

## CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE LA ANTIGUA CAPILLA DE MORA DE CÁDIZ

PACS: 43.55.Gx

Daniel Espinosa<sup>1</sup>; Teófilo Zamarreño<sup>2</sup>; Sara Girón<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Cádiz, Depto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Tecnología Electrónica y Electrónica, CASEM, Campus de Puerto Real, 11500 Puerto Real, Cádiz, España, Tel. +34 956016123, Fax: +34 956016126, E-Mail: [daniel.espinosa@uca.es](mailto:daniel.espinosa@uca.es).

<sup>2</sup>Universidad de Sevilla, Depto. de Física Aplicada II, ETS Arquitectura, IUACC, Avda. Reina Mercedes 2, 41012 Sevilla, España. Tel. +34 954556612, Fax: +34 954557892, E-Mail: [teofilo@us.es](mailto:teofilo@us.es); [sgiron@us.es](mailto:sgiron@us.es).

### ABSTRACT

This paper presents the experimental results of the acoustic quality parameters measured in the chapel of the former Mora Hospital, currently the assembly room of the Economics and Business Faculty at Cádiz University. The study aims to characterize its acoustic field with view to a possible restoration suitable for the university activities performed in this enclosure. The impulse responses in the space have been obtained through sinusoidal logarithmic sweeps and modulated stationary noise signals have also been used to evaluate speech intelligibility. Finally, the spectral behaviour between 125 and 4000 Hz for each parameter and its spatial distribution are assessed.

### RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados experimentales de los parámetros de calidad acústica obtenidos en la capilla del antiguo Hospital de Mora, en la actualidad salón de grados de la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales de la Universidad de Cádiz. El estudio pretende caracterizar su campo acústico con vistas a una posible rehabilitación para su adecuación a las actividades universitarias que se desarrollan en este recinto. Se han obtenido las respuestas al impulso en el espacio mediante barridos logarítmicos sinusoidales y también se han utilizado señales estacionarias de ruido modulado para calificar la inteligibilidad de la palabra. Finalmente, se analiza el comportamiento espectral entre 125 y 4000 Hz de cada parámetro y se valora su distribución espacial.

### INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha podido constatar un creciente interés en nuestro país por la calidad acústica en la Arquitectura, de ahí el nacimiento de nuevas normativas acústicas y de figuras de evaluación que recientemente han cristalizado en la entrada en vigor del Documento Básico de Protección contra el Ruido (DB-HR) del Código Técnico de la Edificación [1]. En él se han incrementado las exigencias relativas al aislamiento acústico en los edificios y se ha incorporado como novedad la necesidad de controlar la reverberación en determinadas situaciones. En concreto, para aulas y salas de conferencias con volumen inferior a 350 m<sup>3</sup> se fijan límites de

0.5 ó 0.7 s para el tiempo de reverberación en función de que en el recinto haya o no butacas. Para volúmenes mayores se indica en el DB-HR que se requerirá un estudio específico. Cuando se trata de recintos para actividades culturales (teatros, auditorios etc.) normalmente los aspectos acústicos son valorados e incorporados en el proyecto de ejecución o remodelación. Sin embargo existen situaciones (como la que se aborda en este trabajo), en las que el recinto supera las limitaciones de volumen del DB-HR y en los que las condiciones acústicas no son debidamente consideradas, dando primacía a los aspectos formales en los procesos de rehabilitación para adecuarlas a la función a la que se va a destinar.



**Figura 1.** Ubicación de la capilla de Mora en el patio de la Facultad de Económicas de la Universidad de Cádiz (señalada con la flecha).

Partiendo de la teoría de la reverberación de Sabine, el desarrollo de parámetros objetivos correlacionados con la calidad y excelencia acústica permiten tomar decisiones de diseño y control del campo acústico al intervenir sobre el espacio. El estado del conocimiento en este sentido ha alcanzado el suficiente grado de madurez como para que todo este conjunto de parámetros, su proceso de medida y valoración estén recogidos en la UNE-EN ISO 3382 [2] (actualmente en proceso de revisión).

