales para iglesias.

Además de tipología y de la organización interna los materiales inevitablemente caracterizan cada arquitectura. Estudios recientes han demostrado que un aspecto fundamental puede ser la posición de cada material. La instalación de material de absorción cerca de la fuente o muy lejos lleva a comportamientos acústicos muy diferentes. El problema debe ser adecuadamente definido en términos de características acústicas y ubicación de los materiales dentro de las iglesias.

Dentro de las iglesias el problema de comportamiento acústico diferente en función de la frecuencia es particularmente importante, ya que el espectro sonoro de interés por los ritos de culto es bastante largo. La alta reverberación de las iglesias se debe a la abundancia de materiales rígidos, que tienen muy bajas propiedades de absorción en cualquier frecuencia (bajos α).

Entre los materiales más comunes en iglesias se encuentran (Figura n°3):

- el mármol, que cubre la mayor parte de las superficies de muchos edificios antiguos en forma de losas en el piso y en las paredes, absorbe un 2% con independencia de la frecuencia;
- el hormigón característico de muchos edificios modernos, cuenta con un coeficiente α igual a 4%;
- el yeso, que se utiliza sobre todo en los paneles laterales (que pueden tener una superficie considerable), suele incrementar el índice de absorción de baja a alta frecuencia variando en función de la porosidad desde valores en torno al 2 y 5%;
- las cerámicas tienen diferentes comportamientos en cuanto a la reflexión y absorción;

- los materiales de piedra se comportan dependiendo de acabados superficiales, y tiene α que oscilan entre los 4 y 8%;
- los ladrillos también absorben hasta el 15% de la radiación incidente, dependiendo de la mezcla, el acabado y el espesor de las juntas de mortero;
- tiza, material parcialmente rígido, a menudo muy presente en las iglesias que se utiliza para ornamentación, tiene un valor del coeficiente de absorción de 10%;
- los paneles suspendidos, que disipan la energía acústica a través de las vibraciones. En general, la absorción de estos materiales es importante, incluso por encima del 30%, pero se produce sólo en las frecuencias bajas alrededor de la frecuencia de resonancia del panel. Pertenecen a esta clase de materiales: el falso techo, ampliamente utilizado en la arquitectura de las minorías religiosas; los paneles de madera anclados al borde del chasis, común en los coros y laterales, y las ventanas cuya vibración no está totalmente limitada.
- la madera que constituye el más recurrente y significativo mobiliario de las iglesias, los bancos. Estos son generalmente masivos y tienen coeficientes de absorción que varía de 10 a 20%. En presencia de los fieles, la zona ocupada muestra una absorción del 20-30% en las frecuencias bajas y aumenta hasta un 80% en alta frecuencia (Martellotta y Cirillo, 2009).
- las cortinas y alfombras son materiales que tienen un alto coeficiente de absorción superior al 60-70%, especialmente a frecuencias superiores a 1 kHz.

3. La simulación acústica

En esta sección se presentan en detalle los resultados de las simulaciones virtuales. Se identificaron 5 tipos de arquitectura de iglesias y entre estos se consideraron 5 volúmenes diferentes, obteniendo un total de 25 “edificios” simulados.

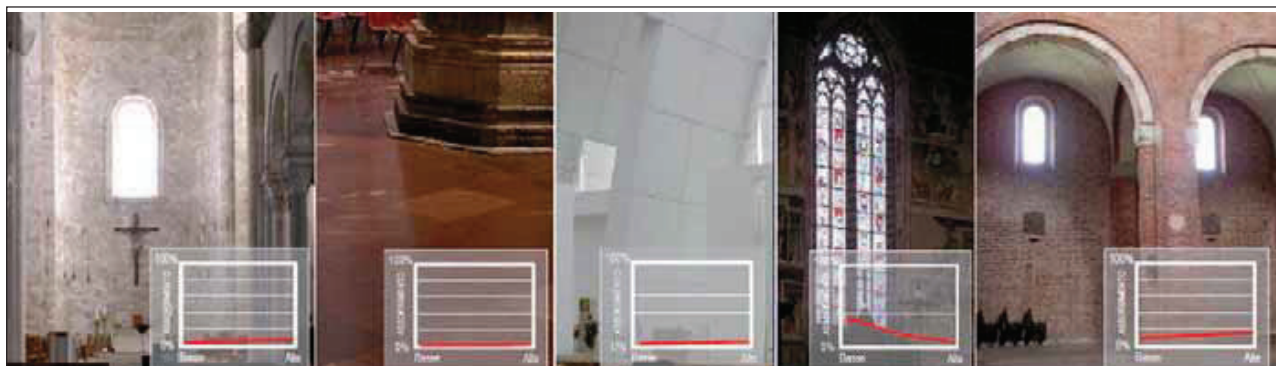


Figura n°3. Coeficientes de absorción acústica de algunos materiales de uso común en las iglesias (imágenes de F. Martellotta)

