



REVISIÓN DE LA ACÚSTICA DE SALAS: DESDE LAS MEDIDAS OBJETIVAS A LA VIRTUALIZACIÓN Y EVALUACIÓN SUBJETIVA

Reference PACS: 43.55.Gx, 43.55.Ka

Grupo de Acústica de la UPV-UVEG: Giménez, A.¹; Cibrián, R.²; Segura, J.²; Cerdá, S.¹; Barba, A.¹; Montell, R.¹; Lacatis, R.¹; Romero, J.¹; Miralles, J.L.²; Fernández, M.²; Navasquillo, J.²

¹ Univ. Politécnica de Valencia (UPV), Camino de Vera s/n, Valencia, SPAIN agimenez@fis.upv.es, salcerjo@mat.upv.es, arturo@arturobarba.com, radmonse@upvnet.es, rala1@doctor.upv.es, romerof@fus.upv.es

² Universitat de València, Polígon de la Coma s/n, Valencia, SPAIN rosa.m.cibrian@uv.es, jsegura@uv.es, Joaquin.Navasquillo@uv.es, Jose.L.Miralles@uv.es, mfmartin@uv.es

ABSTRACT

Virtual acoustics, which comprise the 3D modelling of a room for its visual simulation as well as the auralization of the acoustic signals from each point of interest, offer a highly appropriate tool for addressing a good number of challenges in room acoustics, such as subjective evaluation or the search for the most representative parameters of sound quality. Besides, they provide the possibility of preserving the musical heritage found in works such as the Elche Mystery Play and researching the changes in the acoustic characteristics of patrimonial buildings caused by renovations made throughout their history.

RESUMEN

La acústica virtual, integrada por la modelización en 3D de la sala para una simulación visual de la misma y la auralización de la señal acústica para cada punto de interés, ofrece, por un lado, una herramienta de trabajo sumamente adecuada para abordar diversos problemas de la acústica de salas, como la valoración subjetiva de las mismas o la búsqueda de los parámetros más representativos de su calidad sonora. Por otro lado, ofrece la posibilidad de conservación del patrimonio cultural musical tanto de obras como el Misteri d'Elx o la investigación de las modificaciones de las características acústicas de edificios patrimoniales debido a las remodelaciones realizadas a lo largo de su historia.

CONFERENCIA

La acústica virtual, integrada por la reconstrucción en 3D de la sala para la simulación visual y la auralización de la señal acústica, ofrece una herramienta de trabajo sumamente potente para abordar diversos problemas de la acústica de recintos y cuyo estudio en salas reales resulta mucho más dificultoso, e incluso en ocasiones imposible, ya que, la realidad virtual acústica permite disponer de un entorno controlado y una percepción sonora totalmente repetible.

Mendel Kleiner [1] define la auralización como el proceso de reproducción audible, mediante el modelado físico o matemático del campo sonoro de una fuente en un espacio, de manera que se simule la experiencia binaural auditiva en una posición dada en el espacio modelado. Las auralizaciones de muchos puntos del espacio, permite que el oyente pueda interactuar con el campo sonoro pudiendo realizar movimientos tanto de la cabeza como desplazamientos conservando el mismo entorno acústico. Si esto se complementa con una percepción visual en

3D del correspondiente espacio arquitectónico se consigue integrar las dos percepciones, la visión y la audición, que se tienen en las salas reales.

En general, el cálculo de la respuesta impulsiva de la sala en un determinado lugar, como base para la auralización, se realiza a partir de la conversión de ecogramas en respuestas impulsivas binaurales, las cuales son convolucionadas con música o sonidos anecoicamente registrados. Con ello se consigue una impresión de cómo la música o el habla sonaría si fuese reproducida en la sala modelada. El proceso conlleva el procesado digital de la señal con las funciones de transferencia de la cabeza (HRTF) y la convolución o filtrado de la señal impulsiva con el material anecoico. Este procesado se puede realizar directamente mediante software o hardware específico.

Estas posibilidades son las que llevaron a nuestro grupo de investigación a trabajar en este campo, para complementar, como dice Bradley en su último artículo [2] el "*reasonable general understanding of many important aspects of concert hall acoustics issues*", (el razonable conocimiento que en la actualidad tenemos de los aspectos importantes de las salas de conciertos).

Desde hace ya ocho años, momento en el que empezamos a formar un grupo dedicado a la acústica de salas, gracias al proyecto **BIA2003-09306-C04-01 ESTABLECIMIENTO DE PARAMETROS ACUSTICOS DETERMINANTES DE LA CALIDAD PERCIBIDA EN SALAS DE CONCIERTO Y AUDITORIOS. PROPUESTA PARA SU APLICACION EN PROYECTOS DE NUEVA PLANTA O REHABILITACION**, que ha tenido su continuidad con el proyecto **BIA2008-05485 ESTUDIO DE PARÁMETROS OBJETIVOS Y SUBJETIVOS EVALUADORES DE LA CALIDAD ACÚSTICA PERCIBIDA EN SALAS, AUDITORIOS Y EDIFICIOS DEL PATRIMONIO HISTÓRICO-ARTÍSTICO. VALIDACIÓN DE UN PROPOCOLO DE CALIDAD ACÚSTICA MEDIANTE ENTORNOS VIRTUALES, PARA SU APLICACION EN PROYECTOS DE NUEVA PLANTA Y/O REHABILITACION**, estamos dedicados a obtener ese razonable conocimiento de los aspectos importantes de las salas de conciertos mediante el estudio directo de las salas y edificios patrimoniales a los que teníamos acceso.

Hemos dedicado un notable esfuerzo en la obtención de las respuestas impulsivas y de las valoraciones subjetivas de las salas estudiadas, buscado respuesta a dos objetivos básicos:

- El primero está relacionado con los valores o intervalo de valores de los parámetros objetivos medidos en las salas y que se consideran óptimos para la percepción musical. Se deseaba comprobar si el gusto musical español determinaría esos mismos valores o intervalos, aceptados internacionalmente, pero para cuya determinación no se había realizado ningún estudio en España.
- El segundo objetivo planteado buscaba la posibilidad de una minimización del número de parámetros necesarios para valorar la calidad acústica de las salas.

Para abordar el primer objetivo era necesario realizar un amplio estudio en el territorio español y para ello se unieron 4 grupos de investigación de 4 Universidades públicas, Barcelona, Navarra, Sevilla y Valencia, con lo que pudo analizarse un amplio número de salas de nuestro país y proceder a su valoración tanto objetiva con la medida de los parámetros acústicos en un gran número de puntos de la sala, como subjetiva mediante el análisis estadístico de la opinión del público asistente a los conciertos a través de la respuesta de un test de valoración subjetiva de las salas.

Esta encuesta fue estructurada con la colaboración de psicólogos y músicos del Conservatorio para dotarla de la comprensión necesaria del término a evaluar para el público general, pero que contuviese toda la información necesaria para la contrastación con los parámetros objetivos medidos. Además del público, esta encuesta de valoración era respondida en cada ocasión por un grupo de expertos en música, adiestrados en la comprensión de los términos acústicos implicados en ella, cuyas respuestas representaban una referencia respecto a la del público en general.

Con estas consideraciones se valoraron 20 salas en distintas provincias correspondientes a 5 comunidades autónomas, que representan el 30.6% del país y cubren aproximadamente la mitad de la población española (49.9%). Se han procesado más de 1700 encuestas correspondientes a 26 conciertos interpretados en dichas sala, que cubren un amplio espectro de estilos musicales [3].

Los resultados de este estudio han mostrado (Fig. 1) que en general la respuesta del público asistente a los conciertos era similar a la que ofrecían los expertos en música, si bien con una diferencia promedio en cada ítem de 0,5 puntos, lo que representa una variación del 10% entre la valoración de estos dos tipos de oyentes, siendo más exigentes los expertos.

