

## Análisis de auralizaciones del nuevo órgano de la Basílica de San Jaume de Algemesí (Valencia)

REFERENCIA PACS: 43.55.-n, 43.60.-c, 43.66.-x

Segura, Jaume<sup>1</sup>; Vera, Lucía<sup>1</sup>; Barba, Arturo<sup>2</sup>; Montell, Radha Montell<sup>2</sup>, Giménez, Alicia<sup>2</sup>; Fernández, Marcos<sup>1</sup>; Cibrián, Rosa<sup>3</sup>; Cerdá, Salvador<sup>6</sup>, Romero, José<sup>7</sup>

1 Institut de Robòtica, Universitat de València, Poligon de la Coma s/n, [jsegura@uv.es](mailto:jsegura@uv.es), [vemalu@uv.es](mailto:vemalu@uv.es), [mfmartin@uv.es](mailto:mfmartin@uv.es)

2 E.T.S.I.Industriales., Univ. Politècnica de Valencia, Camí de Vera s/n, [arbarse@doctor.upv.es](mailto:arbarse@doctor.upv.es),  
[rems.radha@gmail.com](mailto:rems.radha@gmail.com), [agimenez@fis.upv.es](mailto:agimenez@fis.upv.es)

3 Facultad de Medicina. Universidad de Valencia, [rosa.m.cibrian@uv.es](mailto:rosa.m.cibrian@uv.es)

4 E.T.S.I.Arquitectura, Univ. Politècnica de Valencia, [salcerjo@mat.upv.es](mailto:salcerjo@mat.upv.es)

5 Escuela Politècnica Superior de Gandía, Universidad Politècnica de Valencia, [romerof@fis.upv.es](mailto:romerof@fis.upv.es)

### Resumen

Mediante el estudio de las condiciones acústicas de la Basílica de Sant Jaume de Algemesí (Valencia) con medidas y simulación, se ha validado un modelo acústico. Con este modelo se ha realizado el cálculo de auralizaciones simuladas mediante una grabación anecoica del nuevo órgano de este templo, que actualmente se encuentra en fase de construcción.

Estas auralizaciones han permitido analizar, previamente a la instalación del nuevo instrumento, las señales obtenidas a partir de la función de transferencia calculada mediante el modelo acústico de la iglesia. Este método podría utilizarse para determinar la reubicación óptima del órgano o cualquier otra fuente sonora dentro del templo.

### Abstract

By means of the study of the acoustical conditions of the Sant Jaume's Basilica in Algemesi (Valencia), with measurements and simulation, an acoustical model has been validated. This model has allowed the computation of simulated auralizations with an anechoic recording of the new organ of this church, which nowadays is being built.

These auralizations have allowed analysing, formerly to the installation of the new instrument, the signals obtained from the transfer function calculated with the acoustical model of the church. This method could be used to determine the optimum location for the organ or any other sound source in the worship building.

### 1. Introducción

El desarrollo de los ordenadores ha permitido un gran avance en el campo de la modelización y simulación en acústica de salas. Estas herramientas han permitido una notable reducción de costes en los proyectos de acondicionamiento acústico respecto a otros que se realizan mediante métodos de predicción acústica, como los modelos a escala. Entre los métodos más usados para la modelización acústica se encuentran el método de trazado de rayos/conos y el método de las imágenes, aunque también es posible usar el método de los elementos de

contorno (BEM), el método de los elementos finitos (FEM), diferencias finitas en dominio del tiempo y de la frecuencia (FDTD y FDFD), etc. La mayoría de estas técnicas numéricas son aplicados al 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 palabra y C80 para música).

La aplicación de técnicas numéricas combinadas de trazado de rayos con esquemas predictivos del método de las imágenes permiten una mejora notable en los tiempos de cálculo en los modelos predictivos, por lo que la respuesta binaural que la que se produciría en un sistema bicanal como una cabeza, puede ser obtenida más rápidamente si los métodos se simplifican usando aproximaciones esféricas en vez de funciones de transferencia de cabeza/oído (HRTF) reales. [1]

Por otra parte, la aplicación de técnicas de procesado de señal binaural a los algoritmos de modelización y predicción en acústica de salas ha motivado que la mayoría de programas de simulación acústica tengan un módulo de auralización que puede funcionar a través de la tarjeta de sonido de cualquier ordenador o de otros módulos de renderización de audio (como por ejemplo, Lake Huron o SREV-1 de Yamaha, que permiten la realización del producto de convolución de la señal con la respuesta impulsiva de la sala en tiempo real). Según Mendel Kleiner, la auralización es el proceso de renderización audible, por modelado físico o matemático, el campo sonoro de una fuente en un espacio de esta manera se simula la experiencia de audición binaural en una posición dada en el espacio modelado. [1]

