

VALENCIA
24-25 November
2011



ISVA

International Seminar
on Virtual Acoustics

INTERNATIONAL SEMINAR ON VIRTUAL ACOUSTICS - 2011

SEMINARIO INTERNACIONAL DE ACÚSTICA VIRTUAL - 2011

Valencia, 24 - 25 November/ Noviembre, 2011

**PROGRAMME
LECTURES AND PAPERS**

**PROGRAMA
CONFERENCIAS Y COMUNICACIONES**



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

EDITORIAL UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



INTERNATIONAL SEMINAR ON VIRTUAL ACOUSTICS
SEMINARIO INTERNACIONAL DE ACÚSTICA VIRTUAL

Valencia, 24 - 25 November/ Noviembre, 2011

PROGRAMME
LECTURES AND PAPERS

PROGRAMA
CONFERENCIAS Y COMUNICACIONES

EDITORIAL UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

First edition 2011

© of the present edition:
Editorial Universitat Politècnica de València
www.editorial.upv.es

© International Seminar on Virtual Acoustics

ISBN: 978-84-8363-764-7

Legal Deposit: V-3927-2011

Publisher reference number: 2663

Any unauthorized copying, distribution, marketing, editing, and in general any other exploitation, for whatever reason, of this piece of work or any part thereof, is strictly prohibited without the authors' expressed and written permission.



SEMINAR VENUE / SEDE DEL SEMINARIO

POLYTECHNIC UNIVERSITY OF VALENCIA,
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA,

Camino de Vera, s/n, 46022 - Valencia (SPAIN)

Auditori de la Ciutat Politècnica de la Innovació (Edifici 8B).

DATES / FECHAS

November / Noviembre 24-25, 2011

SEMINAR VENUE BY COURTESY OF SEDE DEL SEMINARIO CEDIDA POR

Universitat Politècnica de València (UPV)

ORGANIZING COMMITTEE / COMITÉ ORGANIZADOR

Arturo Barba Sevillano (UPV)

Salvador Cerdá Jordá (UPV)

Rosa María Cibrián Ortiz de Anda (UVEG)

Alicia Giménez Pérez (UPV)

Radu Lacatis (UPV)

Radha Montell Serrano (UPV)

Jaume Segura García (UVEG)

SCIENTIFIC COMMITTEE / COMITÉ CIENTÍFICO

Prof. Miguel Arana Burgui (UPNa)

Prof. Rosa María Cibrián Ortiz de Anda (UVEG)

Prof. Francesc Daumal i Domènech (UPC)

Prof. Alicia Giménez Pérez (UPV)

Prof. Tapio Lokki (ASF)

Prof. Antonio Pérez-López (SEA)

Prof. Michael Vorländer (ICA)

Prof. Teófilo Zamarreño García (US)

COLLABORATING ENTITIES

ENTIDADES COLABORADORAS

Universitat Politècnica de València (UPV)

Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN)

Sociedad Española de Acústica (SEA)

European Acoustics Association (EAA)

International Commission for Acoustics (ICA)

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la UPV (ETSII)

Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de la Comunidad Valenciana

Iglesia de la Compañía de Jesús de Valencia

Cabildo de la Catedral Metropolitana de Valencia

Asociación Española para la Calidad Acústica (AECOR)

COLLABORATING COMPANIES

EMPRESAS COLABORADORAS

Álava Ingenieros

Ingeniería para el Control del Ruido (ICR)

Gabinete de Ingeniería Acústica (GIA)

Brüel & Kjaer

Dasit Ramos S. L.

Inter Técnica S.L.

COORDINATOR / COORDINACIÓN

Prof. Alicia Giménez Pérez (UPV)

ACKNOWLEDGEMENTS / AGRADECIMIENTOS

Universitat Politècnica de València

CTT, CFP, ETSA, ETSIT, ETSII, EPSG, Servicios generales

Responsables de las salas y edificios patrimoniales

Responsables de las instalaciones de realidad virtual de la UPV y de la UVEG

Sr. D. Joan Bautista Peiró López

Director de Comunicación Institucional de la Universitat Politècnica de València

Ilmo. Sr. D. Jaime Sancho Andreu

Canónigo Conservador del Patrimonio Artístico de la Catedral Metropolitana de Valencia

Sr. D. Vicente Ros Pérez

Catedrático de órgano y clavecín del Conservatorio Superior de Música "Joaquín Rodrigo" de València

Sr. D. José Alfredo Pellicer Artés

Director Territorial de Cultura Conselleria Cultura de la Generalitat Valenciana

Sr. D. Antonio Pérez-López

Presidente de la Sociedad Española de Acústica

Sr. D. Antonio Calvo-Manzano

Secretario de la Sociedad Española de Acústica

Sra. Dña. Asunción García Solé

Secretaria de Comunicación Institucional de la Universitat Politècnica de València.

Sr. D. Gonçal Garcés Díaz-Munío

Apoyo a la traducción

WELCOME TO VALENCIA-ISVA-2011

Under the institutional sponsorship of the Spanish Acoustical Society (SEA), of the European Acoustics Association (EAA), of the Universitat Politècnica de València (UPV) and the Spanish Ministry of Science and Innovation (MICINN), this event is presented as a meeting of leading experts, national and international, in a new subject area in Spain: virtual reality techniques, simulation and auralization methodologies, subjective and objective assessment of real and virtual environments.

Because of its open nature, this event will deal directly an issue of great interest, which still arises interesting questions to deal about room acoustics in general and the acoustic assessment of national architectural heritage. This event will bring together national and international scientists, acoustic specialists, architects, engineers, construction engineers, industry and professionals interested in Acoustics of enclosures in the development of objective and subjective measurements to optimize the quality of spaces in which factor audition is preferred, with the application of virtual simulation (with visual and aural sensation). It also aims to be a forum for debate, nationally and internationally on experience in different public funded research projects.

BIENVENIDOS A VALENCIA-ISVA-2011

Bajo el patrocinio institucional del Ministerio de Ciencia e Innovación (MCINN), la Universitat Politècnica de València (UPV), la Sociedad Española de Acústica (SEA) y de la European Acoustics Association (EAA), este evento se plantea como un encuentro entre reconocidos expertos, a nivel nacional e internacional, de una incipiente área temática en España. En ella se conjugarán técnicas de realidad virtual, simulación y auralización, metodologías de evaluación subjetiva y objetiva de entornos reales y virtuales.

Por su carácter abierto, este evento difundirá de modo directo un tema de interés, que aún presenta cuestiones abiertas y candentes sobre la acústica de salas, en general y la evaluación acústica del patrimonio arquitectónico nacional. Está orientado a científicos nacionales e internacionales, especialistas acústicos, arquitectos, ingenieros, técnicos de la construcción, de la industria y profesionales interesados en Acústica de recintos, en el desarrollo de las medidas objetivas y subjetivas, para optimizar la calidad de espacios en los que la audición es factor preferente, con la aplicación de la simulación virtual (con sensación visual y sonora). También pretende ser un foro de debate, a nivel nacional e internacional, sobre la experiencia adquirida en diferentes investigaciones financiadas con fondos públicos.

INTERNATIONAL SEMINAR ON VIRTUAL ACOUSTICS

PROGRAM VALENCIA-ISVA-2011

Thursday November 24, 2011

8:00 - 9:00	Registration
9:00 - 9:30	OPENING ACT
9:30 - 10:30	OPENING LECTURE: Acoustics Group of Universitat Politècnica de València – Universitat de València, Spain <i>"Revisión de la acústica de salas: desde las medidas objetivas a la virtualización y evaluación subjetiva"</i>
10:30 - 12:00	COFFEE / POSTER PRESENTATIONS / POSTER SESSION
12:00 - 13:00	LECTURE: Prof. Tapio Lokki, Aalto University Helsinki, Finland <i>"Recording and Reproducing Concert Hall Acoustics for Subjective Evaluation"</i>
13:00 - 15:00	Lunch
15:00 - 16:00	LECTURE: Prof. Teófilo Zamarreño García, Universidad de Sevilla, Spain <i>"Simulación Acústica y Virtualización en Recintos de Culto"</i>
16:00 - 16:30	COFFEE / POSTER SESSION
16:30 - 17:30	LECTURE: Prof. Miguel Arana, Universidad Pública de Navarra, Spain <i>"Predictions vs Measurements in Room Acoustics: A Difficult Adjustment"</i>
18.00 - 20.30	Tour to the city center of Valencia
20:00 - 21.00	ORGAN CONCERT
21.00	Seminar Dinner (optional)

Friday November 25, 2011

9.30 - 10:30	LECTURE: Prof. Michael Vorländer, RWTH Aachen University, Germany <i>"Models and Algorithms for Computer Simulations in Room Acoustics"</i>
10:30 - 11:00	COFFEE / POSTER SESSION
11:00 - 12:30	VISIT TO THE UPV VIRTUAL REALITY FACILITIES
12:30 - 13:30	LECTURE: Prof. Francesc Daumal i Domènech, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain <i>"Restauración y Rehabilitación Acústica en la Arquitectura Patrimonial (realidad y mito de los modelos)"</i>
13.30 - 14.00	CLOSING ACT
14:00	FAREWELL COCKTAIL

SEMINARIO INTERNACIONAL DE ACÚSTICA VIRTUAL
PROGRAMA VALENCIA- ISVA-2011

Jueves 24 de Noviembre de 2011

8:00 - 9:00	Inscripción y registro
9:00 - 9:30	CEREMONIA INAUGURAL
9:30 - 10:30	CONFERENCIA INAUGURAL: Grupo de Acústica de la Universitat Politècnica de València – Universitat de València, España <i>"Revisión de la acústica de salas: desde las medidas objetivas a la virtualización y evaluación subjetiva"</i>
10:30 - 12:00	PAUSA-CAFÉ / SESIÓN DE PÓSTER / PRESENTACIONES DE PÓSTER
12:00 - 13:00	CONFERENCIA: Prof. Tapio Lokki, Aalto University Helsinki, Finlandia <i>"Recording and Reproducing Concert Hall Acoustics for Subjective Evaluation"</i>
13:00 - 15:00	Almuerzo - Comida
15:00 - 16:00	CONFERENCIA: Prof. Teófilo Zamarreño García, Universidad de Sevilla, España <i>"Simulación Acústica y Virtualización en Recintos de Culto"</i>
16:00 - 16:30	PAUSA-CAFÉ / SESIÓN DE PÓSTER
16:30 - 17:30	CONFERENCIA: Prof. Miguel Arana, Universidad Pública de Navarra, España <i>"Predictions vs Measurements in Room Acoustics: A Difficult Adjustment"</i>
18.00 - 20.30	Visita al centro de la ciudad de Valencia
20:00 - 21.00	CONCIERTO DE ÓRGANO
21.00	Cena del Seminario (opcional)

Viernes 25 de Noviembre de 2011

9.30 - 10:30	CONFERENCIA: Prof. Michael Vorländer, RWTH Aachen University, Alemania <i>"Models and Algorithms for Computer Simulations in Room Acoustics"</i>
10:30 - 11:00	PAUSA-CAFÉ / SESIÓN DE PÓSTER
11:00 - 12:30	VISITA A LAS INSTALACIONES DE REALIDAD VIRTUAL DE LA UPV
12:30 - 13:30	CONFERENCIA: Prof. Francesc Daumal i Domènech, Universitat Politècnica de Catalunya, España <i>"Restauración y Rehabilitación Acústica en la Arquitectura Patrimonial"</i>
13.30 - 14.00	CEREMONIA DE CLAUSURA
14:00	CÓCTEL DE DESPEDIDA

INVITED SPEAKERS / PONENTES INVITADOS

Prof. Miguel Arana Burgui

Public University of Navarra (UPNA) (Spain). Professor at the Department of Applied Physics and head of the research group on Acoustic UPNA. Member of the Board of the Spanish Society of Acoustics and reviewer for the journals: Acta Acustica united with ACOUSTIC, Applied Acoustics, International Journal of Sound and Vibration, among others. He will explain his research in signal processing and computational methods.



Universidad Pública de Navarra (UPNa), (España). Profesor Titular del Departamento de Física Aplicada y responsable del grupo de Investigación de Acústica de la UPNa. Miembro del Consejo Rector de la Sociedad Española de Acústica y revisor de las revistas: Acta Acustica united with ACUSTICA, Applied Acoustics, International Journal of Sound and Vibration, entre otras. Difundirá sus conocimientos en tratamiento de señal y métodos de cálculo.

Prof. Francesc Daumal i Domènech

Polytechnic University of Catalonia (UPC) (Spain). Professor at the Department of Architectural Technology at UPC. Member of the Board of the Spanish Society of Acoustics, acoustical consultant, specialist in the area of Artificial Conditioning and Acoustics in Architecture. He will synthesize his knowledge in acoustic rehabilitation.



Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) (España). Catedrático en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la UPC. Vocal del Consejo Rector de la Sociedad Española de Acústica, consultor acústico, especialista en el área de Acondicionamiento Artificial y en la de Arquitectura Acústica. Sintetizará los conocimientos en rehabilitación acústica.

Prof. Tapio Lokki

Aalto University, Helsinki School of Science and Technology (Finland). President of the Finnish Society of Acoustics, Member of IEEE Computer Society, editor of the Journal of the Acoustical Society of America and the journal Acta Acustica united with Acustica. He is a well-known expert in the field of virtual reality, auralization and simulations.



Aalto University, Helsinki, School of Science and Technology, (Finlandia). Presidente de la Sociedad Finlandesa de Acústica, Miembro del IEEE Computer Society, revisor del Journal of the Acoustical Society of America y de la revista Acta Acustica United with Acustica. Es un reconocido experto en el área de realidad virtual, auralizaciones y simulaciones.

Prof. Michael Vorländer

RWTH Aachen University (Germany). President of the International Commission for Acoustics (ICA), Vice President of the European Acoustics Association (EAA) until 2010. Awarded the Medal of the Stephens Institute of Acoustics, United Kingdom and Diploma de Reconhecimento of Actividade of the Acoustical Society of Portugal among others. This specialist, internationally recognized, will show us his knowledge and research in auralization.



RWTH Aachen University (Alemania). Presidente de la Comisión Internacional de Acústica (ICA), Vicepresidente de la Asociación Europea de Acústica (EAA) hasta 2010. Galardonado con la Stephens Medal of the Institute of Acoustics, United Kingdom y Diploma de Reconhecimento de Actividade, Acoustical Society of Portugal entre otros. Este especialista, mundialmente reconocido, aportará sus numerosos y novedosos conocimientos en auralizaciones.

Prof. Teófilo Zamarreño García

Professor at the Universidad de Sevilla, (España). Vocal member of the Governing Board of the Spanish Society of Acoustics. Member of the EAA (European Acoustics Association) and Director of the Department of Applied Physics. He is a well-known expert in room acoustics in national and international stages. He will explain his research in the Acoustic of Worship Enclosures.



Universidad de Sevilla, (España), Titular de Universidad, miembro y vocal del Consejo Rector de la Sociedad Española de Acústica. Miembro de la EAA (European Acoustics Association) y Director del Departamento de Física Aplicada. Experto reconocido a nivel nacional e internacional en área de la acústica de salas, aportara sus investigaciones en Acústica de Recintos de Culto.

Contents / Contenidos

Conferences / Conferencias

Revisión de la acústica de salas: Desde las medidas objetivas a la virtualización y evaluación subjetiva	14
Recording and reproducing Concert Hall Acoustics for subjective evaluation.....	32
Simulación acústica y virtualización en recintos de culto	38
Predictions vs measurements in Room Acoustics: A difficult adjustment.....	62
Models and algorithms for computer simulations in Room Acoustics.....	72
Restauración y rehabilitación acústica en la arquitectura patrimonial (realidad o mito de los modelos)	83

Papers / Comunicaciones

Initial acoustic model to simulate the sound field of the Cathedral of Seville	106
Multisensory evaluation to support urban decision making	114
Simulación acústica de la iglesia de Santa Ana de Moratalaz	122
On absorption and difussion coefficients in acoustic simulation softwares: Effects on parameters.....	130
Recording, simulation and reproduction of spatial soundfields by PCM spatial sampling	138
Perceived feasibility of computer-generated auralization in Concert Halls.....	153
On the use of binaural recordings for dynamic binaural reproduction	163
Exploration of Virtual Acoustic Room simulations by the visually impaired	169
Herramienta 3D-FDTD para el análisis de sistemas de control activo de ruido mediante visualización del campo sonoro resultante	178
Simulación acústica de auditorios y edificios patrimoniales. Integración con entornos de realidad virtual	185
Elaboración de modelos para el estudio acústico en entornos virtuales	194
Análisis de la policoralidad en espacios sacros.....	200
Estudio de la distribución espacial de valores medidos C80 en auditorios	207

CONFERENCES

CONFERENCIAS



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, buscando 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.

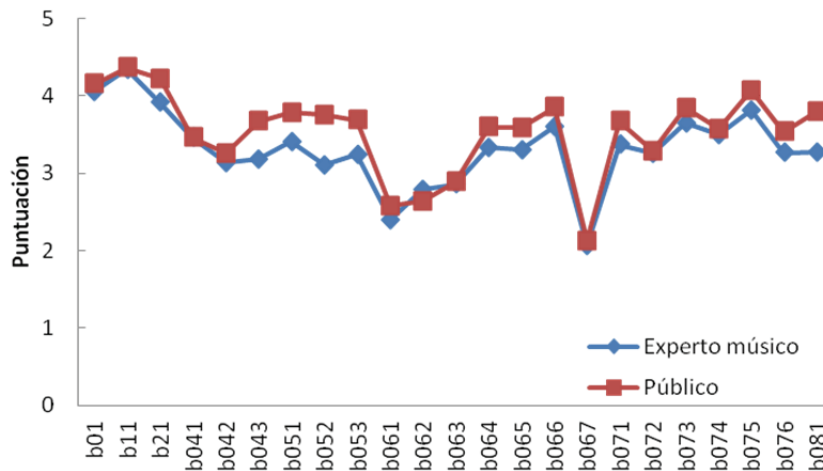


Figura 1. Puntuaciones medias de las preguntas de la encuesta para el público y los expertos en música

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).

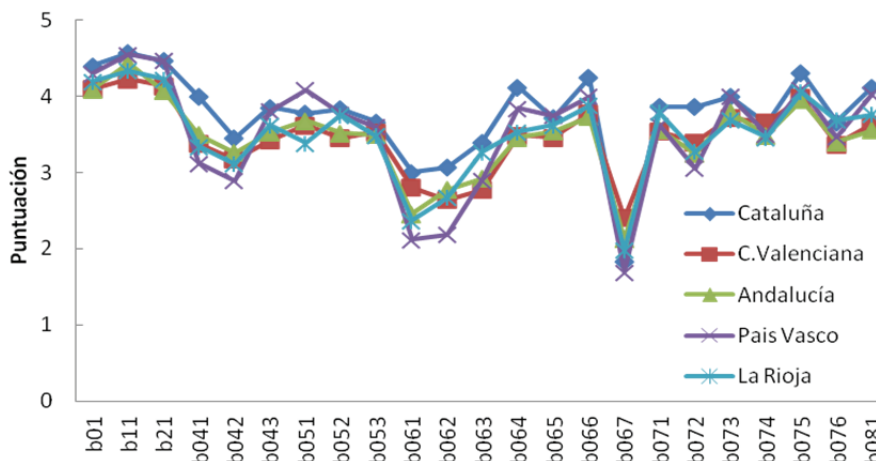


Figura 2. Puntuaciones medias de las preguntas de la encuesta para expertos en música en distintas comunidades autónomas.

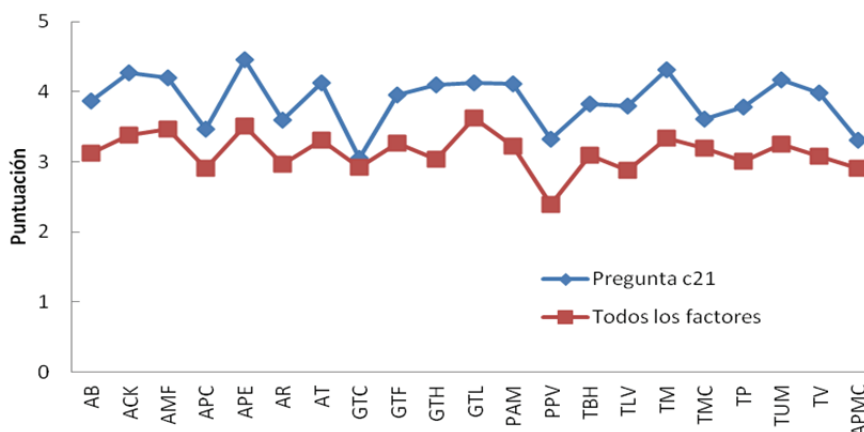


Figura 3. Valoraciones de las salas según la pregunta de calificación de sala de la encuesta o mediante los factores de valoración subjetiva

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).

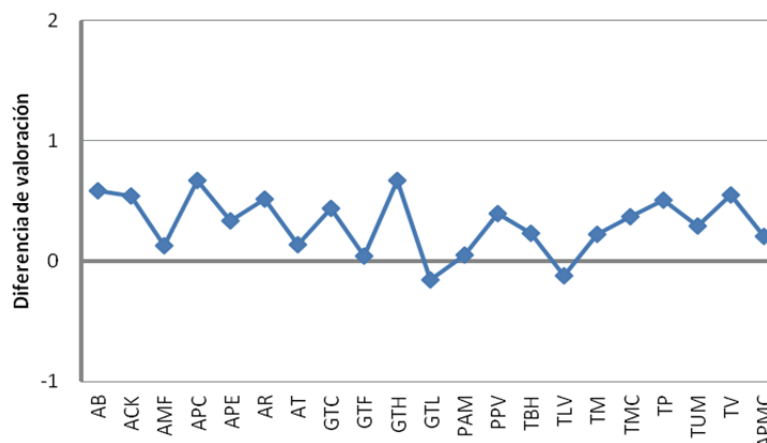


Figura 4. Diferencia entre la valoración media de las sala considerando todos los factores o sólo el factor F1 de la encuesta.

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).

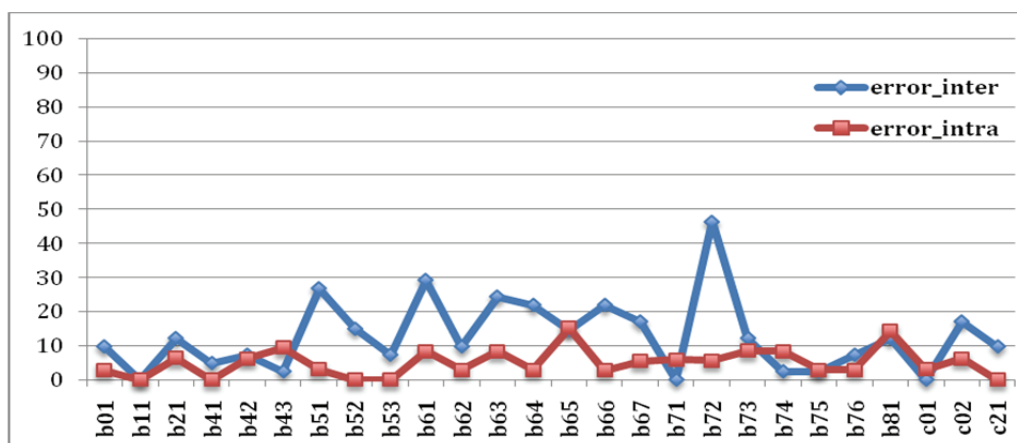


Figura 5. Error intraobservador e interobservador en la respuesta de la encuesta de valoración subjetiva, obtenida mediante reproducción en entorno virtual CAVE.

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	$EDT_{mid} = \frac{1}{2}(EDT^{500\text{ Hz}} + EDT^{1\text{ kHz}})$
Inicial 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	Gmid	LGe4	RTmid	EDTmid	C50avg	C80avg	Ts1kHz	STI	RASTI	IACCe3
LF _{Ce4}		0,92													
LF _{e3}		0,92	0,83												
Gmid					0,56										
LGe4						0,80									
RTmid	0,58														
EDTmid	0,58							0,98							
C50avg	-0,59						-0,52	-0,88	-0,86						
C80avg	-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	
IACCe3		-0,55	-0,68	-0,55											
Brilliance								-0,57	-0,54		0,55		0,55	0,55	
IACCa3															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
TslkHHz	-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 $S_i = g(x_i) = -a_i |x_i|^{3/2}$ 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. $x_1 = IACC_{E3}$ | $a_1 = 1.45$ |
| 2. $x_2 = \log[ITDG/ITDG_{pref}]$ | $a_2 = 1.42$ si $x_2 \geq 0$
$= 1.11$ si $x_2 \leq 0$ |
| 3. $x_3 = G_{mid} - (G_{mid})_{pref} dB$ | $a_3 = 0.04$ si $G_{mid} < 4.0$
$= 0.07$ si $G_{mid} > 5.5$ |
| 4. $x_4 = \log[EDT/EDT_{pref}]$ | $a_4 = 9$ si $EDT < 2.0$
$= 12$ si $EDT > 2.3$ |
| 5. $x_5 = \log[BR/BR_{pref}]$ | $a_5 = 10$ si $RT > 2.2$ sec. |

Y los valores "preferidos" son:

- $ITDG_{pref} \leq 20$ ms.
- $(G_{mid})_{pref} \in [4.0, 5.5]$
- $EDT_{pref} \in [2.0, 2.3]$
- $BR_{pref} [1.1, 1.25]$ si $RT > 2.2$
- $BR_{pref} [1.1, 1.45]$ si $RT < 1.8$.
- 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.

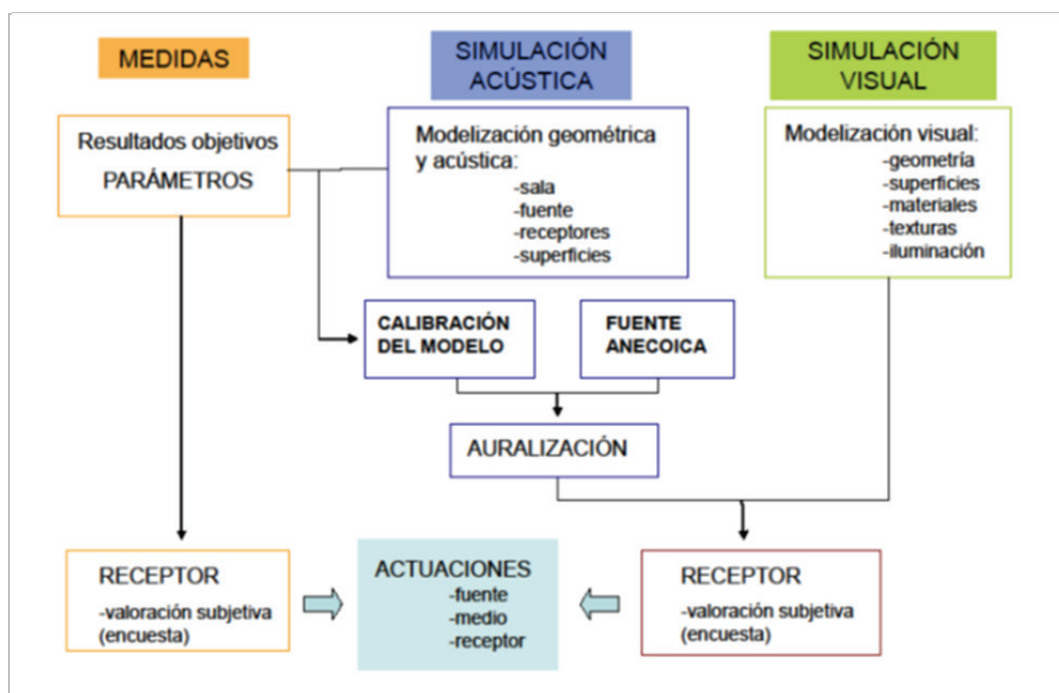


Figura 6. Esquema de las fases de un proceso de simulación virtual acústica.

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.

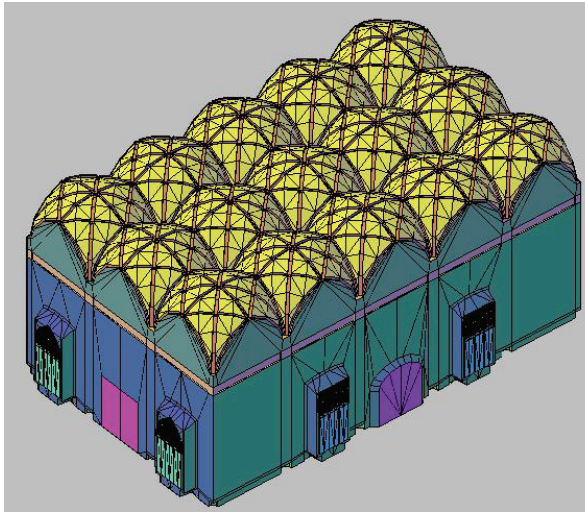
Tabla 4: Número de polígonos para la simulación visual (complejo) y acústica (simplificado) de los edificios patrimoniales estudiados.