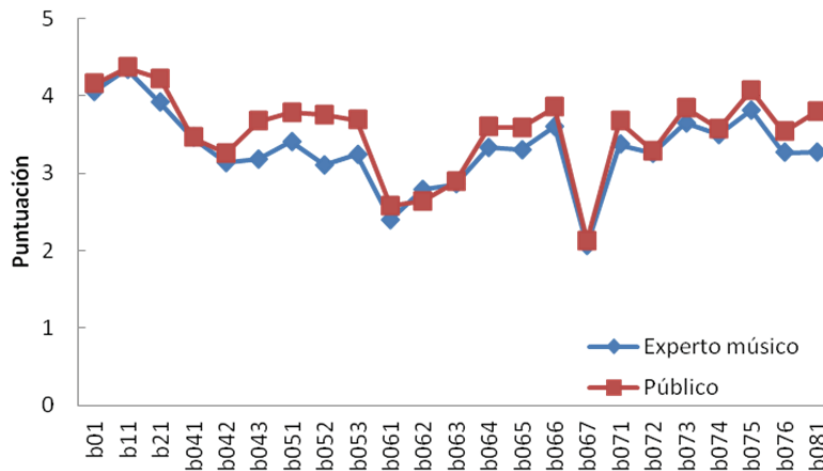


Figura 1. Puntuaciones medias de las preguntas de la encuesta para el público y los expertos en música

También pudimos comprobar que no existía diferencia significativa entre las valoraciones de las salas en función de la comunidad autónoma (Fig.2) y que era posible calificar la sala a partir de los ítems de la encuesta pudiendo realizar un ranking de salas a partir de la valoración subjetiva (Fig.3).

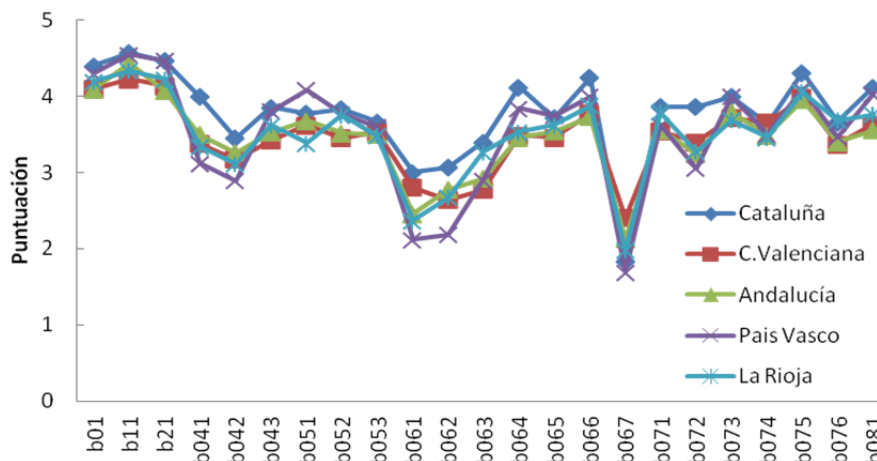


Figura 2. Puntuaciones medias de las preguntas de la encuesta para expertos en música en distintas comunidades autónomas.

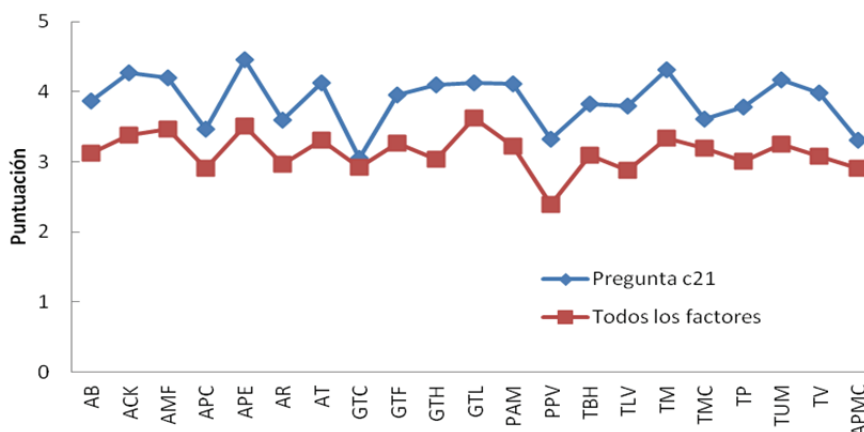


Figura 3. Valoraciones de las salas según la pregunta de calificación de sala de la encuesta o mediante los factores de valoración subjetiva

Los ítems de la encuesta se trataron estadísticamente mediante reducción de factores y se obtuvo una agrupación en 9 factores con significado perceptivo:

- F1: Agradabilidad del sonido en la sala
- F2: Percepción y discriminación de instrumentos
- F3: Percepción de la orquesta en su conjunto
- F4: Aspectos generales de la Sala
- F5: Comodidad de la Sala
- F6: Discriminación perceptiva global
- F7: Desgradabilidad del sonido en la sala
- F8: Predominio del sonido grave o agudo y direccionalidad
- F9: Espacialidad de la sala

El primer factor mostraba ya una muy buena valoración de la calidad acústica de la sala. (Fig 4).

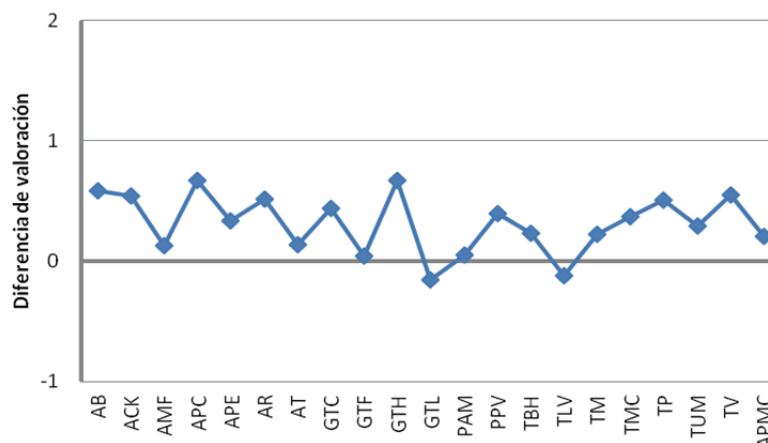


Figura 4. Diferencia entre la valoración media de las sala considerando todos los factores o sólo el factor F1 de la encuesta.

La posibilidad de realizar un ranking de salas a través de la valoración subjetiva permitiría comprobar el objetivo propuesto de conocer los valores de los parámetros objetivos de las salas consideradas como muy buenas para el oyente español. Ahora bien con esta metodología ya estructurada tenemos previsto extender el estudio al resto de comunidades autónomas para poder afirmar cuales son las exigencias de audición musical para el oyente español.

No obstante, consideramos que había aspectos en este estudio que necesitaban ser contrastados y para los cuales la acústica virtual podría aportar la solución:

1.- Comprobar la reproducibilidad de las respuestas del test de valoración subjetiva para un mismo punto de la sala y una misma pieza musical, tanto en el caso del mismo oyente en dos momentos distintos, como entre distintos expertos [4]. Este estudio sí que es posible realizarlo en un sistema de realidad virtual inmersiva como el que permite el C.A.V.E. (Cave Automatic Virtual Environment) o la Powerwall con la visualización de la sala desde puntos concretos de la misma y las correspondientes auralizaciones, ya que las condiciones de la audición pueden reproducirse de forma idéntica todas las veces que sea necesario (Fig 5).