En el presente trabajo se caracteriza el campo acústico de la capilla del antiguo hospital de Mora, en la actualidad salón de grados de la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales (FCEE) de la Universidad de Cádiz. Las medidas se integran en un programa para analizar la posibilidad de un proyecto integral de acondicionamiento acústico del recinto para el desarrollo en su interior de actividades culturales y académicas programadas por la Universidad de Cádiz.

## RESEÑA HISTÓRICA Y DESCRIPCIÓN DEL RECINTO

Este espacio fue originalmente una pequeña Capilla dentro del edificio del antiguo Hospital de Mora, situado en la calle Duque de Nájera de la capital gaditana, en la actualidad Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. El diseño original fue obra del arquitecto Amadeo Rodríguez, plasmado en dos proyectos en 1887 y 1896 respectivamente, pero es el arquitecto gaditano Pedro Alonso Gutiérrez el que ejecuta el proyecto definitivo en 1900. En la fotografía del edificio de la Figura 1 puede verse la capilla en el patio central apantallada y protegida del ruido de tráfico por los pabellones del edificio.

Desde su inauguración como centro sanitario provincial, en 1904, ha sufrido remodelaciones interiores por los arquitectos Fernando de la Cuadra y José Luis Díez Domecq en los años cuarenta y setenta, respectivamente, del siglo pasado, pero conservando siempre su conformación. En 1990, la Diputación Provincial lo cede a la Conserjería de Educación y Ciencia de la Junta de Andalucía, que tras su adaptación como centro universitario, inicia su actividad docente en 1997 como facultad de Ciencias Económicas y Empresariales de la Universidad de Cádiz como se ha mencionado.

El volumen calculado de la iglesia es de  $1136 \text{ m}^3$  con una altura media de unos 7.5 m. La planta tiene  $161.7 \text{ m}^2$ . La audiencia se ubica en las butacas que aparecen en la nave y el crucero de la capilla (Figura 2) con un aforo de 112 personas sentadas en butacas tapizadas. En la parte anterior de la sala, sobre un estrado de tablero de partículas, se ubica la mesa de presidencia. Armarios situados en el crucero se cierran con puertas formadas a base de listones de madera separados unos 3 cm entre sí. El suelo es de mármol, los cerramientos verticales presentan zócalo de hormigón pulido de metro y medio de altura aproximadamente, seguidos de

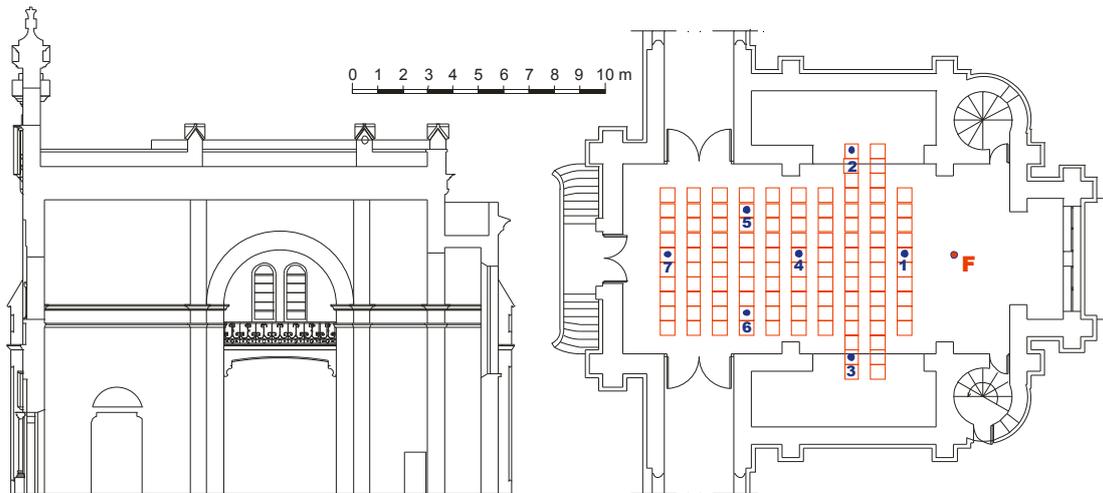


Figura 2. Sección longitudinal y planta, con puntos de recepción (numerados) y ubicación de la fuente (F).

un panel de corcho perimetral, pegado sobre la pared, de medio metro adicional. El resto de la superficie está enlucida de yeso.