El proceso de auralización produce una señal espacial binaural a partir de una monoaural anecoica. Para conseguir unas buenas auralizaciones, es necesario generar unas representaciones binaurales debido al hecho que el oído humano extrae información sobre el evento sonoro y su entorno mediante la separación de efectos acústicos debidos a las colas espectrales temporales y espaciales comunes. [2]

En este estudio se han aplicado estas técnicas combinadas –trazado de rayos/fuentes imagen+procesado de señal binaural- para calcular las auralizaciones para una fuente órgano en un edificio de culto: la Basílica Menor de Sant Jaume de Algemesí (Valencia), un edificio que fue construido entre 1550 y 1582 bajo la dirección del maestro de obra Domènec Gamieta, y con la ayuda de los maestros picapedreros Joan d'Alacant y Joan Matalí.

Se trata de un edificio de planta basilical que mide 38 metros de largo por 13,70 de ancho en la nave central (20 metros contando las capillas laterales) y unos 15 metros de altura en su parte más elevada. Por lo tanto, tiene un volumen de unos 11000 m<sup>3</sup>. La planta de la iglesia tiene cinco tramos, cubiertos con arquivoltas nervadas, con capillas laterales por donde se abre. Se cierra con un ábside de forma poligonal de cinco lados y vueltas estrelladas. Junto a la cabecera se sitúan diversas estancias anejas para usos de sacristía, aula capitular y transagrario. La nave central presenta pilastras adosadas que sostienen arcos fajones y está iluminada mediante ventanas rectangulares, abiertas en las lunetas que forman el crucero de las nervaduras. Las naves laterales han sido transformadas en capillas dedicadas a los santos titulares de las cofradías locales. El edificio en sí es una mezcla de estilos renacentista y barroco valenciano.

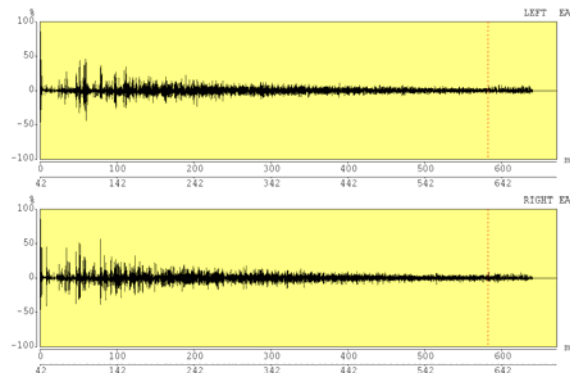
Una vez revisadas las metodologías existentes en el área de la modelización y simulación de la acústica en salas, y después de describir la sala objeto de nuestro estudio, vamos a pasar a detallar el método de procesamiento de la señal binaural que hemos aplicado en nuestro caso concreto. Por tanto, en las siguientes secciones analizaremos la metodología utilizada, describiremos los parámetros psicoacústicos estudiados sobre la señal, daremos un conjunto de resultados y una discusión y conclusión final.

## 2. Metodología

En primer lugar, partimos de la modelización geométrica y predicción de parámetros acústicos con la que realizamos el correspondiente modelo acústico y su calibrado [3]. Tras esta fase, se ha llevado a cabo un procesado mediante el módulo predictivo del software de simulación CATT Acoustics®. Este módulo permite el cálculo de los parámetros característicos de la sala, ecogramas a diferentes frecuencias, mapeados de parámetros, RASTI, además de los datos necesarios para la realización del postprocesado de la sala. Cada uno de estos valores se puede encontrar en diferentes ficheros de salida que el programa genera a la hora de realizar el procesado de la sala.

Estos ficheros de postprocesado han servido para generar la respuesta puntual impulsiva que permitirá realizar las auralizaciones. El módulo de postprocesado es el encargado de esta tarea. Los ajustes generales hacen posible el establecimiento de la longitud y la frecuencia de muestreo de la respuesta impulsiva de la muestra seleccionada. Además, permite la selección del modelo de receptor entre: omnidireccional, binaural, monoaural (seleccionando el diagrama de radiación del micrófono receptor), estéreo (ídem que el anterior), formato ambisonic o B y 5 canales, pudiendo seleccionar la directividad de cada uno de los canales.

En el caso de estudio se ha tomado la respuesta binaural utilizando un muestreo de 44'1 kHz, además como librería para usar filtros HRTF se ha seleccionado la librería que presenta CATT por defecto. Como auriculares para el cálculo de la respuesta binaural se han seleccionado unos AKG Acoustics K500. Con estos parámetros se han calculado los ficheros de respuesta impulsiva binaural (BRIR) para cada uno de los receptores de la sala.