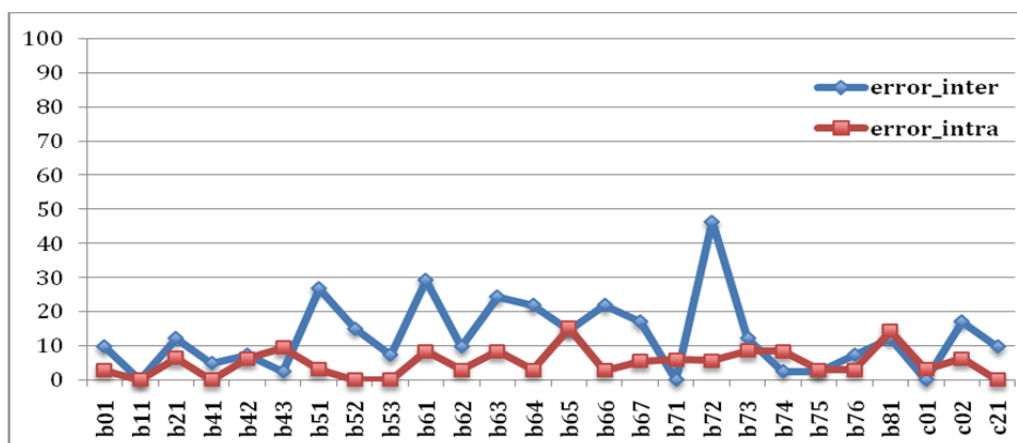


Figura 5. Error intraobservador e interobservador en la respuesta de la encuesta de valoración subjetiva, obtenida mediante reproducción en entorno virtual CAVE.

2.- Comprobar la variación de sensación acústica en diferentes puntos de la sala y con distintos estilos musicales. Este estudio es difícilmente abordable en salas reales durante la audición de un concierto, por la imposibilidad de:

- recoger suficiente número de encuestas para cada zona para que tengan significación los resultados obtenidos, e
- influir en la programación musical de la sala para disponer de distintos estilos a valorar.

En este sentido, la conferencia del Prof. Lokki "RECORDING AND REPRODUCING CONCERT HALL ACOUSTICS FOR SUBJECTIVE EVALUATION" mostrará las características del registro del sonido en las salas de conciertos para su posterior reproducción en un entorno controlado y que permita una valoración subjetiva de la sala.

Respecto al segundo objetivo, encontrar un conjunto mínimo de parámetros acústicos, la literatura especializada y las distintas escuelas ofrecen un gran número de parámetros distintos [5] para esta valoración y aunque el problema es ciertamente complejo dada la componente perceptiva del fenómeno de la audición musical, que se entronca en la psicofísica, parece que, como en otras parcelas de la física sería de interés encontrar un número reducido de parámetros que permitiesen dicha valoración.

A lo largo de la historia de la física podemos observar este deseo de minimizar el número de leyes o parámetros necesarios para explicar los fenómenos, así la dinámica se consiguió explicar con sólo 3 leyes fundamentales, los fenómenos eléctricos y magnéticos con las 4 ecuaciones de Maxwell e incluso las más de 200 partículas elementales que en los años 50 y 60 debían considerarse para explicar las interacciones y reacciones nucleares, actualmente están reducidas a sólo 6. Esta minimización de factores no sólo permite teorías más elegantes sino también simplificar las directrices de trabajo.

Un primer intento para la citada simplificación es la clasificación de estos parámetros en función del tipo de información que aportan, así se pueden considerar: energéticos, temporales

y espaciales, lo que ayuda a buscar relaciones entre ellos y numerosos investigadores y escuelas han propuesto su relación de parámetros independientes pero no existe una aceptación unánime por parte de la comunidad científica [5, 6].

Nuestro enfoque para abordar este problema ha sido un acercamiento estadístico, para ello, de todos los parámetros existentes nos hemos centrado en los 14 que se indican en la tabla por ser los mayoritariamente utilizados por los profesionales e investigadores en acústica de salas y a partir de los cuales buscamos la simplificación.

Parametro	Formulas
Reverberation Time (TR ₃₀):	$TR_{mid} = \frac{1}{2}(TR^{500\text{ Hz}} + TR^{1\text{ kHz}})$
Bass Ratio	$BR = \frac{TR^{125\text{ Hz}} + TR^{250\text{ Hz}}}{TR^{500\text{ Hz}} + TR^{1\text{ kHz}}}$
Brilliance:	$Br = \frac{TR^{2\text{ kHz}} + TR^{4\text{ kHz}}}{TR^{500\text{ Hz}} + TR^{1\text{ kHz}}}$
Early Decay Time	$EDT_{mid} = \frac{1}{2}(EDT^{500\text{ Hz}} + EDT^{1\text{ kHz}})$
Initial Time Delay Gap	ITDG
Center Time:	$T_C = T_{C1\text{ kHz}}$
Music Clarity:	$C_{80} = \frac{1}{3}(C_{80}^{500\text{ Hz}} + C_{80}^{1\text{ kHz}} + C_{80}^{2\text{ kHz}})$
Speech Clarity:	$C_{50} = 0.15 \cdot C_{50}^{500\text{ Hz}} + 0.25 \cdot C_{50}^{1\text{ kHz}} + 0.35 \cdot C_{50}^{2\text{ kHz}} + 0.25 \cdot C_{50}^{4\text{ kHz}}$
Speech Parameters	STI, RASTI, %Alcons
Strenght:	$G_{mid} = \frac{1}{2}(G^{500\text{ Hz}} + G^{1\text{ kHz}})$
Lateral Strenght;	$LG_{E4} = \frac{1}{4}(LG_E^{125\text{ Hz}} + LG_E^{250\text{ Hz}} + LG_E^{500\text{ Hz}} + LG_E^{1000\text{ Hz}})$
Lateral Efficiency:	$\begin{cases} LF_4 = \frac{1}{4}(LF^{125\text{ Hz}} + LF^{250\text{ Hz}} + LF^{500\text{ Hz}} + LF^{1\text{ kHz}}) \\ LFC_4 = \frac{1}{4}(LFC^{125\text{ Hz}} + LFC^{250\text{ Hz}} + LFC^{500\text{ Hz}} + LFC^{1\text{ kHz}}) \end{cases}$
Interaural Cross Correlation (Early):	$IACC_{E3} = \frac{1}{3}(IACC_E^{500\text{ Hz}} + IACC_E^{1\text{ kHz}} + IACC_E^{2\text{ kHz}})$
Interaural Cross Correlation (Late):	$IACC_{L3} = \frac{1}{3}(IACC_L^{500\text{ Hz}} + IACC_L^{1000\text{ Hz}} + IACC_L^{2000\text{ Hz}})$

Hemos medido, hasta este momento, estos parámetros acústicos en 17 salas de distintas tipologías de la Comunidad Valenciana y en 5 edificios patrimoniales:

- Basílica de Sant Jaume de Algemesí. Valencia
- Basílica de Santa María de Elche. Alicante.
- Catedral Metropolitana de Valencia.
- Capilla del Santo Cáliz. Valencia
- Lonja de los Mercaderes. Valencia

Desde un principio se consideró crucial en nuestras investigaciones seguir la norma ISO-3382 [7,8], que marca las directrices de toma de datos. No obstante además de los puntos

implicados en estas normativas, nuestro grupo consideró adecuado aumentar el número de puntos de muestreo, en cada una de las salas, cubriendo todos los lugares que ocupa la audiencia. Esto ha sido uno de los puntos clave de nuestro trabajo pues, aunque por un lado ha supuesto una dedicación considerable de tiempo, gracias al gran número de medidas con las que contamos hemos podido realizar estudios estadísticos fiables para abordar este intento de reducción de factores y además nos permite estar en condiciones de crear modelos virtuales muy ajustados a la realidad.

El primer planteamiento que realizamos para la simplificación de factores fue el estudio de las relaciones estadísticas entre los parámetros seleccionados, cuyas correlaciones se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Correlaciones entre los parámetros acústicos

Parámetro	ITDG	LF _{e4}	LF _{Ce4}	LF _{e3}	G125	G _{mid}	LGe4	RT _{mid}	EDT _{mid}	C50 _{avg}	C80 _{avg}	Ts1kHz	STI	RASTI	IACC _{e3}
LF _{Ce4}		0,92													
LF _{e3}		0,92	0,83												
G _{mid}					0,56										
LGe4						0,80									
RT _{mid}	0,58														
EDT _{mid}	0,58							0,98							
C50 _{avg}	-0,59						-0,52	-0,88	-0,86						
C80 _{avg}	-0,59						-0,51	-0,93	-0,93	0,97					
Ts1kHz	0,62							0,97	0,97	-0,93	-0,95				
STI	-0,58							-0,92	-0,92	0,96	0,98	-0,93			
RASTI	-0,56							-0,92	-0,91	0,96	0,98	-0,93	0,99		
ALcons	0,65							0,94	0,95	-0,93	-0,95	0,98	-0,95	-0,93	
IACC _{e3}		-0,55	-0,68	-0,55											
Brilliance								-0,57	-0,54		0,55		0,55	0,55	
IACC _{a3}															0,51

Dado que en principio la definición de los parámetros se realiza para que midan características diferentes de las respuestas impulsivas de las salas, no se espera de antemano que exista una expresión que relacione unos con otros, pero al obtener estas correlaciones, parece posible reducir el número de parámetros mínimos y buscar un modelo teórico de análisis del campo acústico que se ajuste a los datos obtenidos de las respuestas impulsivas de las salas y que permita predecir, en mayor o menor medida, dichas correlaciones.