La disposición de los esquemas de cada iglesia corresponde con una organización de plano diferente. La figura nº1 muestra los aspectos más importantes de cada esquema. El número de bancos y consecuentemente el de personas en cada iglesia fueron establecidos a partir de un indicador de la tasa de ocupación media de 1.13 m² por persona en el espacio destinado a los bancos. La CEI establece, a partir de las superficies de las plantas, la correspondencia entre los volúmenes y las personas; esto permitió evaluar el procedimiento: por ejemplo una iglesia de 2500 m³, ha correspondido a una comunidad de 3000 personas con correcto número de bancos.

En cada iglesia se realizaron simulaciones acústicas con la fuente del órgano en 5 diferentes posiciones, descritas anteriormente. El órgano se ha considerado una fuente omnidireccional, que se caracteriza por un espectro de emisión de ruido blanco, con igual nivel de presión sonora (fijado en 94 dB en la simulación) en todas las bandas de octava. Las posiciones de los órganos fueron definidas siendo separadas y 0.5 m de las paredes.

En cada edificio se consideraron 10 posiciones de los receptores (de 1 hasta 10 en Figura nº1):

- una detrás del altar, con una altura de 1.5 m, para simular la posición del celebrante;
- ocho en el centro de la iglesia, simétricamente alrededor del eje central, con altura de 1.2 m para simular los fieles;
- una al fondo de la iglesia, con una altura de 1.5 m, a fin de evaluar las características acústicas de personas en la parte trasera de la iglesia.

El procesamiento virtual ha determinado para cada una de las 125 configuraciones diseñadas (5 tipos, 5 volúmenes y 5 disposiciones internas), una considerable cantidad de parámetros, mono y binaural, que se han calculados en las frecuencias de 125 a 4000 Hz y para las 10

posiciones de los receptores. En este artículo solo se consideran los parámetros de la energía lateral (LF) y el tempo baricentrico (Ts).

3.1 La definición de los materiales

Para el análisis tipológico es necesario designar acústicamente los materiales que componen cada superficie. La tabla nº1 muestra los coeficientes de absorción y reflexión aprobados en la simulación.

- el suelo se ha considerado como rígido como si fuera de piedra y con propiedades de reflexión especular, de hecho, los coeficientes de difusión que se asignan son bajos;
- la pared del fondo se ha considerado poco absorbente, con un ligero aumento en los valores de frecuencias más altas, como si se tratara de un yeso, e incluso la difusión crece con la frecuencia;
- las paredes laterales tienen características similares a la pared del fondo, mostrando las propiedades de mayor absorción para frecuencias hasta 500 Hz;
- el área ocupada por los bancos, siempre que la iglesia se considera en condiciones de plena ocupación, representa una superficie muy absorbente. La ropa de la gente, su tendencia natural a propagarse en el medio ambiente, su geometría difícil modelable debido a cambios específicos en cada caso, hacen esta zona particularmente difícil de simular. En la literatura hay muchas maneras de evaluar la absorción de un espectador. Una metodología propuesta por Kath y Kuh es asimilar la zona ocupada por la gente a un volumen de tamaño igual al espacio de los bancos ocupados. Un estudio reciente mostró que la absorción de las partes laterales y parte superior de las personas no es constante (Beranek *et al.*, 2001), por lo tanto se han utilizado valores diferentes de absorción para cada plano de la superficie de los bancos.

