

Acústica Virtual: una herramienta para la evaluación del patrimonio histórico-arquitectónico

Virtual Acoustics: a tool to evaluate architectural heritage

Segura, J.; Montell, R.; Cerdá, S.; Barba, A.; Cibrián, R.; Planells, A.; Querol, L.; Cervera, O.; Moya, T.; Giménez, A.

Palabras clave: Acústica virtual; Auralización; Teatro; Habla; Música; Patrimonio arquitectónico

Keywords: Virtual acoustics; Auralization; Theatre; Speech; Music; Architectural heritage

Resumen

La acústica virtual ha demostrado ser una herramienta muy efectiva en el diseño acústico de recintos. Su aplicación al estudio de salas y edificios del patrimonio arquitectónico valenciano, ha permitido analizar la acústica de estos entornos y auralizar (cálculo de la respuesta del recinto a una determinada señal sonora), tanto señal musical como hablada (natural o generada sintéticamente).

En este trabajo, describimos tanto el proceso de integración en el entorno virtual, con representación visual y sonora, como el de evaluación de la respuesta de estas salas a diferentes estímulos acústicos. Esta inmersión en el entorno virtual nos permite analizar subjetivamente la respuesta acústica del recinto, según la naturaleza de la señal transmitida.

Abstract

Virtual acoustics has shown to be an effective tool in acoustic design of halls. The application to the study of room acoustic and Valencian architectural heritage has allowed analyzing the acoustics of these environments and auralizing (defined as the computing of the room response to specific sound signals), both for musical and speech signals (natural or synthetically generated).

In this work, we describe both the integration process in the virtual environment, with visual and auditive representation, as well as the evaluation of the response of these halls to different acoustic stimulus. This immersion process in the virtual environment would allow analyzing subjectively the environmental acoustic response, according to the transmitted signal nature.

1. Introducción

El concepto de acústica virtual nace a raíz de la conjunción de una serie de técnicas de procesado de señal acústica e informáticas que permiten la visualización y audición de cualquier tipo de recinto simulado en un entorno virtual. Este concepto está íntimamente ligado al de auralización que, según Mendel Kleiner (Kleiner & al., 1993)¹, “es el proceso de presentación audible, por modelado físico o matemático, del campo sonoro de una fuente en el espacio, de manera que se puede modelar la experiencia de escucha binaural en una posición dada en el espacio modelado”. Sobre esta base conceptual y sus implicaciones técnicas, podemos construir entornos que se aproximan a la realidad medida mediante técnicas estandarizadas.

El desarrollo del trabajo que vamos a exponer se gestó en el proyecto BIA2003-09306-C04, donde un grupo de investigadores de cuatro universidades españolas (Universitat Politècnica de València, Universidad de Sevilla, Universidad de Navarra y Universitat Politècnica de Catalunya) investigaron la relación entre los parámetros acústicos de diferentes salas de conciertos españolas con la apreciación subjetiva del público español. Esto fue posible gracias al uso de procedimientos de medida estandarizados (ISO 3382-2:2008) y a la creación de una herramienta de evaluación subjetiva, que fue validada y patentada para la realización de los estudios subjetivos pertinentes dentro del ámbito de este proyecto (Gimenez & al., 2011)². A partir del análisis de los resultados obtenidos con una extensa base de datos de salas y evaluaciones subjetivas, se pudo cruzar las valoraciones subjetivas de los diferentes públicos españoles y los resultados de la medida de diferentes parámetros en las distintas salas españolas consideradas. Este análisis permitió la obtención de un conjunto ortogonal de parámetros objetivos acústicos, que constituyen una base de valoración de cualquier sala con los criterios de valoración subjetiva autóctonos.

Sobre esta base, y teniendo en cuenta la experiencia adquirida en el anterior proyecto, nos embarcamos, mediante el proyecto BIA2008-05485, en una aplicación del estudio anterior a edificios del patrimonio histórico-arquitectónico. Esta vez no íbamos a repetir metodología experimental, ya que en algunos de los casos, la disponibilidad de los edificios era muy escasa o inviable, por lo que el uso de técnicas de realidad virtual nos permitía recrear estos entornos y la creación de modelos acústicos virtuales nos permitía auralizar de la señal (música o habla) en estos entornos. Finalmente, la integración gráfica y auditiva en un entorno inmersivo de realidad virtual, nos permitió la representación del entorno para su evaluación subjetiva.