Como hemos comentado anteriormente hemos realizado un acercamiento estadístico al problema buscando un conjunto de parámetros independientes y ortogonales que permitan clasificar las salas y además si es posible generar a partir de ellos los parámetros antes citados.

Hemos aplicado un análisis factorial sobre los valores obtenidos de los parámetros acústicos, inicialmente con 9 salas [9] y posteriormente ampliado a 17 salas de la comunidad Valenciana [10] y con un 78% de la varianza explicada, la tabla que se muestra a continuación presenta el resultado del análisis factorial obtenido. Como puede observarse (Tabla 2) aparecen tres factores que hemos interpretado de la siguiente manera:

- Factor 1: incluye los parámetros de reverberación, claridad e inteligibilidad.
- Factor 2: incluye los parámetros de espacialidad
- Factor 3: incluye los parámetros de fuerza

Tabla 2: Agrupación de parámetros acústicos en 3 factores de acuerdo con el método de reducción de variables (análisis de factores) con rotación varimax. Están marcados en negrita los parámetros integrados en cada factor, con su correspondiente coeficiente de correlación.

Parameter	F1	F2	F3
ITDG	-0,621	-0,085	0,027
LFe4	0,04	0,909	0,175
LFCe4	0,009	0,944	0,144
LFe3*	0,025	0,89	0,141
G125*	0,006	0,035	0,805
Gmid	-0,139	0,022	0,868
LGe4*	-0,498	0,33	0,683
RTmid	-0,936	-0,132	0,108
EDTmid	-0,916	-0,202	0,1
C50avg	0,896	-0,246	-0,134
C80avg	0,966	-0,064	-0,08
TslkHz	-0,946	-0,012	0,228
STI	0,96	-0,095	0,026
RASTI	0,961	-0,079	-0,039
ALcons	-0,956	0,02	0,097
IACCe3	0,114	-0,771	-0,045
IACCL3*	0,46	-0,138	0,064
BR	0,053	-0,238	-0,692
Brilliance	0,548	0,24	0,488

Para caracterizar cada Factor por un único parámetro, con el cual están relacionados los restantes, hemos seleccionado para el Factor 1 el RTmid, por su evidente importancia, para el Factor 2 el LFCe4, pues además de sus propiedades, es el que muestra mayor peso en el factor y en el caso del Factor 3, aunque Gmid es el parámetro con mayor peso, al observar la variación del este Factor 3 con la distancia nos hizo estudiarlo con mayor detenimiento y como resultado obtuvimos que si calculamos el LEV siguiendo el procedimiento que se presenta en Beranek [11], es decir:

$$LEV = 0.5 \cdot G_{late} + 10 \log(1 - IACC_L)$$

El Factor 3 correlaciona altamente con LEV.

Como conclusión pues a nuestras investigaciones hemos obtenido que existe evidencia estadística de que los 14 parámetros estudiados se reducen a los tres siguientes:

- RTmid
- LFCe4
- LEV

reduciéndose a esta terna el conjunto de parámetros ortogonales que buscábamos inicialmente.

Actualmente estamos trabajando en una generalización del modelo de Ando de preferencia subjetiva que estamos comprobando en el conjunto de todas las salas españolas de las que disponemos de medidas de los parámetros acústicos, para su validación y posterior comparación con las respuestas subjetivas.

El modelo de Ando consiste en encontrar una función:

$$S = \sum_{i=1}^N S_i$$

En la que $S_i = g(x_i) = -a_i |x_i|^{\frac{3}{2}}$ son funciones que permiten determinar la preferencia subjetiva para cada parámetro objetivo x_i , seleccionado. Los parámetros que Beranek selecciona siguiendo el modelo de Ando son:

- | | |
|---|--|
| 1. $x_1 = \text{IACC}_{E3}$ | $a_1 = 1.45$ |
| 2. $x_2 = \log[\text{ITDG}/\text{ITDG}_{\text{pref}}]$ | $a_2 = 1.42$ si $x_2 \geq 0$
$= 1.11$ si $x_2 \leq 0$ |
| 3. $x_3 = G_{\text{mid}} - (G_{\text{mid}})_{\text{pref}} \text{ dB}$ | $a_3 = 0.04$ si $G_{\text{mid}} < 4.0$
$= 0.07$ si $G_{\text{mid}} > 5.5$ |
| 4. $x_4 = \log[\text{EDT}/\text{EDT}_{\text{pref}}]$ | $a_4 = 9$ si $\text{EDT} < 2.0$
$= 12$ si $\text{EDT} > 2.3$ |
| 5. $x_5 = \log[\text{BR}/\text{BR}_{\text{pref}}]$ | $a_5 = 10$ si $\text{RT} > 2.2 \text{ sec.}$ |

Y los valores “preferidos” son:

- $\text{ITDG}_{\text{pref}} \leq 20 \text{ ms.}$
- $(G_{\text{mid}})_{\text{pref}} \in [4.0, 5.5]$
- $\text{EDT}_{\text{pref}} \in [2.0, 2.3]$
- $\text{BR}_{\text{pref}} [1.1, 1.25]$ si $\text{RT} > 2.2$
- $\text{BR}_{\text{pref}} [1.1, 1.45]$ si $\text{RT} < 1.8$.
- Interpolado para RT en (1.8, 2.2).

La idea con la que hemos trabajado ha sido la siguiente. Si estadísticamente existe la posibilidad de reducir los parámetros objetivos a tres factores ortogonales, ¿podemos encontrar una combinación lineal de ellos que correlacione con el modelo de Ando? La respuesta inmediata es que la correlación no es muy buena.

Sin embargo, nuestro planteamiento consistió en definir un modelo de Ando-Beranek en el que se incluían pesos en las funciones Si. De esta forma el modelo de Ando-Beranek viene dado por una expresión del tipo:

$$S = \sum_{i=1}^N \alpha_i S_i$$

Y nos planteamos obtener la combinación de RTmid, LFCe4 y LEV que mejor correlaciona con esa nueva función. En la siguiente tabla mostramos los resultados obtenidos con las correspondientes combinaciones [12]

Tabla 3: Soluciones óptimas

$0.67 \cdot S_1 + 0.33 \cdot S_4 = -1.04 + 0.37 \cdot RT_{mid}$	$r = 0.53$
$0.83 \cdot S_1 + 0.17 \cdot S_2 = -0.61 + 1.45 \cdot LFC_{E4}$	$r = 0.58$
$0.71 \cdot S_2 + 0.145 \cdot S_3 + 0.145 \cdot S_5 = -0.12 - 0.061 \cdot LEV$	$r = 0.88$
$0.2 \cdot S_3 + 0.8 \cdot S_4 = -0.11 + 0.95 \cdot RT_{mid} - 8.78 \cdot LFC_{E4}$	$r = 0.65$
$0.45 \cdot S_3 + 0.09 \cdot S_4 + 0.45 \cdot S_5 = -1.22 + 0.55 \cdot RT_{mid} - 0.22 \cdot LEV$	$r = 0.95$
$0.71 \cdot S_2 + 0.14 \cdot S_3 + 0.14 \cdot S_5 = -0.3 + 0.73 \cdot LFC_{E4} - 0.07 \cdot LEV$	$r = 0.89$
$0.29 \cdot S_2 + 0.36 \cdot S_3 + 0.36 \cdot S_5 = -1.49 + 0.36 \cdot RT_{mid} + 2.76 \cdot LFC_{E4} - 0.19 \cdot LEV$	$r = 0.97$

Cabe destacar la última combinación, que con una correlación muy elevada (0.97), nos permite obtener una combinación lineal de los tres parámetros ortogonales que correlaciona con una combinación lineal de las funciones de Ando S2, S3 y S5 (relacionados con ITDG, G y BR respectivamente).