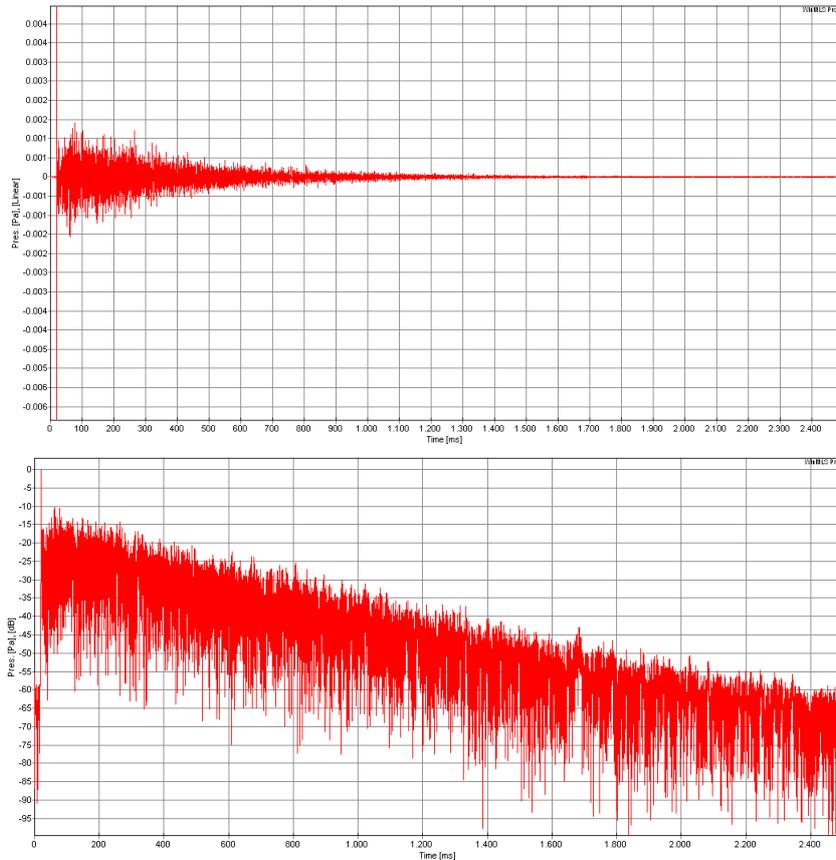
## TÉCNICA EXPERIMENTAL

Las medidas se han llevado a cabo, sin la presencia de público, siguiendo el procedimiento de la UNE-EN ISO 3382 [2]. Las condiciones ambientales se monitorizaron durante el proceso de medida, permaneciendo la temperatura entre 20.8 y 22.1 °C y la humedad relativa entre 56 y 58 %. En la Figura 2 se muestra la sección y la planta de la capilla con las posiciones de los receptores (numerados de 1 a 7) y de la fuente (F). El micrófono se situó a 1.20 m del suelo y la fuente, en el centro del estrado, a 1.6 m sobre el mismo, delante de la mesa de presidencia.

Las respuestas al impulso se han obtenido excitando la sala con señales sinusoidales de barrido logarítmico en frecuencia. El proceso de generación de la señal, registro de la respuesta y análisis de la misma se realizó mediante el sistema WinMLS 2004 [3] sobre una tarjeta de sonido Digigram VXPocket v2. La señal generada alimentaba el amplificador INTER-M 1000 para ser posteriormente reproducida por la fuente omnidireccional DO12. Se ha utilizado el micrófono omnidireccional B&K 4165, con su preamplificador B&K 2669 y fuente de polarización/amplificador OPUS de 01 dB.