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

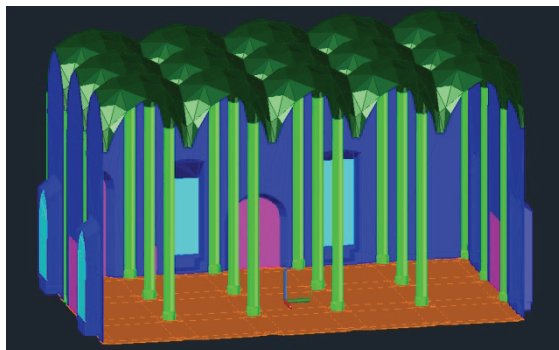
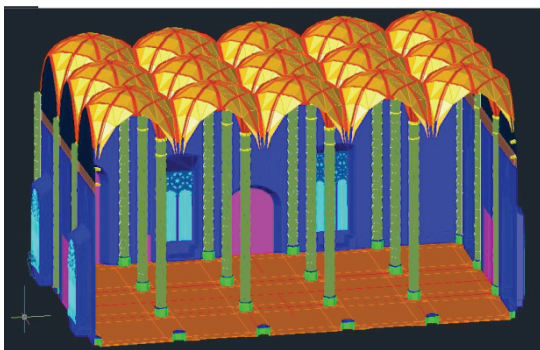
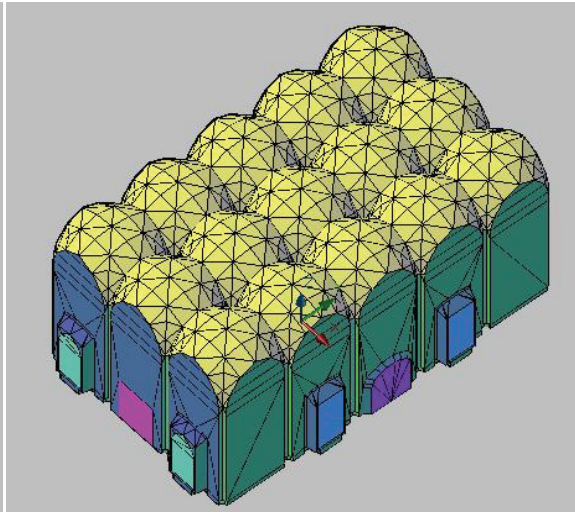


Figura 8: CATEDRAL METROPOLITANA DE VALENCIA

MODELO COMPLEJO

MODELO SIMPLIFICADO

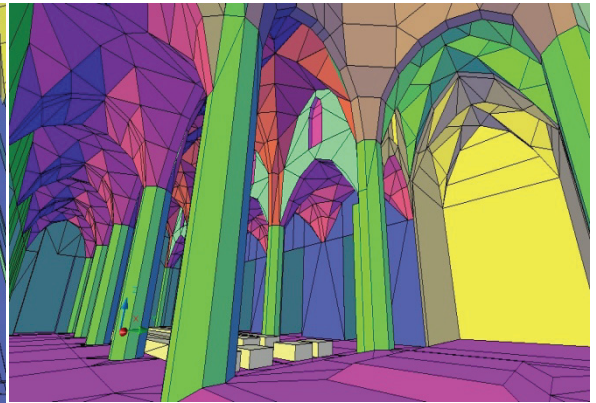
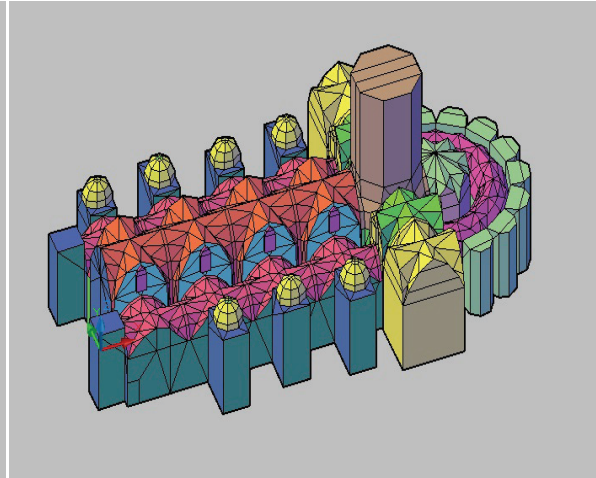
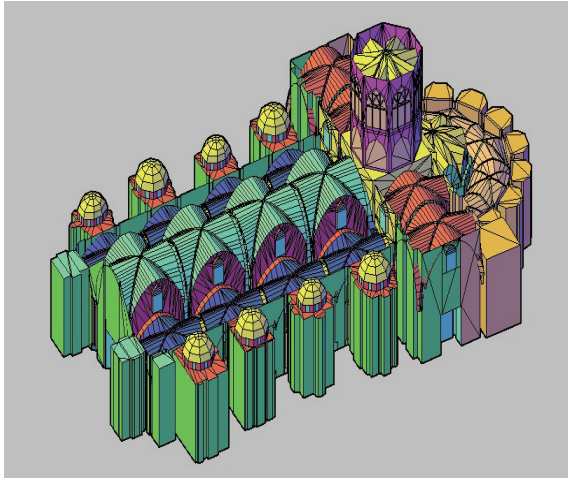
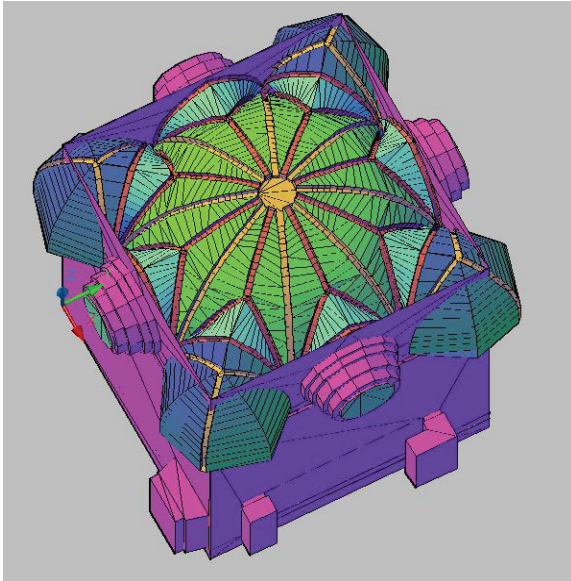


Figura 9: CAPILLA DEL SANTO CÁLIZ DE VALENCIA

MODELO COMPLEJO



MODELO SIMPLIFICADO

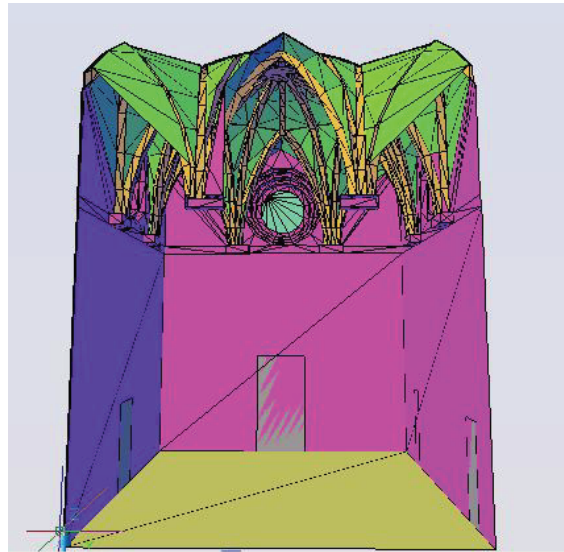
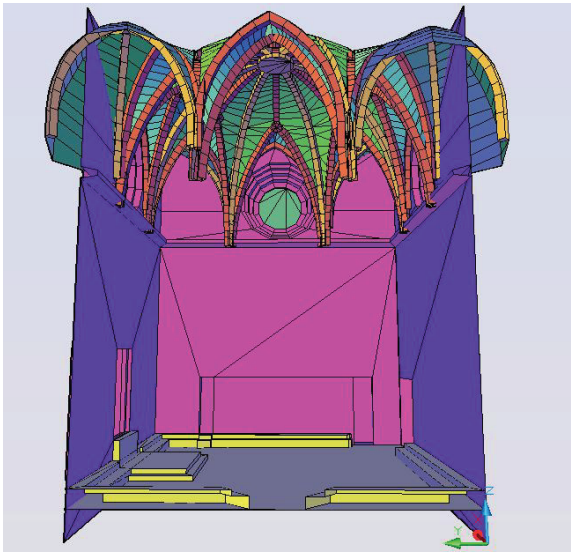
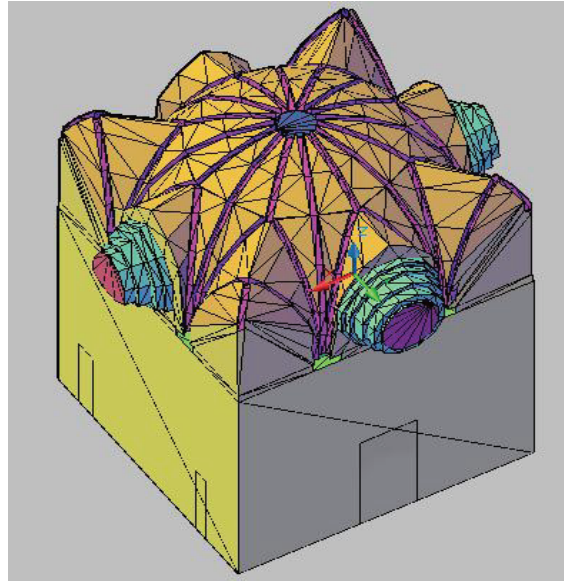
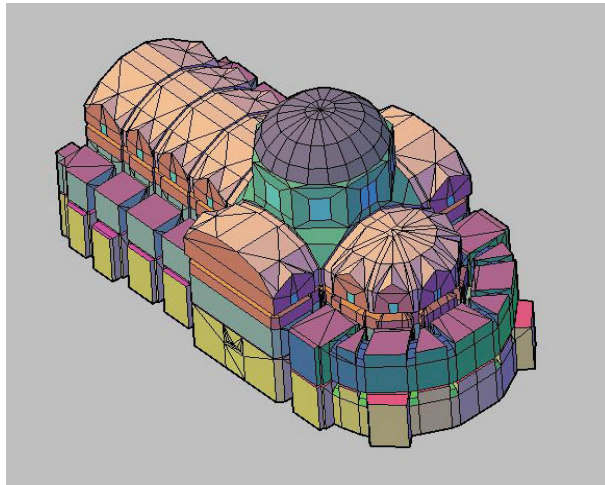
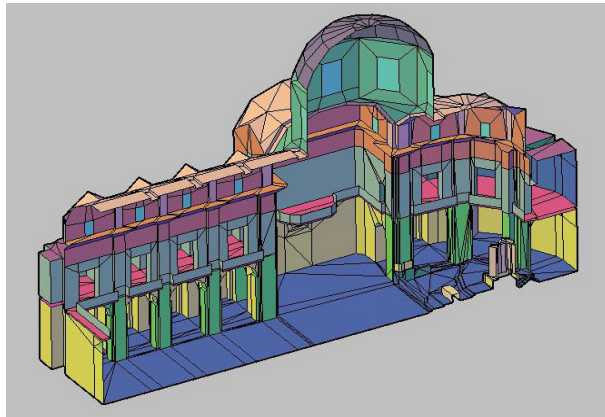


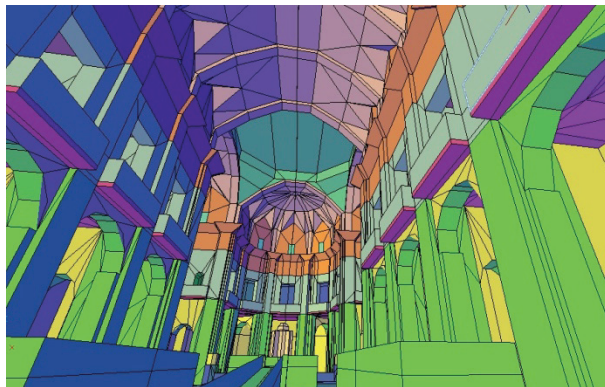
Figura 10: BASÍLICA DE SANTA MARÍA D'ELX



MODELO COMPLEJO



USO HABITUAL

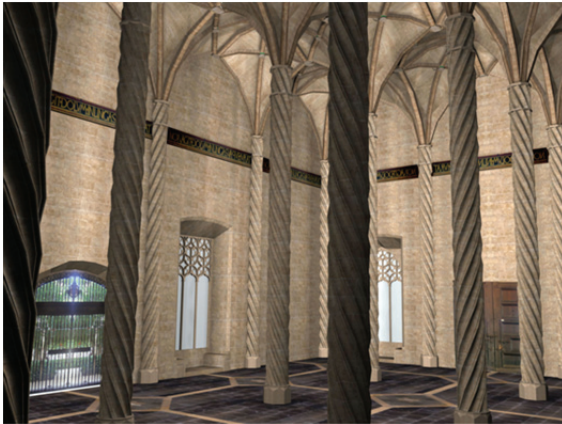


USO PARA
REPRESENTACIÓN DEL
MISTERI

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] Cerdá 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.



RECORDING AND REPRODUCING CONCERT HALL ACOUSTICS FOR SUBJECTIVE EVALUATION

Reference PACS: 43.55.Mc, 43.55.Gx, 43.38.Md

Lokki, Tapio

*Aalto University School of Science, Dept. of Media Technology
P.O.Box 15400, FI-00076 AALTO, Finland
Tapio.Lokki@aalto.fi*

ABSTRACT

Listen to the acoustics of an existing concert hall in the laboratory environment requires capturing and reproducing spatial sound as authentically as possible. Based on our recent research, the best quality can be achieved by measuring spatial impulse responses with a large number of source positions, process the responses with spatial impulse rendering (SIRR), and convolve these processed responses with anechoic symphony orchestra recordings. This paper explains the recording and reproduction processes in detail and gives references to publications in which the presented methods are used in subjective evaluation of concert hall acoustics.

1. INTRODUCTION AND SOUND SOURCES

The subjective evaluation of concert hall acoustics can be done in-situ by listening the real symphony orchestra or later in the laboratory if the music in the hall is captured and rendered properly. Both techniques are widely used and they have some pros and cons, as discussed, e.g., in [1]. In this paper, we are discussing on the techniques with which the spatial sound in the real hall can be captured and transferred to the laboratory for subjective listening tests. The presented techniques aim at simultaneous comparison of multiple halls, or different seats in one or more halls. The key point is that a virtual symphony orchestra is applied to guarantee exactly the same performance in each hall. Such simultaneous listening is essential to careful listening to the differences between acoustics of the concert halls as discussed in [1,2,3].

The most typical sound source in a concert hall is a symphony orchestra that has dozens of musicians with instruments of varying directivity [4]. Therefore, for auralization studies it is not very convincing to use only a few source positions on stage as is recommended for measuring objective parameters in the ISO standard 3382-1:2009 [5]. In addition, no real instrument has similar directivity as the omnidirectional dodecahedron that fulfils the standard. Naturally, it would be desirable to record a real orchestra, but even professional orchestra cannot play exactly the same way in different halls. Therefore, a controllable orchestra, which can be calibrated is needed for concert hall acoustics evaluation studies.

In our solution, we use 24 source positions, with in total of 34 active two-way loudspeakers, to simulate the symphony orchestra. The loudspeakers are covering an area equivalent to the area that a symphony orchestra would occupy [6]. The number of loudspeakers and the number of individual channels are a compromise between practicality and accuracy. Naturally we could use one loudspeaker at the location of each individual player, but then the recording of one hall would not be possible in one day.

All strings are reproduced with channels 1-14 and with 23 loudspeakers, see Fig. 1. Thus, most of the string channels use two loudspeakers to better match the total directivity of a channel to the directivity of a violin or a viola. Channels 15-18 are for woodwinds, one for each instrument group. Channels 19 and 20 represent 4 French horns each and channels 21-24 are for trumpets, trombones, tuba, and timpani as well as other percussion instruments.

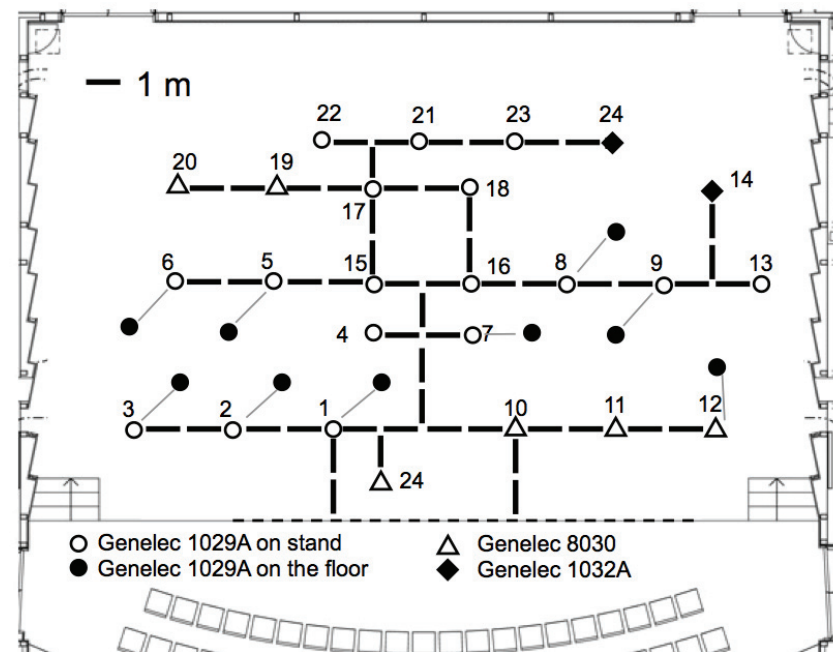


Figure 1: The layout of the loudspeaker orchestra [6]. The distribution of the instruments to the loudspeaker channels is explained in [2].

2. RECORDING THE SPATIAL SOUND

The loudspeaker orchestra can be used to reproduce anechoic music [7] in-situ in the concert hall, or it can be used for impulse response measurements. The music or impulse responses should be captured with multiple microphones so that the sound field in the hall could be reproduced as authentically as possible in the laboratory. Traditionally, the dummy heads are used for binaural recordings and then these recordings are listened to with high quality headphones. However, in our opinion the quality of binaural technology is not good enough for accurate evaluation of concert hall acoustics. There are at least three major issues that hinder the use of binaural technology:

1. A dummy head is static, thus subjects in the laboratory cannot move their heads when listening carefully to the recordings. The lack of head movements, in addition to lack of visual cues, makes it harder to concentrate to the orchestra and in our opinion this is one of the reasons why dummy head recordings sound often noisy. Our brains do not have movement and visual cues that help in concentrating to the orchestra, thus suppressing other sound events, as is the case in-situ in a concert hall.
2. The headphone compensation is very cumbersome at high frequencies above 5 kHz. Even though the compensation is done very carefully, a small change in headphone position after compensation measurement can make large error to binaural signals as the wavelength of sound at high frequencies is so small. Below 5 kHz, the compensation can be done properly, but unfortunately there is important information in the music also at high frequencies [8, 9], and these frequencies should be reproduced correctly.
3. The externalization of binaural recordings is not working well enough for all subjects. The dummy head is not the same size and shape as the heads of subjects, thus there is a HRTF mismatch between the heads. That, in addition to lack of head movements, might hinder the proper externalization.

Mainly due to these three problems, we have been using loudspeakers in the spatial sound reproduction. Multichannel 3D sound reproduction system allows a listener to move and rotate his head, the loudspeakers reproduce the whole audible frequency range with flat spectrum and there are no individual problems due to HRTF mismatch.

2.1 Recording music for spatial sound reproduction

Recording spatial sound in a concert hall so that it can be properly reproduced with a 3D loudspeaker array is not a trivial task. The most well known method is Ambisonics [10]. Currently only first order microphones are commercially available. The B-format consists of one omni and three figure-of-eight microphone signals. The B-format recording can be reproduced with a 2D or 3D loudspeaker array and Ambisonics processing treats equally sounds arriving from all directions. When Ambisonics is listened to anechoic or dry listening conditions it reproduces the 3D sound field quite nicely. However, the spatial image is not as accurate as it could be and in some cases Ambisonics can produce undesired phase errors. However, current research on 2nd order microphones and related signal processing will make spatial sound more accurate in the near future.

Another spatial sound coding technology is Directional Audio Coding (DirAC) [11, 12]. It is based on the idea that the original sound field in a concert hall is not required in the laboratory. If all binaural cues needed by human spatial hearing are reproduced, listeners would perceive the sound as in the recording space. Therefore, DirAC applies the intensity and diffuseness analysis in time-frequency domain to distribute the B-format recording to the 3D loudspeaker setup. Figure 2 shows how we have processed signals captured with 3D intensity probe (GRAS Type 50 VI-1). First the anechoic music emitted by the loudspeaker orchestra is recorded with six high quality omnidirectional microphones. They consist of three pairs in x, y, and z directions and recordings in each receiver position are done twice with 25mm and 100mm spacers. Two spacers are needed to obtain good figure-of-eight signals from the probe at wide frequency range [13]. Then B-format signals are coded with DirAC for the 16-channel 3D reproduction system, consisting of 8 loudspeakers at ear level and 4 at elevation of 45 degrees and 4 at elevation of -45 degrees. Finally, only the usable frequency range from both recordings is used.

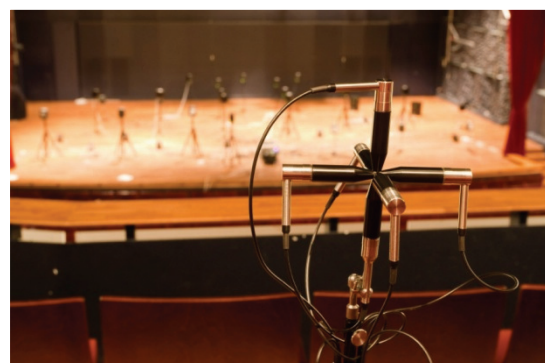
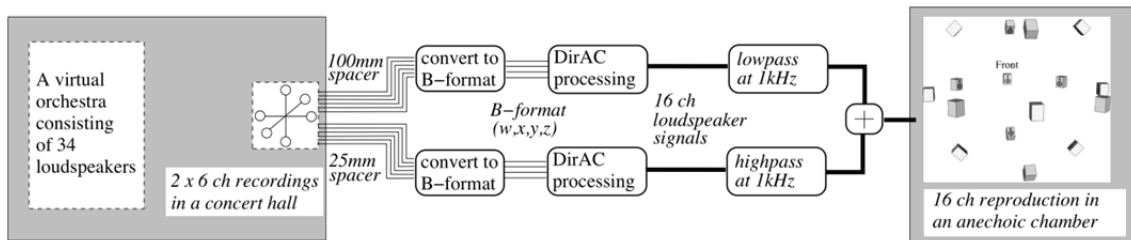


Figure 2: The recording of music emitted by the loudspeaker orchestra in a concert hall. The six microphone signals are converted to B-format, which is furthermore processed with DirAC for 16-channel loudspeaker reproduction [2].

The DirAC processing has some drawbacks that might affect to the sound quality. First of all the conversion from six omnidirectional microphones to B-format increases the noise level at low

frequencies, which might be audible when orchestra is playing in *piano*. In addition, the transients of the recorded signals might be slightly blurred due to the smoothing and windowing that are necessary to avoid audible artefacts in the final signals. Although, these problems can lower the sound quality, the processing is equal to all recordings, thus the differences between the studied concert halls remain, if the processing artefacts are not overriding them.

2.2 Capturing impulse responses for spatial sound reproduction

Another option for spatial sound capturing is to measure a spatial impulse response in a concert hall, distribute it for each reproduction loudspeaker and finally convolve the loudspeaker responses with anechoic music. Again, we are using for measurements a six-channel GRAS vector intensity probe (Type 50 VI-1) and the impulse responses are measured with swept-sine technique [14] to obtain high signal to noise ratio. Each loudspeaker on the stage was calibrated in each hall by measuring 85 dBA at 1 m distance when the loudspeaker emitted bandpass (200 - 1000 Hz) white noise. All six omnidirectional microphones were calibrated with the B&K 4231 calibrator.

To subdivide the B-format impulse response to a 3D loudspeaker array we use spatial impulse response rendering (SIRR) algorithm [15,16], as illustrated with one real measured example in Fig. 3. It divides a spatial impulse response in time-frequency domain into individual impulse responses, one for each reproduction channel. In our concert hall measurements, one measured spatial impulse response was distributed for the 14 channel spatial sound reproduction system, consisted of eight loudspeakers at ear level at 45 degree intervals, four loudspeakers horizontally equispaced at 55 degree elevation above the ear level, and two loudspeakers 40 degree below ear level at azimuth angles -22 and 22 degrees. The processing of one measurement from one loudspeaker orchestra channel is illustrated in Fig. 3. With the full loudspeaker orchestra, the SIRR processing produced 672 impulse responses (24 source channels X 14 reproduction channels X 2 frequency ranges, crossover at 1 kHz) for convolution with the anechoic music [7].

The signals of individual instruments were convolved with the SIRR processed responses of the loudspeaker orchestra channels as presented earlier [2]. Each string instrument recording was individually processed with time varying delays, pitch shifting, amplitude modulation, and varying the recording microphone. When these copies were reproduced from spatially separated loudspeakers, a natural and convincing string section sound was achieved [17]. This processing method produced high quality samples that can be simultaneously compared in the laboratory environment.

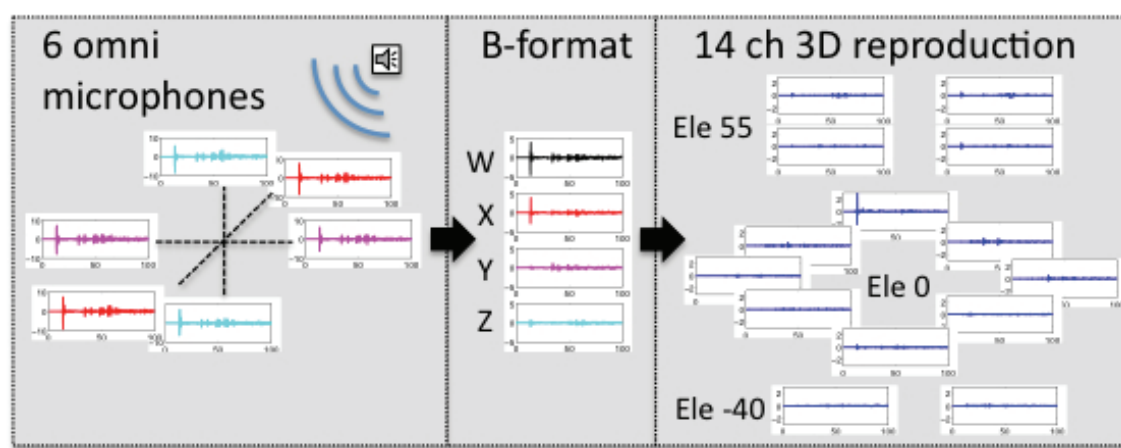


Figure 3: The processing of one spatial impulse response captured with six omnidirectional microphones with the SIRR method [15, 16]. The computed response for each reproduction channel is convolved with corresponding anechoic recording for subjective evaluation.

3. CONSIDERATIONS REGARDING THE LISTENING SPACE IN THE LABORATORY

When listening to reproduced sound in the laboratory, the listening room should be acoustically designed. The best possible solution is an anechoic room, which has 3D multichannel setup, as in Fig. 4 on the left. This room has 16 loudspeakers as explained in Section 2.1. However, anechoic rooms are very expensive and they are not always available. Therefore more practical rooms are needed and we have solved this problem by converting one normal office room to a listening space. The room is acoustically treated with a lot of absorptive materials, such as a soft sofa, mineral wool and some absorptive wedges that were left over in the renovation of an anechoic room. The room is not anechoic, but reverberation time is less than 0.2 seconds at mid frequencies and the room does not have pronounced modes at low frequencies. In addition, 14 reproduction loudspeakers (see Section 2.2) are at 1.0 m distance from the head of the listener, thus the reverberation of the room is not affecting to the listening experience.

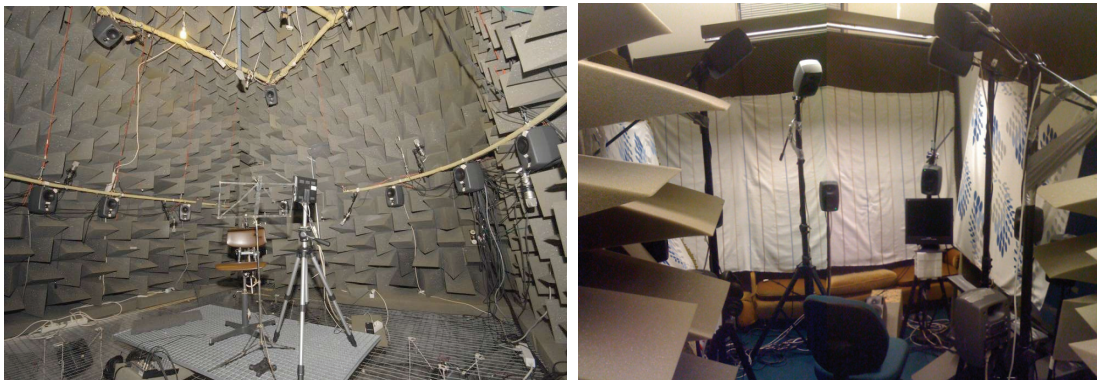


Figure 4: Two different multichannel listening rooms. On the left an anechoic room with 16 reproduction channels. On the right an acoustically treated normal office room with 14 reproduction channels.

There is no optimal number of reproduction loudspeakers. The number and locations of loudspeakers depend on the spatial sound rendering algorithm and they should be optimal for the particular algorithm. The SIRR method renders the sound with defined direction (based on sound intensity analysis) with vector base amplitude panning (VBAP) [18] and the diffuse sound is distributed to all loudspeakers. Therefore, the loudspeaker locations should be optimized for VBAP, keeping in mind the properties of human spatial hearing. In a concert hall the sound reaches the listener from the upper hemisphere and possible in front below the ear level. Therefore, our current loudspeaker setup has 8 loudspeakers at ear level (45 degree intervals), four at elevation of 55 degrees (90 degree intervals) and two loudspeakers 40 degree below ear level at azimuth angles -22 and 22 degrees.

4. CONCLUSIONS

This paper discusses the recording of acoustics of concert halls for listening to the sound later in the laboratory environment. Such methodology is needed to perform subjective evaluations of concert hall acoustics. The presentation is mainly describing the technology that we have been using in our recent studies. Although many other techniques can also be used, our choices are based on the careful thinking of the main problem; how to capture and reproduce the sound of a symphony orchestra. Here, an overview of the applied methods is presented and more detailed reasoning why these techniques are used can be found from the original articles.

5. ACKNOWLEDGMENTS

The research leading to these results has received funding from the Academy of Finland, project nos. [218238 and 140786] and the European Research Council under the European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) / ERC grant agreement no. [203636].

6. REFERENCES

- [1] T. Lokki, H. Vertanen, A. Kuusinen, J. Pätynen, and S. Tervo, "Auditorium acoustics assessment with sensory evaluation methods," In *the International Symposium on Room Acoustics (ISRA2010)*, Melbourne, Australia, August 29-31 2010.
- [2] T. Lokki, J. Pätynen, A. Kuusinen, H. Vertanen, and S. Tervo, "Concert hall acoustics assessment with individually elicited attributes", *Journal of the Acoustical Society of America*, 130, 835–849 (2011).
- [3] T. Lokki, J. Pätynen, and N. Zacharov, "Concert hall acoustics assessment with sensory evaluation – tools and practices," in *The IOA International Conference on Auditorium Acoustics*, Dublin, Ireland, 2011, pp. 35–44.
- [4] J. Pätynen, and T. Lokki, "Directivities of symphony orchestra instruments," *Acta Acustica united with Acustica*, 96, 138–167 (2010).
- [5] ISO 3382-1:2009, "Acoustics – measurement of room acoustic parameters – part 1: Performance spaces," (International Standards Organization, Geneva, 2009).
- [6] J. Pätynen, S. Tervo, and T. Lokki, "A loudspeaker orchestra for concert hall studies," in *The Seventh International Conference On Auditorium Acoustics*, 45–52 (Institut of Acoustics, Oslo, Norway, 2008), also published in *Acoustics Bulletin*, 34(6), 32–37 (2009).
- [7] J. Pätynen, V. Pulkki, and T. Lokki, "Anechoic recording system for symphony orchestra", *Acta Acustica united with Acustica*, 94, 856–865 (2008).
- [8] T. Lokki, J. Pätynen, S. Tervo, S. Siltanen, and L. Savioja, "Engaging concert hall acoustics is made up of temporal envelope preserving reflections," *Journal of the Acoustical Society of America*, 129, EL223–EL228 (2011).
- [9] T. Lokki, J. Pätynen, "Lateral reflections are favorable in concert halls due to binaural loudness," *Journal of the Acoustical Society of America*, 130, EL345-EL351 (2011).
- [10] M. Gerzon, "Periphony: With-height sound reproduction," *Journal of the Audio Engineering Society*, 21, 2–10 (1973).
- [11] V. Pulkki, "Spatial sound reproduction with directional audio coding," *Journal of the Audio Engineering Society*, 55, 503–516 (2007).
- [12] J. Vilkkamo, T. Lokki, and V. Pulkki, "Directional audio coding: Virtual microphone based synthesis and subjective evaluation," *Journal of the Audio Engineering Society*, 57, 709–724 (2009).
- [13] J. Merimaa, "Analysis, synthesis, and perception of spatial sound – binaural localization modeling and multichannel loudspeaker reproduction", Ph.D. thesis, Helsinki University of Technology, Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing, report 77 (2006).
- [14] A. Farina, "Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique," presented at the 108th Convention of the Audio Engineering Society, *Journal of the Audio Engineering Society* (Abstracts), vol. 48, p. 350 (2000 Apr.), preprint 5093.
- [15] J. Merimaa and V. Pulkki, "Spatial impulse response rendering I: Analysis and synthesis", *Journal of the Audio Engineering Society*, 53, 1115–1127 (2005).
- [16] V. Pulkki and J. Merimaa, "Spatial impulse response rendering II: Reproduction of diffuse sound and listening tests", *Journal of the Audio Engineering Society*, 54, 3–20 (2006).
- [17] J. Pätynen, S. Tervo, and T. Lokki, "Simulation of the violin section sound based on the analysis of orchestra performance", in *IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA)*, (New Paltz, New York, USA) (2011), pp. 173–176.
- [18] V. Pulkki, "Virtual sound source positioning using vector base amplitude panning," *Journal of the Audio Engineering Society*, 45, 456–466 (1997).