Tabla nº1. Coeficientes de absorción y difusión de los diferentes materiales utilizados en la simulación acústica

	Coeficientes de absorción						Coeficientes de difusión					
	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
Suelo	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20
Techo	0.20	0.15	0.10	0.08	0.07	0.07	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
Paredes laterales	0.06	0.06	0.06	0.08	0.09	0.10	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
Pared fondo	0.03	0.05	0.06	0.08	0.09	0.10	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
Bancos superior	0.50	0.60	0.70	0.80	0.80	0.80	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75
Bancos lateral	0.05	0.10	0.27	0.27	0.14	0.17	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75

3.2 Análisis comparativo de los modelos tipológicos

El propósito de este análisis es identificar relaciones entre la tipología y los resultados acústicos por diferentes posiciones de la fuente en la misma iglesia, o diferentes volúmenes y formas.

Consideremos, por ejemplo la figura n°4, que muestra los resultados con una posición central de la fuente en frente del altar (posición A): la forma rectangular determina un buen porcentaje de la energía lateral en las zonas ocupadas por los fieles, gracias a las reflexiones que el sonido tiene sobre las paredes laterales. El análisis comparativo no puede ser hecho independientemente del volumen del medio ambiente: los valores obtenidos en las iglesias más pequeñas son altos (mas de 30% en media), mientras en mayores volúmenes, el aumento global de tamaño implica una disminución sustancial de la energía lateral (menos de 20%).

El rectangular reverso largo tiene un valor alto de LF solo en la zona cercana a la fuente debido a la falta de superficies reflectantes cercanas, si también la fuente está en la posición A, en frente del altar, que es el lado largo. La planta rectangular reverso largo tiene valores ligeramente superiores cerca de las esquinas en las posiciones no ocupadas por los fieles. Los mejores resultados para los tipos reversos se obtienen con la fuente colocada en la posición C, aunque esta situación determina una distribución asimétrica de los valores (Figura n°5).

Esta posición maximiza la energía lateral (LF) en el volumen promedio de 10000 m³ porque permite obtener una importante reflexión sobre las paredes largas transversales. Esta posición conduce a buenos resultados incluso en volúmenes mayores, sin embargo el tamaño de los valores que se obtienen son muy bajos y no superan la media del 15% para un volumen de 50000 m³.

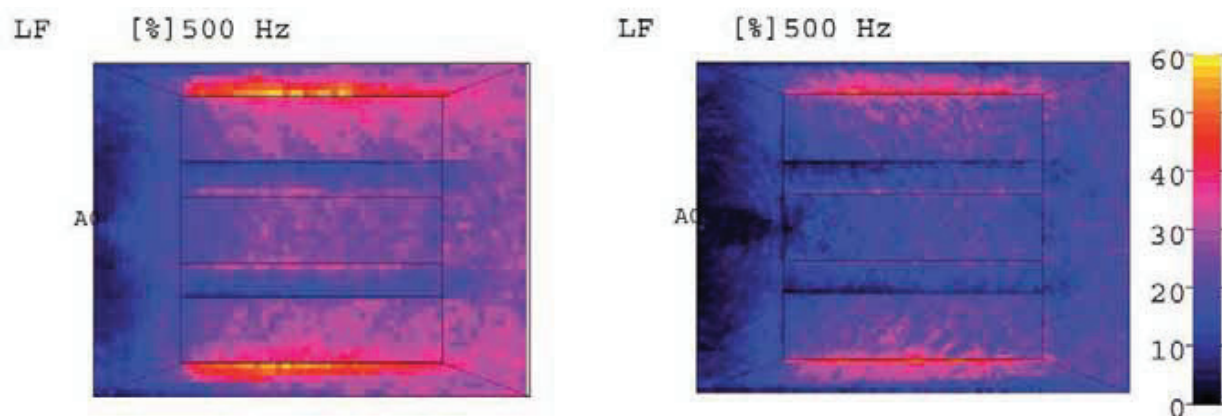


Figura n°4. Mapa en colores de el parámetro LF (%) a 500 Hz, para el volumen de 10000 m³ (izquierda, escala 1:1000) y 50000 m³ (derecha, 1:1600) en iglesias de planta rectangular con la fuente sonora en posición A