En el proceso de diseño, mejora o rehabilitación de un edificio destinado a la audición musical o del habla, resulta de vital importancia poder conocer la respuesta final del oyente antes de realizar la obra misma, es decir, que un edificio reúna las condiciones exigibles por la audiencia para la actividad a desarrollar. Este último proyecto referenciado se basó en la realización de unos determinados objetivos:

¹ Mendel Kleiner, B.-I. Dalenbäck, and P. Svensson. “Auralization – an overview”. *J. Audio Eng. Soc.* 41(11), pp. 861–875, 1993.

² 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* Vol. 97 (2011) 1 – 1

- El diseño de recintos mediante modelos de realidad/acústica virtual, a partir de la determinación de sus características acústicas antes de su rehabilitación/construcción y de la obtención de límites de parámetros de calidad acústica óptimos para su uso.
- La auralización de los modelos diseñados para señal hablada/musical, a partir del conocimiento previo del modelo real (Segura, 2010)³, según a qué se destine la sala.

Estos objetivos se concretaron en la obtención de herramientas de cálculo y análisis para la evaluación de entornos. Con la presentación de este trabajo pretendemos mostrar la experiencia llevada a cabo, indicando la metodología empleada, los problemas encontrados y la superación de estas dificultades, para llegar a los objetivos deseados. Investigación que se está desarrollando por un grupo multidisciplinar integrado por físicos, matemáticos, arquitectos, psicólogos, músicos e ingenieros.

2. Metodología y resultados

La figura 1 resume de manera esquemática la ejecución metodológica del proceso de simulación y procesado de la señal para su representación en un entorno virtual y su posterior evaluación subjetiva.

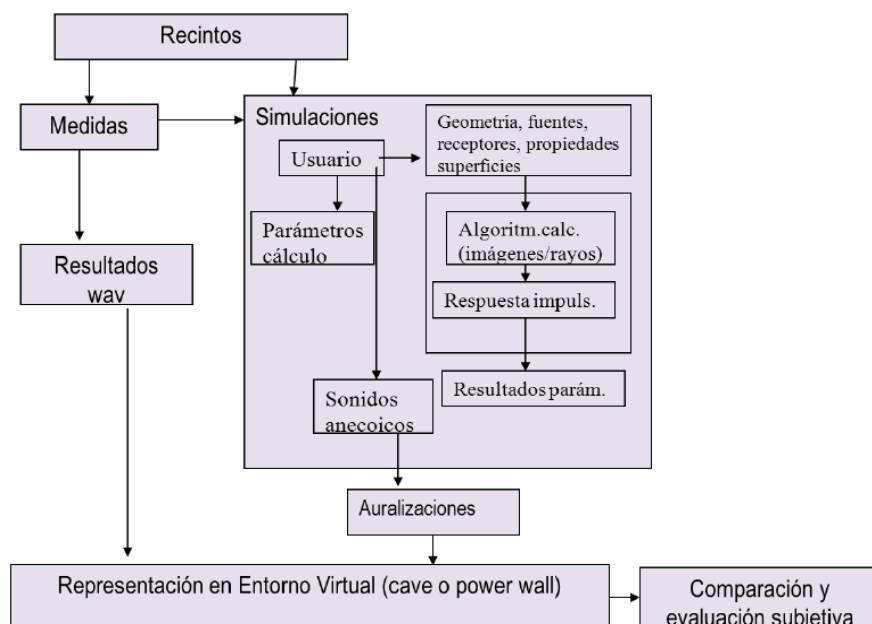


Figura 1: Esquema del proceso de renderizado simulado y medido y su evaluación

En ella se pueden observar todos los pasos que a continuación se desarrollarán y que constituyen la estructura de desarrollo de este proyecto.

³ J.Segura; “¿Cómo suena una sala donde se realizan actuaciones musicales?. “Acústica virtual:una herramienta de evaluación acústica”. 1er Congreso Internacional de Investigación en Música de Valencia, (ISEACV) 25-26 Febrero 2010. ISBN: 978-84-693-3667-0

2.1. Selección de la muestra de entornos objeto de estudio

En esta tarea se realizó la selección del catálogo de salas y edificios del patrimonio histórico-artístico que han sido, y continúan siendo, objeto de estudio. Entre ellos, a parte de un determinado número de salas estudiadas, cabe destacar la catedral metropolitana de Valencia, la Basílica de Santa María de Elche (sede del “Misteri d’Elx”, patrimonio inmaterial de la humanidad por la UNESCO), el *Auditori y Palau de Congressos* de la ciudad de Castellón, el *Palau de la Música* de Valencia, el *Palau de les Arts “Reina Sofía”* y la Lonja de los Mercaderes de Valencia (edificio declarado patrimonio de la humanidad por la UNESCO).