*Figura 1: Respuesta impulsiva binaural de la sala (BRIR) para el primer receptor (R1)*

A continuación se realizó el producto de convolución de las señales impulsivas de la sala con la señal anecoica. Para la realización de las auralizaciones se ha seleccionado un pasaje de órgano con tres secciones de escala ascendentes. Estas auralizaciones fueron calculadas en los emplazamientos que se observan como puntos blancos localizados en la nave central tal y como muestran las figuras 2a y 2b.

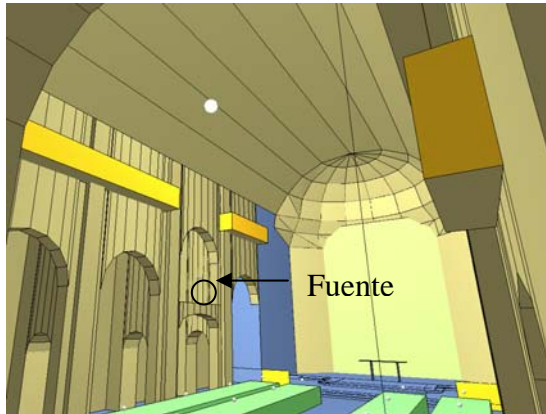


Figura 2a: Vista de la localización de la fuente

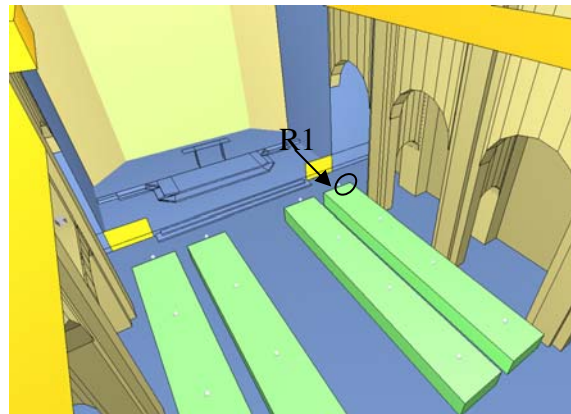


Figura 2b: Vista de la localización de los receptores

A partir del proceso anteriormente descrito se han obtenido las 24 auralizaciones correspondientes a cada uno de los 24 emplazamientos donde se hayan ubicados los correspondientes observadores.

### 3. Parámetros psicoacústicos

Con el fin de evaluar la distribución espacio-temporal de la respuesta de la sala se ha seleccionado los siguientes parámetros psicoacústicos en este análisis: *loudness*, *roughness*, *sharpness* y tonalidad.

#### 3.1. Loudness

Este parámetro es una medida de la percepción del efecto de la energía contenida de un sonido en el oído. Está relacionado con los decibelios (dB) que son una escala logarítmica usada para cuantificar la potencia de un sonido. El *loudness* percibido es dependiente del contenido en frecuencia de un sonido, de hecho se suele definir “la unidad fonio como el nivel de presión sonora de un tono de 1 kHz de una onda plana y frontal incidente” [3]. Las aplicaciones más directas suelen darse para examinar la calidad sonora en la industria del automóvil, midiendo el ruido en el interior de un vehículo, también para cuantificar la molestia de fuentes sonora industriales y de aparatos electrodomésticos. La medida de esta magnitud viene regulada por la BS ISO 226:2003. Su expresión final viene dada por:

$$N = \int_0^{24 \text{Bark}} N' dz, \text{ donde } N' \text{ es el loudness específico en sone/Bark y } z \text{ es la banda crítica.}$$

#### 3.2. Sharpness

Es una medida del contenido sonoro de alta frecuencia, cuanto mayor proporción de altas frecuencias hay, más agudo y cortante es el sonido. Este parámetro es una medida del centro de gravedad espectral. *Sharpness* puede ser una medida muy útil para evaluar la calidad de un producto que emita un sonido con contenido de alta frecuencia [3].

#### 3.3. Roughness

El *roughness* es un efecto complejo que cuantifica la percepción subjetiva de la amplitud de modulación rápida (15-300 Hz) de un sonido. Este parámetro se mide en *asper*. Un *asper* se define como el *roughness* producido por un tono de 1000Hz de 60 dB que está modulado en amplitud al 100% a 70 Hz [3]. Para un tono con una frecuencia de 1000Hz o más, el *roughness* maximal de un tono se encuentra a una frecuencia moduladora de 70Hz. Este valor se encuentra a frecuencias de modulación bajas cuando la portadora es menor de 1000Hz.