Los gráficos correspondientes al LF y al Ts se han representado en los mapas de colores en las cinco posiciones de la fuente para iglesias de volumen de 10000 m³ (Figuras n°6-7). Los parámetros LF y Ts son fundamentales en la percepción de la música, tanto para la evaluación de sonido espacial, como para el curso temporal de la energía que llega a los fieles. Cada figura permite comparar entre las diferentes posiciones de fuente. También se pueden evaluar a lo largo de una columna las tendencias de los parámetros manteniendo la fuente en la misma posición. Un estudio de Cirillo y Martellotta (2007) ha puesto de relieve la variación de los parámetros acústicos en iglesias reales, teniendo en cuenta la evolución de los entornos de energía del lado cuadrado, rectangular y largo, y manteniendo la posición de la fuente en el eje de simetría. Las posiciones de las fuentes de B, C y D en este estudio se apartan del eje de simetría. El análisis de los parámetros muestra una disimetría en el medio ambiente, y por lo tanto una variación de calidades acústicas más o menos notable en posiciones que se corresponden simétricamente.

El Ts permite la evaluación de la secuencia temporal de la energía que llega al receptor. Este parámetro es afectado por la posición respecto a la fuente como se muestra en los gráficos en la figura n°7. La situación próxima a la fuente, en general, muestra un valor bajo del Ts, que luego crece con la distancia del receptor. Así, por ejemplo, si nos fijamos en los gráficos de la planta rectangular larga, con las posiciones de la fuente en el eje, A o E, hay un crecimiento gradual en el valor del parámetro Ts con la distancia.

La combinación que muestra parámetros de valores uniforme y relativamente cercanos a los valores considerados favorables, resulta la planta reversa rectangular largo con la fuente en E. De hecho el esquema rectangular reverso, considerando la fuente colocada en A o E, muestra valores casi constantes en toda la zona ocupada por los fieles.

El tipo que registra el Ts menor en términos absolutos, aunque a veces desigual, es la planta cuadrada; de hecho en cualquier posición de la fuente, las distancias entre éste y el

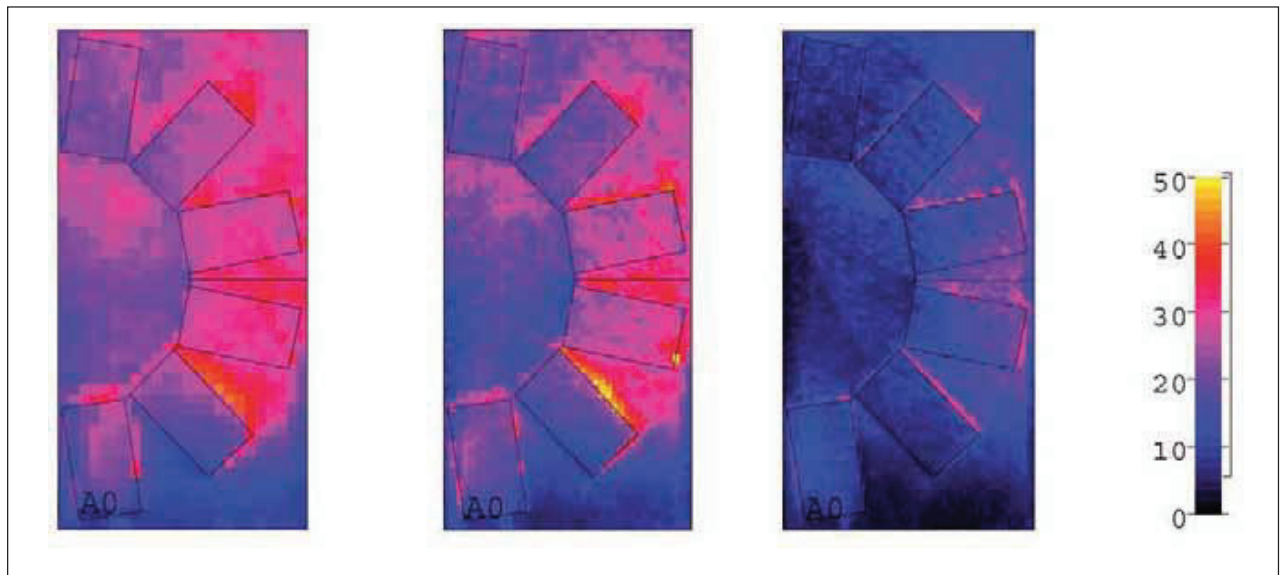


Figura n°5. Mapa en colores del parámetro LF (%) a 500 Hz, para el volumen de 2500 m3 (izquierda, 1:400) , 10000 m3 (centro, 1:650) y 50000 m3 (derecha, 1:1000) en iglesias de planta rectangular reverso largo con la fuente sonora en posición C