SIMULACIÓN ACÚSTICA Y VIRTUALIZACIÓN EN RECINTOS DE CULTO

Referencia PACS: 43.55.Gx, 43.55.Ka.

Zamarreño, Teófilo; Galindo, Miguel; Girón, Sara

*Dpto. Física Aplicada, I.U.A.C.C., E. T. S. de Arquitectura, Universidad de Sevilla,
Avda. Reina Mercedes, 2, 41012 - Sevilla, Spain.
E-Mail: teofilo@us.es; mgalindo@us.es; sgiron@us.es*

ABSTRACT

Acoustic simulation methods applied to existing places of worship enable to use calibrated models to simulate the inner acoustic field with enough accuracy. It is possible to obtain adequate spectral and spatial behaviour of the most common room acoustic parameters, and even to obtain simulated impulse responses that can be used to do auralizations with subjective assessment purposes, either reconstruction of acoustic intangible heritage associated, or prior recreation of the behaviour before any permanent or ephemeral interventions. The implementation of these methods and the iterative process to obtain calibrated models, to be applied with the objectives proposed to a set of very significant Mudéjar-Gothic churches of the city of Seville are shown.

RESUMEN

Los métodos de simulación acústica aplicados a lugares de culto existentes permiten disponer de modelos calibrados para simular con suficiente precisión el campo acústico interior, tanto en términos del comportamiento espectral y distribución espacial de los parámetros acústicos habituales, como, incluso para utilizar las respuestas al impulso simuladas para implementar auralizaciones con fines de evaluación subjetiva, reconstrucción del patrimonio inmaterial acústico asociado o recreación previa del comportamiento ante posibles intervenciones permanentes o efímeras. Aquí se presenta la aplicación de estos métodos, y el procedimiento iterativo de calibración de los modelos con los objetivos planteados, a un conjunto de iglesias Gótico-Mudéjares muy significativas de la ciudad de Sevilla.

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos computacionales [1] basados en la acústica geométrica aparecen por primera vez alrededor de 1967 y hasta la década de los 90 han ido madurando hasta alcanzar hoy una eficiencia capaz de proporcionar resultados próximos a las condiciones acústicas reales en recintos. Gracias al incremento de la velocidad de cálculo, la mejora del equipamiento tecnológico y el desarrollo de nuevos algoritmos y métodos de análisis, estas técnicas pueden proporcionar resultados fiables a pesar de las limitaciones inherentes al modelo geométrico. Los algoritmos más recientes pueden producir respuestas al impulso (RI) binaurales (h_L y h_R) que permiten la implementación de auralizaciones [2] de alta calidad o, incluso, en formato B-format (h_w , h_x , h_y y h_z) [3] que permiten obtener una fiable información espacial en cada receptor y sintetizar patrones polares de otros tipos de micrófono. Como la base computacional

de estos algoritmos es la técnica del trazado de rayos o acústica geométrica, resulta un método especialmente apropiado de análisis para el rango de alta frecuencia (teóricamente por encima de cuatro veces la frecuencia de Schroeder), pero con limitaciones en la región de baja frecuencia. Dicha frecuencia de corte viene dada por:

$$f_s = \sqrt{\frac{c^3 T}{8,8V}} \approx 2000 \sqrt{\frac{T}{V}},$$

donde c es la velocidad de propagación del sonido, T el tiempo de reverberación (suele usarse el valor medio de las octavas centradas en 500 y 1000 Hz) y V el volumen del recinto. Podemos observar que cuanto más sorda sea la sala menor será esta frecuencia, y por tanto mayor el rango de validez del método. Sin embargo, debido a la falta de consideración del carácter ondulatorio del sonido propagándose en el recinto, los resultados que se obtienen no son completamente satisfactorios [2]. Una forma de recuperar alguno de los efectos asociados a este carácter ondulatorio es la introducción de un coeficiente de dispersión (o scattering) asociado a cada superficie y que, como sucede con los de absorción, pueden ser dependientes de la frecuencia. De esta manera las reflexiones producidas en los contornos del espacio pasan de exhibir un comportamiento puramente especular a ser parcialmente difusas.

Se dispone de evidencias suficientes de que todas las superficies requieren la incorporación de un coeficiente de dispersión apropiado [4,5] para que los resultados simulados describan adecuadamente las condiciones reales del espacio. La principal dificultad aparece ante la falta de datos experimentales fiables de estos coeficientes para los diferentes materiales, aunque se está avanzando en este sentido [2,5-10] para identificar estos valores, tanto en el laboratorio como *in situ*. Además ya se dispone de procedimientos normalizados [11] para la medida de estos coeficientes.

Así mismo, hay que considerar que un modelo geométrico muy detallado no produce necesariamente una mayor precisión en los resultados de los parámetros [3,5]. Como regla general [2,3], detalles geométricos cuya dimensión característica sea inferior a 0.5 m se pueden ignorar. Es mucho más importante describir las propiedades acústicas de las superficies (mediante los respectivos coeficiente de absorción y dispersión), para los que, en muchas ocasiones, no se dispone de datos con una aproximación adecuada.

Se han desarrollado diversos algoritmos para implementar la propagación de la energía acústica en el interior de un recinto mediante técnicas de acústica geométrica. El primero de ellos utilizado en el diseño de auditorios fue el de trazado de rayos [12]. Se basa en el trazado y seguimiento de los rayos sonoros desde un punto del recinto, que actúa como fuente sonora, hasta que alcanzan el punto de recepción, siguiendo las mismas leyes que los rayos luminosos en la óptica geométrica, y considerando en su propagación hasta un determinado orden de reflexiones. Este modelo permite incorporar los efectos de la dispersión. El mayor inconveniente de esta técnica surge del hecho del gran número de rayos necesarios para recubrir adecuadamente un recinto normal, lo que provoca un incremento en el tiempo de cálculo cuando se ha de evaluar el camino recorrido por cada rayo para cada una de las bandas de octava de interés. El método fue posteriormente mejorado [13] y el camino de cada rayo se ha convertido en un cono [14] o en una pirámide triangular [15].

Como alternativa, el algoritmo de las fuentes imagen se puede utilizar para generar un ecograma considerando la intensidad asociada con cada reflexión y el retardo de su llegada al receptor respecto del sonido directo. Cuando el número de superficies crece arbitrariamente, el número de posibles imágenes aumenta exponencialmente con el orden máximo de las reflexiones considerado, dando como resultado un modelo complejo, como ocurre en las salas de concierto y, más aún, en los espacios de culto. La gran ventaja de este algoritmo es su carácter determinista en la generación de la respuesta impulsiva. Por otra parte, su gran inconveniente es su enorme coste computacional. Por ello, se utiliza solamente para implementar la primera parte de la respuesta al impulso, que resulta de la máxima importancia para la correcta percepción de las características del correspondiente campo sonoro.

En 1989, Vorländer [16] presentó el primer algoritmo híbrido en un intento de combinar las ventajas de los algoritmos anteriores y limitar la incidencia de sus inconvenientes. Consiste en encontrar imágenes que tienen una alta probabilidad de ser válidas mediante el trazado de la distribución de los rayos desde la fuente y considerar aquellas superficies que tienen resultados válidos. El número de rayos utilizado, necesariamente finito, proporciona un ecograma de longitud temporal limitada y con deficiencias de energía, pues al ser finito el número de rayos lanzados no se consideran todas las posibles fuentes imagen. Es por ello necesario utilizar otros métodos (generalmente estadísticos) para contabilizar el resto de las contribuciones, permitiendo así generar la *cola* de la respuesta al impulso integrada. Estas técnicas se han aplicado por algunos autores en salas de concierto [17], teatros, algunos de ellos con una tipología similar [18], en mezquitas [19], y también en el estudio de los antiguos teatros griegos y romanos al aire libre [20].

2. LAS IGLESIAS GÓTICO MUDÉJARES SEVILLANAS

Se analizaron acústicamente doce iglesias de la misma tipología, pero con diferentes volúmenes, dimensiones, acabados interiores y mobiliario, [21]. Todas ellas fueron construidas en la Edad Media, y su estilo arquitectónico es el resultado de un movimiento artístico español único, el mudéjar, que muestra influencias góticas, islámicas y cristianas.

Las iglesias Gótico-Mudéjares de Sevilla, todas ellas ubicadas en su centro histórico, se caracterizan morfológicamente por este dualismo estilístico: un ábside gótico abovedado y un cuerpo de tres naves con cubierta de madera (de par y nudillo en la nave principal) de origen árabe. Sus paredes de ladrillo se complementan con portadas y ábside de piedra. Los apoyos son también claramente islámicos, con pilares cuadrangulares u octogonales y con molduras de ladrillo como decoración. Arcos apuntados, de medio punto o segmentados descansan sobre estos soportes. Una descripción completa de las terminaciones y otra información acústica se puede ver en [21].

Se eligieron seis de estas iglesias para ser simuladas acústicamente [22]. En orden decreciente de volumen fueron la de Santa Marina (MN), San Julián (JU), San Pedro (PE), San Esteban (ES), San Marcos (MC) y Santa Catalina (CA). En la Fig. 1 se muestran las plantas (se indican las posiciones de fuentes y receptores utilizadas en las medidas y las simulaciones) y secciones longitudinal y transversal de cada una de ellas y en la Fig. 2 vistas del interior de las seis iglesias.

Fueron varias las razones para la elección de esta muestra. La primera es que pertenecen a dos grupos diferentes en cuanto a los valores de sus tiempos de reverberación: las de Santa Marina y San Marcos están en el primer grupo, con valores más altos, que superan los óptimos propuestos por Knudsen *et al.* [23]. Las restantes iglesias, por el contrario, presentan tiempos de reverberación cortos que dan mejores condiciones para la voz y el uso musical.

La segunda razón fue considerar toda la gama de volúmenes. En este sentido el mayor volumen (10708 m^3) es el de la Iglesia de Santa Marina; los valores intermedios corresponden a San Julián (6226 m^3) y San Pedro (6180 m^3) y los de San Esteban (4746 m^3), San Marcos (4623 m^3) y Santa Catalina (4362 m^3), se asocian a las iglesias más pequeñas de la muestra. Cabe destacar que la iglesia de San Marcos se encuentra entre las que tienen un tiempo de reverberación alto, aun teniendo uno de los volúmenes más pequeños.

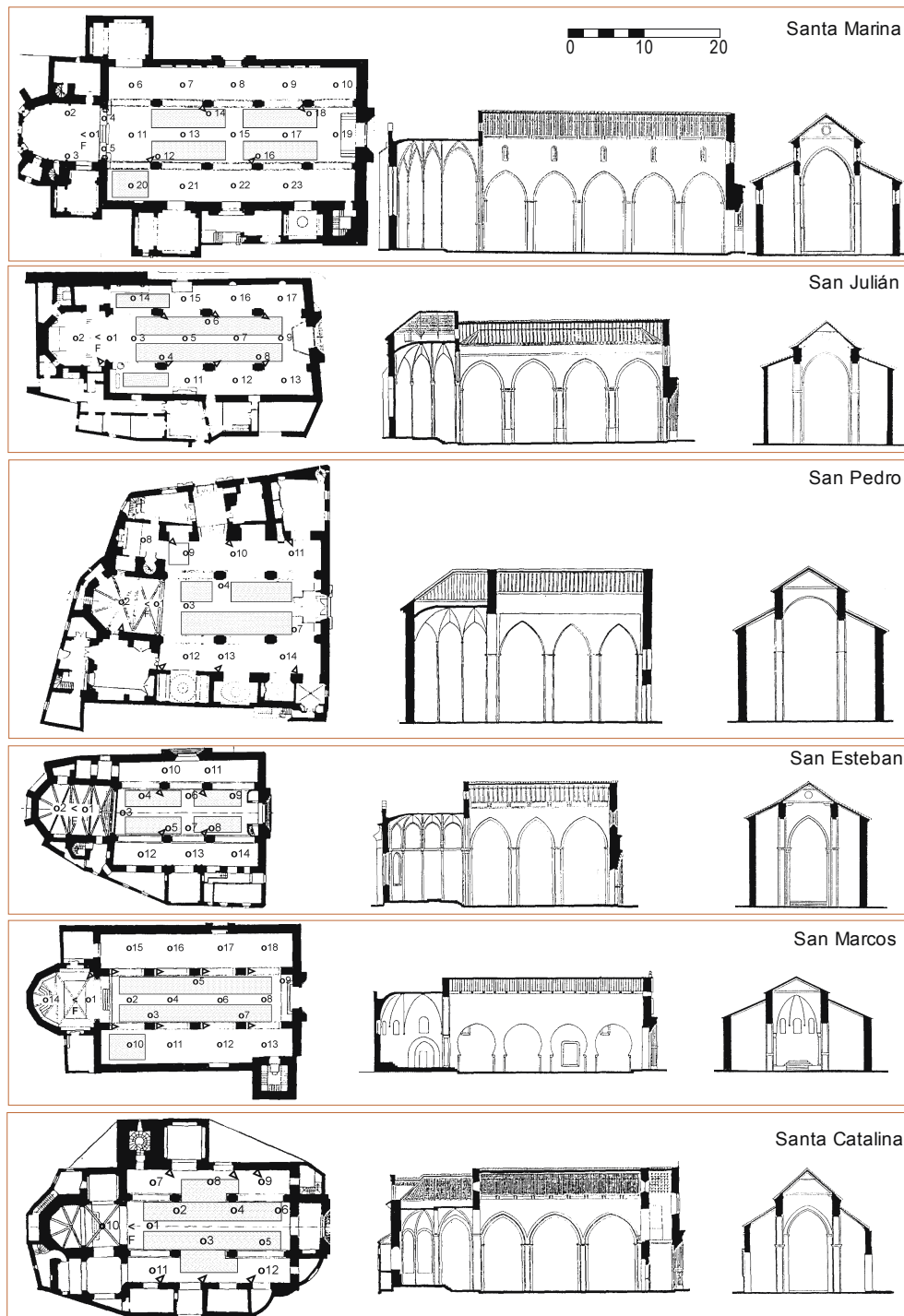


Figura 1. Plantas y secciones longitudinales y transversales de las iglesias simuladas. En la planta se indican las posiciones de la fuente (F), de los receptores (O), de los altavoces del sistema electroacústico existente (▷) y la distribución de los bancos (rectángulos sombreados).

La tercera razón tiene que ver con el acabado superficial. En este sentido, tenemos dos iglesias (Santa Marina y San Marcos) que presentan escasa decoración en sus paredes y el mobiliario presente queda prácticamente limitado a los bancos de madera ubicados en la nave central para acoger a los fieles; las demás están considerablemente más adornadas y encontramos, además, retablos de madera en el altar principal, así como pinturas, esculturas y elementos textiles. En las iglesias de San Esteban y Santa Marina, las paredes están hechas a base de ladrillo de taco con gruesas juntas de mortero, mientras que en las otras cuatro las paredes de ladrillo han sido enlucidas y pintadas o directamente pintadas. En San Julián y San Pedro, tanto los muros perimetrales como las bases de los pilares, están acabados con un

Tabla 1. Coeficientes de absorción, α (arriba), y de dispersión, δ (abajo), de los principales materiales utilizados en las simulaciones.

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Cubierta de madera (CM)	0.30	0.29	0.24	0.21	0.20	0.21
	0.50	0.60	0.70	0.70	0.80	0.80
Mármol y azulejos cerámicos (MA)	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01
	0.10	0.10	0.10	1.10	0.10	0.10
Bancos (BA)	0.16	0.18	0.18	0.17	0.17	0.16
	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Madera (MD)	0.30	0.25	0.20	0.17	0.15	0.10
	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Retablo (RE)	0.32	0.28	0.27	0.27	0.20	0.17
	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Ladrillo visto (LV)	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05
	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Terciopelo (TE)	0.02	0.04	0.08	0.20	0.35	0.40
	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Suelo de bloques cerámicos (BC)	0.09	0.09	0.08	0.07	0.07	0.08
	0.10	0.15	0.15	0.20	0.20	0.20
Paredes de MN (ladrillo de taco con gruesas juntas de mortero) (PMN) ^a	0.11	0.11	0.12	0.11	0.11	0.11
	0.10	0.15	0.15	0.20	0.20	0.20
Paredes de JU (ladrillo enlucido y pintado con algunos cuadros al óleo) (PJU) ^a	0.10	0.10	0.11	0.12	0.12	0.11
	0.10	0.15	0.15	0.20	0.20	0.20
Paredes de PE (ladrillo enlucido y pintado con muchos cuadros al óleo, altares y esculturas de madera) (PPE) ^a	0.18	0.16	0.14	0.13	0.15	0.16
	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Paredes de ES (ladrillo visto con gruesas juntas de mortero y muchos cuadros al óleo) (PES) ^a	0.14	0.12	0.13	0.15	0.19	0.21
	0.20	0.20	0.30	0.30	0.40	0.50
Paredes de MC (ladrillo pintado) (PMC) ^a	0.04	0.04	0.06	0.06	0.07	0.07
	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Paredes de CA (ladrillo enlucido y pintado con algunos cuadros al óleo) (PCA) ^a	0.13	0.15	0.16	0.13	0.11	0.11
	0.10	0.15	0.15	0.20	0.20	0.20

^aCoeficientes de absorción estimados mediante el proceso iterativo de calibración del modelo. Los demás coeficientes de absorción se han tomado de [2,8,24] y a partir de datos de informes internos. Los coeficientes de dispersión se han estimado a partir del tamaño de las irregularidades de las superficies [2,4].

aplicado cerámico que alcanza una altura de unos 2 m. En la Iglesia de San Marcos, el techo de madera de la nave central fue destruido por un incendio y ha sido sustituido por rasillones cerámicos sustentados por correas metálicas. En la Iglesia de San Pedro las tablas de madera de los techos de las naves laterales han sido sustituidas por azulejos cerámicos. Estos detalles se resumen en la Tabla 1 y se pueden apreciar en las Figs. 1 y 2.

3. MEDIDAS EXPERIMENTALES

Las medidas *in situ* se realizaron, con las iglesias vacías, siguiendo los procedimientos establecidos en la norma ISO 3382 [25] y en la IEC 60268-16 [26]. Se monitorizaron las condiciones ambientales durante las mediciones: el rango de variación, para todas las iglesias, fue 22.6-27.4 °C para la temperatura, 35.7%-65.7% para la humedad relativa y 101.7-102.5 kPa para la presión atmosférica.

Se registraron las respuestas al impulso, y otras señales estacionarias, para determinar, para las bandas de octava comprendidas entre 125 y 4000 Hz, y en todas las posiciones de recepción, entre otros, los siguientes parámetros: tiempo de reverberación T ; fuerza sonora G ; tiempo central T_S ; definición y claridad, D_{50} y C_{80} , como parámetros energéticos relacionadas con la proporción de energía temprana/tardía; fracción de energía lateral precoz J_{LF} , relacionada con la impresión espacial en estos lugares; y por último, el índice RASTI para evaluar la inteligibilidad a partir de la degradación de la función de transferencia de modulación.

Para obtener las RI se utilizaron señales de secuencias de máxima longitud (MLS) [27] generadas y analizados mediante el analizador MLSSA. La fuente omnidireccional (B&K 4296) se colocó en el punto más habitual de ubicación de la fuente natural: el altar a una altura de 1.70 m del suelo. El micrófono (omnidireccional B&K 4190 de 1/2" o el multipatrón Audio-Technica AT4050/CM5) se colocó aproximadamente a la altura de la cabeza de una persona



Figura 2. Interior de las iglesias, de izquierda a derecha y de arriba a abajo, de Santa Marina, San Julián, San Pedro, San Esteban, San Marcos y Santa Catalina

sentada (1.20 m desde el suelo), en un número predeterminado de posiciones distribuidas en la nave central y en las laterales, que van desde los 12 receptores para la iglesia de Santa Catalina hasta los 23 en la de Santa Marina (ver Fig. 1).

Para obtener la fuerza sonora se utilizó una señal estacionaria de banda ancha mediante una fuente calibrada y se comprobó la equivalencia de estos resultados con los obtenidos a partir de las señales MLS analizadas con MLSSA [21].

El ruido de fondo se midió promediando temporalmente durante unos 6 minutos en uno o dos puntos representativos de cada iglesia, evitando la proximidad a las puertas de acceso u otras potenciales fuentes perturbadoras.

Los valores del índice RASTI se midieron utilizando el sistema B&K 3361, que utiliza la técnica de ruido estacionario modulado, y se constató la equivalencia de estos resultados con los obtenidos a partir de las RI registradas utilizando señales MLS con niveles y espectros adaptados en la emisión [21].

Para caracterizar la distribución espacial de los parámetros acústicos mencionados, cada uno se promedió espectralmente como sigue:

- Claridad: media directa de los valores en las octavas de 500, 1000 y 2000 Hz.
- Definición: media ponderada según la propuesta de Marshall [28] para C_{50} ,
$$D_{50av} = 0.15D_{50}(500 \text{ Hz}) + 0.25D_{50}(1 \text{ kHz}) + 0.35D_{50}(2 \text{ kHz}) + 0.25D_{50}(4 \text{ kHz})$$
- Tiempo de reverberación, tiempo central y fuerza sonora: media de los valores correspondientes a las octavas centradas en 500 y 1000 Hz [29].
- Fracción de energía lateral precoz: valor medio de las octavas de 125, 250, 500 y 1000 Hz [30].

4. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES Y DISCUSIÓN

4.1. Aspectos generales

Se utilizó el software CATT-ACOUSTIC que, al configurar el cálculo detallado completo, hace uso del algoritmo de trazado de conos con corrección estadística de la cola, que combina características del trazado especular de conos, trazado de rayos estándar y del algoritmo de las fuentes imagen. Este método de predicción permite el cálculo de los valores numéricos para los parámetros acústicos de la sala y la producción de ecogramas que pueden ser utilizados en los procesos de auralización. Para mitigar sus inconvenientes, el sonido directo, las reflexiones de primer orden, tanto especulares como difusas, y las especulares de segundo orden, al menos, se tratan de forma determinista mediante el algoritmo de las fuentes imagen.

En las simulaciones realizadas se hizo uso de un proceso de calibración que no es posible implementar para nuevas construcciones, ya que se basa en un ajuste de los valores de los coeficientes de absorción de los materiales que no aparecen en la literatura y cuya medición, en el laboratorio o *in situ*, es excesivamente compleja. Este proceso se lleva a cabo mediante un procedimiento iterativo cuyo objetivo final es que los valores simulados del tiempo de reverberación, espacialmente promediados, no difieran de los medidos *in situ*, en cada una de las bandas de octava, en más de un 5% en cada iglesia. Este límite se basa en el umbral de percepción (JND) ampliamente aceptado [5,30]. Puesto que CATT-ACOUSTIC ofrece la posibilidad de evaluar los valores de estos tiempos de reverberación de forma interactiva trazando un reducido número de rayos, el procedimiento de ajuste no requiere necesariamente una simulación completa en las primeras etapas de elaboración del modelo. Sin embargo, debido a la particularidad de este tipo de recintos, es siempre conveniente lanzar una simulación completa por si se hace necesario un ajuste final de los coeficientes.

Aunque este proceso de calibración tiene el inconveniente de que es necesario realizar una medida previa, en el caso de un recinto existente, especialmente si posee carácter patrimonial, puede facilitar la evaluación de forma fiable de los procesos de mantenimiento, restauración o acondicionamiento para nuevos usos, y también facilita la recreación del ambiente acústico de épocas pretéritas. Cuando las técnicas de simulación se aplican al caso de recintos de nueva planta se tiene la ventaja, como contrapartida, de que en la elección de las terminaciones se puede optar por materiales cuyos coeficientes de absorción sean conocidos de antemano.

Las condiciones ambientales existentes durante las medidas *in situ* se utilizaron como datos de entrada en los procesos de simulación. Estas variables físicas ejercen influencia sobre la determinación de la velocidad del sonido (y por lo tanto, sobre los retardos relativos de las diferentes reflexiones al construir los ecogramas) y en la estimación de la absorción sonora del aire interior de las iglesias.

El espectro del ruido de fondo medido en cada caso también se utilizó como dato de entrada al simular el comportamiento acústico de las iglesias. Su incidencia es especialmente importante para calcular los valores del índice de inteligibilidad STI. La fuente sonora se eligió de forma que los niveles de emisión se ajustaran en cada caso con los utilizados en las medidas experimentales, con el fin de comparar los valores del nivel de presión medidos y simulados cuando la fuente emite de forma estacionaria. No se realizaron modificaciones especiales para simular las desviaciones del patrón omnidireccional de la fuente utilizada en las medidas, de modo que, en las simulaciones se ha utilizado la fuente omnidireccional predefinida en el software.

Puesto que una de las fuentes de posibles errores al comparar los datos experimentales y los simulados es la variación en la localización de los receptores entre el recinto real y el modelo implementado, se prestó especial cuidado para minimizar, en lo posible, estas diferencias. La Tabla 2 presenta los valores medios de las diferencias absolutas entre las distancias fuente-receptor medidas (obtenidas a partir del tiempo de vuelo del sonido directo desde la fuente hasta el receptor y la velocidad del sonido corregida para la temperatura medida) y las simuladas, proporcionadas por el software, y sus desviaciones estándar para todas las iglesias. Estas diferencias varían entre los 0.08 m para la Iglesia de San Julián y los 0.21 m para la de

Santa Catalina y, por tanto, en todos los casos, son inferiores a la distancia que separa asientos contiguos.

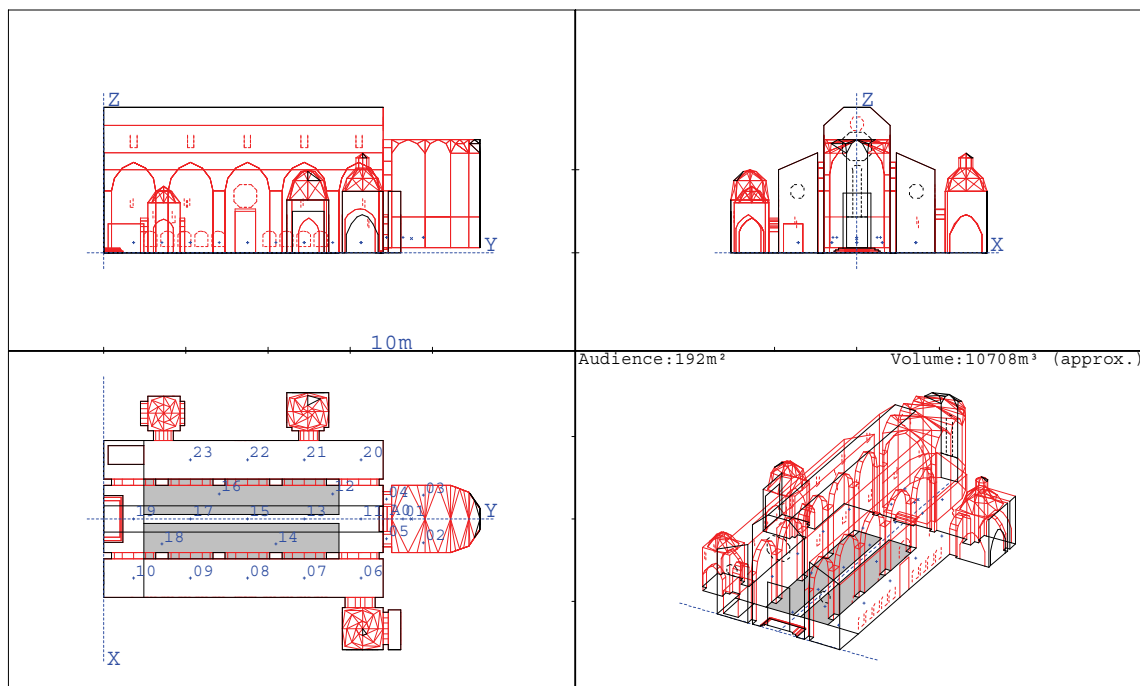


Figura 3. Secciones longitudinal y transversal (arriba), planta y perspectiva 3D (abajo) del modelo computacional elaborado para la iglesia de Santa Marina.

Para no forzar los parámetros de simulación en los distintos modelos, se aceptaron las autoestimaciones del programa, tanto para el número de rayos como para el tiempo de truncado, seleccionando las correspondientes opciones ("autonumber" y "autotime") al configurar el software para el proceso de cálculo completo, a condición de que el tiempo de truncado cumpliera el requisito de ser del orden del tiempo de reverberación. En la Tabla 3 se muestran los valores de estos parámetros para las seis iglesias simuladas. En la versión de CATT-ACOUSTIC utilizada se implementaba una nueva opción para el cálculo detallado de la parte final de la respuesta al impulso [31]. La nueva opción difiere sólo en la evaluación de la parte final de los ecogramas donde se utiliza el trazado aleatorio de rayos en lugar del RTC. La ventaja es que no es necesaria ninguna corrección de la cola y, por tanto, se puede prescindir de las hipótesis acerca del crecimiento de la densidad de las reflexiones, lo que supone la posibilidad de simular con precisión recintos de formas inusuales o con espacios acoplados. El coste a pagar es que se tiene un mayor error aleatorio en la parte final y por lo tanto se ha de utilizar un mayor número de rayos (el número de rayos generado automáticamente es el doble que para el RTC). Sin embargo, la nueva variante del algoritmo es más rápida, dando como resultado un tiempo de cálculo total aproximadamente igual que con el RTC. Esta opción se utilizó en las tres iglesias marcadas en negrita en la Tabla 3.

Para las simulaciones todas las superficies de las iglesias se han caracterizado, para cada banda de octava, con su correspondiente coeficiente de dispersión, estimado a partir del tamaño de sus irregularidades (ver Tabla 1). El valor por defecto del programa se ajustó a 0.1.

Tabla 2. Valores medios de las diferencias absolutas entre distancias fuente-receptor medidas y simuladas (m) y la desviación estándar, para cada iglesia.

Iglesia	Diferencias	Desviación est.
Santa Marina	0.13	0.16
San Julián	0.08	0.07
San Pedro	0.09	0.07
San Esteban	0.10	0.08
San Marcos	0.11	0.08
Santa Catalina	0.21	0.14

Tabla 3. Parámetros usados en las simulaciones. En negrita los calculados con el nuevo algoritmo.