A partir de las respuestas al impulso (RI) monaurales se han obtenido los siguientes parámetros acústicos, para cada frecuencia entre 125 Hz y 4000 Hz, en todas las posiciones de los receptores mostradas en la Figura 2: tiempo de reverberación ( $T_{30}$  y  $T_{20}$ ), tiempo de caída inicial ( $EDT$ ) para la evaluación de las características de la reverberación; la fuerza acústica ( $G$ ) para explorar la distribución del nivel sonoro; la claridad musical ( $C_{80}$ ), la claridad ( $C_{50}$ ) y la definición para la palabra ( $D_{50}$ ), y el tiempo central ( $T_S$ ), como parámetros basados en la energía acústica que estudian las razones energía-inicial/final o energía-inicial/total. En la Figura 3 se muestra una respuesta al impulso típica y la correspondiente curva energía-tiempo sin filtrar.

Asimismo, se ha caracterizado la inteligibilidad de la palabra a partir de la función de transferencia de modulación [4] derivando a partir de ella el índice RASTI. Para su obtención se ha utilizado el equipo B&K 3361 que emplea una señal de ruido estacionario modulado en intensidad. La emisión se ajusta a ref+10 dB lo que implica un nivel de presión sonora de 69 dB a 500 Hz y 59 dB en la banda de 2 kHz (67 dB(A)). El ensayo se ha repetido utilizando el sistema de apoyo electroacústico existente en la sala, incluyendo en la transmisión el micrófono, que se sitúa a una distancia de 50-60 cm. del emisor B&K 4225 sobre la mesa de oradores del estrado de tribuna. El procedimiento se ajusta a la norma IEC [5].



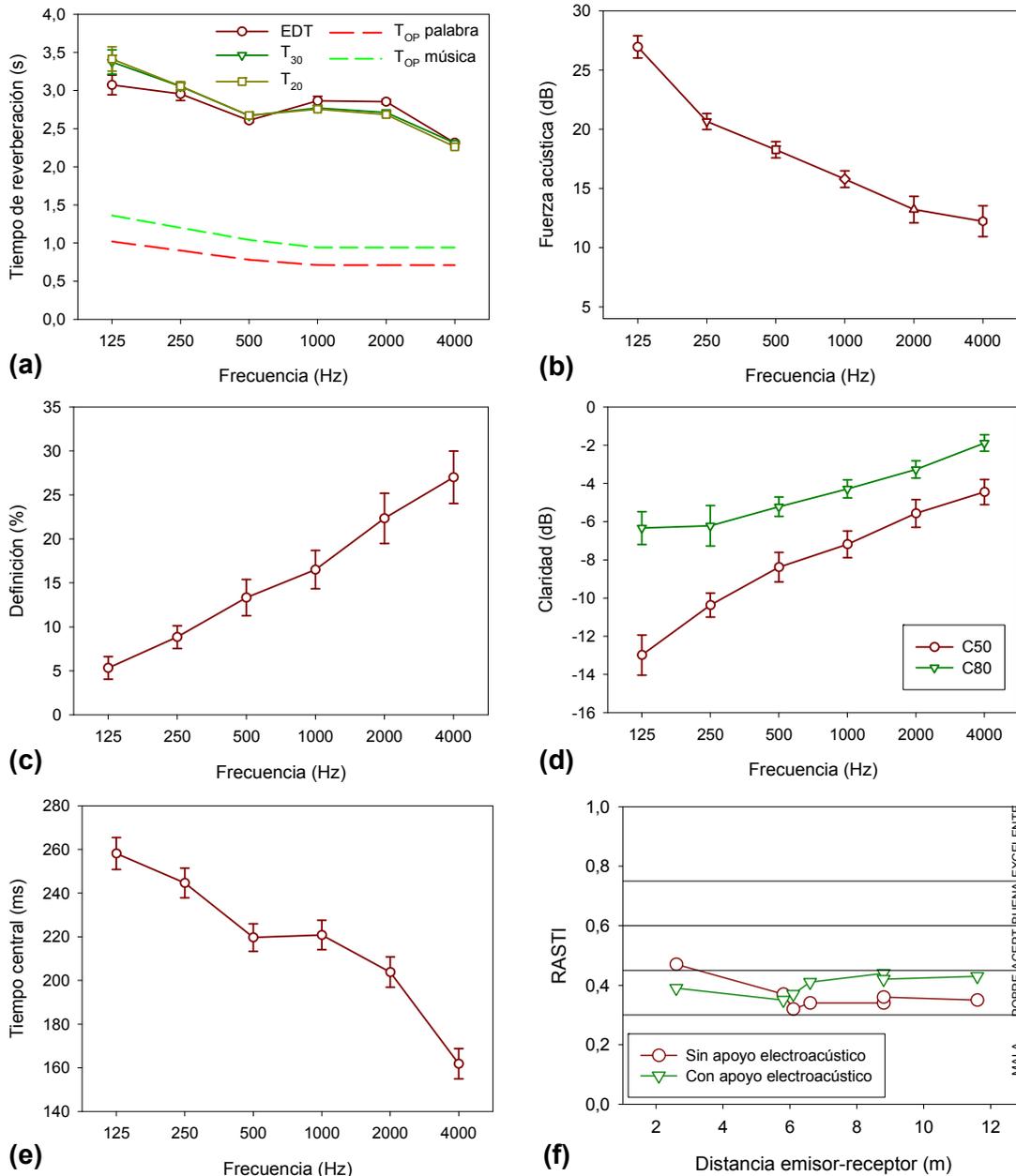
**Figura 3.** Respuesta al impulso (arriba) y curva energía-tiempo (abajo) correspondientes al receptor nº 4.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