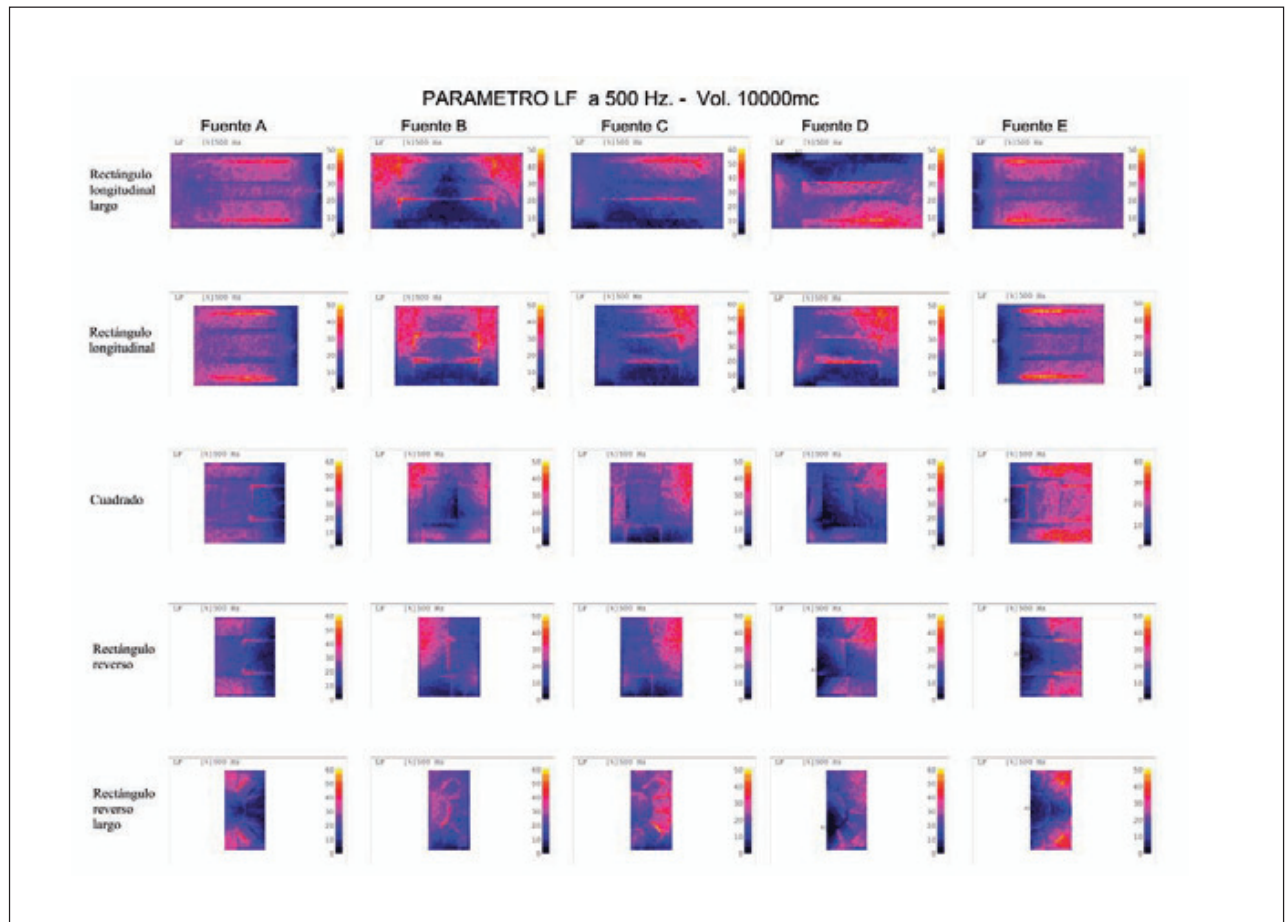


Figura n°6. Mapa en colores del parámetro LF (%) a 500 Hz en iglesias de 10000 m3 (diferentes escalas entre las figuras)