Este catálogo completa el conjunto de salas que son objeto de estudio acústico y representación virtual para su posterior análisis. En esta fase, cabe destacar la lentitud de obtención de permisos para la realización de mediciones, por el tipo de edificios de los que se trataba, pero una vez obtenidos, la colaboración y el apoyo por parte de las instituciones encargadas fue total.

2.2. Medición de parámetros acústicos objetivos en los entornos seleccionados

Para la determinación de los parámetros acústicos objetivos se han realizado medidas de ellos, siempre según las directrices de la norma 3382⁴ y siguiendo la metodología validada. Se ha sobremuestreado en referencia a la norma con el objetivo de estudiar detalladamente el campo sonoro en cada una de las salas y para realizar una calibración lo más rigurosa posible de las simulaciones. Ésta sólo puede hacerse con fiabilidad si se pueden contrastar resultados medidos y calculados, además de su posible utilización en planteamientos futuros.

La mayor dificultad que presenta esta fase es la disponibilidad de las salas para las mediciones que por su horario de apertura al público, se realizó después de su cierre (en la mayoría de casos durante la noche). Otra característica que ha alargado la realización de medidas es que las salas que tratamos son de gran volumen y además se ha medido con diferentes ubicaciones de la fuente emisora, para aproximarnos a los casos reales de emisión.

2.3. Modelado gráfico 3D de los entornos

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 los modelos a emplear en la simulación acústica. Partiendo de los modelos complejos se ha procedido a eliminar cierto grado de detalle para facilitar la compatibilidad con los programas de simulación acústica. Se han tomado como referencia estudios sobre el grado de simplificación y su influencia en los resultados obtenidos, para asegurar que dicha simplificación no interfiera con la fiabilidad de

⁴ ISO3382-1:2009, Acoustics. measurement of room acoustic parameters Part 1: Performance spaces. International Organization for Standardization (ISO), 2009.

UNE-EN ISO 3382-2:2008, Acústica:Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2008

los resultados. En la tabla 1 se muestra el número de polígonos en los diferentes recintos para el modelo complejo (visual) y el modelo simplificado (modelo de cálculo). En la figura 2 se representan imágenes del Palau de les Arts “Reina Sofía”, en ambas modelizaciones.

SALA EN ESTUDIO	NÚMERO DE POLÍGONOS DEL MODELO	
	Complejo	Simplificado
CATEDRAL	12778	2399
PALAU DE LA MÚSICA	3685	1040
PALAU DE LES ARTS “REINA SOFIA	6520	2272
BASÍLICA SANTA MARÍA (ELCHE)	4114	2334
BASÍLICA SANTA MARÍA (con Misteri)	4106	2450

Tabla 1.- Número de polígonos para la modelización visual (modelo complejo) y la modelización de cálculo (modelo simplificado)

La realización de los modelos virtuales en tres dimensiones de las salas ha sido costosa. Los principales problemas encontrados han sido:

- Para el modelado se ha utilizado el programa de diseño asistido por ordenador AutoCAD. En la mayoría de casos se ha contado con planta y sección de cada una de las salas en soporte digital. En la Basílica de Santa María de Elche, la ausencia de planos digitales ha obligado a la elaboración de los mismos a partir de los planos en papel.
- Por ser espacios de geometría compleja, la documentación disponible resultaba escasa, siendo necesario recurrir a fotografías y visitas para completar la información requerida.
- 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. Es en ésta fase donde se han encontrado las mayores dificultades, debido a que las exigencias del modelado en 3D de la sala para su simulación acústica y visual es diferente (necesita distinta resolución). Para ello, este modelo, realizado en AutoCAD 3D, ha sido convertido a los diferentes formatos requeridos por los diferentes software de cálculo acústico.
- 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, importante en salas de gran complejidad.

PALAU DE LES ARTS “REINA SOFÍA”