### 3.4. Tonalidad

El concepto de tonalidad se refiere a la prominencia de tonos puros contra un fondo de ruido continuo. Los sonidos tonales intensifican generalmente un sonido de impresión desagradable. Por otra parte, muestra componentes sonoras con cierta periodicidad.

## 4. Resultados y discusión

A partir de los ficheros de audio obtenidos mediante el modelo predictivo y la auralización realizada con programa CATT Acoustics®, y utilizando el software de análisis Artemis de Head Acoustics®, se han calculado los parámetros psicoacústicos anteriormente descritos. Se han estudiado las posiciones de los receptores de las columnas de bancos de oyentes 1 y 4 como posiciones extremas.

Tal y como han observado otros autores [4], en las representaciones temporales en cada uno de los parámetros *loudness*, *roughness*, *sharpness*, y tonalidad, vemos un perfil con pocas variaciones espaciales en cada canal. En la figura 3 observamos estas variaciones.

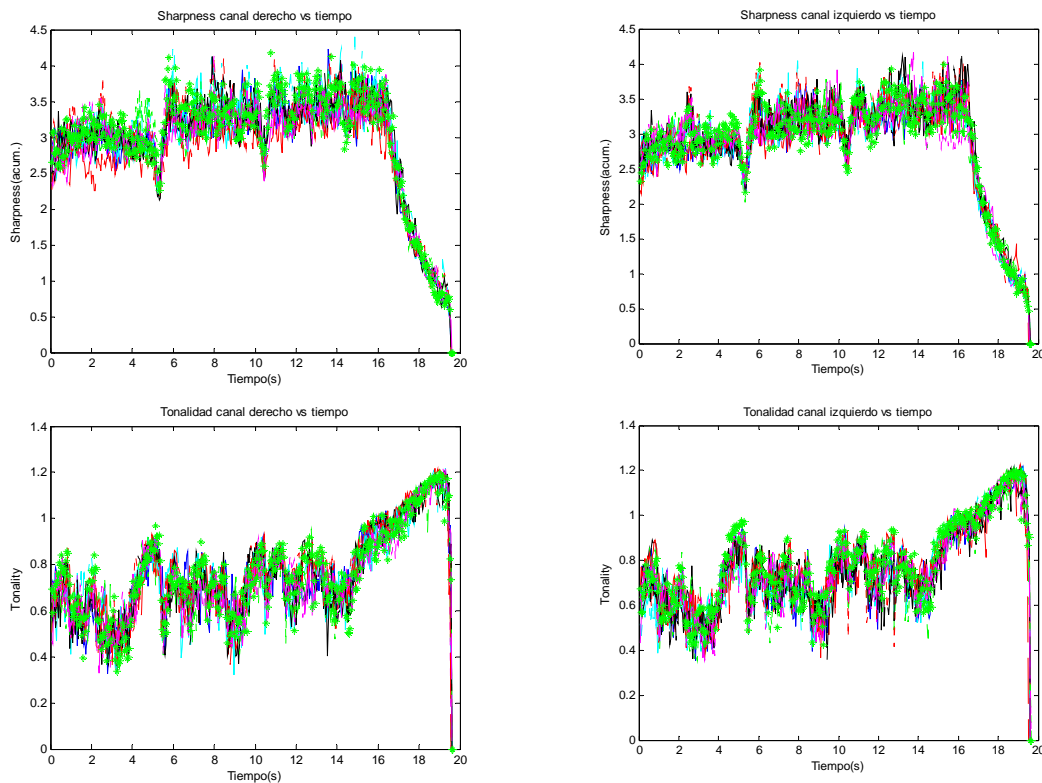


Figura 3: Representaciones de Sharpness y tonalidad en canal izquierdo y derecho

Por otra parte, la representación de los espectrogramas en intervalos de banda crítica para el *loudness* da tendencias semejantes en cada una de las posiciones estudiadas, de manera que el cálculo del *loudness* global a partir de la expresión dada en el apartado 3.1 en cada una de las posiciones da una dispersión reducida. En el caso del espectrograma del *roughness* da una tendencia semejante. La figura 4 ilustra la variación de estos parámetros en intervalos de banda crítica.