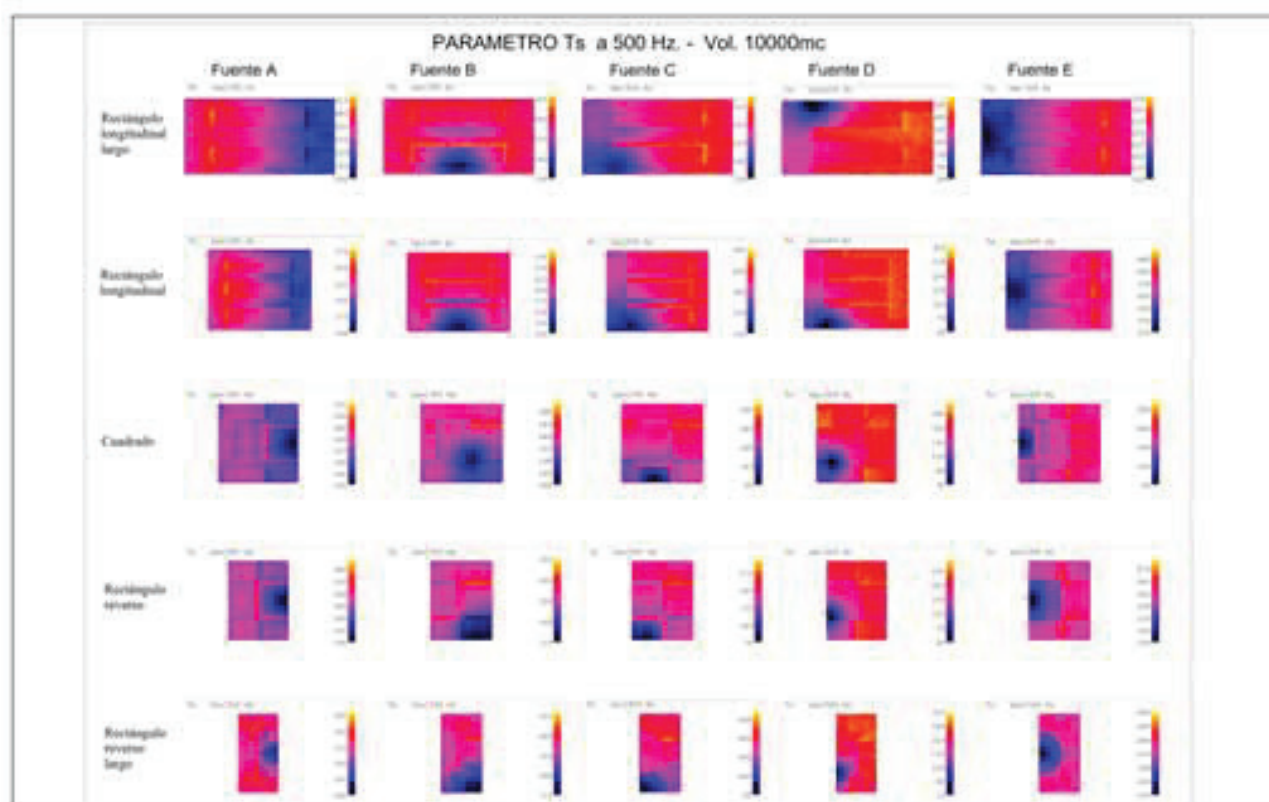


Figura n°7. Mapa en colores del parámetro T_s (ms) a 500 Hz en iglesias de 10000 m³ (diferentes escalas entre las figuras)

receptor de las posiciones se reducen al mínimo, por lo que el valor de T_s es satisfactorio y los valores son más pequeños que en otros esquemas, aunque, por supuesto, con el volumen, los valores de T_s aumentan.

Por el contrario, el tipo rectangular longitudinal largo, que se refleja también en la forma en que la asamblea está dispuesta, determina la distancia máxima entre la fuente y el receptor, y los valores de T_s que se obtienen superan los 300 ms por un volumen de 10000 m³, y llegan a valores más altos de 550 ms para el volumen de 50000 m³.

La figura n°8 muestra los valores de T_s y LF medios entre los 10 receptores (en figura n°1) por diferentes volúmenes y forma tipológicas, con la fuente sonora en posición A y D. Es evidente que para volumen sobre 10000 m³ la forma de la iglesias y la organización son parámetros importantes para el T_s , mientras iglesias con volúmenes menores tienen valores muy similares y constantes.