Modelo Complejo

Modelo Simplificado

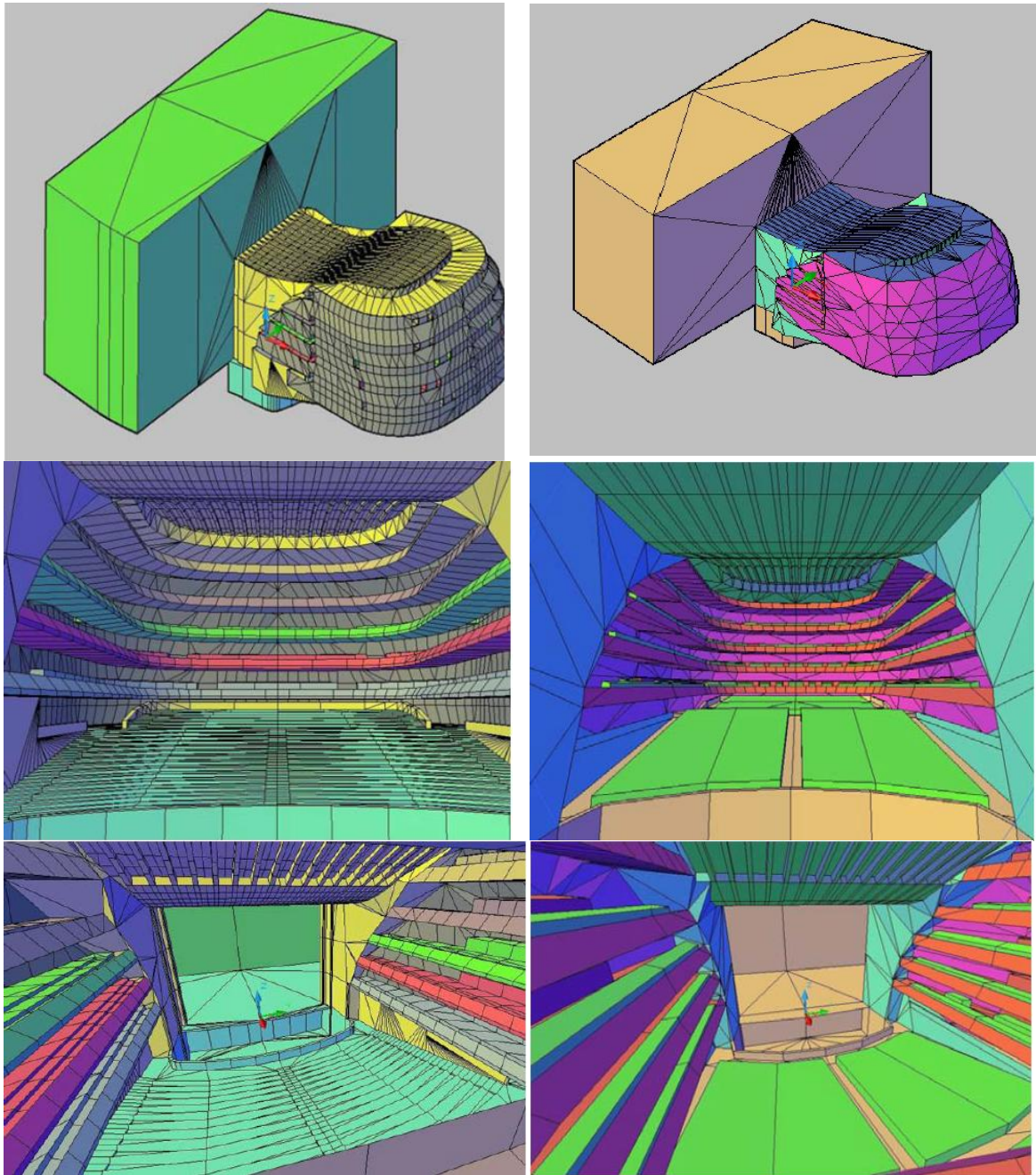


Figura 2.- Modelización del Palau de les Arts "Reina Sofía", sala de ópera

2.4. Modelado gráfico texturizado en 3D

A partir de los modelos generados con Autocad® y convertidos a 3D Studio Max®, se realizaron las mejoras y adaptaciones necesarias del modelo virtual dentro de este programa, lo que permitirá aplicar correctamente las diferentes texturas. Además, se han modelado los elementos que no contiene el modelo a partir de 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, lo que se conoce como texturas para los entornos virtuales. En la figura 3 se

representa imágenes texturizadas de la Capilla del Santo Cáliz en la Catedral de Valencia y la Lonja.

La aplicación de las texturas en los modelos visuales no es trivial. Se ha de tener cierta pericia en la aplicación de la iluminación a los modelos. Problema que se incrementa debido a la complejidad de éstos. Las mayores dificultades encontradas han sido:

- En la toma de fotografías puesto que deben reunir un alto nivel de detalle, ajuste de luz y color adecuado, poca distorsión:
 - En salas con iluminación pobre se dificulta la toma de imágenes y, en algunos casos las fotografías contienen ruido y necesitan mayor post-procesado.
 - Dificultades con el ajuste de color para que reflejen fielmente el entorno/iluminación de la sala.
 - Evitar sombras o cambios de iluminación intensos para obtener una imagen limpia. Si esto no se consigue se debe dedicar un tiempo mayor en el retoque de la fotografía.
- En el post-procesamiento:
 - Selección de fotografías adecuadas, con la consecuente disminución del material de trabajo.
 - Actuación sobre cada una de las fotografías para extraer las texturas (corrección de la perspectiva, igualar iluminación, corrección de tono, ...)
- En la aplicación de las texturas sobre el modelo geométrico:
 - Reestructuración del modelo geométrico inicial, agrupando por materiales y separando zonas con diferente posicionamiento de textura (superficies con diferente orientación o diferente normal).
 - En algunos casos, reconstrucción de partes de la geometría para permitir un mejor acoplamiento de las texturas.
 - Es necesario realizar un segundo ajuste del color y el tono de las texturas, ya que el programa de renderización 3D modifica la percepción del color conseguida con el primer post-procesamiento de la imagen
- En la iluminación de la sala.
 - Crear el efecto deseado de luces/sombras que representa la sala en el que intervienen tanto la iluminación artificial de la sala (focos, lámparas, etc.) como la luz ambiental exterior y el modelado de ésta no es trivial. La experiencia del modelador es esencial para intuir la posición y tipos de luces necesarias para crear el ambiente correcto.

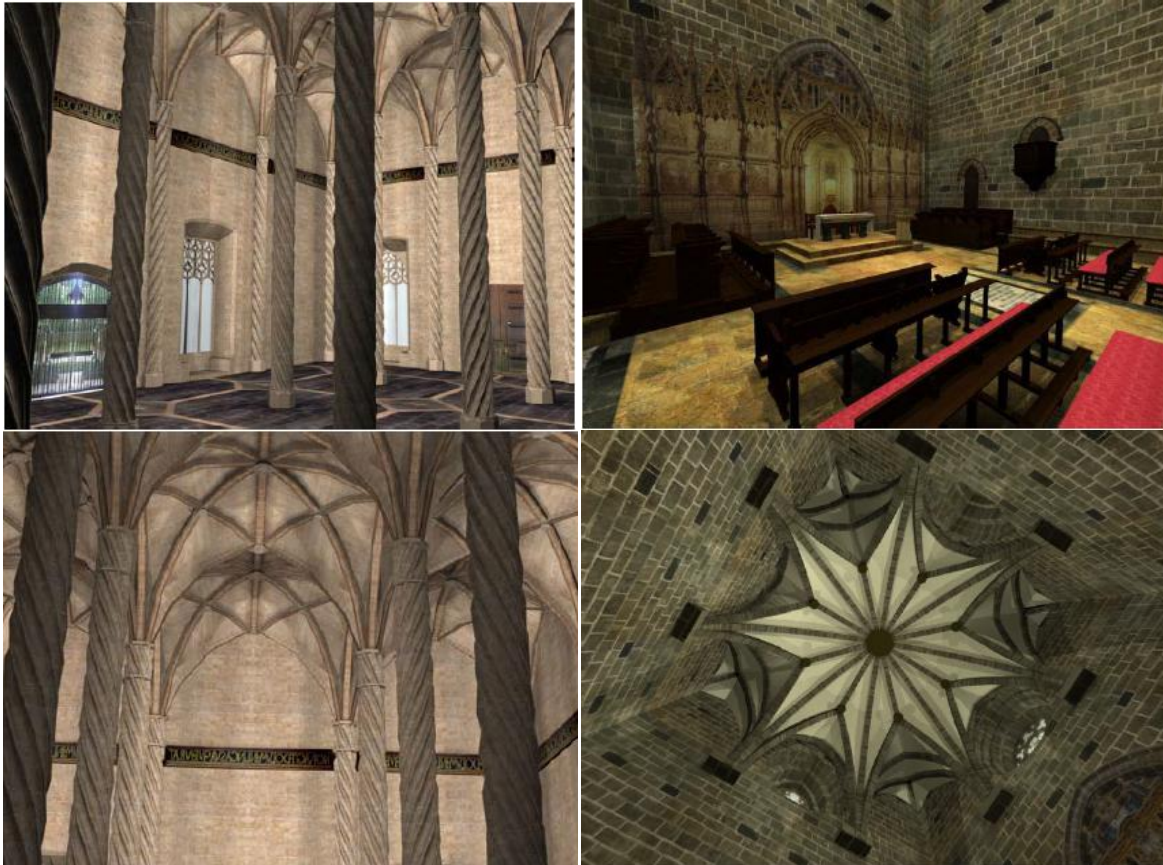


Figura 3.- Imágenes de los modelos texturizados

2.5. Simulación acústica virtual y auralización

A partir de las mediciones y del modelado gráfico simplificado en 3D, se ha realizado la simulación acústica. Se ha trabajado con dos programas de simulación acústica CATT-Acoustics® y Odeon®. Para la tarea 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. Como problemas encontrados en esta la fase caben citar:

- Errores en la transformación de formatos. En el proceso de simulación acústica de una sala se parte de modelos geométricos construidos a mano o con programas CAD. Previamente a la simulación, éstos se deben revisar con sumo cuidado para eliminar posibles errores, tarea que se complica con la complejidad de la sala a estudiar. El éxito de este trabajo depende en gran medida de la experiencia del usuario y puede llegar a ser una tarea monótona y larga. Por ello:
 - - Se ha desarrollado una herramienta de soporte a la corrección geométrica para la depuración en la transformación de formatos para el modelado acústico.
 - - Se ha realizado un estudio de los diferentes tipos de errores detectados por el programa CATT Acoustics. Para cada uno de los errores se ha realizado una propuesta

de corrección y se ha implementado, obteniendo así un programa que permite corregir de forma iterativa cada uno de los errores (Montell & al, 2010)⁵.

- La realización de auralizaciones ha de ser comparable tanto con la respuesta impulsiva medida como con la simulada (Segura & al., 2009a)⁶ (Segura & al., 2010a)⁷. 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. (Segura & al., 2010b)⁸ (Segura & al., 2009b)⁹
- La calibración de la simulación acústica de las salas respecto a las medidas realizadas es crítica. Los parámetros que influyen en el ajuste de una sala, (geometría y características acústicas del medio y los materiales), determina la bondad de la predicción del modelo acústico (Lacatis & al., 2011)¹⁰[14]. En nuestro caso, al tratar edificios emblemáticos y del patrimonio histórico-arquitectónico, esta dificultad se ha acrecentado al encontrar materiales no ensayados acústicamente e incluidos en las bases de datos. Por ello, trabajamos con un equipo de medida de absorción portable que permita el ensayo 'in situ' de estos materiales y acercarnos más a sus características acústicas reales.

En esta fase también se han modelizado y analizado algunos edificios del proyecto anterior por su particular interés. Este proceso ha resultado en una prolífica producción de trabajos (Segura & al., 2011)¹¹ (Barba & al., 2011)¹²(Barba & al., 2009a)¹³(Barba & al., 2009b)¹⁴ (Barba & al., 2009c)¹⁵(Lacatis & al., 2010a)¹⁶ (Lacatis & al., 2010b)¹⁷(Barba, 2010)¹⁸.

⁵ R. Montell; J. Segura; A. Giménez; A. Barba; R. Lacatis; A. Planells; "A proposal for a tool for automatic correction of geometrical errors in acoustical simulation". Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010. 23-27 August 2010, Sydney, Australia.

⁶ 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 Jaume de Algemés (Valencia)". TECNIACUSTICA'09. CÁDIZ, SEPTIEMBRE 2009.

⁷ 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 August 2010, Sydney, Australia.

⁸ 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.

⁹ Segura, J.; Vera, L.; Barba, A.; Lacatis, 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, SEPTIEMBRE 2009.

¹⁰ R. Lacatis, S. Cerdá, A. Giménez, J. Romero; "Comparación de los parámetros acústicos obtenidos mediante dos programas de simulación con modelos geométricos de diferente complejidad de una sala". Revista de Acústica Vol 42, 1-2, 2011.

¹¹ J. Segura, A. Giménez, J. Romero, S. Cerdá; "A comparison of different techniques for simulating and measuring parameters in a place of worship: Sant Jaume Basilica in Valencia, Spain". Acta Acustica united with Acustica. Vol. 97 Number 1, January/February 2011

¹² Barba, A.; Giménez, A.: El Teatro Principal de Valencia. Acústica y Arquitectura Escénica, Valencia, Teatres de la Generalitat y Universitat Politècnica de València, 2011.

2.6. Integración de modelo gráfico y acústico en el entorno virtual. Diseño de aplicaciones de testeo.

A partir del estudio preliminar realizado (Montell et al., 2009)¹⁹, 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 (Radha & al., 2010)²⁰. Este sistema ha sido aplicado a diferentes tecnologías inmersivas (Power Wall y CAVE).

2.7. Realización de prueba piloto subjetiva en el entorno virtual

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.

Se han comparado estos dos dispositivos de visualización y reproducción de la señal auralizada, el "Cave" y la "PowerWall" y simultáneamente el error intra e interobservador del

¹³ Barba, A.; Giménez, A.; "Análisis acústico de la tipología teatral a la italiana a través del estudio del Teatro Principal de Valencia". Revista de Acústica Vol 40, 3-4, 2009.