Iglesia	Nº de rayos	Tiempo de truncado t_t (s)
Santa Marina	48412	2.93
San Julián	72122	2.68
San Pedro	56702	2.1
San Esteban	30590	1.95
San Marcos	37664	3.71
Santa Catalina	51440	1.63

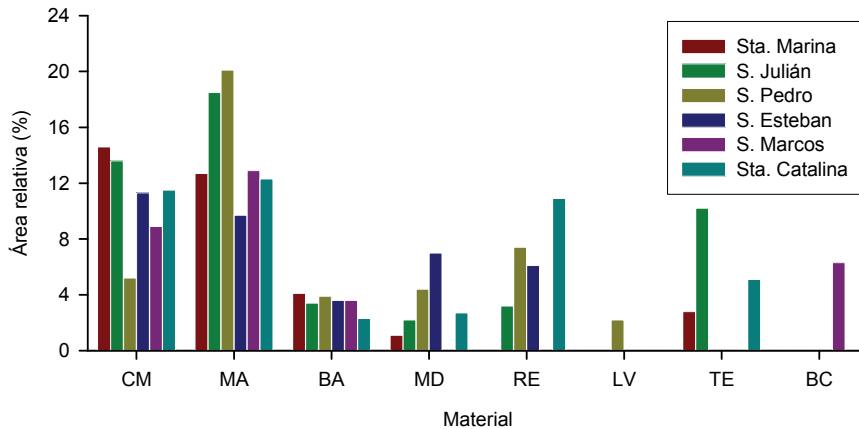


Figura 4. Porcentaje del área total para los principales materiales utilizados en los modelos acústicos de las iglesias (excepto los ajustados en el proceso iterativo). Las categorías del eje horizontal identifican cada material con el acrónimo asignado en la Tabla 1.

4.2. Resultados de las simulaciones

A modo de ejemplo de todos ellos, la Fig. 3 exhibe las secciones longitudinal y transversal, la planta al nivel de la audiencia y una vista en perspectiva del modelo elaborado para la Iglesia de Santa Marina. En la planta se muestran la ubicación de los receptores, la de la fuente, junto al altar mayor en consonancia con las condiciones habituales de la liturgia, y la zona de ubicación de los fieles (en gris). También aparecen los valores del volumen total y de la superficie del área de audiencia; así como una escala gráfica para dar una idea de las dimensiones de la iglesia.

En la Tabla 1 se presentan los principales materiales, con sus respectivos coeficientes de absorción y dispersión para cada una de las bandas de octava, utilizados en los modelos computacionales. En las Figs. 4 y 5, se puede ver el porcentaje del área de cada material presente en cada iglesia. La mayoría de los materiales interiores (mostrados en la Tabla 1) tienen coeficientes de absorción que son bien conocidos [2,8,24]. Los de las cubiertas de madera y los de los retablos se han evaluado a partir de informes internos. Por tanto la estimación mediante el proceso iterativo se aplica a las paredes laterales (mostradas en la Fig. 5) de las tres naves de las iglesias (excluyendo el zócalo cerámico presente en las iglesias de San Julián y San Pedro). Las iglesias estudiadas presentan diferentes acabados en sus paredes, con cuadros, altares y decoraciones varias, estableciéndose así las diferencias en los coeficientes acústicos y en su comportamiento frente a frecuencia. El coeficiente de dispersión de las superficies, que es el menos investigado, se estimó a partir del tamaño de las irregularidades. La estructura superficial se describe en términos de la profundidad y longitud media de sus irregularidades [2,4,10]. La Tabla 1 proporciona una descripción aproximada de estas paredes para una mejor comprensión de los coeficientes obtenidos.

El programa permite valorar la importancia relativa de las diferentes superficies mediante un histograma interactivo donde se presentan los impactos en cada una de ellas. La Fig. 6 muestra esta valoración para cada uno de los planos de las iglesias de San Pedro y San Marcos identificados por los descriptores asignados a los mismos en el modelo. Los materiales de los planos con una puntuación superior al 4% se identifican con las siglas asignadas en la

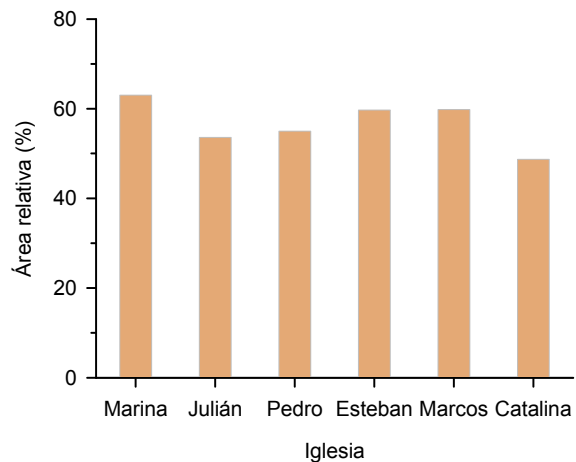


Figura 5. Porcentaje del área total, para las superficies ajustadas en el proceso iterativo de cada iglesia.

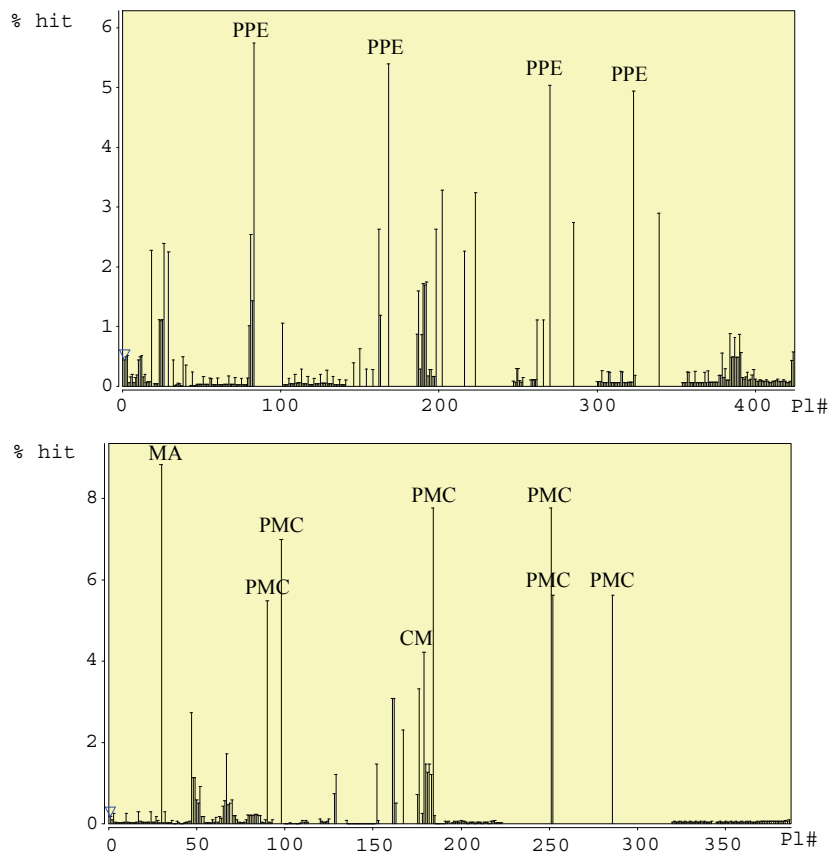


Figura 6. Histogramas de reflexiones producidas en las superficies (identificadas por el número asignado en el modelo): para la iglesia de San Pedro (arriba) y la de San Marcos (abajo). Los materiales de las superficies más significativas (con un porcentaje superior al 4%) se identifican en cada caso con el acrónimo asignado en la Tabla 1.

Tabla 1. Las contribuciones más importantes en todos los casos (sumando las puntuaciones de los diferentes planos con el mismo acabado acústico) son el techo de madera, el suelo y las paredes laterales longitudinales de las tres naves.

Para comparar los resultados de los descriptores acústicos simulados y medidos *in situ*, en la Fig. 7 observamos los tiempos de reverberación, para cada una de las bandas de octava para la Iglesia de Santa Marina. Se han incluido los valores del tiempo de reverberación de Sabine y Eyring, así como las curvas tonales recomendables para música y voz sugeridas por Knudsen *et al* [23]. El tiempo de reverberación de Sabine se ha estimado a partir de los datos del área de cada superficie y de sus correspondientes coeficientes de absorción. El de Eyring se estima a partir del recorrido libre medio, calculado a partir de todos los segmentos de rayo, y el coeficiente de absorción medio, evaluado como la media aritmética de todos los valores de absorción encontrados por los rayos.

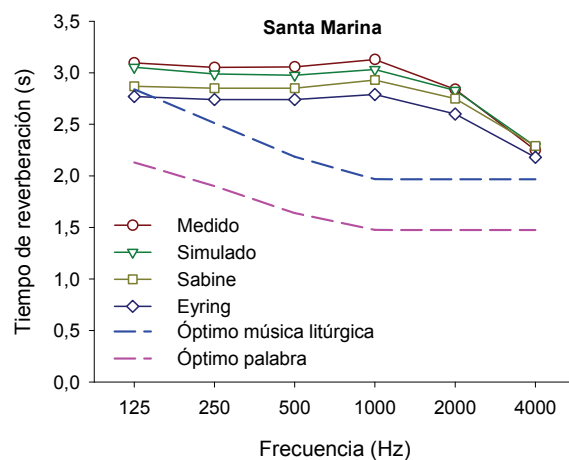


Figura 7. Tiempo de reverberación en bandas de octava: medido, simulado y calculados en la iglesia de Santa Marina. Los valores óptimos se muestran a efectos comparativos.

En todas las bandas, los valores simulados del tiempo de reverberación difieren menos del 5% de los medidos *in situ* tras el

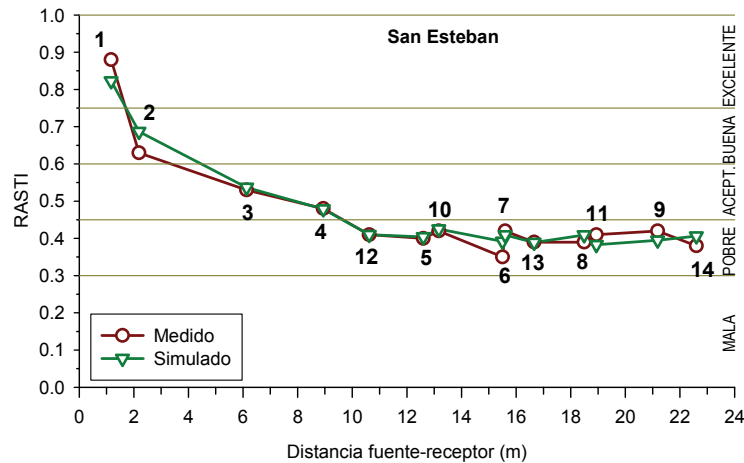


Figura 8. Comparación de los valores medidos y simulados del índice RASTI en distintas posiciones de la iglesia de San Esteban: receptores 1 y 2 en el presbiterio, 3-9 en la nave central y 10-14 en las naves laterales.

proceso iterativo de ajuste de los coeficientes de absorción de los materiales que ofrecen mayor incertidumbre: las paredes verticales de las tres naves de cada iglesia.

Los valores de los parámetros objetivos relacionados con la inteligibilidad del discurso hablado se deducen a partir de los ecogramas obtenidos durante el proceso de simulación; derivando primero la función de transferencia de modulación para, posteriormente, obtener los valores del índice RASTI. Se observa una gran similitud entre los valores simulados y los medidos, a pesar de la diferente metodología seguida en su obtención: los simulados se deducen a partir de las funciones de transferencia de modulación obtenidas de los ecogramas, mientras que los valores experimentales se han obtenido mediante señales estacionarias de ruido modulado. En estos espacios de culto, el nivel de ruido de fondo no es muy significativo, dominando el efecto reverberante en la degradación de la inteligibilidad; por tanto, un buen ajuste de los coeficientes de absorción juega un papel crucial en la obtención de valores simulados similares a los medidos.

La Fig. 8 compara los resultados simulados con las medidas experimentales, para cada uno de los receptores, en la Iglesia de San Esteban para el índice RASTI. Los resultados corresponden a las mediciones realizadas con el equipo B&K, sin apoyo electroacústico y con un nivel de emisión ajustado a $ref + 10$ dB, lo que supone 69 dB en la banda de 500 Hz y 60 dB en la banda de 2 kHz a 1 m del altavoz. A la derecha de la figura, aparecen los intervalos de calificación cualitativa de la inteligibilidad de la palabra. La coincidencia es más que aceptable en todas las áreas del recinto de culto y la calificación de la inteligibilidad, si exceptuamos el presbiterio, en casi toda la iglesia se queda en el rango de *pobre*.

Continuando con la comparación entre los resultados medidos y simulados, en la Fig. 9 se presentan los resultados de los siguientes parámetros acústicos monofónicos: fuerza sonora, claridad, definición, tiempo central y fracción de energía lateral precoz, para cinco de las seis iglesias seleccionadas. En todos los casos, se estudió el comportamiento frente a la frecuencia de los valores promediados espacialmente y la distribución espacial de los valores espectralmente promediados en función de la distancia fuente-receptor. En cuanto al comportamiento frente a la frecuencia, se muestra la dispersión espacial, para cada banda de octava, con la barra de error vertical cuya longitud viene dada por el error estándar (o error cuadrático medio). En la Fig. 9, todas las gráficas utilizan una nomenclatura común. Cabe destacar la coincidencia aceptable, tanto para la dependencia espectral como para la espacial, entre los resultados simulados y los de las mediciones *in situ*.

Como referencia, al representar la dependencia de estos parámetros frente a la distancia fuente-receptor, se ha superpuesto la curva prevista por la teoría clásica, lo que supone admitir un comportamiento perfectamente difuso del campo acústico en las iglesias, y utilizar en los cálculos los volúmenes y tiempos de reverberación medidos. Se observa que todos los

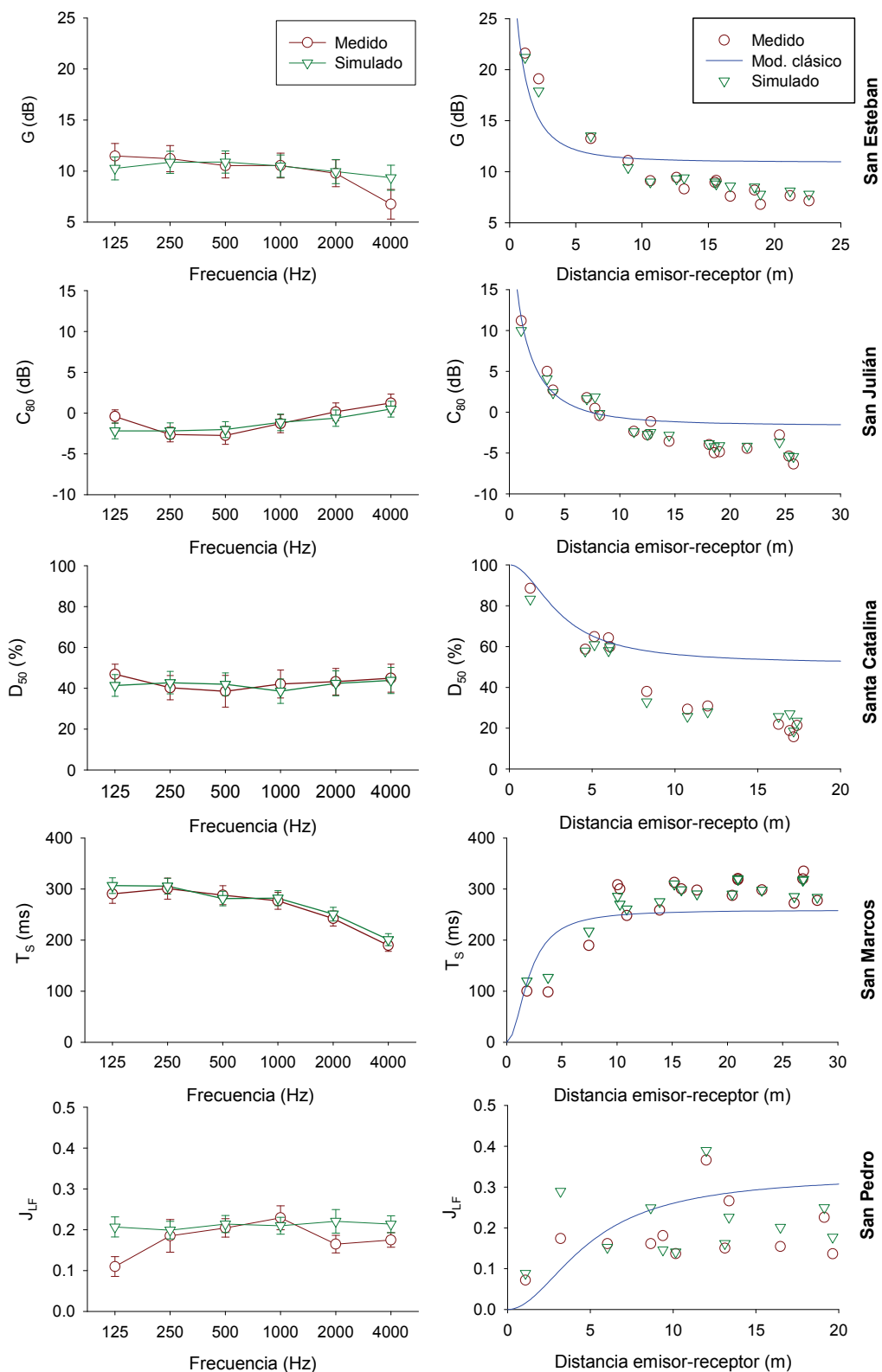


Figura 9. Dependencia con la frecuencia (izquierda) y con la distancia emisor-receptor (derecha) para la fuerza sonora, la claridad, la definición, el tiempo central y la fracción de energía lateral precoz. Se comparan los valores medidos y simulados para cinco iglesias.

parámetros, medidos y simulados, se alejan de las predicciones clásicas y, por tanto, el campo sonoro en las iglesias difiere claramente del decaimiento puramente exponencial.

Es bien conocido el hecho de que en las iglesias las curvas de extinción muestran un comportamiento complejo sobre todo para la energía inicial. Para la tipología que nos ocupa, se

ha propuesto un modelo analítico capaz de describir adecuadamente la distribución de energía [32] que es capaz de predecir el comportamiento frente a la distancia emisor-receptor de los parámetros acústico basados en la energía acústica. En ese trabajo se discutió y aplicó el anteriormente propuesto por Cirillo *et al.* [33] para iglesias italianas, e investigaciones teóricas posteriores sobre curvas con caídas de varias pendientes, utilizando potentes métodos de estimación [34], han inspirado a Martellotta [35] hacia un refinamiento del modelo lineal anterior para iglesias [32], disminuyendo la complejidad en los cálculos. Una explicación más detallada de la propagación del sonido en estos espacios complejos requiere un análisis profundo y disponer de más datos experimentales sobre otras tipologías de lugares de culto, y constituye parte de investigaciones en curso en nuestro grupo.

En cuanto a los resultados de la simulación, de entre todos los parámetros basados en la energía acústica, la fracción de energía lateral es el más deficientemente simulado en lo que respecta al comportamiento espectral, ya que este parámetro es el más sensible a la posición relativa emisor-receptor. El valor medio, para cada banda de octava difiere alrededor de 0.05 (1 JND) y, ocasionalmente, para la de 125 Hz hasta 0.1 (2 JNDs). En todas las iglesias, los valores medios simulados son casi constantes para todas las frecuencias, mientras que los medidos aumentan entre 125 Hz y 1 kHz y disminuyen entre 1 y 4 kHz, como muestra la Fig. 9 para la Iglesia de San Pedro (PE). De acuerdo con los ecogramas direccionales suavizados que presenta el programa según las tres direcciones espaciales perpendiculares (arriba-abajo, delante-atrás e izquierda-derecha), y considerando esta última dirección, las mayores discrepancias aparecen en los primeros 80 ms [36]. En todos los casos el comportamiento de las bajas frecuencias, y especialmente en la banda de octava de 125 Hz, presenta valores promedio que difieren significativamente de los valores experimentales. Mejores resultados se obtienen desde 500 hasta 4000 Hz, especialmente en el caso de la iglesia de San Marcos (no mostrados).

El análisis de la dependencia con la distancia pone de manifiesto que los valores experimentales de J_{LF} , espectralmente promediados, son mayores en los puntos de recepción

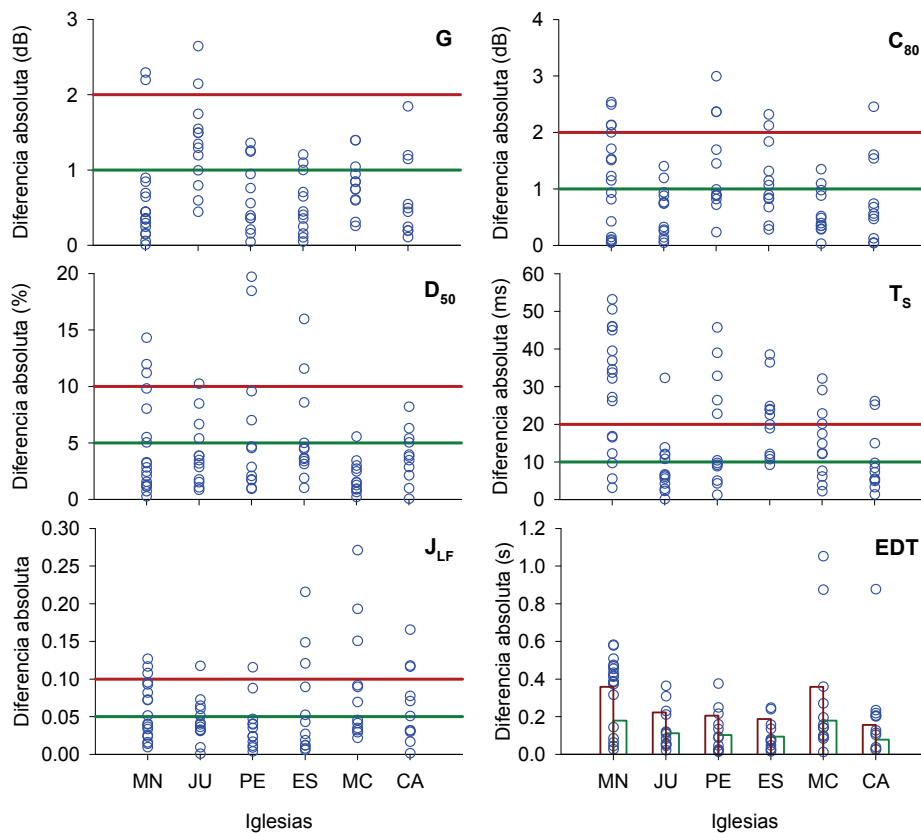


Figura 10. Diferencias absolutas entre los valores medidos y simulados, espectralmente promediados, para todos los puntos de recepción, en cada iglesia, y para cada parámetro acústico (O). Se indican dos límites en términos de los correspondientes JND: en verde para 1 JND y en rojo para 2 JND.

Tabla 4. Umbral diferencial subjetivo (JND) para cada parámetro.

Parámetro	JND
G	1 dB
C80	1 dB
D50	5%
T _s	10 ms
J _{LF}	0.05
EDT	5%

Tabla 5. Porcentaje de las diferencias absolutas entre valores medidos y simulados, espectralmente promediados, para todos los receptores en cada iglesia y para cada parámetro en los intervalos de 1 y 2 JND.

Rango	G	C ₈₀	D ₅₀	T _s	J _{LF}	EDT
1 JND (%)	75.5	64.1	73.1	39.7	62.8	47.4
2 JNDs (%)	94.9	87.2	89.7	62.8	83.3	64.1

de las naves laterales que en los de la nave central [36]. Estos resultados no se confirman en las simulaciones, quizás debido a las limitaciones de la técnica de *ray-tracing* que origina sombras acústicas causadas por las columnas y pilares. Esto se puede poner de manifiesto mediante la opción del software de "mapeado del área de audiencia".

Para completar esta información, la Fig. 10 muestra la diferencia absoluta entre los valores espectralmente promediados (ver Sección 3) medidos y simulados, para todos los puntos de recepción en cada iglesia, y para cada parámetro acústico. Puesto que el software MLSSA calcula, para cada receptor, la distancia desde la fuente a partir del instante de la llegada del sonido directo, se han omitido los receptores que no estaban expuestos a este sonido directo. Bork [5] propuso una forma estándar para comparar los valores medidos y simulados mediante el umbral de percepción subjetiva de cada uno de los parámetros acústicos, mostrados en la Tabla 4, admitiéndose que la simulación es adecuada si las diferencias entre los dos conjuntos de valores están comprendidas en el rango de 1 a 2 veces los respectivos JNDs [2,5].

En la Fig. 10 se observa que la mayoría de los puntos de recepción, para todos los descriptores acústicos mencionados, incluyendo el parámetro EDT, se incluyen en el rango de precisión señalado, apoyando así la adecuación de las simulaciones. Para cuantificar estos resultados, se muestra en la Tabla 5 el porcentaje de estas diferencias en los intervalos respectivos de 1 y 2 JNDs. Hay algunas excepciones aisladas en algunas iglesias, como en la de Santa Marina (MN), que tiene cerca del 40% de sus puntos fuera de la gama de 2 JNDs para dos parámetros, T_s y EDT, altamente correlacionados.

Debe prestarse especial atención a la fracción de energía lateral precoz. Debido a su definición y el error sistemático asociado con la medición (orientación y sensibilidad del micrófono multipatrón) [37], se esperaría tener las mayores discrepancias para J_{LF}. Esto no es cierto para el J_{LF} espectralmente promediado en estas iglesias; especialmente en el caso de la iglesia de San Pedro (PE), cuyas diferencias para todos los puntos de recepción, excepto uno, están en el rango de 1 JND. Puesto que las paredes verticales de las tres naves de la iglesia de San Pedro muestran una profusa decoración uniformemente distribuida (ver Tabla 1), estas particularidades no fueron modeladas y se incluyeron como características de la pared en sus coeficientes de absorción y dispersión. Esto podría ser un punto débil, pero los resultados demuestran lo contrario. Obviamente este argumento falla en bajas frecuencias cuando el análisis se realiza en bandas de octava, particularmente a 125 Hz.

A fin de cuantificar la precisión punto a punto de la simulación para cada iglesia, en la Tabla 6, la primera columna para cada parámetro, muestra el valor promediado espacialmente de las diferencias absolutas, calculadas en cada receptor, entre los valores medidos y los simulados, espectralmente promediados. La columna a su derecha muestra el error estándar típico de

Tabla 6. Valores espacialmente promediados de las diferencias absolutas entre los valores medidos y simulados, espectralmente promediados, en cada receptor (columna izquierda) y su error estándar asociado (columna derecha) para cada parámetro y en cada iglesia

Parámetro	MN	JU	PE	ES	MC	CA						
G (dB)	0.51	0.09	1.33	0.16	0.75	0.13	0.51	0.11	0.95	0.08	0.77	0.11
C ₈₀ (dB)	1.23	0.20	0.55	0.13	1.78	0.45	1.12	0.19	0.89	0.16	0.71	0.20
D ₅₀ (%)	4.17	0.82	4.22	1.01	9.08	3.08	4.79	1.30	1.94	0.44	3.85	0.80
T _s (ms)	26.30	3.09	26.37	2.91	32.77	7.40	13.08	2.45	10.45	2.44	11.44	3.58
J _{LF}	0.08	0.02	0.04	0.01	0.03	0.007	0.06	0.02	0.09	0.03	0.06	0.02
EDT (s)	0.42	0.03	0.09	0.02	0.11	0.03	0.08	0.02	0.15	0.02	0.12	0.03

estas diferencias para cada parámetro y cada iglesia. El promedio espectral para cada parámetro se ha realizado siguiendo las indicaciones presentadas en la Sección 3. Al calcular estos valores medios se han ignorado los receptores situados a una distancia inferior a la dada por la expresión: $d_{\min} = 2\sqrt{V/(cT)}$ (ver [25]). Esta tabla muestra que existe una adecuada concordancia entre los valores medidos y los simulados para estos espacios de culto. Para todos los parámetros, el valor medio de las diferencias es aproximadamente 1 JND para todas las iglesias. Los valores de C_{80} en la iglesia de San Pedro (PE), los de J_{LF} en las de Santa Marina y San Marcos y los de EDT en la de Santa Marina son del orden de 2 JNDs. La situación más desfavorable se presenta para T_S en las iglesias de San Pedro, San Julián y Santa Marina, que rondan los 3 JNDs.

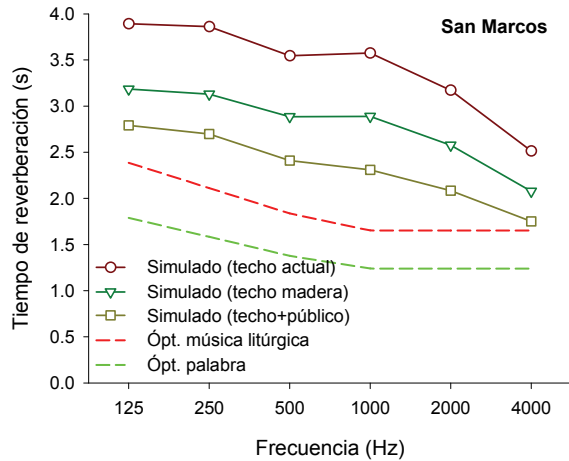


Figura 11. Tiempo de reverberación simulado, tras modificar el modelo, en bandas de octava, para la iglesia de San Marcos comparados con los valores óptimos para música litúrgica y para la palabra.

4.3. Modelos modificados de las iglesias de San Marcos y San Pedro

A fin de estudiar la recreación del entorno acústico en tiempos pretéritos y valorar la importancia de la cubierta de madera en estos recintos de culto, se ha realizado una nueva simulación para la iglesia de San Marcos que incorpora el artesanado Mudéjar (ahora inexistente) en su nave central. La superficie de esta cubierta es de 175 m². Los coeficientes de absorción y de dispersión del techo actual se asocian con “suelo de bloques cerámicos (BC)” y los de la nueva cubierta simulada corresponden a CM (ver Tabla 1). El software utilizado permite así una reconstrucción de la situación original y evaluar la importancia de la cubierta de madera original. Es evidente que la sustitución de los rasillones cerámicos por un techo de madera aumentará la cantidad de absorción y, por tanto, disminuirá el tiempo de reverberación. No obstante, esta disminución por sí sola, no sería suficiente para proporcionar condiciones acústicas aceptables (ver Fig. 11) y quedaría, junto a la iglesia de Santa Marina (con tiempos de reverberación frente a la frecuencia muy similares), como uno de los casos más desfavorables. La disminución del tiempo de reverberación es más acusada a bajas y medias frecuencias, con caídas de entre 0.3 y 0.7 s.