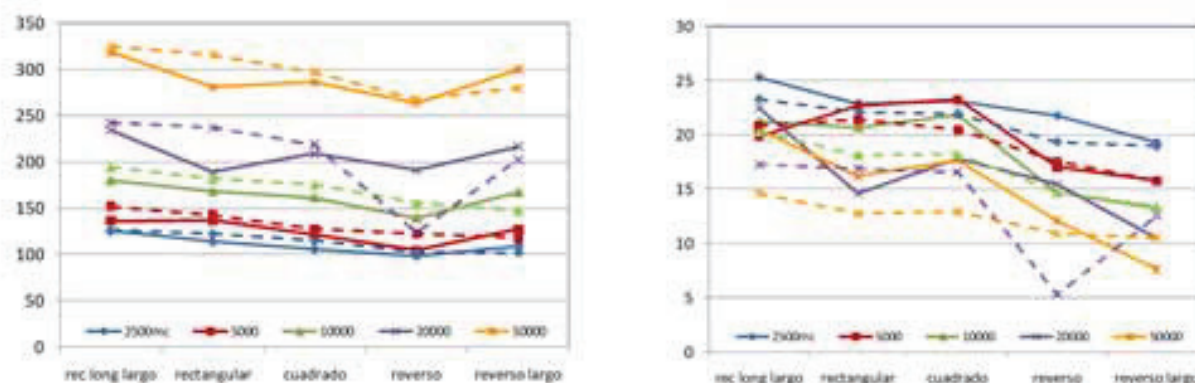


Figura n°8. Valores medios entre los 10 receptores de T_s en ms (izquierda) y de LF en % (derecha) en iglesias de diferentes formas y volúmenes con la fuente sonora en la posición A (—) y en D (---)

4. Conclusión

El artículo ha descrito la simulación acústica de tipologías de iglesias diferentes en volumen y organización interna. Para efectuar un análisis tipológico, se han definido algunos esquemas más frecuentes, y se han configurado diferentes organizaciones internas.

El trabajo ha realizado una confrontación entre diferentes formas, disposiciones internas y dimensiones de volumen. Los parámetros de calidad espaciales LF y Ts se han descrito, porque son fundamentales en la percepción de la música en las iglesias. El tipo que registra el Ts menor en términos absolutos, aunque a veces desigual, ha sido la planta cuadrada, que también tiene buenos valores de LF. El tipo rectangular longitudinal largo tiene valores altos de LF, pero registra valores también altos de Ts, lo que provoca una pérdida de calidad acústica. Una evaluación, preliminar para retomar algunas indicaciones sobre la acústica de una iglesia es posible desde la forma, aunque esta tiene que tener en cuenta los materiales en el espacio y sus dimensiones.

Referencias

- [1] Berardi, U.; Cirillo, E.; Martellotta F., *A comparative analysis of energy models in churches*, J. Acoust. Soc. Am., 126(4), 2009, 1838-1849.
- [2] Beranek, L.; Nishihara N.; Hidaka T., *Mechanism of sound absorption by seated audience in halls*, J. Acoust. Soc. Am., 110(5), 2001, 2400-2411.
- [3] Cirillo, E.; Martellotta F., *Sound propagation and energy relations in Churches*, J. Acoust. Soc. Am., 118(1), 2005, 232-248.
- [4] Cirillo, E.; Martellotta F., *On the spatial variation of acoustical parameters in churches*, ICA, Madrid, 2007.
- [5] CEI – Commissione Episcopale Italiana, *Parámetros para la asignación de contribuciones para edificios de culto, (en italiano: Parametri indicativi per l'edilizia di culto)*, Servizio nazionale per l'edilizia di culto, 2007.
- [6] Desarnaulds, V., *De l'acoustique des églises en Suisse – Une approche pluridisciplinaire*, PhD Thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2002.
- [7] Martellotta F.; Cirillo, E., *Experimental studies of sound absorption by church pews*, Applied Acoustics, 70, 2009, 441-449.
- [8] Sendra, J.; Zamarreño T.; Navarro A., *Acoustics in churches*, Computational Acoustics in architecture, Southampton, 1999.
- [9] Weitze, C.; Rindel, J.H.; Christensen, C.L., Gade, A., *The acoustical history of Hagia Sophia revived through Computer Simulation*, Forum Acousticum, Siviglia, 2002.