También en este objetivo la acústica virtual puede permitirnos analizar un mayor número de salas y comprobar la efectividad de este grupo de parámetros y este modelo para la calificación de las salas, si bien como veremos en la conferencia del Prof Arana "PREDICTIONS vs. MEASUREMENTS IN ROOM ACOUSTICS: A DIFFICULT ADJUSTMENT", este va a ser siempre un elemento en continua revisión.

Además de estos retos la acústica virtual ofrece una gran aplicabilidad en un país como España con una gran cantidad de edificios patrimoniales de gran interés cultural. La conferencia del Prof. Zamarreño sobre "Simulación Acústica y Virtualización en Recintos de Culto" muestra las posibilidades en este campo en las hermosas iglesias sevillanas.

En nuestro caso, hemos utilizado esta herramienta tanto para realizar la simulación en 3D y la correspondiente auralización de edificios de gran interés histórico como la capilla del Santo Cáliz de la Catedral de Valencia y el edificio de la Lonja de los Mercaderes o de la Seda, patrimonio de la Humanidad desde 1996, como para conocer cómo sería la percepción acústica en el pasado, en edificios como el Teatro Principal de Valencia con reformas o cambios arquitectónicos a lo largo de su historia. Otros de los retos que tenemos propuestos en este campo es la simulación de la Basílica de Santa María y la auralización del Misteri d'Elx, proclamada Obra maestra del Patrimonio Oral e Inmaterial de la Humanidad por la UNESCO desde 2001.

Ahora bien, la simulación visual y acústica de salas de conciertos o de edificios del patrimonio conlleva la dificultad asociada a cualquier tipo de modelización. Precisamente la conferencia del Prof. Vorländer "MODELS AND ALGORITHMS FOR COMPUTER SIMULATIONS IN ROOM ACOUSTICS" mostrará la problemática asociada a este respecto.

En nuestra experiencia, tras la selección de los edificios de interés y la toma de medidas acústicas objetivas en un amplio número de localizaciones y con diversos emplazamientos de la fuente, el trabajo realizado queda esquematizado en la figura 6.

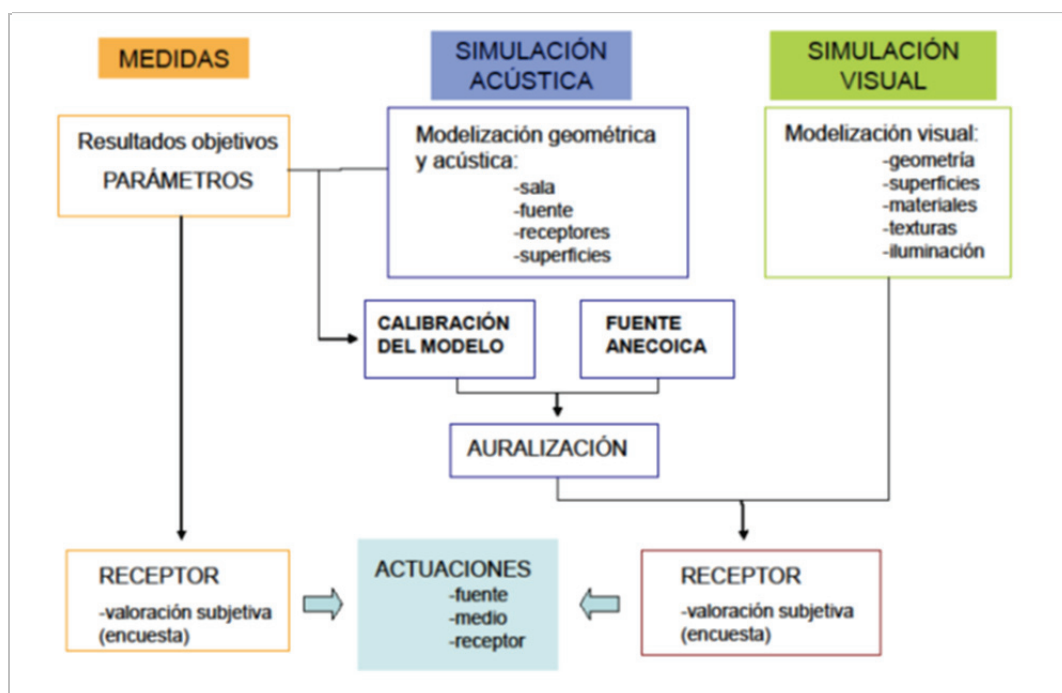


Figura 6. Esquema de las fases de un proceso de simulación virtual acústica.

En una primera etapa se han elaborado modelos detallados de las distintas salas con el objetivo de que la percepción visual del espacio virtual sea lo más realista posible. En una segunda etapa, se ha procedido a la simplificación de estos modelos para su utilización en la simulación acústica, pero asegurándose de que dicha simplificación no altere la fiabilidad de los resultados.

En la tabla 4 se muestra el número de polígonos en los diferentes recintos para el modelo complejo (visual) y el modelo simplificado (modelo de cálculo) y en las figuras 7-10 las imágenes de dichos modelos.

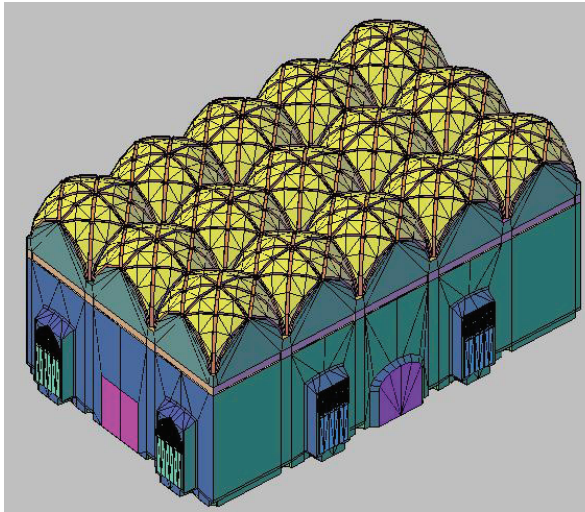
Tabla 4: Número de polígonos para la simulación visual (complejo) y acústica (simplificado) de los edificios patrimoniales estudiados.

SALA DE ESTUDIO	NÚMERO POLÍGONOS MODELO	
	COMPLEJO	SIMPLIFICADO
CATEDRAL	12778	2399
LONJA DE LOS MERCADERES	18262	3875
CAPILLA SANTO CÁLIZ	8669	2367
BASÍLICA ELCHE	4114	2334
BASÍLICA ELCHE CON MISTERI	4106	2450

Por otra parte, la simulación acústica requiere el cerramiento del modelo, para evitar fugas. Debido a que los programas conversores usan algoritmos de mallado no uniforme, esto ha introducido mayor complejidad en el modelado y la aparición de gran número de errores, por ello se ha desarrollado una serie de herramientas para el análisis y corrección de estos errores de manera semi-automática y así obtener una simulación acústica más fiable, porque no tenemos constancia de la existencia de una herramienta que de forma sistemática ayude a depurar errores. Este hecho resulta de gran importancia sobre todo en salas de gran complejidad.