Esta sustitución también tendrá influencia sobre los demás parámetros acústicos. Los

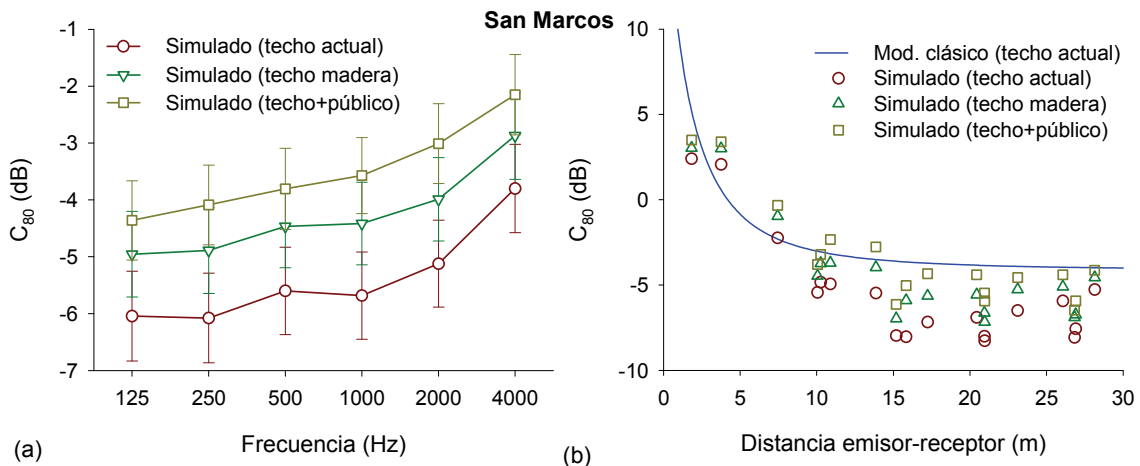


Figura 12. Comparación de los valores de la claridad para las tres simulaciones implementadas para la iglesia de San Marcos: (a) valores promediados espacialmente frente a la frecuencia y (b) valores espectralmente promediados frente a la distancia emisor receptor.

Tabla 7. Valores simulados, espacialmente promediados, y sus errores estándar, para cada banda de octava, en la iglesia de San Marcos para las condiciones actuales (arriba), con una posible cubierta de madera en la nave central (centro) y, si además se considera con una densidad de ocupación del 100% (abajo).

Frecuencia	G (dB)	C_{80} (dB)	D_{50} (%)	T_S (ms)	J_{LF}	EDT (s)						
125 Hz	13.4	0.6	-6.0	0.8	14.7	3.3	306.5	15.4	0.23	0.02	4.14	0.08
	12.3	0.6	-5.0	0.8	16.9	3.3	239.8	12.1	0.23	0.02	3.38	0.11
	11.6	0.7	-4.4	0.7	18.4	3.3	211.8	10.5	0.22	0.02	2.69	0.07
250 Hz	13.4	0.6	-6.1	0.8	14.3	3.2	305.9	15.3	0.23	0.02	4.08	0.08
	12.3	0.7	-4.9	0.8	17.2	3.4	233.3	11.8	0.23	0.02	3.37	0.11
	11.5	0.7	-4.1	0.7	19.0	3.2	206.6	10.5	0.24	0.02	2.63	0.08
500 Hz	13.0	0.6	-5.6	0.8	15.1	3.3	281.1	14.4	0.25	0.02	3.73	0.09
	11.9	0.7	-4.5	0.7	18.6	3.3	219.9	11.1	0.24	0.02	3.23	0.10
	11.0	0.8	-3.8	0.7	19.9	3.4	189.4	9.91	0.23	0.02	2.38	0.07
1 kHz	13.0	0.6	-5.7	0.8	15.1	3.2	283.5	14.5	0.25	0.02	3.77	0.09
	11.9	0.7	-4.4	0.7	18.4	3.4	219.5	11.5	0.23	0.02	3.31	0.11
	10.7	0.8	-3.6	0.7	20.2	3.3	182.2	9.39	0.23	0.02	2.29	0.07
2 kHz	12.3	0.6	-5.1	0.8	16.6	3.3	250.8	13.2	0.25	0.02	3.31	0.10
	11.3	0.7	-4.0	0.7	19.9	3.4	198.7	10.7	0.23	0.02	2.96	0.10
	10.2	0.8	-3.0	0.7	22.3	3.5	165.8	9.14	0.23	0.02	2.07	0.06
4 kHz	11.1	0.7	-3.7	0.7	20.3	3.7	199.0	11.3	0.26	0.02	2.59	0.09
	10.2	0.8	-2.9	0.8	23.1	3.7	163.8	9.8	0.24	0.02	2.37	0.09
	9.2	0.9	-2.2	0.7	25.0	3.7	143.6	8.35	0.24	0.02	1.81	0.06

parámetros relacionados con la inteligibilidad de la voz y la calidad de la música proporcionan mejores condiciones para la nueva simulación en comparación con la situación existente. Para comparar la modificación de las condiciones acústicas, en la Fig. 12 (a) se ha representado el comportamiento espectral de la claridad. Se observa un incremento de alrededor de 1 dB (aproximadamente 1 JND) en todas las bandas de octava desde la situación actual hasta la modelada con la cubierta mudéjar. La dispersión espacial, en términos del error estándar, se mantiene aproximadamente constante. La Tabla 7 muestra los valores medios simulados y sus errores estándar para el resto de parámetros y para cada una de las bandas de octava. En ella podemos observar que los valores de G , espacialmente promediados, disminuyen alrededor de 1 dB (1 JND), para cada banda de octava, desde la situación simulada con el techo cerámico actual hasta la situación con el de madera. Los valores de los errores estándar son casi constantes en las dos situaciones. En el caso de D_{50} , los valores promediados espacialmente se incrementan alrededor de un 3%, con dispersión espacial muy similar. Especialmente importante son las reducciones en los valores promedio del tiempo central, que suponen variaciones entre 5 y 7 JNDs. En este caso el parámetro de dispersión espacial muestra una leve reducción para todas las bandas de octava (alrededor de 5 ms). No se observan variaciones significativas para los valores de J_{LF} , como era de esperar, ya que la modificación realizada no tiene influencia directa sobre las reflexiones laterales. Por último, para el parámetro EDT, se observan variaciones que oscilan entre los 0.22 s (a 4000 Hz) y los 0.76 s (a 125 Hz), lo que supone variaciones comprendidas entre 2 y 3 JNDs.

En la Fig. 12(b) se muestra la dependencia del parámetro acústico C_{80} , espectralmente promediado, frente a la distancia fuente-receptor. Los valores simulados siguen tendencias similares, con un lógico incremento de los mismos para la simulación remodelada. Los demás parámetros acústicos exhiben un comportamiento similar.

También se investigó el efecto de la presencia del público en este lugar de culto. La configuración simulada que se presenta aquí corresponde a la hipótesis de un grado de ocupación del 100% de la zona de audiencia, con los asistentes sentados en los bancos de madera existentes. Los coeficientes de absorción y dispersión adoptados para las bandas de octava comprendidas entre 125 Hz y 4 kHz son (0.57, 0.61, 0.75, 0.86, 0.91, 0.86) [8] y (0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8), respectivamente. Esta configuración es muy frecuente para los usos culturales de la iglesia. En los usos de culto la asistencia de fieles es variable según el día de la semana y la hora del día del acto litúrgico. Es posible realizar las mismas observaciones que en el caso anterior (ver Figs. 12(a) y 12(b) y la Tabla 7), para todos los parámetros acústicos, con una ligera variación a todas las frecuencias que supone una mejora de las condiciones acústicas. La fracción de energía lateral es el único parámetro que no experimenta un cambio

significativo que pueda causar variación en la percepción subjetiva. La nueva curva tonal correspondiente a la presencia de la audiencia aparece en la Fig. 11.

Aunque no se muestra, el aumento en el índice RASTI en las dos simulaciones de remodelación aún mantiene la calificación de *pobre* de la inteligibilidad de la palabra en la Iglesia de San Marcos.

Para profundizar en el análisis de la importancia de la cubierta de madera, se realizó otra simulación en la Iglesia de San Pedro. El material cerámico (MA), que actualmente cubre las naves laterales (169 m²), fue reemplazado por el techo de madera original. Los resultados simulados no presentaron variaciones ni en el comportamiento espectral, ni en su dependencia con la distancia emisor-receptor, ni para el tiempo de reverberación ni para el resto de los parámetros acústicos. Sólo en algunos de los receptores situados en las naves laterales se observan variaciones puntuales.

A partir de la información detallada de la Fig. 6, los histogramas de las iglesias de San Marcos y San Pedro muestran que el porcentaje de impactos en la cubierta (sumando todas las contribuciones de los diferentes planos que constituyen el techo) es mayor o igual en las naves laterales que en la nave central (7.9% en las naves laterales y 6.4% en la nave central para la iglesia de San Marcos; y 5.4%, tanto en las laterales como en la central, en la de San Pedro). Las demás iglesias simuladas presentan un histograma similar al de la iglesia de San Marcos. Se observa que sólo unas pocas superficies tienen un número de impactos significativo (paredes, suelo y cubierta de madera) y, por tanto, cualquier cambio del correspondiente material producirá una modificación notable de las características acústicas, como ocurrió en el caso de la Iglesia de San Marcos. Por otro lado, el número de impactos está más ampliamente distribuido en el caso de la Iglesia de San Pedro, y la sustitución de los materiales cerámicos por el techo de madera en sus naves laterales, no produce cambios significativos en los resultados simulados.

5. PROPUESTA DE REHABILITACIÓN EN LA IGLESIA DE SAN LORENZO

En esta sección se presenta un caso en el que se utilizaron las técnicas de simulación con el

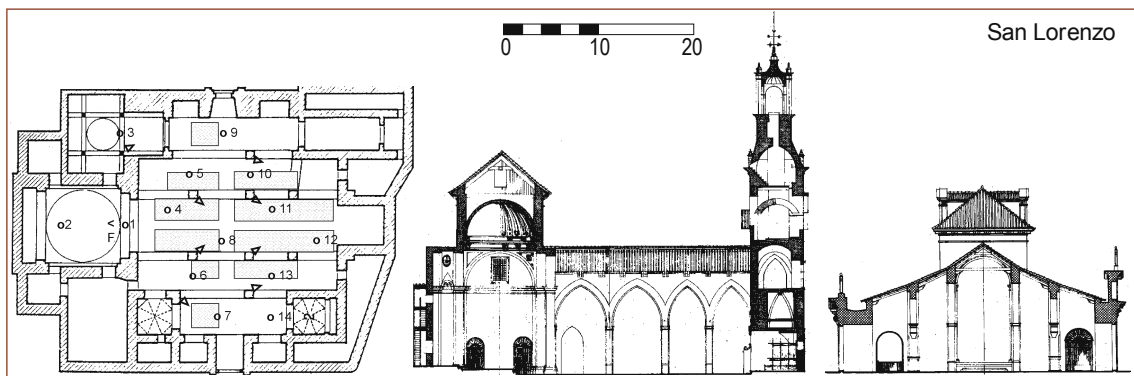


Figura 13. Planta, con la ubicación de los receptores (O), de la fuente (F) y de los altavoces del sistema electroacústico existente (▷), y secciones longitudinal y transversal de la Iglesia de San Lorenzo.

fin de evaluar, desde el punto de vista acústico, una posible intervención en una de las iglesias Gótico-Mudéjares analizadas. Mediante CATT-ACOUSTIC se ha implementado un modelo que se ha calibrado, usando el procedimiento iterativo ya descrito. Los resultados de los parámetros acústicos, tanto para la inteligibilidad de la palabra como para la audición musical, se han contrastado, tanto en su comportamiento espectral como en su distribución espacial, con los resultados experimentales obtenidos *in situ*. A partir de este modelo se han recreado las propuestas de una posible intervención de rehabilitación consistente en cambiar el acabado de ciertas paredes de la iglesia, con objeto de mejorar su comportamiento acústico, sin menoscabo de sus aspectos visuales y formales, dado su carácter patrimonial; así mismo, también ahora se han simulado las modificaciones producidas en el campo sonoro debido a la presencia del público en la zona de audiencia.



Figura 14. Vista interior de San Lorenzo: hacia el presbiterio (izquierda) y hacia los pies de la nave central donde se ubica el órgano (derecha).

Cuando se aborda un proceso de intervención en un objeto patrimonial se hace necesario acercarse al mismo con la intención de poner en valor su significación. Por ello, aunque sea brevemente, se referencian a continuación algunos datos significativos. La iglesia de San Lorenzo [38] está ubicada en Sevilla, en la plaza del mismo nombre, desde la cual tiene su acceso principal. El templo fue originalmente del tipo mudéjar sevillano, pero las reformas de los siglos XVIII y XIX alteraron sustancialmente el conjunto. A la obra primitiva corresponde la portada de cantería, oculta por la tribuna del órgano, y las ménsulas que reciben el vuelo de los arcos del último tramo de la nave central. La capilla mayor y las ubicadas a sus lados se proyectaron a principios del siglo XVII por Diego López Bueno, encargándose de su construcción, a partir de 1615, Andrés de Oviedo. El muro de los pies está concebido como una torre-fachada y aloja en el cuerpo inferior una portada de estructura ojival. Fue construida ya avanzado el siglo XV y rematada con un campanario barroco en 1757.

La planta del templo tiene forma muy irregular (Fig. 13) lo que prueba que no fue erigido en un programa constructivo único, sino que es el resultado de un largo proceso en el que a un núcleo básico se fueron añadiendo cuerpos y volúmenes hasta configurar su aspecto actual. Está formada por cinco naves, la central y las dos laterales adyacentes de cuatro tramos, y las dos laterales más alejadas de dos tramos. En total son ocho los pilares rectangulares que separan las naves. Los de la nave central apean arcos apuntados de desigual anchura. En las naves laterales los arcos son de medio punto, con luces también diferentes. A los pies de la nave central se aloja el coro con sillería de maderas nobles y, encima, el órgano. El presbiterio, en la cabecera de la nave central, se cubre con una bóveda semiesférica (Figs. 13, 14 y 15).

Las cubiertas de las naves son de madera, con armadura de tres paños con tirantes en la nave central y de colgadizo en todas las laterales. Se ilumina fundamentalmente por vidrieras dispuestas en las dos puertas de acceso. Las paredes son de fábrica de ladrillo enfoscada y/o enlucida y, posteriormente, pintada. Están muy ornamentadas con pinturas, altares, tallas, hornacinas con retablos, coro, órgano, y presentan un zócalo de azulejos de 1.5 m de alto, incluso en la base de los pilares. La capilla mayor se encuentra recorrida por un zócalo de azulejo sevillano de 2 m de altura y dos grandes cuadros a ambos lados del altar mayor. Además existen varias capillas laterales con una decoración profusa. El suelo es de mármol en toda la iglesia y el mobiliario está constituido por bancos de madera ubicados en la nave central y algunos asientos en las laterales adyacentes a ella (Figs. 13, 14 y 15).

5.1. Modelos acústicos

Para realizar la simulación acústica se ha utilizado, como en las secciones precedentes, CATT-ACOUSTIC. En la Fig. 15 se muestra la planta, las secciones, y la perspectiva del modelo creado de la iglesia, tras suprimir salas anexas y sacristía.

Una vez implementada la geometría básica del recinto se han realizado las modificaciones pertinentes para llevar a cabo tres simulaciones diferentes: en primer lugar se simuló las

condiciones en las que se realizaron las mediciones *in situ* con la iglesia vacía (la técnica y condiciones de medida ya se han detallado anteriormente) y utilizando los valores de los coeficientes de los materiales ya recogidos en la Tabla 1, para aquellos comunes a todas las iglesias, y los específicos de este templo que aparecen en la Tabla 8. Así se ha podido calibrar el modelo a partir de los valores del tiempo de reverberación medidos siguiendo el proceso

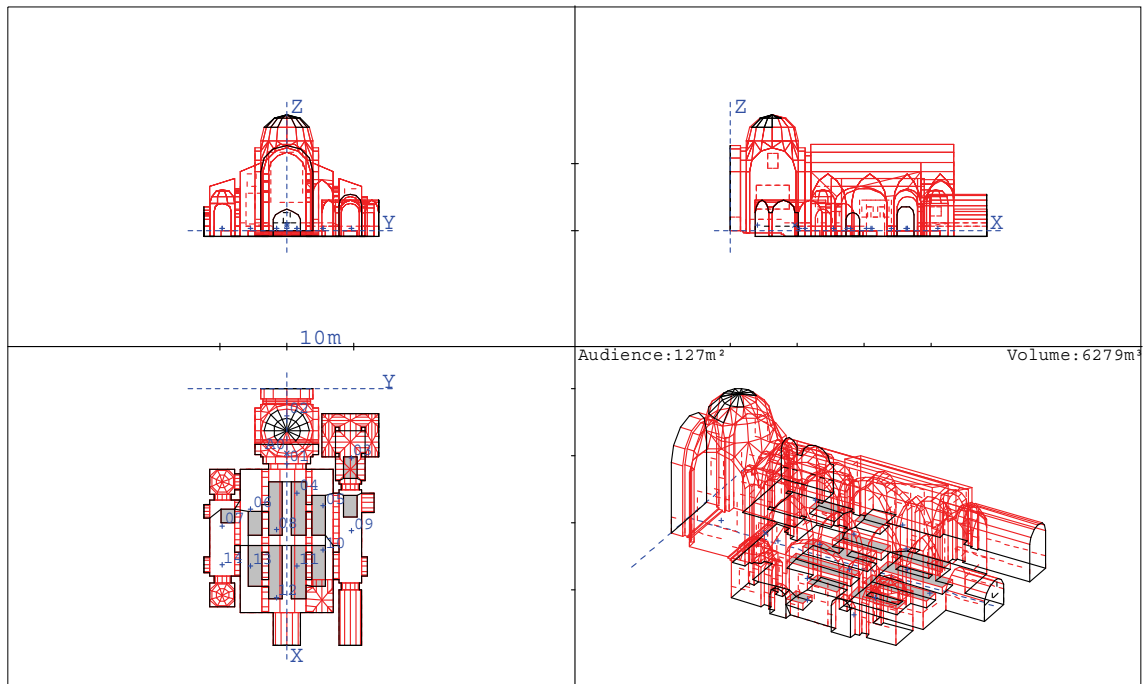


Figura 15. Planta, sección longitudinal, transversal y perspectiva 3D del modelo básico para la simulación de la iglesia de San Lorenzo.

iterativo ya descrito. Esto permitió ajustar los valores de los coeficientes de absorción y dispersión de los materiales que son más desconocidos en la literatura, en este caso, como ya se hizo anteriormente, las paredes verticales perimetrales de las naves de la iglesia (pared adornada LO en la Tabla 8). En la segunda simulación se incorpora la presencia del público en la zona de bancos de la iglesia, simulando las condiciones normales para los actos litúrgicos (50% de ocupación) y en las condiciones actuales del templo. Los coeficientes de absorción aparecen en la Tabla 8 y están adaptados de [39]. Finalmente, se implementa y analiza la incidencia de una posible rehabilitación acústica que consiste en un tratamiento absorbente de parte de los cerramientos, con la condición de que éste sea formalmente respetuoso con el espacio eclesial y su valor patrimonial y sea posible siempre restituir el espacio a sus condiciones originales.

El programa nos permite valorar la importancia de cada uno de los planos en las simulaciones, observando el porcentaje de impactos sobre cada uno de ellos. Los resultados muestran que las contribuciones más significativas en esta iglesia corresponden al suelo, techo, paredes laterales y pared del fondo.

Para simular la segunda propuesta se cambió el coeficiente de absorción de los bancos de madera a los valores que se exhiben al final de Tabla 8 en la fila “bancos ocupados (50%)”.

Puesto que, incluso con la iglesia ocupada, los valores de los parámetros acústicos están lejos de los valores recomendables, parece necesario abordar algún tipo de rehabilitación para mejorar las condiciones acústicas de este recinto de culto. Se propone un tratamiento superficial con placa de yeso perforada, trasdosada con una manta de lana mineral, y terminada con enlucido microporoso sobre velo acústico de lana de vidrio, soportada por una estructura de perfiles anclados a la pared. En la Fig. 16 se muestran fotos de una muestra del material, siendo su apariencia final muy similar a las terminaciones enlucidas. Las superficies a tratar en la iglesia mediante este material se muestran en color verde en la Figura 17 y sus

coeficientes de absorción y dispersión para la recreación virtual aparecen reflejados al final de la Tabla 8, en la fila “trasdosado acústico”.

5.2. Resultados y discusión

En el conjunto de Figs. 18(a)-(f) se muestra el comportamiento espectral, por bandas de octava, de los siguientes parámetros acústicos: tiempo de reverberación, fuerza sonora, definición, claridad, tiempo central y fracción de energía lateral precoz, respectivamente, medidos [21] y simulados en los diferentes supuestos. Así mismo se han dibujado barras de error que dan cuenta de la dispersión espacial sobre los diferentes receptores mediante el error estándar. Para valorar la dispersión espacial, no se ha considerado el receptor 1 (demasiado cerca de la fuente) ni el 3 (no llega sonido directo). En la Figura 18(a) se detallan, además de los resultados medidos y simulados, los valores óptimos del tiempo de reverberación para la

Superficie	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Pared adornada LO	0.18	0.16	0.18	0.18	0.18	0.20
	0.20	0.25	0.35	0.45	0.55	0.65
Coro de madera	0.17	0.18	0.19	0.18	0.17	0.16
	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Órgano	0.12	0.14	0.16	0.16	0.16	0.16
	0.20	0.30	0.30	0.40	0.50	0.60
Terciopelo	0.10	0.14	0.15	0.18	0.30	0.38
	0.10	0.15	0.15	0.20	0.20	0.20
Lienzo	0.15	0.15	0.18	0.21	0.27	0.35
	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Bancos ocupados (50%)	0.27	0.37	0.42	0.45	0.48	0.58
	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Trasdosado acústico	0.62	0.6	0.72	0.74	0.58	0.53
	0.10	0.15	0.15	0.20	0.20	0.20

palabra y la música eclesial aportados por Knudsen *et al* [23]. Cabe señalar la concordancia entre los valores experimentales medidos *in situ* en la iglesia vacía y la simulación equivalente tras el proceso iterativo de calibración del modelo informático. Se observa un ligero descenso de la curva tonal a todas las frecuencias en la simulación con la presencia de público, y el notable descenso con la incorporación del trasdosado en las paredes verticales señaladas en la Fig. 17. Con esta intervención el tiempo de reverberación se aproxima a la banda óptima, más aún si incorporamos la presencia de público cuando se realice el tratamiento.



Figura 16. Panel de yeso laminado perforado propuesto para la rehabilitación (Knauf STO).

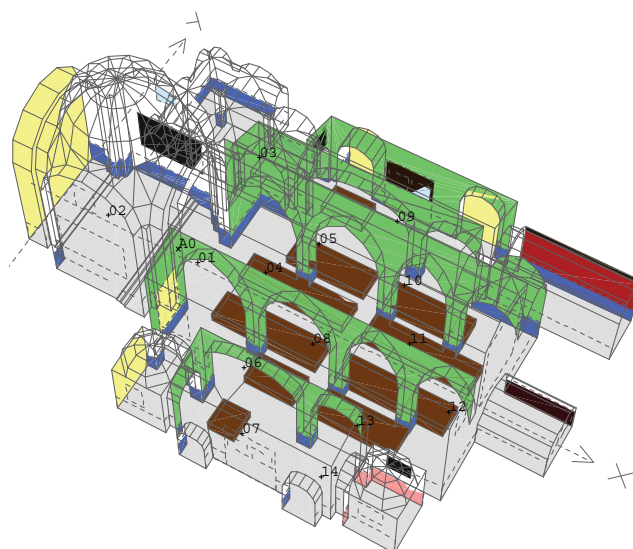


Figura 17. Modelo de mejora con trasdosado acústico (superficies indicadas en color verde).

Para la fuerza acústica aparecen ligeras discrepancias entre los resultados experimentales y los simulados, para las distintas frecuencias, en las mismas condiciones (iglesia vacía), con diferencias en promedio de unos 2 dB (2 JND). La incorporación de público no supone un cambio sustancial con respecto a la simulación real y solo el tratamiento absorbente de las paredes verticales tiene una influencia significativa en la disminución de la energía inicial y final reflejada en la iglesia. Como norma general común en los parámetros energéticos (definición, claridad y tiempo central) cabe señalar que existe una buena aproximación entre los valores medidos *in situ* y simulados sin público, también que existe muy poca diferencia en los resultados de la simulación con público y sin público en la iglesia y que el tratamiento de las paredes propuesto supone un incremento de un 20% en la definición (4 JND), de unos 4 dB (4 JND) en la claridad, y una disminución del tiempo central de unos 80 ms (8 JND), por término medio, en todas las frecuencias. En cuanto a la fracción de energía lateral precoz cabe destacar que presenta un comportamiento similar en todos los casos simulados, mostrando éstos solo una variación notable con los valores medidos a 125 Hz.

Finalmente en la Fig. 19 se representan los valores del índice RASTI en todos los puntos de recepción en la iglesia; la concordancia entre los resultados medidos y simulados son excelentes lo que corrobora la bondad del procedimiento implementado. Es de destacar cómo la incorporación del trasdosado en las paredes verticales supone un salto en la calificación de la iglesia de *pobre* al límite superior de la zona *aceptable* en todos sus puntos.

6. CONCLUSIONES

El conocimiento de los datos experimentales de reverberación en las iglesias estudiadas permite ajustar los valores de los coeficientes de absorción y dispersión que caracterizan acústicamente sus superficies interiores menos conocidas. Este procedimiento, que podría suponer una limitación, es al mismo tiempo una ventaja, ya que permite evaluar de forma eficiente los efectos sobre el comportamiento acústico de los espacios en los proyectos de reforma futura, restauración, mantenimiento o acondicionamiento para usos temporales específicos.

De hecho, este punto de partida inicial asegura una simulación adecuada de las RI y, en consecuencia, gran precisión en los valores de los parámetros acústicos más importantes deducidos a partir de ellas. Cabe destacar que esta precisión aparece tanto en los valores promediados espacialmente para las diferentes bandas de octava y su dispersión espacial, como en la distribución espacial de los valores de los parámetros, espectralmente promediados, utilizados para calificar la acústica del recinto, principalmente en referencia a su dependencia respecto de la distancia emisor-receptor. Por lo tanto, para los parámetros que son muy sensibles a la posición, como el tiempo de reverberación inicial, la claridad y la definición, e incluso la fracción de energía lateral precoz, los resultados obtenidos en la simulación están en excelente concordancia con los valores medidos experimentalmente. Esta coincidencia ha sido analizada en términos del JND para cada parámetro. Los resultados para el índice RASTI también han mostrado un acuerdo muy notable en todas las zonas de la iglesia a pesar de las dificultades relacionadas con los distintos métodos empleados para obtener las funciones de transferencia de modulación.

El proceso iterativo utilizado y la estimación de las irregularidades facilitan la descripción adecuada de las características acústicas de los materiales mediante sus coeficientes de absorción y dispersión. Este procedimiento permite caracterizar una superficie heterogénea, constituida por fragmentos de diferentes materiales y configuraciones.

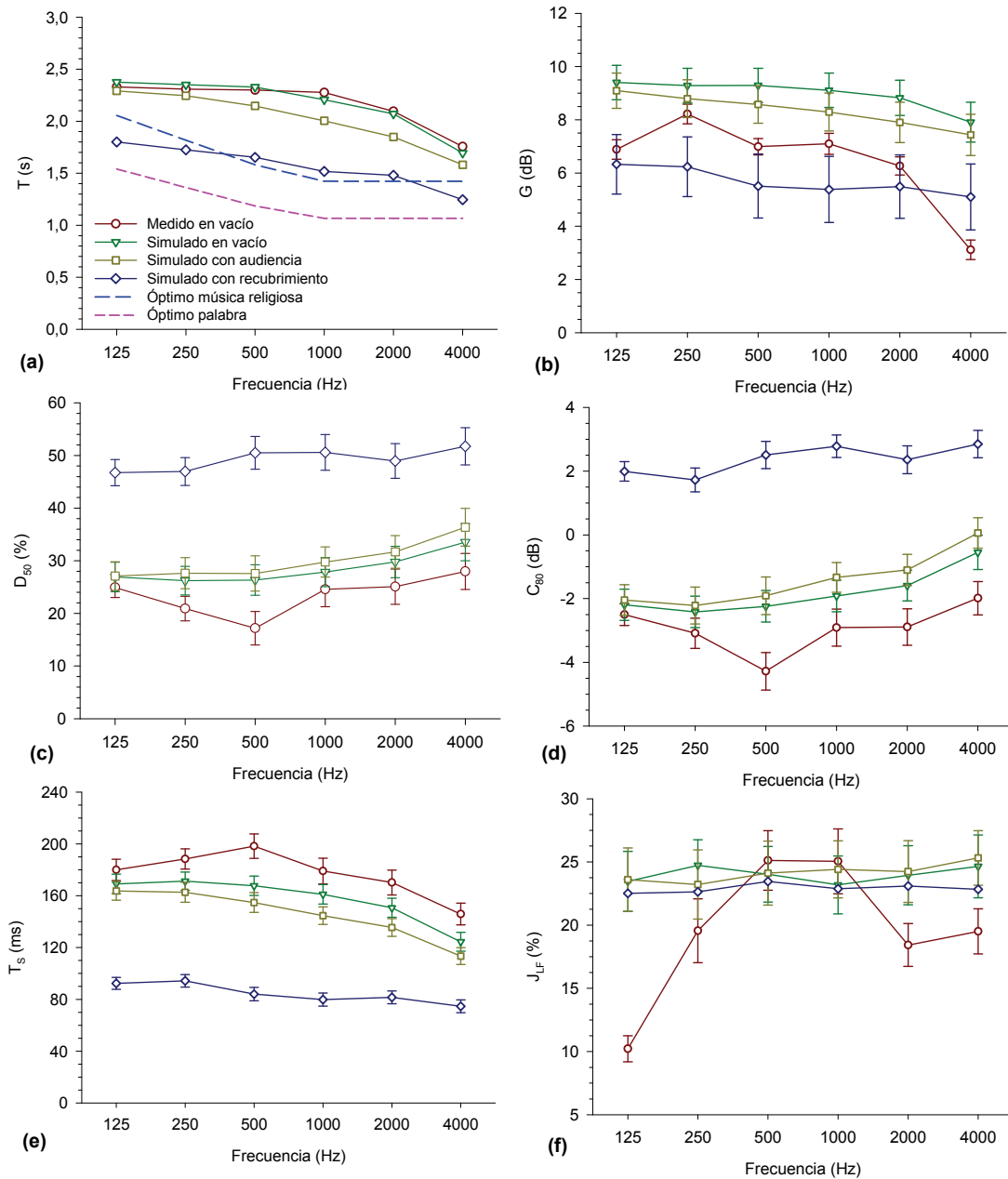


Figura 18. Valores de los parámetros acústicos medidos y simulados, promediados espacialmente, frente a la frecuencia, con valoración de la dispersión espacial mediante el error estándar: (a) tiempos de reverberación; (b) fuerza sonora; (c) definición; (d) claridad; (e) tiempo central y (f) fracción de energía lateral precoz.

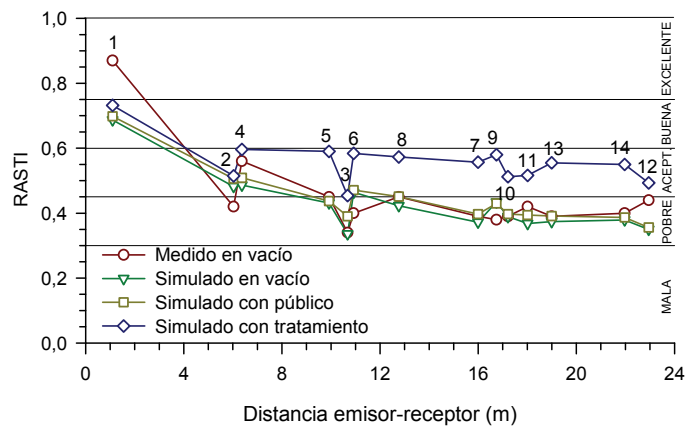


Figura 19. Índice RASTI frente a la distancia emisor-receptor, medido y simulado en los diferentes supuestos para la iglesia de San Lorenzo.