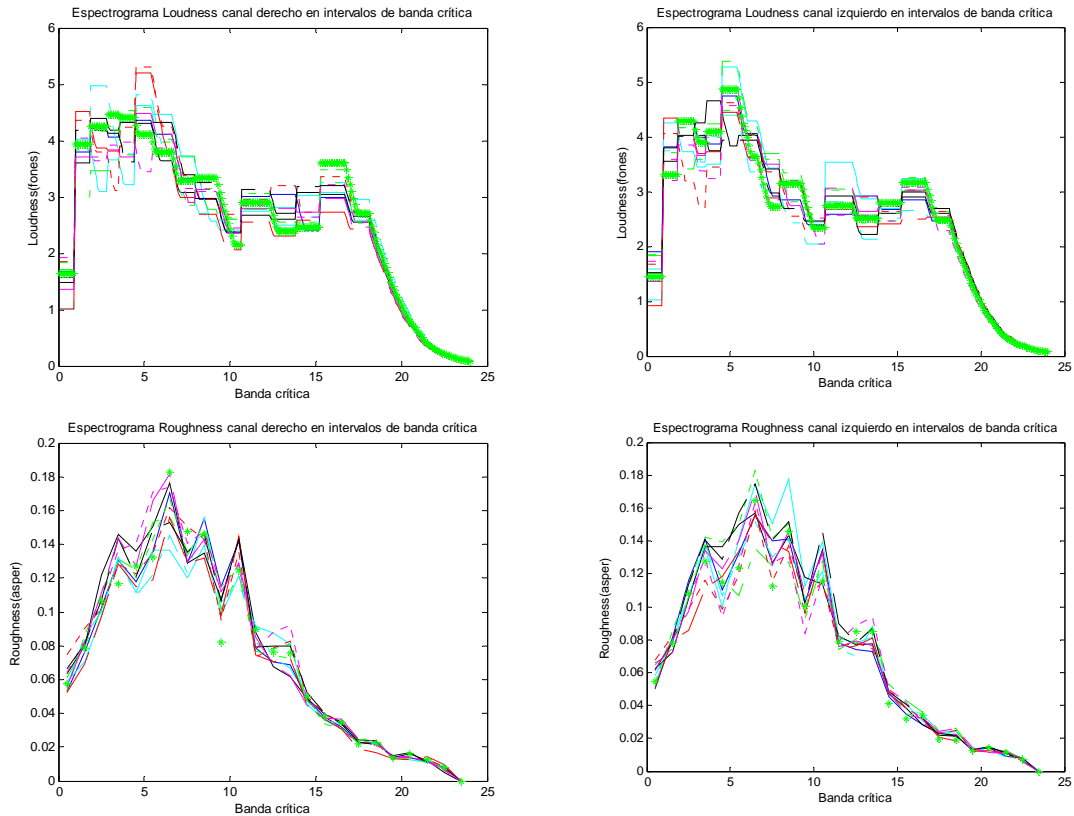


Figura 4: Representaciones de loudness y roughness en bandas críticas en los 2 canales

## 5. Conclusiones

En este estudio, a partir del modelo geométrico de la Basílica de Sant Jaume de Algemés (Valencia) se ha realizado el cálculo de las respuestas impulsivas y la auralización en diferentes posiciones, auralizaciones que han sido guardadas en ficheros de audio.

Estos ficheros de audio han sido procesados para calcular cuatro parámetros psicoacústicos que permiten describir la señal en cada emplazamiento. Estos parámetros han sido el *loudness*, *roughness*, *sharpness* y tonalidad.

A partir de los resultados obtenidos se observa una cierta constancia espacial en los parámetros psicoacústicos seleccionados tanto en tiempo como en frecuencia. Esta metodología puede ser usada para investigar cual es la ubicación óptima de una fuente como el nuevo órgano de la Basílica.

## 6. Agradecimientos

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología mediante el proyecto de investigación BIA2008-05485. Así mismo agradecemos al Rector de la Basílica de Sant Jaume de Algemés el acceso a los planos del edificio.



## 7. Bibliografía

- [1] Mendel Kleiner & al; "Auralization: An overview". Journal AES, Vol.41, No.11 (1993).
- [2] Michael Vorländer; "Auralization in acoustics". ACOUSTICS High Tatras 06 - 33rd International Acoustical Conference - EAA Symposium. Patria Hotel, Štrbské Pleso, Slovakia, October 4th - 6th, 2006
- [3] Zwicker y Fastl (1999). Psychoacoustics: Facts and models. Springer Series in Information Sciences, 22. Springer, Berlin; New York, 2nd updated edition.
- [4] Harrison JM, Thompson-Allen N.; "Constancy of loudness of pipe organ sounds at different locations in an auditorium". J Acoust Soc Am. 2000 Jul;108(1), pp 389-399
- [5] Segura J., Romero J., Navasquillo J., Giménez A., Cerdá S., Navarro E.; "Saint James' Church acoustic study for the installation of a pipe organ". Proceedings of the Institute of Acoustics. Vol. 28, Pt.2, 2006.