Figura 7: LA LONJA DE LOS MERCADERES

MODELO COMPLEJO



MODELO SIMPLIFICADO

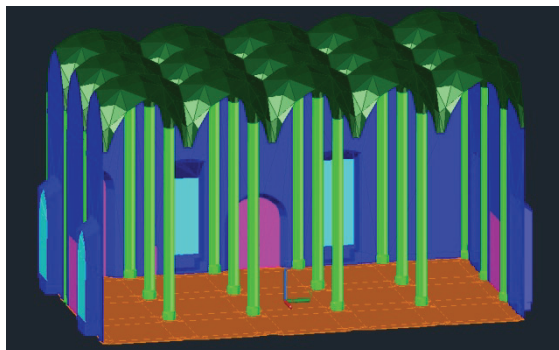
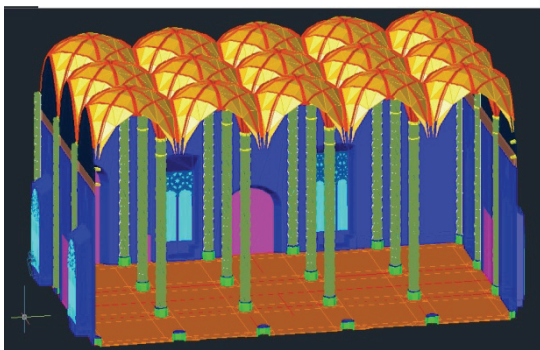
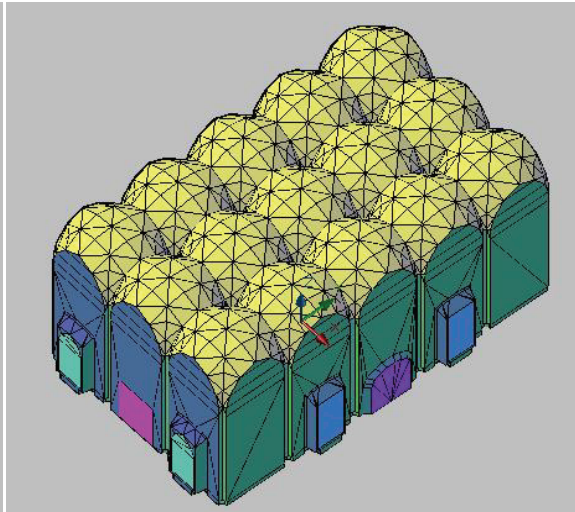


Figura 8: CATEDRAL METROPOLITANA DE VALENCIA

MODELO COMPLEJO

MODELO SIMPLIFICADO

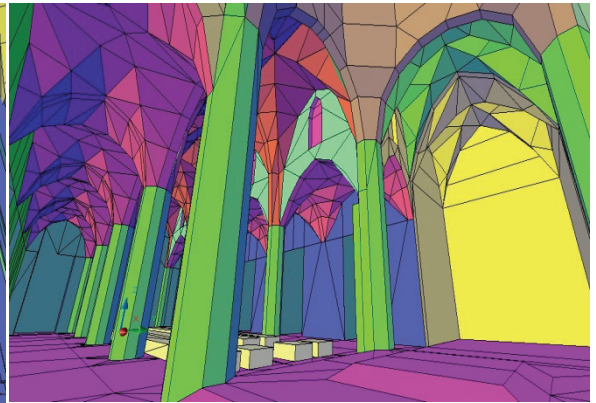
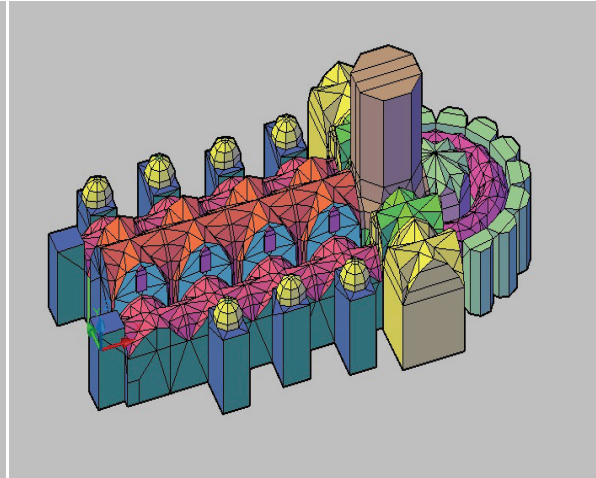
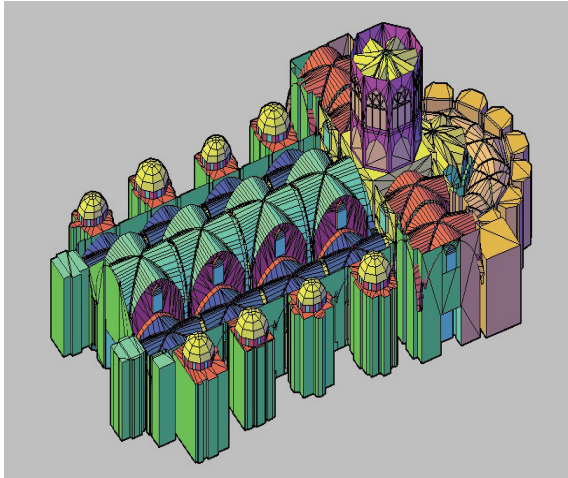
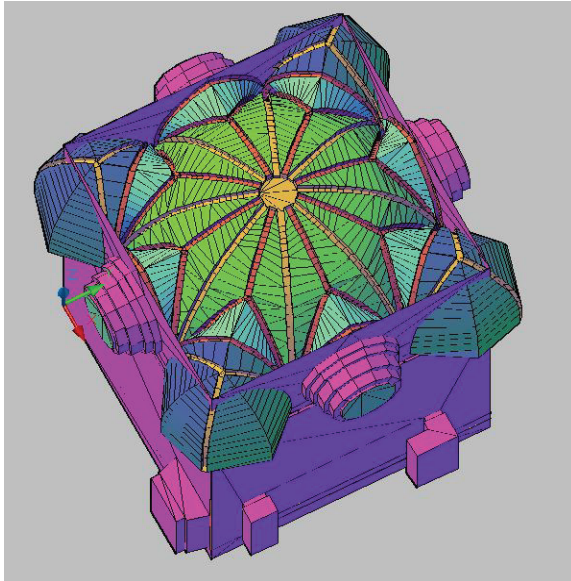