Mediante las simulaciones por ordenador es posible recrear el comportamiento acústico de las iglesias Gótico-Mudéjares en configuraciones y para celebraciones litúrgicas de tiempos pasados, actuales o futuros. Estas recreaciones se han realizado con éxito en dos de estas iglesias.

Finalmente se ha creado y calibrado un modelo de la iglesia de San Lorenzo con el objetivo fundamental de evaluar una posible rehabilitación para mejorar las condiciones acústicas. La comparación de los resultados simulados con los medidos da garantías de la validez del procedimiento implementado para poder aceptar los resultados de la recreaciones estudiadas: incorporar público en la zona de bancos y la intervención con tratamiento absorbente de ciertas paredes de la iglesia, que siendo respetuoso con las formas y el acabado original de la misma, mejora sustancialmente sus condiciones acústicas, como evidencian los resultados virtuales de los parámetros descriptores de calidad acústica obtenidos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está financiado por fondos FEDER y el Ministerio de Ciencia e Innovación Español, dentro del proyecto BIA2010-20523.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. H. Rindel, "The use of computer modelling in room acoustics," *Journal of Vibroengineering* 3, 219–224 (2000).
- [2] M. Vorländer, *Auralization, Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality* (Springer-Verlag, Berlin, 2008).
- [3] B.-I. Dalenbäck, *CATT-A v9.0 User's Manual (CATT-Acoustic with TUCT)*, Gothenburg, Sweden, 2011.
- [4] I. Bork, "A comparison of room simulation software—The 2nd round robin on room acoustical computer simulation," *Acust.- Acta Acust.* 86, 943–956 (2000).
- [5] I. Bork, "Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation—Part II: Calculations," *Acta. Acust.- Acust.* 91, 753–763 (2005).
- [6] Y. W. Lam, "A comparison of three diffuse reflection modeling methods used in room acoustics computer models," *J. Acoust. Soc. Am.* 100, 2181–2192 (1996).
- [7] M. Vorländer y E. Mommertz, "Definition and measurement of random incidence scattering coefficients," *Appl. Acoust.* 60, 187–199 (2000).
- [8] T. J. Cox y P. D'Antonio, *Acoustic Absorbers and Diffusers. Theory, Design and Application* (Spon, London, 2004).
- [9] T. J. Cox, B.-I. L. Dalenbäck, P. D'Antonio, J. J. Embrechts, J. Y. Jeon, E. Mommertz, y M. Vorländer, "A tutorial on scattering and diffusion coefficients for room acoustic surfaces," *Acta. Acust. Acust.* 92, 1–15 (2006).
- [10] Y. H. Kim, H. S. Jang, y J. Y. Jeon, "Characterizing diffusive surfaces using scattering and diffusion coefficients," *Appl. Acoust.* 72, 899–905 (2011).
- [11] ISO 17497-1, "Acoustics—Sound-scattering properties of surfaces. Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room," *International Organisation for Standardisation, Geneva, Switzerland* (2004).
- [12] A. Krockstadt, S. Ström, y S. Sörnsdal, "Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique," *J. Sound Vib.* 8, 118–125 (1968).
- [13] A. Kulowski, "Algorithmic representation of the ray tracing technique," *Appl. Acoust.* 18, 449–469 (1985).
- [14] I. A. Drumm y Y. W. Lam, "The adaptive beam-tracing algorithm," *J. Acoust. Soc. Am.* 107, 1405–1412 (2000).
- [15] T. Lewers, "A combined beam tracing and radiant exchange computer model of room acoustics," *Appl. Acoust.* 38, 161–178 (1993).
- [16] M. Vorländer, "Simulation of the transient and steady-state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm," *J. Acoust. Soc. Am.* 86, 172–178 (1989).

- [17] R. San Martín y M. Arana, "Predicted and experimental results of acoustic parameters in the new Symphony Hall in Pamplona, Spain," *Appl. Acoust.* 67, 1–14 (2006).
- [18] G. Cammarata, A. Fichera, A. Pagano, y G. Rizzo, "Acoustical prediction in some Italian theatres," *ARLO* 2, 61–66 (2001).
- [19] A. ElKhateeb y M. Refat, "Sounds from the past: the acoustics of Sultan Hassan Mosque and Madrasa," *Build. Acoust.* 14, 109–132 (2007).
- [20] S. L. Vassilantonopoulos y J. N. Mourjopoulos, "A study of ancient Greek and Roman theater acoustics," *Acta. Acust. Acust.* 89, 123–136 (2003).
- [21] M. Galindo, T. Zamarreño, y S. Girón, "Acoustic analysis in Mudejar-Gothic churches: Experimental results," *J. Acoust. Soc. Am.* 117, 2873–2888 (2005).
- [22] M. Galindo, T. Zamarreño, y S. Girón, "Acoustic simulations of Mudejar-Gothic churches," *J. Acoust. Soc. Am.* 126, 1207–1218 (2009).
- [23] V. O. Knudsen y C. M. Harris, *Acoustical Design in Architecture*, 5th ed. (Acoustical Society of America, New York, 1988).
- [24] Physikalisch-Technische Bundesanstalt
<http://www.ptb.de/en/org/1/16/163/datenbank.htm> (visitada en octubre, 2011).
- [25] ISO 3382, "Acoustics—Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters," International Organisation for Standardisation, Geneva, Switzerland (1997).
- [26] IEC 60268-16, "Sound system equipment, Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index," International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland (2003).
- [27] N. Xiang y M. R. Schroeder, "Reciprocal maximum-length sequence pairs for acoustical dual source measurements," *J. Acoust. Soc. Am.* 113, 2754–2761 (2003).
- [28] L. G. Marshall, "An acoustic measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio," *J. Acoust. Soc. Am.* 96, 2251–2261 (1994).
- [29] W. Ahnert y H. P. Tennhardt, "Acoustics for Auditoriums and Concert Halls," in *Handbook for Sound Engineers*, edited by G. M. Ballou, (Elsevier, New York, 2005), pp. 109–155.
- [30] ISO/DIS 3382-1, "Acoustics—Measurement of room acoustic parameters. Part I: Performance rooms," International Organisation for Standardisation, Geneva, Switzerland (2006) (actualizada en 2009 y traducida como UNE-EN-ISO 3382-1 en 2010).
- [31] J. E. Summers, R. R. Torres, Y. Shimizu, y B.-I. L. Dalenbäck, "Adapting a randomized beam-axis-tracing algorithm to modeling of coupled rooms via late-part ray tracing," *J. Acoust. Soc. Am.* 118, 1491–1502 (2005).
- [32] T. Zamarreño, S. Girón, y M. Galindo, "Acoustic energy relations in Mudejar-Gothic churches," *J. Acoust. Soc. Am.* 121, 234–250 (2007).
- [33] E. Cirillo y F. Martellotta, "Sound propagation and energy relations in churches," *J. Acoust. Soc. Am.* 118, 232–248 (2005).
- [34] N. Xiang y T. Jasa, "Evaluation of decay times in coupled spaces: An efficient search algorithm within the Bayesian framework," *J. Acoust. Soc. Am.* 120, 3744–3749 (2006).
- [35] F. Martellotta, "A multi-rate decay model to predict energy-based acoustic parameters in churches (L)," *J. Acoust. Soc. Am.* 125, 1281–1284 (2009).
- [36] S. Girón, M. Galindo, y T. Zamarreño, "Distribution of lateral acoustic energy in Mudejar-Gothic churches," *J. Sound Vib.* 315, 1125–1142 (2008).
- [37] I. Bork, "Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation—Part I: Measurements," *Acta. Acust. - Acust.* 91, 740–752 (2005).
- [38] A. J. Morales, *La iglesia de San Lorenzo de Sevilla*. Sever-Cuesta, Sevilla, (1981).
- [39] F. Martellotta, y E. Cirillo "Experimental studies of sound absorption by church pews," *Appl. Acoust.* 70, 441–449 (2009).



PREDICTIONS vs MEASUREMENTS IN ROOM ACOUSTICS: A DIFFICULT ADJUSTMENT

Reference PACS: 43.55.Gx, 43.55.Mc

Arana, Miguel

*Acoustics Laboratory, Physics Department - Public University of Navarra
Campus de Arrosadía, 31006 Pamplona - SPAIN
marana@unavarra.es*

ABSTRACT

Virtual acoustics deals with the simulation of acoustic fields experienced by a listener within a natural environment. The measurement of impulse responses along the room for specific source positions arrangement is usually needed. Measurements of room acoustic parameters are standardized. Nevertheless, some dispersion-uncertainty arises both from the device's characteristics and from experimental set up even though meeting the standard requirements. The influence of the source directivity patterns and the position of the receiver are here analyzed. Results of the most 'sensitive' parameters (C80, IACCE, but also EDT) may be notably influenced. Some results are presented in this paper.

1. INTRODUCTION

Auralization is the technique of creating audible sound files from numerical (simulated, measured or synthesized) data [1]. The auralization must cover all relevant cognitive aspects of the specific case analyzed because perception of sound signals has multiple dimensions. The term was firstly introduced by Kleiner et al. [2]

Virtual acoustics means digitally processing sounds so that they appear to come from particular locations in three-dimensional space, with the goal of simulating the complex acoustic field experienced by a listener within a natural environment. Sometimes Auralization and Virtual Acoustics are used as synonymous.

A virtual audio model can include:

- model-based sound synthesizers,
- geometric room acoustics modeling,
- binaural auralization for headphone and loudspeaker listening,
- high-quality animation,
-

As an example, Digital Interactive Virtual Acoustics (DIVA) Project, developed at Helsinki University of Technology [3] has the goal to create a virtual musical event that is as authentic as possible both in terms of audio and visual quality. The DIVA environment is an integrated implementation of a virtual reality system currently aiming at a virtual symphony orchestra performance. Multiple sound sources (physical models of musical instruments) are conducted by a virtual conductor (controlled by a position tracker with 3 transmitters). The real-time calculation of auralization is enhanced by accurate HRTF approximations, a new late reverberation model, and by an efficient image source method.

Either perceptually or physically based modeling techniques can be used to create virtual acoustics [4]. In professional audio-as well as in computer music, perceptually based approaches produces very accurate results by using optimized efficient algorithms. In this writing attention is focused on physically based approach. In principle, a high quality virtual acoustics should be achieved by modeling physical principles of sound propagation, reflections and scattering from boundaries, diffraction on obstacles, etc.

In order to carry out a reliable room acoustic simulation many physical processes and characteristics of the materials and of devices have taken into account. Next section briefly describes the most important.

2. VARIABLES AND PHYSICAL APPROACHES

2.1 Simulation methods

Different ways could be used for room acoustics simulations that are required for physically based virtual acoustics. In theory, wave-based techniques offer the most accurate results. From the element methods, finite element method (FEM), boundary element method (BEM) and finite difference time domain (FDTD) methods had been the most developed. They take into account wavy phenomena, especially important for low frequencies. Nevertheless, time computation required for high size rooms and high frequencies is not practical. More practical techniques are based on geometrical acoustics, such as ray tracing (RT), beam tracing (BT) or image source (IS) methods. In any case, it is of great significance to know how reliable the auralization is, and to what extend the acoustical details are actually simulated [5]. The more is the quality of the room acoustic model used for calculation of the impulse response the more is the quality of the auralization.

2.2 Room model.

All room acoustic software are able to import the geometrical model from architectural design software, typically a CAD model. From an acoustic point of view, precision of such models is more than enough. Even more, it would be better to simplify geometrical models with very high resolution. Details with a precision of 8.5 cm or lesser are only of interest for frequencies above 5 kHz.

2.3 Source modelling

Radiation characteristics of sound sources are dependent on frequency and direction of radiation. That is to say, sound sources are characterized by its spectral sound power and directivity pattern. Minimum requirements for them are specified in standards. For example ISO 140-4 (Field measurements of airborne sound insulation between rooms) requires a maximum standard deviation for the source directivity measured in free field and under pink noise excitation, in third octave bands. ISO 3382-1 [6] requires lesser standard deviation for the source directivity, in octave bands. We will discuss in detail later uncertainties in measurements (and in room simulations) caused by directivity patterns.

2.4 Material absorption

Absorption coefficients used in room simulations and provided by manufacturers. In general absorption coefficients are obtained from measurements in reverberation chambers [7] and, therefore, their figures are realistic for diffuse sound incidence that happens at late response in room simulation software based in geometrical acoustics. But, really, absorption coefficients are angle dependent, what is very important for first reflections. For example, a change of 0.2 in absorption coefficient (0.4 for normal incidence and 0.2 for real angle incidence) implies a difference in 3 dB in energy for the reflected ray. It seems of great importance to introduce correctly the angle dependence in absorption coefficients for beam tracing and image model methods. In the last version of a popular software [8], reflection coefficients of the walls involved in generating the image (secondary sources) can be angle dependent by enabling the option of angular absorption.

2.5 Scattering coefficients

The scattering coefficient is defined as the ratio of the non-specularly reflected sound energy to the totally reflected energy. It does not include any information about the directivity of the scattered energy. If deeper knowledge on the directional pattern of the scattered sound is required, measurements or calculations of the polar response become necessary [9]. It is expected that with the measurements methods in process of standardization [10] more reliable figures for scattering coefficients will be published. Room simulation software should calculate the fraction of energy which is not specular but taken into account scattering coefficients both due to edge diffraction and due to surface roughness.

3. REAL ACOUSTICS. OBJECTIVE MEASUREMENTS

It may seem strange the question: what is real acoustics?. Into a performance in a concert hall, for example, one can answer that real acoustics means the total acoustic impression of a listener in his seat. Nevertheless, such answer is not free of subjectivism. Since that it deals with a physical phenomenon objective parameters can be used-and measured, to quantify such impression. This way ends in to define measurement standard focused to obtain unambiguously results for the acoustic parameters related to acoustic impression. Such is the goal of ISO 3382 [6] for performance spaces. But, how these methods ensure unambiguous figures of the acoustic parameters?. This question must be answered in terms of the just noticeable difference (jnd) of each one of the acoustic parameter. Some acoustic parameters (T30, for example) are little sensitive to variables involved in the experimental arrangement but not other ones (C80, LF, IACCE).

On the other hand, the figure of an acoustic parameter is not one individual characteristic of the room. It is clearly dependent on the position in the room. A requirement for room simulations is that the spatial resolution must represent the natural listening experience related to noticeable differences for all listener positions. In theory (for an ideal diffuse sound field) local variations are related with the correlation function of their corresponding impulse responses [11].

4. SOME RESULTS ABOUT UNCERTAINTIES IN MEASUREMENTS

In this section some results concerning to the influence of some variables of the experimental arrangement are shown. In all measurement results here presented sweeps signals were used to obtain impulse responses since they are relatively tolerant of time variance and totally immune to harmonic distortion [12]. All devices (sound sources, amplifiers, microphones, filters) fulfilled the requirements of ISO 3382-1 standard.

4.1 Directivity patterns of the source

Two dodecahedron loudspeakers with directivity diagrams fulfilling the specifications of ISO 3382-1 were used. Fig 1 shows their directivity characteristics in the equator plane by 'gliging' 30° arc, as well as ISO 3382-1 tolerances.

In order to quantify the uncertainty of the measurement (experimental arrangement) the experimental standard deviation (STD_{exp}) was evaluated by taking 10 measurements without any change of the setup-fixed orientation of loudspeaker [13]. Then this figure quantitatively expresses the repeatability in terms of dispersion characteristics of the results of successive observations carried out under the same measurement conditions. STD_{exp} obtained from all dodecahedron loudspeakers used was similar and always a little fraction of the value of the corresponding jnd [14] of the acoustic parameter measured.

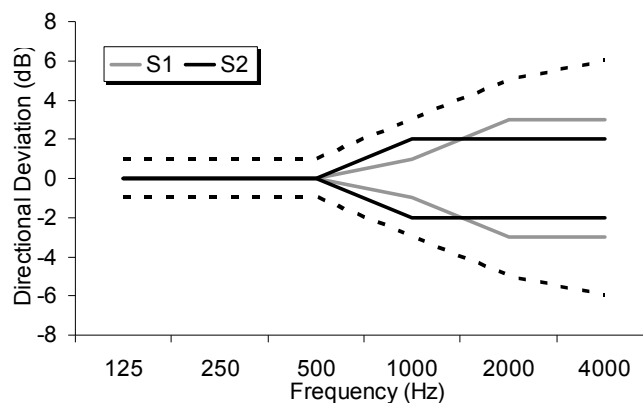


Fig.1 Directivity for two sources: maximum deviation from mean value for 'gliding' 30° arc. Upper and lower curves are the ISO 3382 tolerances.

Since the loudspeakers meet the ISO requirements one can think that the orientation of the source when measuring acoustical parameters in a seat is unconcerned. As a first example, figure 1 shows the results obtained from sources S1 and S2, with random-specific orientation. Four acoustical properties are grouped with their objective parameters.

Table 1. Results from S1 and S2 with random-specific orientation.

	Reverberance		Clarity		Loudness	Apparent Source Width	
	T30 _{mid} (s)	EDT _{mid} (s)	C50 _{mid} (dB)	C80 _{mid} (dB)	G _{mid} (dB)	LF _{E4}	1-IACC _{E3}
S1	2.88	2.73	-4.3	-1.4	2.9	0.12	0.60
S2	2.89	2.75	-5.9	-2.5	3.7	0.12	0.46
STD _{exp}	0.02	0.03	0.1	0.1	0.1	0.01	0.01
jnd	0.14	0.14	1	1	1	0.05	0.08

It's clear that such a deviation produced by the measurement itself is not enough in order to explain the differences found at some parameters as C50_{mid}, C80_{mid}, G_{mid} and IACC_{E3}. Taking into account that only one link of the measurement chain was replaced, a difference larger than jnd for clarity must be considered unacceptable. In addition, remarkable results are also found regarding the IACC_{E3} data. By using Beranek's criteria [15] the 'good' valuation of the spaciousness of the hall obtained with the source S1 –at least at that source-receiver position– will become to solely 'acceptable' in the case of having used the source S2.

In order to study the influence of the source orientation on the results of different acoustic parameters, a total of 24 different source orientations for the same source- receiver position were considered. The receiver position was selected at the central part of the audience – 18.2 m from the source – and was certainly a representative point of the main audience area. Due to the symmetry of the sources, a rotation of 120° was covered in 5° steps, which is thought to be representative of the directivity of the sources. Denoting by STDs the standard deviation of the measurement including the effect of the source orientation, figure 2 shows that, for frequencies above 500 Hz, STDs surpass the limit of a half of jnd (thick line) for both parameters and sources except in the case of C80 at 1 kHz for one of the sources.

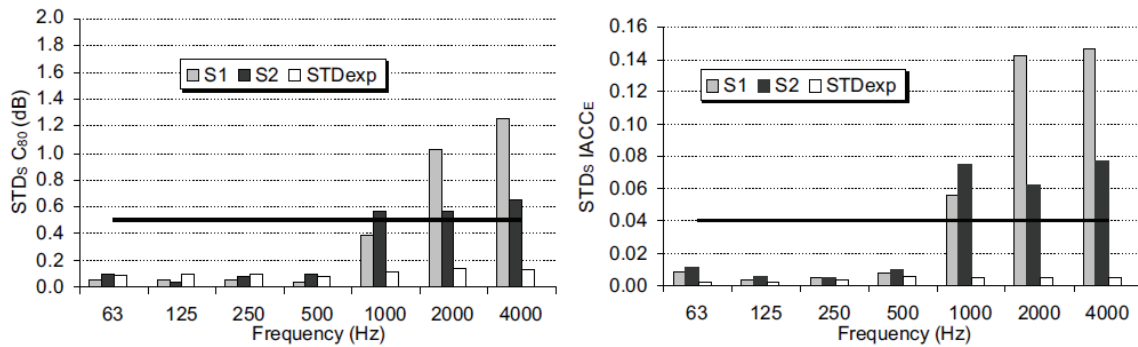


Fig.2 STDs octave band values for C80 and IACCE from sources S1 and S2, 24 orientations. Thick line: stated range of tolerance.

Detailed observation of the impulse responses obtained from different source orientations [16] revealed that the main deviation is introduced at the very start of the impulse response with the arrival of the direct sound. It depends on the lobe's shape of the dodecahedron loudspeaker and whether a maximum or a minimum of the source directivity is facing the receiver. Variations on the measured values depend both on the frequency band and on the way those parameters are derived. The most 'sensitive' parameters are C50, G and IACCE. But, even within the group of reverberation time parameters, EDT is influenced by source orientation due to its integration interval is shorter. In short, for auralization purposes, it is hence of importance to use a suitable source with an omni-directional pattern over a wide frequency range.

4.2 Receiver position

When one thinks of the acoustic evaluation of a specific receiver-position in a room one assumes the seat as a point. Nevertheless, listener position allows some spatial variability, as well as of the two positions of our ears. Several researchers have reported the possibility that values of the most common acoustic parameter show significant variations caused by different source positions or small displacements of the microphone. With regard to receiver's position, both Bradley [17] and Pelorson [18] found that for all measures considered and investigated in all rooms, a displacement of 30 cm leads to significant changes. Nielsen [19], again, found differences between 1.4 and 3.2 dB for values of C80 measuring at eight positions within the same seat. More surprising still are the fluctuations in parameters focused to measure spaciousness obtained by Okano [20] or D. de Vries [21]. Their results confirmed the existence of large variations in the values of both LF and IACC, not only between seats within the same room, but in different positions within the same seat, coming to question the potential of these parameters to describe changes on ASW due to its extreme sensitivity to local interference phenomena.

In order to study influence of the receiver position on the measurement of acoustic parameters, an experimental setting was designed to measure on a seat with greater resolution. By means of a swing-mounted tripod, IRs at 25 positions (central position and 24 positions on two circles of 15 and 25 cm of radius each one, every 30°). Figure 3 shows the results obtained for C80 at 125 Hz, 500 Hz and 2 kHz frequency bands. In spite of such bands are quite above of the Schroeder's frequency, it turns out surprising that figure of the parameter shows a certain sinusoidal characteristic. This implies that local undulatory phenomena arise into the measurement surface and clearly influences the results.

In order to summarize, figure 4 shows the resulting deviations from averaging several positions measured in different rooms. In the left graph, STD_R and STD_{exp} are compared. STD_R (average value from 125 Hz to 4 kHz bands) ranges from four to seven times the STD_{exp} . Right graph shows the effect of distance, 15 or 25 cm from the center. These differences are lower than those found at the literature, especially for parameters related with spaciousness.

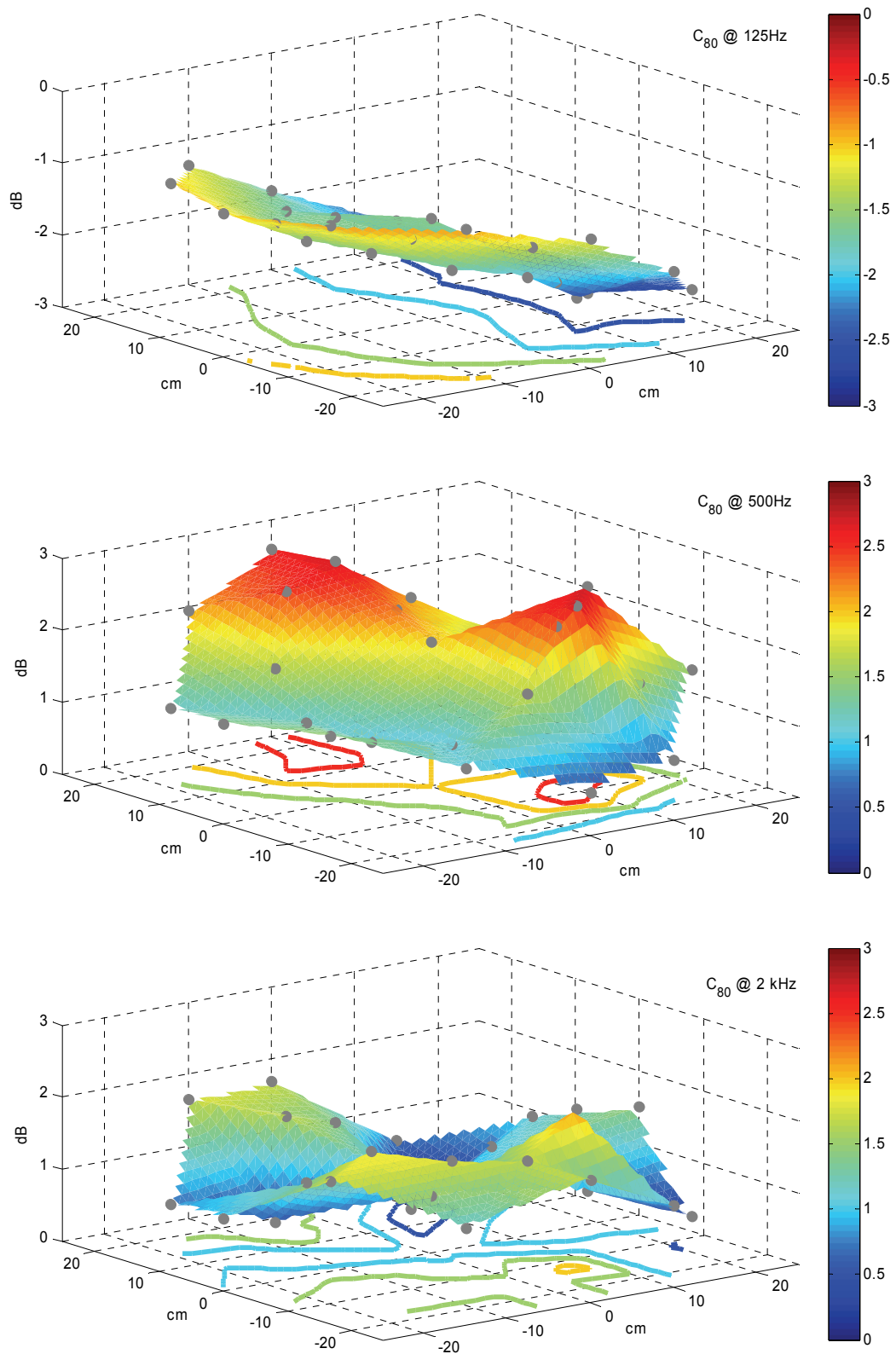


Fig. 3 C₈₀ values-receiver position dependent, for 125 Hz (up), 500 Hz (mean) and 2 kHz (low) frequency bands.

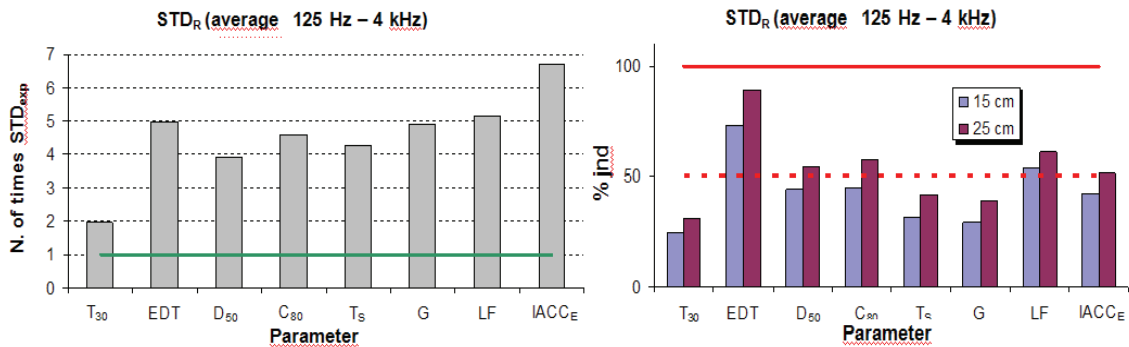


Figure 4 Influence of the position of the receiver. STD_R (averaging 125 Hz – 4 kHz) versus STD_{exp} (left) and jnd (right) of each parameter.

5. ASSESSING MEASUREMENT UNCERTAINTIES THROUGH SIMULATIONS

Enhanced computing power enables the acoustician to test a vast array of variables efficiently, thus making it possible to come up with configurations which would otherwise be unfeasible solely through measurement procedures. The use of simulation software could aid us in diminishing the complex procedures required when spatial distributions within halls are analysed.

Up to now, research on uncertainties due to source orientation has been limited to, as well as by, measurement procedures. The peculiarity of the phenomenon, which appears solely at higher frequencies, seems to suggest that simulation software – whose main limitation is ray-tracing at low frequencies – is not a limiting tool. It may enable us to test the ‘source orientation’ variable spatially in a time-saving way, in sharp contrast to the use of measurements. In addition, present display facilities implemented by developers of the programs are a great aid for interpreting results.

In this example [22], the directivity of four different acoustic sources was measured and the influence of its accurate orientation spatially quantified in five enclosures for speech and music. In order to determine the effect of the source orientation on the results of various acoustic parameters, 72 simulations were carried out with each source. A full 360° rotation was covered in 5° steps. For the spatial analysis, a grid of receivers – one receiver per m^2 – was placed all over the audience zone excluding balconies. Over three thousand receivers, each one ‘measuring’ 7 parameters – T_{30} , EDT, C_{50} , C_{80} , T_s , G and LF – at 8 frequency bands for each simulation and source, were finally utilised. Over 50 million data had to be carefully evaluated by means of Matlab® technical computing software.

Fig. 5 shows the results obtained for source S2 at the Baluarte Concert Hall. Sound Pressure Level of solely the direct sound at 2 kHz octave band is represented for one orientation. The SPL_{direct} value is subject to the lobe shape of the dodecahedron loudspeaker, i.e. whether a maximum or a minimum of the source directivity is facing the receiver. Furthermore, the corresponding octave-band directivity balloon plot of the source along with a graph containing measured and simulated values in the test receiver – which is highlighted inside the grid map – can also be observed. Both measurement and simulation values follow a similar pattern.

Variations on the C_{80} parameter are shown in Fig. 6. The same source, concert hall, and receiver test are displayed; however, in this case, 4 kHz octave-band is the frequency chosen for representation. The mean value for C_{80} in the highlighted receiver is in the vicinity of -2 dB but the variation of the parameter value ranges from -3 dB to -1.2 dB. When we evaluated the direct sound along with the whole impulse response, we also found that the coincidence between measured and simulated values favoured the simulation software and its ability to accurately predict even minor changes in measurement conditions.