En la Figura 4 se ha representado el comportamiento espectral y la distribución espacial, para cada banda de octava, valorada en términos del error estándar calculado para las diferentes posiciones de medida, de cada uno de los parámetros acústicos derivados de las diferentes respuestas al impulso registradas en el recinto. Para expresar estos resultados promediados espacialmente a las diferentes frecuencias se ha suprimido el punto 1 por estar situado a una distancia de la fuente inferior a la distancia mínima que sugiere la norma ISO 3382.

En el caso del tiempo de reverberación se ha incluido en la gráfica Figura 4 (a), la banda óptima determinada para dos usos: palabra sin apoyo electroacústico y música religiosa. Podemos observar que los tiempos medidos presentan un comportamiento espectral típico (valores más elevados a bajas frecuencias) y una dispersión espacial pequeña para cualquiera de los tres valores representados ( $EDT$ ,  $T_{20}$  y  $T_{30}$ ). No obstante, los valores medidos son del orden del triple de los deseables. Cualquier proceso de acondicionamiento ha de resolver en primer lugar este problema, y para ello una de las posibilidades de actuación sería disminuir el volumen efectivo del recinto al tiempo que se aumenta la absorción acústica. El dimensionado de estas soluciones se analizará en un trabajo futuro utilizando un modelo informático del espacio.

Los valores de la fuerza acústica ( $G$ ), Figura 4(b), son excesivamente altos, en congruencia con los valores demasiado grandes del tiempo de reverberación que implican elevados niveles del campo reverberante. El comportamiento espectral muestra una disminución continua que implica una diferencia de unos 10 dB entre los valores a 125 Hz y los de 4 kHz. De nuevo encontramos un comportamiento espacial muy uniforme, para todas las frecuencias.



**Figura 4.** Comportamiento espectral y distribución espacial, valorada en términos del error estándar, para los parámetros acústicos derivados de las respuestas al impulso registradas en la Capilla de Mora: (a) tiempo de reverberación, (b) fuerza acústica, (c) definición, (d) claridad y (e) tiempo central. Índice RASTI medido con y sin apoyo electroacústico en la Capilla de Mora (f).

Los valores de los parámetros definición ( $D_{50}$ ), claridad para la palabra ( $C_{50}$ ) y para la música ( $C_{80}$ ), Figuras 4(c) y (d) respectivamente, son demasiado bajos para el volumen del recinto y su comportamiento espectral es muy similar entre sí: crecen con la frecuencia. Este crecimiento es más rápido para los dos primeros. La distribución espacial es bastante homogénea para todas las frecuencias en el caso de la claridad para la palabra y para la música. En el caso de la definición, como se observa esta dispersión espacial crece también ligeramente con la frecuencia.