Figura 9: CAPILLA DEL SANTO CÁLIZ DE VALENCIA

MODELO COMPLEJO



MODELO SIMPLIFICADO

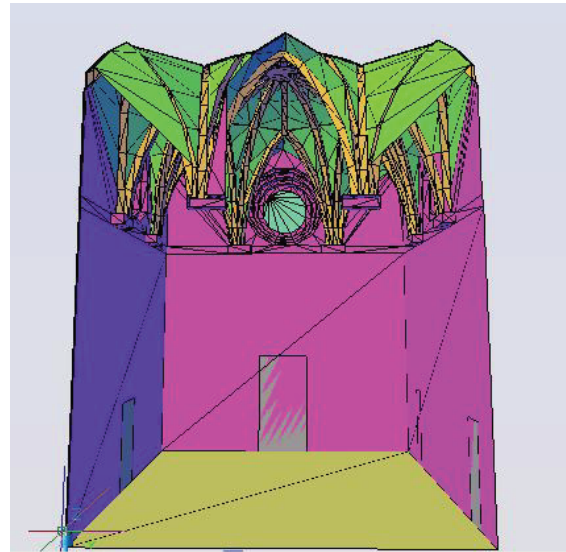
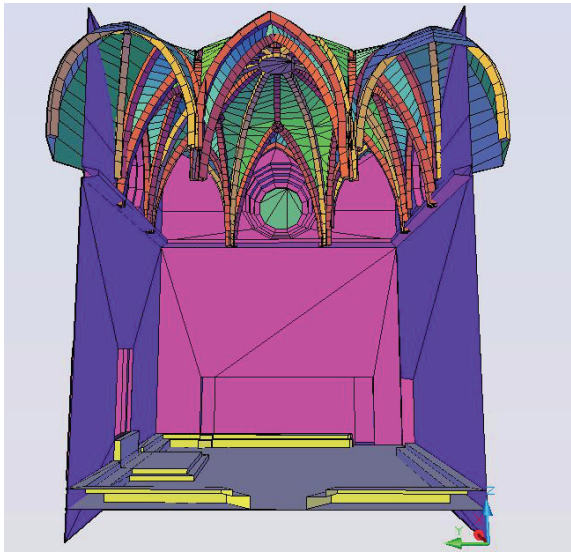
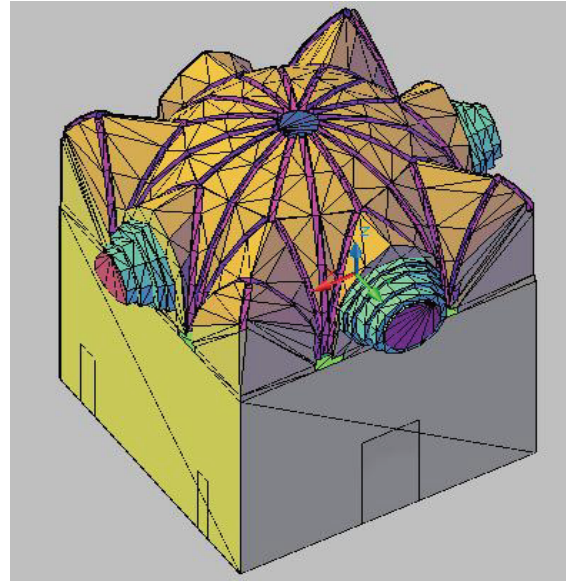
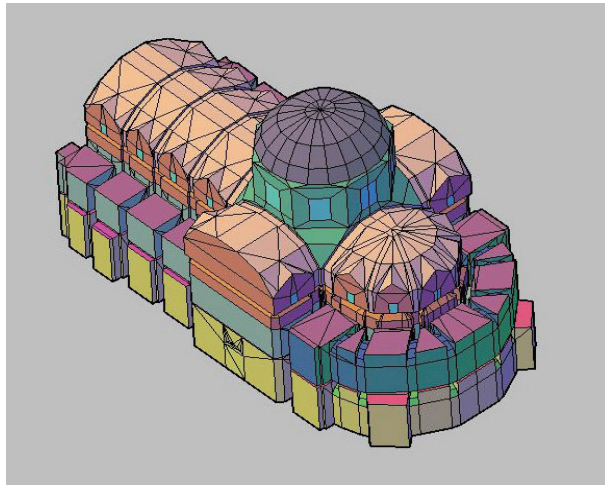
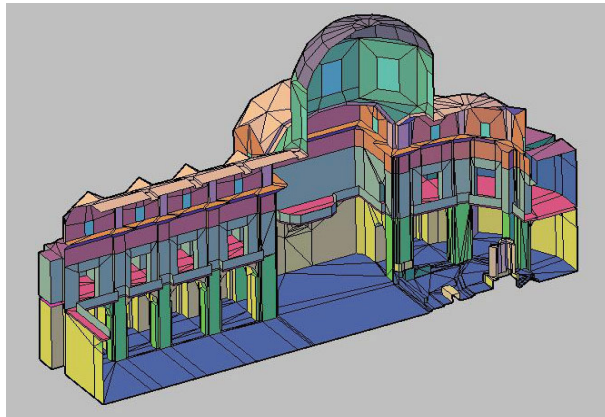


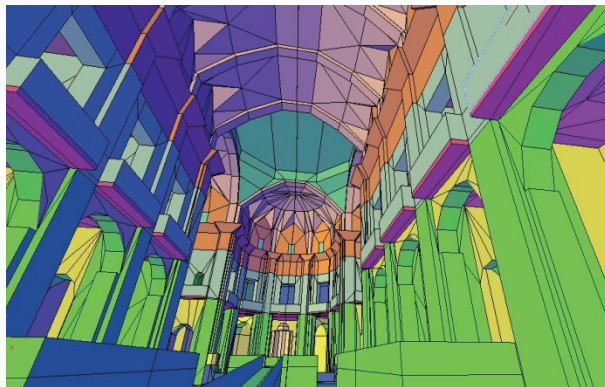
Figura 10: BASÍLICA DE SANTA MARÍA D'ELX



MODELO COMPLEJO



USO HABITUAL

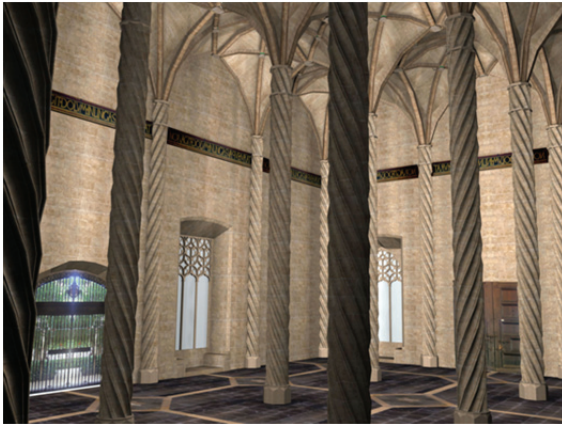


USO PARA
REPRESENTACIÓN DEL
MISTERI

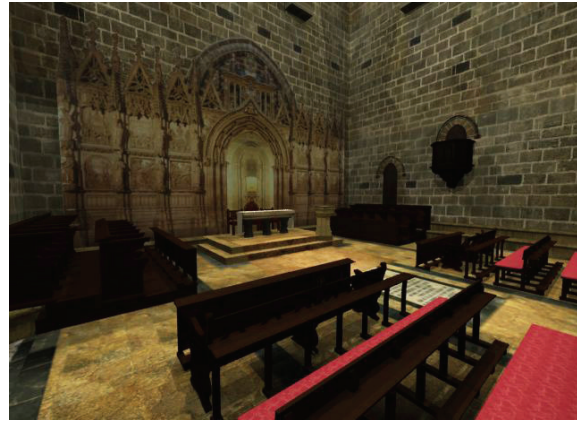
A partir de los modelos generados se han realizado las mejoras y adaptaciones necesarias del modelo virtual para aplicar correctamente las diferentes texturas, incluyendo elementos no incluidos en los planos como, puertas, sillas, elementos del escenario, etc., mediante el tratamiento de la información visual procedente de fotografías realizadas en visitas a los edificios, para crear una versión fiel del entorno y lo más realista posible. En la figura 11 se representa imágenes texturizadas de la Capilla del Santo Cáliz en la Catedral de Valencia y la Lonja.

Figura 11: IMÁGENES DE SALAS TEXTURIZADAS

LA LONJA DE LOS MERCADERES



CAPILLA DEL SANTO CÁLIZ



Con las mediciones y el modelado gráfico en 3D, se ha realizado la simulación acústica. Se ha trabajado con dos programas de simulación acústica CATT-Acoustics y Odeon. Para la subtarea de auralización, se dispone de un catálogo de grabaciones anecoicas de obras musicales. Se ha realizado la auralización estática de los entornos simulados acústicamente con una selección de extractos musicales.

La realización de auralizaciones ha de ser comparable tanto con la respuesta impulsiva medida como con la simulada [13, 14]. En nuestro caso, la técnica de medida utilizada ha tenido un peso muy importante ya que la fuente sonora omnidireccional (normalizada) tiene unas determinadas características de emisión de potencia sonora en frecuencia. A partir de la determinación de estas características, su aplicación en los modelos y usando ciertas técnicas de procesado de señal hemos podido ajustar las auralizaciones simuladas y estudiar su calidad. [15,16]

A partir del estudio preliminar realizado [17], se ha creado un sistema de navegación de entornos virtuales en primera persona mediante el desarrollo de una interfaz de navegación de entornos simulados, que integra simulación acústica y gráfica con el objetivo de que el usuario pueda desplazarse por el modelo visual de la sala objeto de análisis mientras percibe el sonido auralizado correspondiente a la posición en la que se encuentra [18]. Este sistema ha sido aplicado a diferentes tecnologías inmersivas (Power Wall y CAVE).