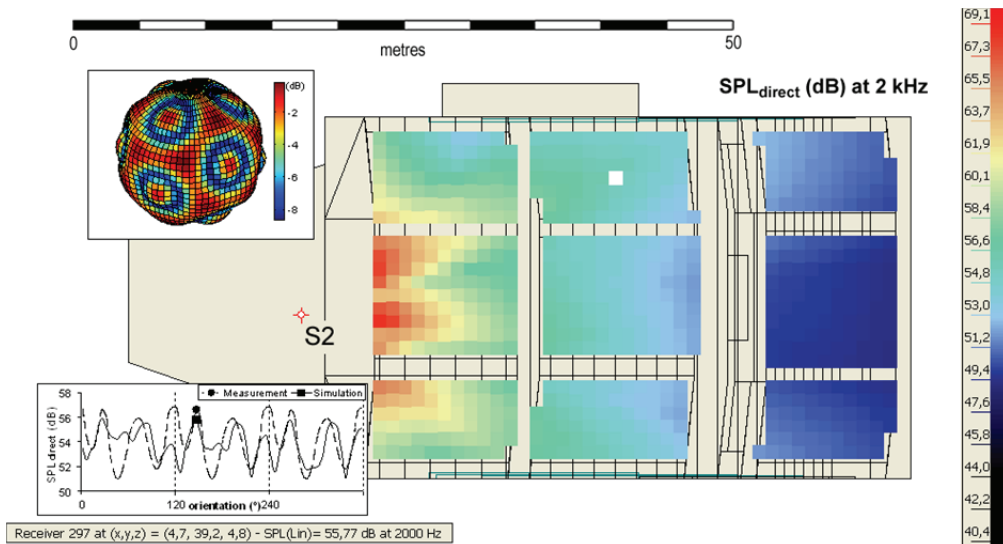


Figure 5. SPL_{direct} for S2 at 2 kHz while turning the source. (Top-left hand window) Directivity balloon plot of the source. (Bottom-left hand window) Measured and simulated values in the test receiver, highlighted. Room: Baluarte Concert Hall.

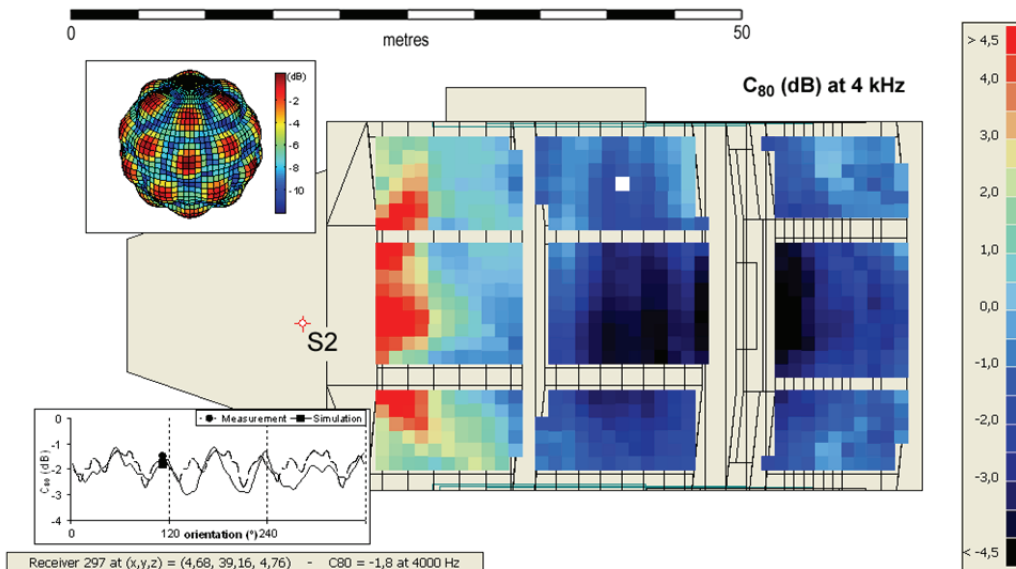


Figure 6. C_{80} for S2 at 4 kHz while turning the source. (Top-left hand window) Directivity balloon plot of the source. (Bottom-left hand window) Measured and simulated values in the test receiver, highlighted. Room: Baluarte Concert Hall.

On identifying the standard deviation including the effect of the source orientation – STD_S – as the parameter that characterised the dispersion of the results observed in each receiver when carrying out the 72 corresponding simulations on each source, it was possible to draw up grid plots as those shown in Fig. 7 covering the different halls. Relative STD_S with the jnd of the respective parameter as a reference was preferred for depiction. Thus, apart from displaying the results on a sole scale for all parameters, the value of relative STD_S was also representative of the change in subjective perception that the uncertainties could produce.

As can be seen in Fig. 7, there are several variations depending on the position within the hall. The use of a grey scale for the diagram enables us to locate the most affected zones. Central areas may be more affected by the directivity of the source. The proximity of a wall and subsequently the arrival of a reflection from others may help to compensate the uncertainty which arises as a result of the difference of levels from the direct sound. Finally, Fig. 8 shows the percentage of receivers affected with STD_S higher than $0.5jnd$ depending on each one of the sources in the five halls under study.

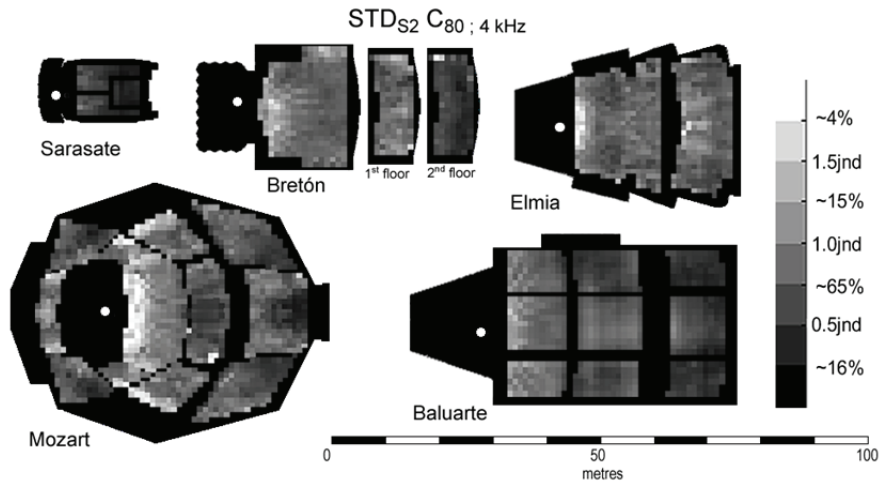


Fig. 7. Relative STD_S for C_{80} parameter obtained for S_2 at 4 kHz for all rooms. Reference: $1\text{dB} - j\text{nd}$ for C_{80} . At colorbar, the percentage of receivers whose STD_S remain within an interval of half a $j\text{nd}$ is also displayed.

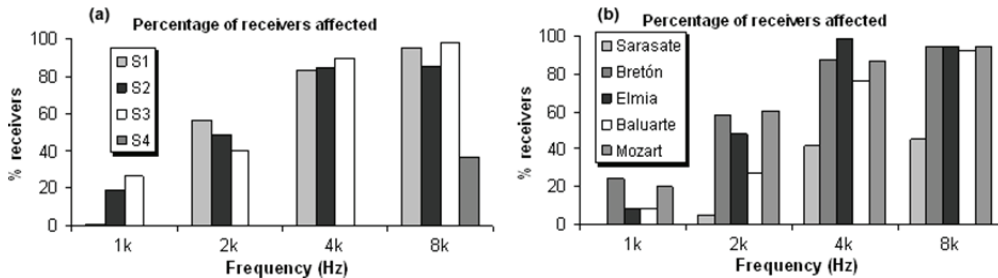


Fig. 8. Percentage of receivers with STD_S for $C_{80} > 0.5j\text{nd}$ (a) for all rooms and (b) for the three commercial dodecahedron loudspeakers (S_4 excluded).

The loudspeakers which were tested delivered satisfactory results up to 1 kHz. Below that frequency band, the bearing of source orientation is negligible for all acoustic parameters. As frequency is increased, sound radiation becomes more directional and the effect on the parameters cannot be neglected any longer. Variations on parameter figures depend on the source, the frequency band, the way those parameters are derived as well as the position within the hall where they are going to be measured. The use of typical commercial dodecahedron sources (as S_1 , S_2 and S_3) could lead to high deviations in wide areas of audience zones of common enclosures for both speech and music. At 1 kHz and 2 kHz octave bands, the percentage of receivers affected with uncertainties higher than the subjectively perceivable change exceeds 15% and 40% respectively. Furthermore, at higher frequencies, a deviation greater than half the $j\text{nd}$ of the parameter could be expected in at least 80% of receivers.

6. CONCLUSIONS

The measurement of impulse responses is a powerful technique to adjust simulations, to make auralizations and for virtual acoustic achievements. It is clear that impulse response is spatial dependent. It is accepted that an only impulse response characterizes a specific source-receiver position-or, at least, possible differences are not perceptible. Nevertheless, even though by using experimental set up meeting all standard requirements, noticeable dispersion appears on results of some acoustic parameters. Minor influence was found with regard to the exact position of the receiver (around the central point) but noticeable differences arise when orientation of the source changes. Detailed observation of the impulse responses obtained from different source orientations revealed that the main deviation is introduced at the very start of the impulse response with the arrival of the direct sound. It depends on the lobe's shape of the dodecahedron loudspeaker and whether a maximum or a minimum of the source directivity is facing the receiver.

The peculiarity of the phenomenon, which appears mainly at higher frequencies, suggests that simulation software – whose main limitation is ray-tracing at low frequencies – is not a limiting tool. It allows us to test the ‘source orientation’ variable spatially in a time-saving way, in sharp contrast to the use of measurements. Percentage of receivers with an STD_s exceeding an interval of half a jnd was calculated for several auditoriums and for different loudspeakers.

7. REFERENCES

- [1] Michael Vorländer, *Auralization: fundamentals of acoustics, modeling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality*, Springer-Verlag, Berlin. ISBN 978-3-540-48829-3 (2008).
- [2] M.Kleiner; B. I. Dalenback; U.P. Svensson; “Auralization - an overview”. *J. Audio Eng. Soc.*, 41(11):861-875 (1993).
- [3] V Pulkki, T Lokki, “Creating Auditory Displays with Multiple Loudspeakers Using VBAP : A Case Study with DIVA Project” In: *Proc. 5th Int. Conf. Auditory Display (ICAD’98)* Glasgow, UK: (1998).
- [4] Tapio Lokki; Lauri Savioja; “Virtual Acoustics”. In D. Havelock, S. Kuwano and M. Vorlander editors, *Handbook of Signal Processing in Acoustics*, Vol. 1, pp. 761-771, Springer, NY, (2008)
- [5] J. H. Rindel; C. L. Christensen, “Room acoustic simulation and auralization – how close can we get to the real room?”, *WESPAC 8, The Eighth Western Pacific Acoustics Conference* (Keynote lecture), Melbourne, Australia, 7-9 April (2003)
- [6] ISO 3382-1, *Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces*. (2009)
- [7] ISO 354, *Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room*. (2003)
- [8] ODEON Room Acoustics Software, v. 11, User Manual, Odeon A/S, Lyngby, Denmark (2011)
- [9] Michael Vörländer and Eckard Mommertz, “Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients”, *Applied Acoustics* 60, 187-199, (2000)
- [10] ISO/DIS 17497-2. *Acoustics - Sound-scattering properties of surfaces -- Part 2: Measurement of the directional diffusion coefficient in a free field*
- [11] H. Kuttruff, *Room acoustics*, 4th ed. E&FN Spon, London, (2000).
- [12] S. Müller, P. Massarani; “Transfer-function measurement with sweeps”. *Journal of the Audio Engineering Society* 49, 443–471. (2001)
- [13] JCGM 100:2008, *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*, (2008)
- [14] I. Bork; “A comparison of room simulation software – the 2nd round robin on room acoustical computer simulation”. *Acustica united with Acta Acustica* 86, 943–956. (2000).
- [15] L. L. Beranek: *Concert and opera halls: How they sound*. Acoustical Society of America, Woodbury, New York, (1996).
- [16] [16] R. San Martín, I. B. Witew, M. Arana, M. Vorländer, “Influence of the Source Orientation on the Measurement of Acoustic Parameters”, *Acustica united with Acta Acustica* 93, 387–397. (2007).
- [17] Bradley J.S., Halliwell R.E., “Accuracy and reproducibility of auditorium acoustics measures”, *Proceedings of British Institute of Acoustics*, Spring’88 Meeting, Cambridge (UK) Volume 10, Part 4, 339-406, (1988).
- [18] Pelorson X., Vian J.P., Polack J.D., “On the variability of room acoustical parameters: reproducibility and statistical validity”, *Applied Acoustics* 37, 175-198, (1992).
- [19] Nielsen J.L., Halstead M.M., Marshall A.H., “On spatial validity of room acoustical measures”, *Proceedings of 16th International Congress on Acoustics (ICA)*, Seattle (US), (1998).
- [20] Okano T., Beranek L., Hidaka T., “Relations among interaural cross-correlation coefficient (IACCE), lateral fraction (LFE), and apparent source width (ASW) in concert halls”, *Journal of the Acoustical Society of America* 104(1), 255-265 (1998).
- [21] de Vries D., Hulsebos E.M., Baan J., “Spatial fluctuations in measures for spaciousness”, *Journal of the Acoustical Society of America* 110(2), 947-954, (2001).
- [22] San Martín R., Arana M., “Uncertainties caused by source directivity in room-acoustic investigations”. *Journal of the Acoustical Society of America* 123 (6), 133-138, (2008)



MODELS AND ALGORITHMS FOR COMPUTER SIMULATIONS IN ROOM ACOUSTICS

Reference PACS: 43.55.Ka

Vorländer, Michael

*Institute of Technical Acoustics - RWTH Aachen University
Neustr. 50, 52066 Aachen, GERMANY
mvo@akustik.rwth-aachen.de*

ABSTRACT

With the rapid development of computers, commercial software for room acoustical simulation is available. It is only complete with an option for auralization. Another field of rapid progress is Virtual Reality. In this contribution the development of simulation tools in room acoustics and further work aiming at real-time Acoustic Virtual Reality systems are reviewed and discussed with particular emphasis on the level of detail in CAD models, on curved surfaces, on diffraction, on stochastic uncertainties in input data, on small rooms, and on real-time processing.

1. INTRODUCTION

With the rapid development of computers, room acoustical simulation software was developed and applied in sound field analysis in rooms. Finally in the beginning of the 1990's, the processor speed, the memory space and the convolution machines were sufficiently powerful to allow room acoustical computer simulation and auralization on a standard personal computer. Since then, several improvements in the modelling algorithms, in binaural processing and in reproduction techniques were made (see Kleiner et al [1]). Commercial software for room acoustical simulation today is only complete with an option for auralization through the sound card of the computer.

The concept of auralization was applied to fields other than room acoustics since about the year 2000. The aim is now different as not music and the quality of concert halls or other performance spaces are to be evaluated but the perception of sound and noise. Thus, building acoustics, automotive acoustics and machinery noise are areas of application. The task in all these applications is the evaluation of sound sources, transmission constructions or products by listening instead of a numeric expression of the acoustic quality [2]. Wave-based numerical acoustics such as FEM, BEM, FDTD or analytic models and any kind of structural acoustics transfer path method is suited as a basis for auralization. The link between simulation and auralization is the representation of the problem in the signal domain and the treatment of sound and vibration by signal processing [3].

Another field of rapid progress is Virtual Reality. Originally used in computer graphics and visualization, Virtual Reality aims at image simulation (so-called "rendering") and 3D displays. In this contribution the development of simulation tools, examples for applications in room acoustics and further work aiming at real-time Acoustic Virtual Reality systems is reviewed and discussed.

Following the concepts of simulations in acoustics and vibration, we can describe the process

of auralization by separation of the processes of sound generation and transmission into system blocks and description of these blocks with tools of system theory. Fig. 1 illustrates the basic elements of sound generation, transmission and radiation.

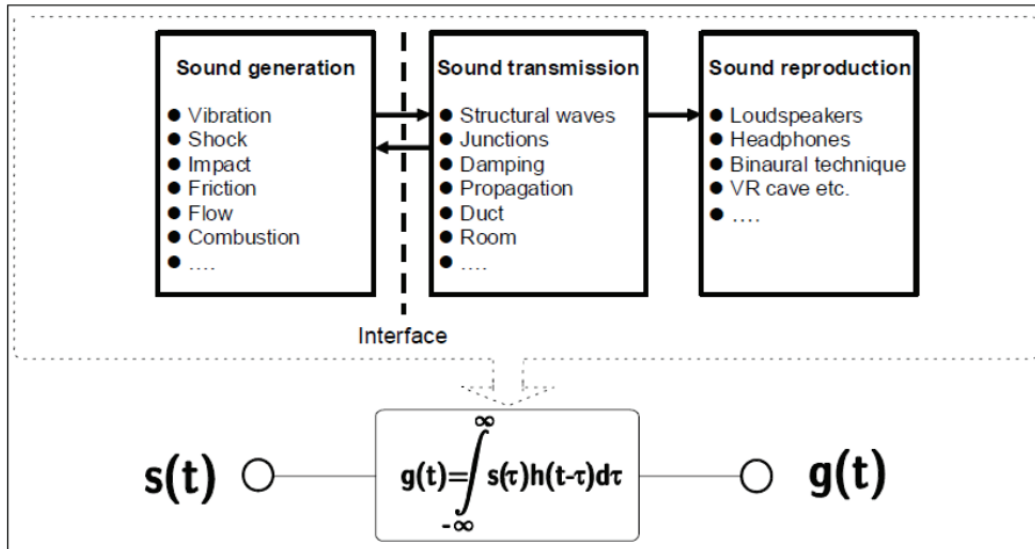


Figure 1. Components of auralization and virtual acoustics: representation of sound and vibration sources, transmission, reproduction, and mapping on a task of signal processing.

One might ask why the problem cannot simply be treated by using a mono signal, an equalizer and a headphone. The need for a more complex reproduction technique with a spatial representation is given by the fact that human hearing extracts information about the sound event and the sound environment by segregation of acoustic objects due to common cues of spectral, temporal and spatial attributes. This, for instance allows us to identify one speaker out of a cloud of diffuse speech (cocktail party effect). In situations of noise immission, the spectral, temporal and spatial cues are extracted to judge the event as pleasant, annoying, informative or neutral. As long as the specific acoustic (physical) and semantic content of the noise must be treated, restrictions in spectral, temporal and spatial cues are not appropriate.

In room acoustics, the quality of the results must be very high. People are sensitive to the perception of music in all its aspects, temporal, spectral and spatial. Therefore the challenge in creating auralization in room acoustics is very high, and this applies to source recording, sound propagation (reverberation) rendering and audio reproduction. While source recording and audio reproduction is discussed in other papers, this contribution is focused on simulation of the sound propagation in rooms.

2. ROOM ACOUSTICAL SIMULATION

Today, simulated room acoustics are applied in various fields with great success. Their well-developed algorithms help to create realistic acoustics during architectural planning. Acoustic simulation tools are also used for designing sound reinforcement systems in churches, stadiums, train stations and airport terminals.

2.1 Geometrical acoustics: Ray Tracing and Image Sources

In geometrical acoustics the two basic models of geometrical sound propagation, ray tracing and image sources are applied. Often, however, the two philosophies are mixed up, even confused. It is important to highlight the differences in the physical meaning: Ray tracing describes a stochastic process of particle radiation and detection. Image sources are geometrically constructed sources which correspond to specular paths of sound rays. Often, image sources are constructed by using rays, beams or cones, via kind of ray tracing.

Nevertheless they remain to be “image source models”. The fundamental difference between

image sources and ray tracing is the way of calculation of contributions in impulse responses. Ray Tracing only yields impulse response low-resolution data like envelopes in spectral and time domains. Image sources (classical or via tracing rays, beams, cones, etc. [4 - 8]) may be used for exact construction of amplitude and delay of reflections which narrow-band resolution depending on the filter specifications for wall reflection factors, for instance.

2.2 Hybrid models

Due to the contradictory advantages and disadvantages of ray tracing and image sources it was tried to combine the advantages in order to achieve high-precision results without spending too much complexity or computation time. Either ray tracing or radiosity algorithms were used to overcome the extremely high calculation time inherent in the image source model for simulation of the late part of the impulse response (adding a reverberation tail), or ray tracing was used to detect audible image sources in a kind of “forward audibility test”. The idea behind is that a ray, beam, or cone detected by a receiver can be associated with an audible image source. The order, the indices and the position of this image source can be reconstructed from the ray's history with storing the walls hit and the total free path. Hence the total travel time, the direction and the chain of image sources involved can be addressed to the image source. Almost all other algorithms used in commercial software are kind of dialects of the algorithms described above, and they differ in the way mixing of the specular with the scattered component is implemented. The specific choice of dialect depends on the type of results, particularly on the accuracy, spatial and temporal resolution.

2.3 Verification tests

The computational performance and the accuracy of computer simulations can only be checked if existing rooms are modelled and the results compared with measurement results. Auralization, of course, can also be checked in listening tests with recordings in the original room. This procedure was carried out in a first intercomparison in Braunschweig in 1993 and 1994, Germany, on a lecture hall. The first results were partly disappointing [9]. Data were collected from 17 participants in computer simulations and 7 in measurements. One result is shown in Figure 2. It contains the prediction of reverberation time based on visual inspection of the test room and individual choice of absorption coefficients. The results of this phase showed a surprisingly large scatter with a strong tendency to underestimate the absorption coefficients and thus to overestimate the reverberation time.

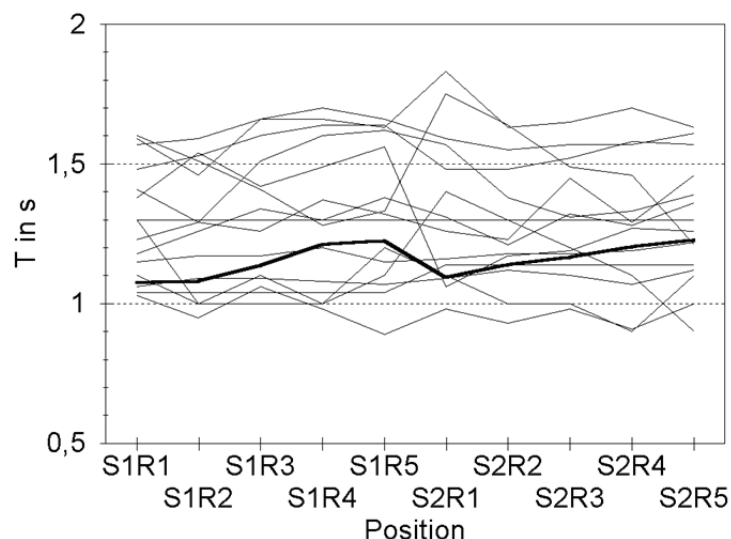


Figure 2. Results from the first round robin on room acoustical computer simulations (from [9]). Plot of reverberation times T predicted for the 1 kHz octave band in an auditorium. Thick line: average measurement result which has an uncertainty of 5% (± 0.05 s) ([10]).

The differences exceeded 50% in some cases. Even simple quantities such as the sound level (strength) were predicted with up to ± 5 dB maximum deviation. In an overall accuracy rating,

however, only a few programs were identified reliable. Moreover, it was significant that algorithms with purely specular reflection modelling are not sufficient which was supported by the results of the second phase where the input data were fixed for all participants. Still the programs which only used specular reflections overestimated the reverberation time systematically. Today it is common knowledge that in typical rooms after reflection order three or four, the main energy propagation goes through diffuse (scattered) sound.

In the following years, two more round robins were created by Bork in 2000 [9] and in 2005 [10]). He confirmed the results of the first project and who extended the scope and the interpretation towards new aspects.

3. CAUSES AND CONSEQUENCES OF UNCERTAINTIES

In the following we investigate the sources of uncertainties and their impact on the results. In this discussion, an uncertainty must be treated as object of scientific research on its own. It is not adequate to “calibrate” a computer model with adjustment of input data in a way that, for instance, reverberation times or other damping effects are matched to measurement results. The objective for computer simulation should be to be independent of adjustment factors. It should be purely based on physical data and corresponding databases of input data (typically material properties).

If correct data are used, there still remains the question of the correct model and the correct method suitable for solving the acoustic problem. The latter aspect sets demands on the skills and experience of the operator. For this paper, we assume that the operator uses the software under appropriate conditions of applicability to the acoustic problem. Then remain systematic and stochastic errors due to the algorithm itself.

In the analysis of stochastic uncertainties, a very powerful tool can be applied which is related to uncertainties of measurements (ISO GUM). The principles suggested in this “ISO Guide to the expression of uncertainty in measurement” have not yet been considered in acoustics in a wide sense. And in computational acoustics there is hardly a systematic approach to tackle the problem of uncertainties with a comparable insight which is available for some acoustic measurements (typically high-precision calibration techniques where uncertainties must be stated as part of the result).

It is sensible to define a scale of psychoacoustic relevance of differences and, thus, comparing differences between results or quantitative uncertainties addressed to simulations with the just audible differences (JND) of human hearing. In best case of listening environment in the laboratory by using headphones, for instance, the JND for reverberation time is about 5%, for strength (level) 1 dB and for definition 10% (after [9]). If uncertainties are smaller than these values, the simulation can be considered as sufficiently precise. For computer prediction and simulation including auralization, one could state the general rule of “don’t compute what you can’t hear”. This statement, however, is quite useless in other applications such as in discussing uncertainties in calibrations, for example.

3.1 Level of detail

The reasons for deviations between simulations and measurements are shortcomings in the algorithms and the modelling approach behind it. As described before, ray tracing (or similar) and the image model are the basis for all simulations. In the following, some examples are discussed in which the physics of wave propagation is only too roughly approximated. Errors may possibly occur, and it is the question if these affect parameters like reverberation time or clarity, or if the approximations are audible.

A proper CAD model is essential for room acoustic simulations. The surface elements, usually polygons, must be large compared with wavelengths in three decades, in order to cover the audio frequency range. This is practically impossible. In engineering applications, thus, compromises are used without any theoretical foundation. The results may be wrong due to physically unfortunate choice of the level of detail. Also, too a high level of detail will lead to

unnecessary long computation times. Accordingly a large potential is identified in the acceleration of algorithms at low frequencies at low spatial resolution in the CAD model, and at late times in the impulse response, where the late decay is built by scattering rather than by deterministic specular reflections in a detailed CAD model. In an ongoing project it is investigated which criteria can be used for choosing appropriate level of detail in CAD models [13] (see Figure 3). These findings will be also relevant for simulation large volumes such as cathedrals, stadiums, airports and trains stations at reasonable computation times.

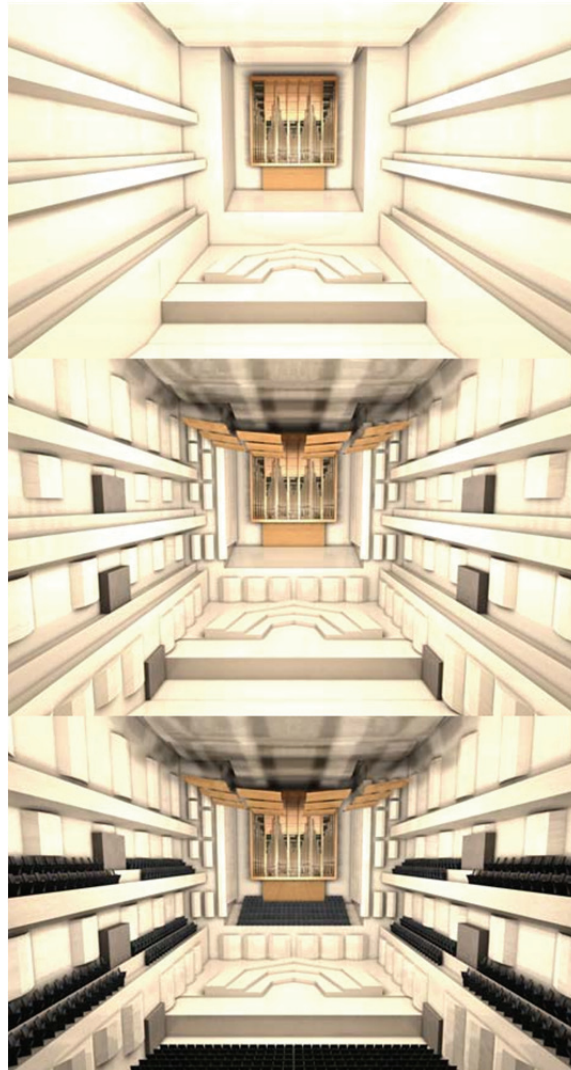


Figure 3. Level of detail in a CAD model of a concert hall illustrated for (top to bottom) low, mid and high frequencies (after [13]).

3.2 Curved surfaces

To the author's knowledge, none of the simulations packages allows modelling of curved surfaces. Usually curved surfaces are approximated by a number of planes. Curved surfaces produce very special features like focal points or caustics. The questions is if an approximation by planes produces a focus as well and if the sound level in the focal region is correct ([15, 16]) It was shown that only deterministic approaches with coherent image source contributions can be used.

Recent work published by Vercammen [17, 18] clarified much more details in the problem of focusing. He gave mathematical formulations for sound reflections from concave spherical surfaces. Particularly for the region near the focus calculations of the sound pressure are given. For a hemisphere the energy is distributed over a circular area with a width of $\lambda/2$. For small wavelength the focussing effect is therefore quite strong. Generally, a reduction of the

extremely high pressure by absorbers or diffusers in the curved boundary is not enough to eliminate the focussing effect. Outside the focal a strong interfering sound field is observed. Vercammen concludes that within reasonable accuracy the sound field outside the focus can be calculated with geometrical acoustics. But computer models based on image source methods are not capable of describing the focal pressure.

3.3 Diffraction

Diffraction in room acoustics mainly happens for two reasons: There can be obstacles in the room space (e.g. stage reflectors), or there can be edges at surroundings of finite room boundaries. In the latter case, either the boundary is forming an obstacle, such as columns or the edge of an orchestra pit, or the boundary is forming the edge between different materials with different impedances (and absorption). Since diffraction is a typical wave phenomenon, it is not accounted for by the basic simulation algorithms listed above. In the past there were some ideas of including diffraction as a statistical feature into ray models. But the success was quite limited because the increase in calculation time is a severe problem. In optics and radiowave physics, ray tracing models were generalised into so-called UDT (uniform geometrical diffraction theory [19]). Other approaches were presented by Svensson [20], who applied the model by Biot and Tolstoy [21] and by Stephenson [22]. They are very powerful for determination first-order diffraction. All methods of geometrical diffraction are, however, very time consuming for simulation of a multiple-order diffraction and corresponding reverberation.

Most recently, Svensson and Schröder implemented diffraction modules in simulation software for both stochastic ray tracing and deterministic image sources [23, 24]. Tests and comparisons with experiments are subject to ongoing work. Therefore, in all cases where room modes are to be calculated, in small studio rooms, in living rooms or in other examples, only wave-based models can be used, such as BEM or FEM or similar.

3.4 Stochastic uncertainties in input data

Source of stochastic uncertainties in simulations are usually introduced by uncertain input data, mainly by boundary conditions of absorption and scattering. These data are often taken from databases or textbooks, or they are integrated databases in software.

The stochastic uncertainties are caused by influences of the operator and by uncertainties of material properties, either in uncertainties of the product specification from standard measurements or by manufacturing variations of the products. In the following we exclude influences of the operator, since this component is not predictable. Also, the model of the geometry, the “polygon model”, is for the moment considered as perfect. For constructing polygon models in geometrical acoustics similar guidelines exist, such as “walls-large-compared-with-wavelength”. For the following we neglect these uncertainties. Also neglected are uncertainties from too low computation time due to an insufficiently low number of rays, low reflection order etc. We now only consider material input data.