¹⁴ Barba Sevillano, A.; Giménez Pérez, A.; Segura García, J.; Montell Serrano, R.; "Caracterización del comportamiento acústico de los teatros a la italiana a partir del estudio de su geometría.". TECNIACUSTICA'09. CÁDIZ, SEPTIEMBRE 2009.

¹⁵ Barba Sevillano, A. ; Giménez Pérez, A. ; Segura García, J. ; Lacatis, R. G.; "¿Cómo "suenan" un teatro a la italiana?. El Teatro Principal de Valencia." TECNIACUSTICA'09. CÁDIZ, SEPT 2009.

¹⁶ Lacatis, R.; Montell, R.; Giménez, A.; Barba, A.; Cibrián, R.; Cerdá, S.; Segura, J.; Romero, J.; "Coordination between in situ measures, acoustic simulation and virtual environments, key for improvement proposals in audience halls.". Internoise 2010. June 13-16, 2010. Lisbon, Portugal.

¹⁷ Lacatis, R.; Barba, A.; Giménez, A.; Cerdá, S.; "Analysis of the Polytechnic University of Valencia auditoriums, through a unitary measurement protocol application". Internoise 2010. June 13-16, 2010. Lisbon, Portugal.

¹⁸ A.Barba; "Acústica de los auditorios de la ciudad de Valencia: ayer, hoy y mañana". 1er Congreso Internacional de Investigación en Música de Valencia, (ISEACV), 25-26 Febrero 2010. ISBN: 978-84-693-3667-0

¹⁹ 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, SEPTIEMBRE 2009.

²⁰ 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 41º Congreso Nacional de Acústica - 6º Congreso Ibérico de Acústica. TecniAcústica 2010. 13-15 Octubre, León.

método de simulación. El ensayo se ha realizado en tres salas y en distintas posiciones en cada una de ellas por expertos acústicos, experto musical y aficionado (Cibrián & al., 2011)²¹.

3. Conclusiones

En este trabajo hemos presentado la experiencia en acústica virtual aplicada a salas de audición y particularmente a edificios patrimoniales, llevada a cabo en el proyecto de investigación que estamos desarrollando del plan nacional I+D+i. Nos hemos centrado en la exposición detallada de la metodología seguida para lograr los objetivos que se plantearon al comienzo de la investigación, incidiendo en los problemas que han surgido y la solución que hemos dado a los mismos. Con ello pensamos que, si se dispone de la herramienta de cálculo y análisis adecuado, pueda servir de guía y herramienta a quienes se inicien o trabajen en entornos de realidad virtual y auralizaciones, con el objetivo de evaluar la calidad de una sala existente, o antes de su construcción o rehabilitación. En este proyecto hemos desarrollado un sistema válido para la evaluación acústica de entornos. En nuestro caso particular lo hemos aplicado a la evaluación de salas de concierto y a edificios del patrimonio.

Para la implementación de este sistema se han desarrollado una serie de protocolos para el modelado acústico y visual, la calibración y ajuste de los modelos a partir de medidas reales, la simulación y auralización, la integración de gráficos y audio, la presentación en el entorno virtual inmersivo y su evaluación.

Además, hemos podido comprobar la validez de esta herramienta de evaluación mediante un estudio estadístico de validez entre dos expertos y un oyente en diferentes salas simuladas y texturizadas en las que se ha calificado la audición de la señal auralizada en diferentes puntos.

4. Agradecimientos

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Ciencia e Innovación mediante el proyecto de investigación BIA2008-05485.

5. Referencias

Kleiner, M.; Dalenbäck, B.-I.; and Svensson, P.; «Auralization – an overview». J. Audio Eng. Soc. 41(11), pp. 861–875, 1993.

Giménez, A.; Cibrián, R. M.; Girón, S.; Zamarreño, T.; Sendra, J. J.; Vela, A.; Daumal, F.; «Questionnaire Survey to Qualify the Acoustics of Spanish Concert Halls». ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA Vol. 97, Num 6, Nov/Dec 2011, pp. 949 - 965(17).

²¹ Cibrián, Rosa; Segura, Jaume; Giménez, Alicia; Barba, Arturo ; Vera, Lucía; Ponz, Silvia; Lacatis, Radu; Cerdá, Salvador ; Montell, Radha ; Planells, Ana, "Error inter e intraobservador en la valoración acústica de salas en entornos virtuales, mediante encuesta de valoración subjetiva". TECNIACUSTICA'11. CÁCERES, OCTUBRE 2011.