Sobre los modelos simulados, texturizados y auralizados, se han realizado test de análisis del método de evaluación de factores de calidad de audición de salas sobre los dos sistemas de

proyección (CAVE y PowerWall), para posteriormente realizar estudios de las salas modeladas, por parte de expertos, que puedan valorar diferentes parámetros en diferentes puntos de la sala, y nos permita extraer conclusiones tanto sobre la influencia que supone el sistema de proyección usado, como la valoración de la acústica de la sala de manera virtual, sin necesidad de estar presente en la sala en los momentos en los que se realizan conciertos. La diferencia entre los dos sistemas de proyección radica principalmente, en el grado de inmersión que consiguen sobre el espectador.

Todas estas posibilidades marcan las vías de desarrollo presentes y futuras de la Acústica virtual como una poderosa herramienta para el estudio acústico de salas, la recuperación de entornos perdidos con características sonoras especiales (monasterios, iglesias en ruinas, teatros, etc) y para la “RESTAURACIÓN Y REHABILITACIÓN ACÚSTICA EN LA ARQUITECTURA PATRIMONIAL”, como tendremos oportunidad de distinguir en la conferencia del Prof. Daumal.

APÉNDICE: METODOLOGIA EMPLEADA PARA LA OBTENCIÓN DE MEDIDAS OBJETIVAS

La metodología experimental empleada ha seguido los requerimientos de la ISO-3382 e IEC 60268, pero se han medido un significativo número de puntos adicionales y se ha situado la fuente en diversos emplazamientos según el uso del recinto.

El sistema de adquisición consta de:

- PC portátil con una tarjeta de sonido profesional (Vxpocket v2)
- Sistema de adquisición y análisis Winmls.
- Dos micrófonos G.R.A.S. Type 40 AK (Sensitivity at 250Hz 50 mV/ Pa, Frequency Response (\pm dB): 3.15 Hz-20 kHz, Upper Limit of Dynamic Range (3% Distortion): 164 dB re. 20 μ Pa, Lower Limit Dynamic range: 14 dB, re. 20 μ Pa). Y sus correspondientes fuentes de alimentación GRAS 12AA y preamplificadores G.R.A.S Type 26AK (Frequency Range: 2Hz-20 kHz, Noise: A-weight :< 2.5 μ V).
- Para la determinación de los parámetros de espacialidad hemos utilizado el micrófono multi pattern capacitor microphone AT4050/CM5 (frequency response: 20-20.000Hz, sensitivity: 15.8 mV, polar patterns: cardioids, omni directional, figure-of-eight) y la correspondiente fuente de alimentación phantom.
- Finalmente las medidas binaurales se han llevado a cabo mediante Head acoustic HMS III.0 (transmission range: 3 Hz-20 kHz, -3dB/+0.1 dB; dynamic range: typ. >118 dB, max SPL 145 dB). Cabeza binaural (HEAD Acoustics).
- El sistema de amplificación y emisión consta de: Power amplifier M-1000 (Power output level RL=4 Ω : 520W+520W). Y la fuente dodecaédrica Dodecahedral loudspeaker DO12 (Rated power 600W, Sound Power>120dB, Frequency range: 80 Hz-6.3 kHz, directivity: nearly spherical).

AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Ciencia e Innovación por la concesión de los proyecto de investigación BIA2003-09306-C04-01 y BIA2008-05485.

A los responsables de las salas y edificios patrimoniales.

Al grupo de expertos y público que respondió amablemente nuestra encuesta

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kleiner et al., “Auralization – an overview”. **J. Audio eng. Soc.** 41, 861 (1993)
- [2] J.S. Bradley. Review Of Objective Room Acoustics Measures And Future Needs **Applied Acoustics** 72 (2011) 713–720
- [3] A. Giménez, R. M. Cibrián, S. Girón, T. Zamarreño, J. J. Sendra, A. Vela, F. Daumal. “Questionnaire survey to qualify the acoustics of Spanish concert halls”. **Acta Acustica United With Acustica.**

- [4] Cibrián R; Segura J; Giménez A; Barba A; Vera L; Ponz S; Lacatis R; Cerdá S; Montell R; Planells A . "Error inter e intraobservador en la valoración acústica de salas en entornos virtuales, mediante encuesta de valoración subjetiva", **Tecnicacustica** Cáceres 2011 .
- [5] A Giménez, A Marín, A Sanchis, J Romero, S Cerdá, MD Jorge. "Estudio de la evolución de parámetros acústicos Que miden la calidad de salas de conciertos" Pacs: 43.55.fw. **Tecnicacustica** Logroño 2001
- [6] R Lacatis, A Giménez, A Barba, S Cerdá, J Romero, R Cibrián. "Historical and chronological evolution of the concert hall acoustics parameters". **J. Acoust. Soc. Am.**, Vol. 123, No. 5, Pt. 2, May . **Acoustics'08 Paris**.
- [7] ISO 3382:1997(e), Second Edition 1997-06-15, Acoustics Measurement Of The Reverberation Time Of Rooms With Reference To Other Acoustical Parameters.
- [8] International Standard ISO 3382-1:2009(E): Acoustics – Measurement of room acoustic parameters. Performance spaces. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2009.
- [9] Cerda S, Giménez A, Romero J, Cibrián R, Miralles JI. "Room Acoustical Parameters: A Factor Analysis Approach". **Applied Acoustics** 70 (2009).
- [10] Cerdá, S.; Giménez, A.; Romero, J.; Cibrián, R.; "A factor analysis approach to determining a small number of parameters for characterising halls". **Acta Acustica United With Acustica**. vol. 97 (2011) 441 – 452.
- [11] Beranek L. Concert halls acoustics-2008. **J. Audio Eng. Soc.** 56 (2008)
- [12] S. Cerdá, A. Giménez and R. Cibrián. "An Objective Scheme for Ranking Halls and Obtaining Criteria for Improvements and Design". **J. Audio Eng. Soc.**(In revision).
- [13] Segura, J.; Vera, L.; Barba, A.; Montell, R.; Giménez, A.; Fernández, M.; Cibrián, R.; Cerdá, S.; Romero, J.; "Análisis de auralizaciones del nuevo órgano de la Basílica de San Jaime de Algemesí (Valencia)". **TecniAcustica'09**. CÁDIZ,
- [14] J. Segura; S. Cerdá; A. Giménez; E. R. Montell; A. Barba; L. Vera; M. Fernandez; J. Romero; R. Lacatis; R.M. Cibrián; J.L. Miralles; J. Navasquillo; "Comparison between measured and simulated binaural impulse responses in different rooms". **Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010**. 23-27 Sydney, Australia.
- [15] J. Segura, S. Cerdá, R. Montell, R. Lacatis, A. Barba, A. M^a Planells, A. Giménez, J. Romero, R. M^a Cibrián, L. Vera, M. Fernández; "Análisis de respuestas impulsivas en salas de audición". Actas del 41^o Congreso Nacional de Acústica - **6^o Congreso Ibérico de Acústica. TecniAcústica 2010**. 13-15 Octubre, León.
- [16] Segura, J.; Vera, L.; Barba, A.; Lakatis, R.; Giménez, A.; Fernández, M.; Cibrián, R.; Cerdá, S.; Romero, J.; "Estudio de parámetros de calidad sonora de señal música y habla auralizada en una sala de uso múltiple". **TecniAcustica'09**. CÁDIZ,
- [17] Montell, R.; Segura, J.; Vera, L.; Barba, A.; Giménez, A.; Fernández, M.; Cibrián, R.; Cerdá, S.; Romero, J.; "Sistemas de auralización y sonido 3D para su aplicación en entornos virtuales de edificios del patrimonio histórico-arquitectónico". **TecniAcustica'09**. CÁDIZ.
- [18] R. Montell, J. Segura, A. Giménez, A. M^a Planells, A. Barba, S. Cerdá, R. Lacatis, L. Vera, B. Martínez; "Simulación acústica y gráfica. Prototipo de navegación de entornos virtuales". Actas del 41^o Congreso Nacional de Acústica - **6^o Congreso Ibérico de Acústica. TecniAcústica 2010**. 13-15 Octubre, León.