Los valores del tiempo central ( $T_s$ ), Figura 4(e), son excesivamente grandes (se sitúan en el límite superior del rango habitual para grandes auditorios). Su comportamiento espectral muestra una disminución típica conforme crece la frecuencia con una distribución espacial suficientemente uniforme a todas las frecuencias.

Finalmente los resultados correspondientes para el parámetro RASTI, Figura 4(f), ponen de manifiesto que los valores del mismo son bastante independientes de la distancia emisor-receptor. Además, describen que la presencia del sistema de apoyo electroacústico solo supone una ligera mejora en las posiciones más alejadas sin que se supere el rango correspondiente a la calificación “pobre” de la inteligibilidad, en ambas situaciones y para todos los receptores.

Con el fin de caracterizar globalmente el campo acústico en el interior del recinto (sobre todo tras observar una distribución espacial que es suficientemente uniforme para todos los parámetros) en la Tabla 1 se muestran los valores promediados espectralmente (500 y 1000 Hz) tal y como se sugiere en el Anexo A de la ISO/DIS 3382-1 [6] y luego espacialmente sobre las posiciones de los receptores 2 a 7 (fila *promedio*). También se han incluido los valores  $RASTI_{SAE}$  (sin apoyo electroacústico) y  $RASTI_{CAE}$  (con él). Se han obviado los valores de la posición 1 por las razones ya señaladas. En la fila *intervalo* se ha incluido un rango como objetivo a alcanzar para cada uno de los parámetros tras completar el proyecto de adecuación acústica. Podemos observar que para todos ellos, los valores actuales están excesivamente alejados del intervalo que se marca como objetivo a conseguir.

**Tabla 1.-** Valores promediados espectralmente (500 y 1000 Hz) y espacialmente e intervalo deseable, para cada parámetro, tras la remodelación.

	EDT (s)	G (dB)	D <sub>50</sub> (%)	C <sub>50</sub> (dB)	C <sub>80</sub> (dB)	T <sub>s</sub> (ms)	RASTI <sub>SAE</sub>	RASTI <sub>CAE</sub>
Promedio	2.74	17.0	14.9	-7.8	-4.8	220	0.35	0.40
Intervalo	0.9 – 1	2 – 10	35 – 80	-2 – +7	-4 – +8	80 - 150	0.45–0.75	0.60–0.80

## CONCLUSIONES

Se ha caracterizado el campo acústico en el interior de la Capilla de Mora, actualmente usada como Salón de Grados de la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales de la Universidad de Cádiz. Para ello se han obtenido los principales parámetros acústicos derivados de las respuestas al impulso monoaurales. Los valores de estos parámetros caracterizan el comportamiento espectral y la distribución espacial del campo sonoro. Se ha puesto de manifiesto que la distribución espacial es uniforme en toda la zona de audiencia, aunque los valores de los mismos están lejos de los valores que serían deseables. Los valores promediados espectralmente y espacialmente nos permiten poner de manifiesto hasta qué punto es necesario acometer un proyecto de rehabilitación acústica del recinto para adecuarlo a las actividades culturales y académicas que él se desarrollan. El proceso de diseño y evaluación de esta posible intervención se está desarrollando en estos momentos utilizando modelos informáticos basados en las técnicas de raytracing.

## REFERENCIAS

- [1] Documento Básico de Protección frente al Ruido (DB-HR) del Código Técnico de la Edificación (CTE) (<http://www.codigotecnico.org/index.php?id=632>).
- [2] UNE-EN ISO 3382: Medición del tiempo de reverberación de recintos con referencia a otros parámetros acústicos, (2000).
- [3] WinMLS 2004. Reference Documentation. Morset Sound Development.
- [4] Hougast T., Steeneken H.J.M. “A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria,” J. Acoust. Soc. Am. **77**(3), 1069-1077 (1985).
- [5] IEC 60268-16. Sound system equipment, Part 16: objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. International Electrotechnical Commission. Geneva, Switzerland, (2003).
- [6] ISO/DIS 3382-1: Measurements of room acoustic parameters. Part 1: Performance rooms, International Electrotechnical Commission. Geneva, Switzerland, (2006).