Segura, J.; «¿Cómo suena una sala donde se realizan actuaciones musicales?. Acústica virtual: una herramienta de evaluación acústica». 1er Congreso Internacional de Investigación en Música de Valencia, (ISEACV) 25-26 Febrero 2010. ISBN: 978-84-693-3667-0

ISO3382-1:2009, Acoustics. Measurement of room acoustic parameters Part 1: Performance spaces. International Organization for Standardization (ISO), 2009.

UNE-EN ISO 3382-2:2008, Acústica: Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2008.

Montell, R.; Segura, J.; Giménez, A.; Barba, A.; Lacatis, R.; Planells, A.; «A proposal for a tool for automatic correction of geometrical errors in acoustical simulation». Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010. 23-27 August 2010, Sydney, Australia.

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 Jaume de Algemesí (Valencia)». TECNIACUSTICA'09. CÁDIZ, SEPTIEMBRE 2009.

Segura, J.; Cerdá, S.; Giménez, A.; Montell, E. R.; Barba, A.; Vera, L.; Fernández, M.; Romero, J.; Lacatis, R.; Cibrián, R.M.; Miralles, J.L.; Navasquillo, J.; «Comparison between measured and simulated binaural impulse responses in different rooms». Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010. 23-27 August 2010, Sydney, Australia.

Segura, J.; Cerdá, S.; Montell, R.; Lacatis, R.; Barba, A.; Planells, A. M^a; Giménez, A.; Romero, J.; Cibrián, R. M^a; Vera, L.; Fernández, M.; «Análisis de respuestas impulsivas en salas de audición». Actas del 41º Congreso Nacional de Acústica - 6º Congreso Ibérico de Acústica. TecniAcústica 2010. 13-15 Octubre, León.

Segura, J.; Vera, L.; Barba, A.; Lacatis, 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, SEPTIEMBRE 2009.

Lacatis, R.; Cerdá, S.; Giménez, A.; Romero, J.; «Comparación de los parámetros acústicos obtenidos mediante dos programas de simulación con modelos geométricos de diferente complejidad de una sala». Revista de Acústica Vol 42, 1-2, 2011.

Segura, J.; Giménez, A.; Romero, J.; S. Cerdá; «A comparison of different techniques for simulating and measuring parameters in a place of worship: Sant Jaume Basilica in Valencia, Spain». Acta Acustica united with Acustica. Vol. 97 Number 1, January/February 2011

Barba, A.; Giménez, A.; El Teatro Principal de Valencia. Acústica y Arquitectura Escénica, Valencia, Teatres de la Generalitat y Universitat Politècnica de València, 2011.

Barba, A.; Giménez, A.; «Análisis acústico de la tipología teatral a la italiana a través del estudio del Teatro Principal de Valencia». Revista de Acústica Vol 40, 3-4, 2009.

Barba, A.; Giménez, A.; Segura, J.; Montell Serrano, R; «Caracterización del comportamiento acústico de los teatros a la italiana a partir del estudio de su geometría». TECNIACUSTICA'09. CÁDIZ, SEPTIEMBRE 2009.

Barba, A. ; Giménez, A. ; Segura, J. ; Lacatis, R. G.; «¿Cómo “suena” un teatro a la italiana?. El Teatro Principal de Valencia» TECNIACUSTICA'09. CÁDIZ, SEPT 2009.

Lacatis, R.; Montell, R.; Giménez, A.; Barba, A.; Cibrián, R.; Cerdá, S.; Segura, J.; Romero, J.; «Coordination between in situ measures, acoustic simulation and virtual environments, key for improvement proposals in audience halls». Internoise 2010. June 13-16, 2010. Lisbon, Portugal.

Lacatis, R.; Barba, A.; Giménez, A.; Cerdá, S.; «Analysis of the Polytechnic University of Valencia auditoriums, through a unitary measurement protocol application». Internoise 2010. June 13-16, 2010. Lisbon, Portugal.

Barba, A.; «Acústica de los auditorios de la ciudad de Valencia: ayer, hoy y mañana». 1er Congreso Internacional de Investigación en Música de Valencia, (ISEACV), 25-26 Febrero 2010. ISBN: 978-84-693-3667-0

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, SEPTIEMBRE 2009.

Montell, R.; Segura, J.; Giménez, A.; Planells, A. M^a; Barba, A.; Cerdá, S.; Lacatis, R.; Vera, L.; Martínez, B.; «Simulación acústica y gráfica. Prototipo de navegación de entornos virtuales». Actas del 41º Congreso Nacional de Acústica - 6º Congreso Ibérico de Acústica. TecniAcústica 2010. 13-15 Octubre, León.

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». TECNIACUSTICA'11. CÁCERES, OCTUBRE 2011.