For geometrical acoustics there exist a few preliminary studies of the influence of material data on the prediction results. In contrast to data of complex impedances or reflection factors, tables of absorption coefficients are widely available in textbooks and online. The question concerning simulation software is here focused on the implementation. Should α be modeled angle-dependent or just be constant (random incidence)?

ISO 354 provides a standard method for measuring random-incidence absorption coefficients in reverberation rooms. The uncertainty inherent in the method can be expressed as follows:

Table 1. Uncertainty of absorption coefficients (ISO 354)

<i>Low</i> α (≈ 0.1)	0.1
<i>Mid</i> α (≈ 0.4)	0.1
<i>High</i> α (≈ 0.9)	0.2

Source: Data extracted and condensed from (ISO 354, 2003)

Surface scattering occurs if wall surfaces are corrugated. The specific reflection pattern depends strongly on the frequency. However, with diffuse field conditions and the corresponding uniform sound incidence, not the detailed reflection characteristic is needed, but knowledge about a random-incidence scattering coefficients, which is defined as the ratio between the scattered sound energy and the totally reflected sound energy [25]. There are no tables available in depth, except one first attempt in [3]. And also here: Should scattering be implemented in the software with angle dependence or just for the random-incidence average?.

The question of angle dependence cannot be solved generally. If the sound field provides a good mixing and, thus, a good diffuse field approximation, the random-incidence data are surely sufficient. In non-mixing geometries such as corridors or flat halls, this effect may not be taken as granted, and instead of the average, specific angles of incidence dominate the losses. For scattering walls it can be expected that differences are noticeable for vertical or horizontal orientation of 1D structures [26].

4. SMALL ROOMS

For acoustic rendering of car compartments geometrical acoustics is not sufficient. Wave-based models must be used as well, because relevant parts of the frequency response are below the Schroeder frequency. In this example, a combination of FEM (with subsequent inverse FFT) and geometrical acoustics is applied. At the crossover frequency the two transfer function are linked in a very similar way as used in loudspeaker crossover networks.

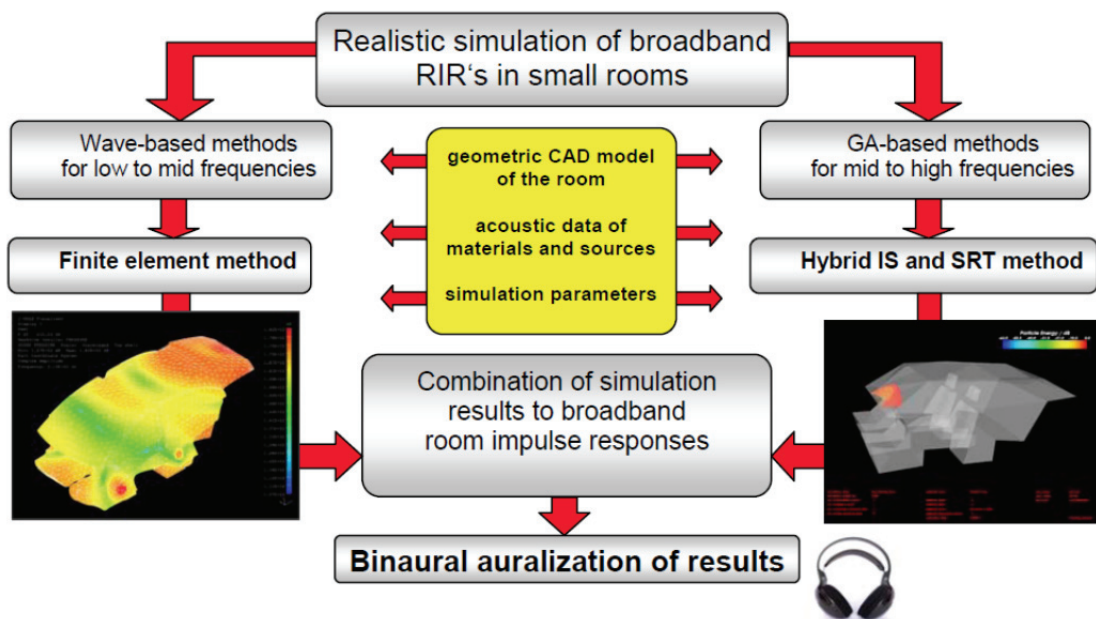


Figure 4. Simulation package for small room acoustics (after Aretz [27]).

With extensive measurements and modelling of the acoustic characteristics of the car materials a good agreement between measured and simulated results was achieved. However, as Aretz [26] clearly points out, further investigations regarding the boundary and source representation and diffraction are necessary to improve the simulation accuracy, see also [28].

5. REAL-TIME SIGNAL PROCESSING

Sound field modelling and auralization have been state of the art for many years. The method of auralization with real-time performance can be integrated into the technology of “Virtual Reality”. Virtual Reality (VR) is an environment generated in the computer, with which the user can operate and interact. The process of generating the cues for the respective senses (3D image, 3D audio, etc.) is called “rendering”. Apparently simple scenes of interaction, for

instance, when a person is leaving a room and closing a door, require complex models of room acoustics and sound insulation. Otherwise the coloration, the loudness and timbre of sound within and between the rooms will not be sufficiently represented. Another example is the interactive movement of a sound source behind a barrier or inside an opening of a structure so that the object is no longer visible but can be touched and heard (by diffraction). The task of producing a realistic acoustic perception, localization and identification is a big challenge [29, 30].

Real-time processing requires dramatic reduction of complexity on several levels. At first, the model geometry must be kept as simple as possible but also as accurate as possible. Therefore not only the physical but the psychoacoustic evaluation is important as well to evaluate the degree of complexity necessary. If this problem is to be solved, the data handling concerning scene and object management must be very efficient. Finally, the filter representing the sound and vibration transmission system is the basis for convolution of the source signal of choice. Usually we talk about a dry source signal (recording), but generally it can be also a force or vibration source signal, as described above. In the following, data management and convolution problems are briefly discussed in the light of real-time performance.

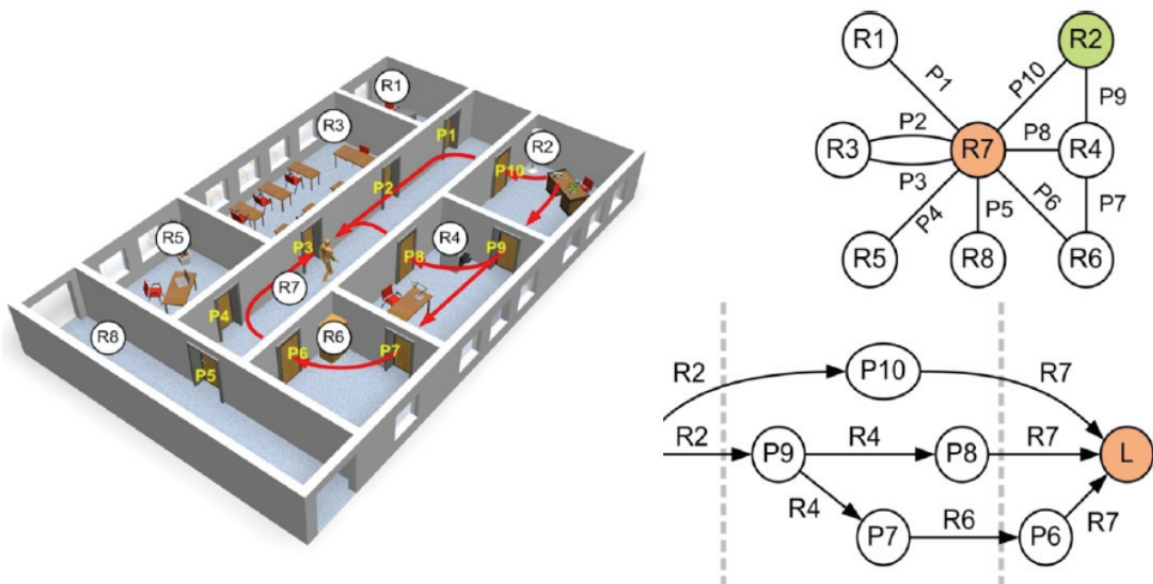


Figure 5. An example of an office building and the corresponding acoustical scene graph describing the topological structure of a room acoustic scene and acoustic coupling of interconnected rooms via portals (after Wefers and Schröder [31]), see also Fig. 6.

5.1 Data management

Imagine a ray tracing algorithm and a scene with many (more than 100) polygons, where the actual ray intersection point with the right wall polygon must be found (the same by the way is a task in image source models). In a brute-force approach the polygons are listed in serial order, and on average half the list must be checked until the right candidate is found. This is far too slow. Therefore in acoustic ray tracing as well as in computer graphics methods for speed-up were developed, and these consist of clever data structures for fast search algorithms.

Another aspect is data handling in coupled rooms with the possibility to open and close the rooms' connections (doors). In case of open doors, the demands are very high due to a physically complex situation of bended decay curves and multiple reverberation times. Subdivision of the complex scene into rooms coupled by "portals" is an appropriate way to optimize the rendering process. From [31] one example of a scene representation of coupled rooms is shown in Fig. 5.

5.2 Fast convolution

For rendering of complex scenes, a partitioned fast convolution must be created. The general principle of such an algorithm for one channel consists of two main parts: Stream processing and filter processing. The algorithm can be split into four major parts:

1. Packing and FFT transformation of the input data (source signal)
2. Packing and FFT transformation of the filter data (transmission system)
3. Spectral convolution (complex-valued multiplication and accumulation)
4. IFFT transformation and unpacking of the output data

Now, it is crucial how this kind of block processing is organized. With large blocks the gain of processing speed due to FFT algorithms is large, but the large block requires the time of the block length to be loaded into the convolution buffer. This is simply due to the running (continuous) audio stream from the source file. This waiting time to feed the block with data causes “latency”, a very important effect in real-time systems. It simply means that the output has a delay related to the input. The critical range is already found at several ten milliseconds. Imagine the user knocking a virtual door and the knocking sound does not coincide with the visual and haptic perception.

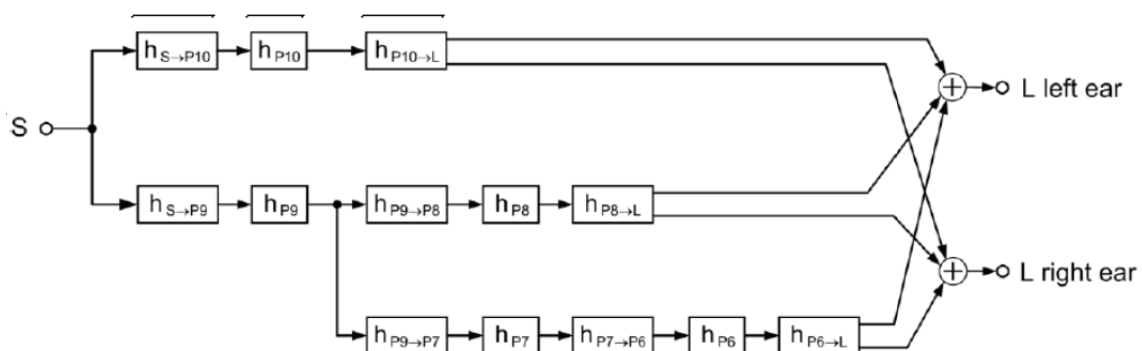


Figure 6. An example of the filter chain for acoustical scene graph for the topological structure described in Fig. 5 (after Wefers and Schröder [31]).

The processing time for interaction is relevant as well. Partly special processors and filter partitioning were used to speed up the convolution ([32, 33]). In dynamic situations the user can freely move. Other receiving points may require new transmission system filters. The filters must be changed without fading arte-facts. The key methods to achieve real-time performance are grouping of signal transmission paths and connecting through portals. The subsystems are characterized by their impulse responses between source, receivers and interfaces. Interfaces such as portals typically have insulating properties which can be modelled by simple equalizers effects. Binaural processing is only required in the last filter for modelling the listener.

6. CONCLUSIONS

After some decades of development in room acoustics simulation, progress was made indeed. This fact is related to the results of the “round robins” and on success in numerous applications for room acoustics design. User guides, however, are still uncertain and they do not generally provide a good basis for using *any* software. Software specifications differ particularly in the transition of early / late response modelling, and in treatment and combination of both specular and diffuse reflections. As long as the user is not sure how many rays shall be chosen, how the resolution of the geometrical CAD model is to be defined, how the scattering coefficients are found and the transitions order between early and late parts is chosen, uncertain results may occur. It is not, however, a task of research to find out those differences, it should be a clear user guideline for each simulation software applied.

Crucial questions for research are foreseen with emphasis on the quality of input data [34], on implementation of scattering by 1D diffusors and by inclusion wave models.

7. REFERENCES

- [1] M. Kleiner et al., "Auralization – an overview", *J. Audio Eng. Soc.* 41, 861 (1993)
- [2] M. Vorländer, "Engineering Acoustics meets Annoyance Evaluation", *Proc. Internoise 2005*, Rio de Janeiro (2005)
- [3] M. Vorländer, *Auralization*, Springer 2007
- [4] A. Krokstad, S. Strøm and S. Sørsdal, "Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique". *J. Sound Vib.* 8, 118-125 (1968)
- [5] J.-P. Vian and D. van Maerke, "Calculation of the Room Impulse Response Using a Ray-Tracing Method", *Proceedings of the Symposium on Acoustics and Theatre Planning*, Vancouver, 74-75 (1986)
- [6] J.B. Allen et al., "Image Method for Efficiently Simulating Small-Room Acoustics", *J. Acoust. Soc. Am.* 65, 943 (1979)
- [7] M. Vorländer, "Simulation of the transient and steady state sound propagation in rooms using a new combined sound particle - image source algorithm". *J. Acoust. Soc. Am.* 86, 172-178 (1989)
- [8] T.A. Funkhouser, I. Carlbom, G. Elko, G. Pingali, M. Sondhi and J. West, "A Beam Tracing Approach to Acoustic Modelling for Interactive Virtual Environments". *Computer Graphics, SIGGRAPH '98*, 21-32 (1998)
- [9] M. Vorländer, "International Round Robin on Room Acoustical Computer Simulations". *Proceedings 15th ICA 95*, Trondheim, 689-692 (1995).
- [10] A. Lundeby, M. Vorländer, T.E. Vigran, H. Bietz, "Uncertainties of Measurements in Room Acoustics". *Acustica* 81, 344-355 (1995)
- [11] I. Bork, "A Comparison of Room Simulation Software - the 2nd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation". *Acustica united with Acta Acustica* 84, 943-956 (2000)
- [12] I. Bork, "Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation - : Part II: Calculations". *Acta Acustica united with Acustica* 91, 753-763 (2005)
- [13] S. Pelzer et al., "Room Modeling for Acoustic Simulation and Auralization Tasks: Resolution of Structural Details", *Proc. DAGA Berlin* (2010)
- [14] S. Pelzer et al., "Quality assessment of room acoustic simulation tools by comparing binaural measurements and simulations in an optimized test scenario", *Proc. FORUM ACUSTICUM Aalborg* (2011)
- [15] H. Kuttruff, "Some remarks on the simulation of sound reflection from curved walls". *Acustica* 77, 176-182 (1993)
- [16] E. Mommertz, Investigation of acoustic wall properties and modelling of sound reflections in binaural room simulation. Doctoral thesis (in German), RWTH Aachen University, Germany (1996)
- [17] M. Vercammen, "Sound Reflections from Concave Spherical Surfaces. Part I: Wave Field Approximation". *Acta Acustica united with Acustica* 96, 82-91 (2010)
- [18] M. Vercammen, "Sound Reflections from Concave Spherical Surfaces. Part II: Geometrical Acoustics and Engineering Approach". *Acta Acustica united with Acustica* 96, 92-101 (2010)
- [19] R. Kouyoumjian, P. Pathak, "A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an Edge in a Perfectly Conducting Surface". *Proc. IEEE* 62, No. 11 (1974)
- [20] U.P. Svensson, R.I. Fred, J. Vanderkooy, "An analytic secondary source model of edge diffraction impulse responses". *J. Acoust. Soc. Am* 106, 2331-2344 (1999)
- [21] M.A. Biot, I Tolstoy, "Formulation of wave propagation in infinite media by normal coordinates with an application to diffraction". *J. Acoust. Soc. Am.* 29, 381-391 (1957)
- [22] U. M. Stephenson, "Simulation of diffraction within ray tracing", *Acta Acustica united with Acustica*, 96, 516 (2010)
- [23] D. Schröder, A. Pohl, "Real-Time Hybrid Simulation Method Including Edge Diffraction", *Proc. EAA Symposium on Auralization*, Espoo, Finland (2009)
- [24] D. Schröder, M. Vorländer and P.U. Svensson, "Open acoustic measurements for validating edge diffraction simulation methods". *Proc. BNAM 2010*, Bergen, Norway (2010) and "Edge Diffraction Toolbox" (2011). See Website (<http://www.iet.ntnu.no/~svensson/software/index.html>)
- [25] E. Mommertz, M. Vorländer, "Definition and Measurement of Random-Incidence Scattering Coefficients". *Applied Acoustics* 60, 187-199 (2000)
- [26] R. Vitale, "Perception of scattering coefficient in auralized concert halls". *Proc. DAGA 2010*, Berlin (2010).

- [27] M. Aretz et al., "Sound field simulations in a car passenger compartment using combined finite element and geometrical acoustics simulation methods", Proc. Aachen Acoustics Colloquium (2009)
- [28] T. Otsuru et al., "Ensemble averaged surface normal impedance measured in-situ; a trial application onto finite element sound field analysis", Proc. Internoise Lisbon (2010)
- [29] S. Siltanen et al., "Room Acoustics Modeling with Acoustic Radiance Transfer", Proc. ISRA Melbourne (2010)
- [30] N. Tsingos et al., "Perceptual audio rendering of complex virtual environments". ACM Transactions on Graphics, Proc. SIGGRAPH 3 (2004)
- [31] F. Wefers et al., "Real-time auralization of coupled rooms", Proc. EAA Symposium Espoo (2009)
- [32] L. Savioja, D. Manocha, M. C. Lin, "Use of GPUs in room acoustic modeling and auralization", Proc. ISRA Melbourne (2010)
- [33] F. Wefers et al., "Optimal filter partitions for real-time FIR filtering using partitioned FFT-based convolution in the frequency domain", Proc. DAFX Paris (2011)
- [34] M. Vorländer, "Prediction tools in acoustics - Can we trust the PC?". Proc. BNAM 2010, Bergen, Norway (2010)



RESTAURACIÓN Y REHABILITACIÓN ACÚSTICA EN LA ARQUITECTURA PATRIMONIAL (realidad o mito de los modelos)

Reference PACS: 43.55.Ka

Daumal i Domènech, Francesc

Universidad Politécnica de Cataluña
Avda. Diagonal 649, 08028 BARCELONA, SPAIN
francesc.daumal@upc.edu

ABSTRACT

Virtual reality techniques, simulation, auralization, subjective and objective assessment methodology of real and virtual environments, are some of the words used while introducing this ISVA seminar.

If we combine them with the others such as predictive modeling, rendering, geographic information systems, strategic noise maps, room soundproofing, parameters of acoustic quality on rooms, both indoors and outdoors, including cities and territories, we can finally predict, see and hear the new project sound, as well as its application to restoration and rehabilitation of all assets.

But is it true? Is this lawful? Is that enough?

RESUMEN

Técnicas de realidad virtual, simulación, auralización, metodologías de evaluación subjetiva y objetiva de entornos reales y virtuales, son algunas de las palabras utilizadas en la introducción del prospecto de este Seminario ISVA.

Si además las unimos con otras como modelos predictivos, renderización, sistemas de información geográfica, mapa estratégico de ruido, aislamiento entre locales, parámetros de calidad acústica de salas, tanto en espacios interiores como exteriores, incluso ciudades y territorios, finalmente podemos predecir, ver y escuchar la acústica de nueva planta, así como la aplicable a la restauración y rehabilitación de todo el patrimonio.

¿Es esto cierto? ¿Es esto lícito? ¿Es esto suficiente?

1. LA LEGISLACIÓN

En general, los programas adolecen de transparencia. Casi nunca se sabe exactamente cuáles son los algoritmos utilizados para cada paso. Ello puede incluso provocar cierta indefensión en el ámbito jurídico. En un recurso contencioso administrativo contra la administración que los utilice, la parte actora difícilmente pueda rebatir los argumentos de apertura de una nueva carretera o vía férrea, si esta se ha basado en un sistema predictivo informático hermético o cerrado.

Desde que la directiva 2002/49/CE obliga a los estados miembros de la Unión Europea a realizar estudios de acústica ambiental en los grandes ejes viarios cada estado, en estos se han diseñado y desarrollado su propia metodología de acuerdo con las directrices estatales, autonómicas y locales que han aparecido posteriormente.

A continuación se acompañan algunas leyes solamente para dar idea de la vorágine legislativa a la que nos hemos visto bombardeados (para la defensa de nuestro Medio Ambiente, por supuesto), pero algunas de ellas son repetitivas o con difícil lectura y concreción.

Para la evaluación ambiental, y la protección frente al ruido, en particular para Cataluña tenemos:

Legislación para la evaluación del impacto ambiental

a) *Ámbito europeo*

Directiva 2001/42/CE

Directiva 2001/42/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de junio, relativa a la evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente.

Publicada en el núm. 197 del Diario Oficial de las Comunidades Europeas de fecha 21 de julio de 2001 (páginas 30 – 37).

b) *Ámbito estatal*

Ley 9/2006

Ley 9/2006, de 28 de abril, sobre evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente.

Publicada en el núm. 102 del Boletín Oficial del Estado de fecha 28 de abril de 2006 (páginas 16820 – 16830).

Real Decreto Legislativo 1/2008

Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos.

Publicada en el núm. 23 del Boletín Oficial del Estado de fecha 26 de enero del 2008 (páginas 4986 – 5000).

Ley 6/2010

Ley 6/2010, de 24 de marzo, de modificación del texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero.

Publicada en el núm. 73 del Boletín Oficial del estado de 25 de marzo de 2010 (páginas 28590 – 28597).

c) *Ámbito autonómico*

Decreto 114/1988

Decret 114/1988, de 7 d'abril, d'avaluació d'impacte ambiental. Publicado en el núm. 1000 del Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya de fecha 3 de junio de 1988 (páginas. 2357 – 2358).

Decreto 136/1999

Decret 136/1999, de 18 de maig pel qual s'aprova el Reglament General de Desplacament de la LLei 3/1998, de 27 de febrero, de la Intervenció Integral de l'Administració Ambiental, i se n'adapten els seus annexos.

Publicado en el número 2894 del Diario Oficial de la Generalitat de Catalunya de fecha 21 de mayo de 1999 (página 6883).

Ley 12/2006

Llei 12/2006, del 27 de juliol, de mesures en matèria de medi ambient.

Publicada en el número 4690 del Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya de fecha 3 de agosto de 2006 (páginas 34423 – 34431).

Ley 6/2009

Llei 6/2009, del 28 d'abril, d'avaluació ambiental de plans i programes.

Publicada en el número 5374 del Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya de fecha 7 de mayo de 2009 (páginas 37154 – 37177).

Ley 20/2009

Llei 20/2009, del 4 de desembre, de prevenció i control ambiental de les activitats.

Publicada en el número 5524 del Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya de fecha 11 de noviembre de 2009 (páginas 93055 – 93114).

Legislación para la evaluación del ruido

a) *Ámbito europeo*

Directiva 89/106/CEE

Directiva 89/106/CEE "Protección frente al ruido".

Bruselas 23/07/2001

Directiva 2001/49/CE

Directiva 2001/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental.

Publicada en el núm. 189 del Diario Oficial de las Comunidades Europeas de fecha 18 de julio de 2002 (páginas 12 – 25).

Directiva 2002/49/CE

Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental.

Bruselas 10/03/2004

b) Ámbito estatal

Ley 37/2003

Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido.

Publicada en el núm. 276 del Boletín Oficial del Estado de fecha 18 de noviembre del 2003 (páginas 40494 – 40505).

Real Decreto 1513/2005

Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental.

Publicado en el núm. 301 del Boletín Oficial del Estado de fecha 23 de octubre de 2005 (páginas 41356 – 41363).

Real Decreto 1367/2007

Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.

Publicado en el núm. 254 del Boletín Oficial del Estado de fecha 23 de octubre de 2007 (páginas 42952 – 42972).

c) Ámbito autonómico

Ordenanza Municipal tipo reguladora del ruido y las vibraciones

Ordenança Municipal "Tipus" reguladora del soroll i les vibracions.

Publicada en el núm. 2126 del Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya en fecha de 10 de noviembre de 1995.

Ley 16/2002

Llei 16/2002, de 28 de juny, de protecció contra la contaminació acústica, publicada en el núm. 3675 del Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya de fecha 11 de julio de 2002 (páginas 12639 – 12649).

Decreto 245/2005

Decret 245/2005, de 8 de novembre, pel qual es fixen els criteris per a l'elaboració dels mapes de capacitat acústica.

Publicado en el núm. 4507 del Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya de fecha 10 de noviembre de 2005 (páginas 36205 – 36207).

Decreto 176/2009

Decret 176/2009, de 10 de novembre, pel qual s'aprova el Reglament de la Llei 16/2002, de 28 de juny, de protecció contra la contaminació acústica, i se n'adapten els annexos.

Publicado en el núm. 5506 del Diari Oficial de la Generalitat de Catalunya de fecha 16 de noviembre de 2009 (páginas 85734 – 85797).

d) Ámbito local

Respecto al ámbito local, remitimos a la ordenanza, bando, etc. de cada población específica.

2. NECESIDAD DE LOS MÉTODOS DE PREVISIÓN

Debemos estar de acuerdo en que, desde el punto de vista Técnico, los métodos de previsión son muy versátiles, puesto que son capaces de determinar los niveles sonoros de fuentes conocidas, (como por ejemplo el tráfico) o incluso de otros simulados. Además sus menores costes y su mayor fiabilidad nos llevan a preferirlos a la hora de proceder a la evaluación del ruido del aislamiento acústico de los edificios y de la acústica de recintos. Han demostrado ser de gran utilidad y algunos de ellos se han aplicado en una amplia gama de situaciones extremas.

Los métodos de previsión basados en el cálculo, parten del conocimiento de las teorías de emisión y propagación del sonido, que, como ya sabemos, son sumamente debatidas en todos los foros nacionales e internacionales. Los programas comerciales, a su vez, permiten calcular muchos parámetros a través de la simulación de situaciones reales o predecibles mediante modelos. Algunos son llamados métodos de carácter semiempírico, ya que combinan resultados experimentales con fórmulas de cálculo.

LOS MODELOS PREDICTIVOS INFORMATIVOS

Puede decirse que un modelo predictivo es una representación de una realidad compleja, que puede responder a un esquema teórico, y que se elabora para estudiar su comportamiento y anunciar o conjeturar lo que en determinadas condiciones ha de suceder.

3. LOS PARÁMETROS NECESARIOS EN EL TERRITORIO Y LA CIUDAD

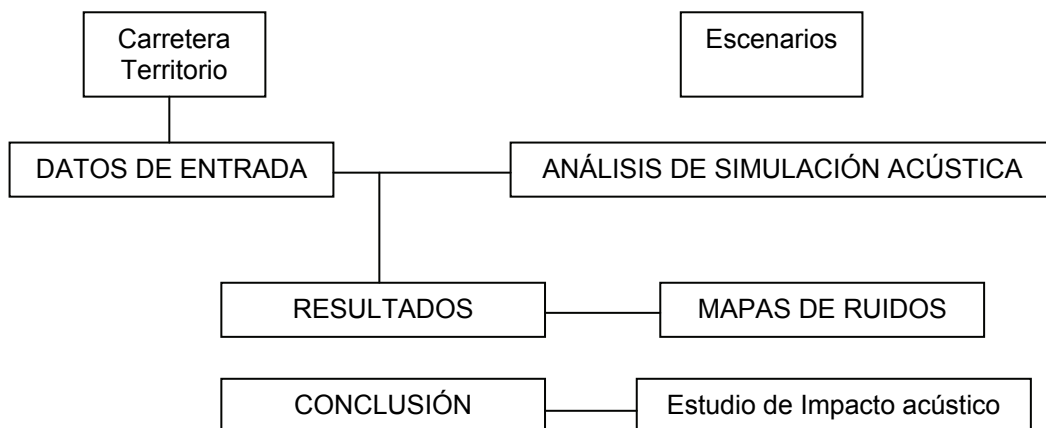
Los parámetros que se presentan como factores implicados en la simulación son la descripción topográfica del lugar, la definición de la carretera, las características de las fuentes y el análisis de difusión del sonido en su propagación.

Los conceptos acústicos generales que intervienen en la simulación son el entorno de la carretera, el efecto de los obstáculos, el tipo de pavimento, la anchura de la plataforma, el perfil longitudinal de la carretera, la sección transversal de la carretera, el trazado de la planta de la carretera, la velocidad media de tráfico, la intensidad de tráfico y el ruido de una carretera.

Y por último, las unidades estándares de medición de uso son los niveles equivalentes sonoros expresados en dB(A), relativos a la emisión y a la inmisión sonora de un objeto, y los periodos de estudio.

Como vemos, en el territorio y en la ciudad, debe realizarse una gran recopilación de los datos sobre el terreno, tanto de las fuentes de emisión como de los obstáculos existentes, completándolos y verificándolos con una campaña de campo iniciada a través de un reconocimiento in situ muy exhaustivo, y en épocas y horarios distintos. Posteriormente se introducen los datos obtenidos de acuerdo a las hipótesis simplificadoras, en un modelo de predicción acústico cuyos datos se explotan por medio de una herramienta GIS para obtener finalmente el conjunto de mapa de ruidos resultantes.

Un esquema inicial puede ser el siguiente:



Normalmente se predicen tres escenarios; inicial, futuro y el de variabilidad.

En el escenario inicial, los parámetros principales acostumbra a ser el Mapa de emisión Ldía, Mapa de emisión Lnoche, Mapa de inmisión Ldía y Mapa de inmisión Lnoche.

El escenario futuro, se repiten para presentar el Mapa de emisión Ldía, Mapa de emisión Lnoche, Mapa de inmisión Ldía y Mapa de inmisión Lnoche.

Y por último, para el Escenario variable, la variabilidad puede producirse en el propio escenario, territorio o ciudad, o bien en sus fuentes por acontecimientos puntuales como eventos (fiestas mayores, pirotecnias, etc) u otras causas incluso impredecibles. En este caso también se muestran los Mapas de emisión Ldía, Mapas de emisión Lnoche, Mapas de inmisión Ldía y Mapas de inmisión Lnoche.

A continuación se describen algunos de los programas utilizados para la simulación acústica en el territorio y la ciudad. Obviamente no vamos a enumerarlos a todos, ni para el territorio y ciudad, ni en el edificio, ni en el local, ni en sonorización, ni en arte sonoro, ni en ...

Como profesor advierto que si alguna casa comercial encuentra a faltar alguno de sus productos, le atenderé gustosamente para próximas conferencias (Los jamones bellota 5 jotas, gracias).

PREDICTOR TYPE 7810

Es un software de simulación acústica que cumple con los requisitos expresados en la Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002, y permite la evaluación y gestión del ruido ambiental. Sirve perfectamente para la predicción normalizada de niveles sonoros ambientales en exteriores y su modelización mediante la integración de los diversos datos referidos a fuentes de ruido existentes, receptores, características del terreno, modelización de obstáculos, etc.

STANDARD XPS 31 – 133

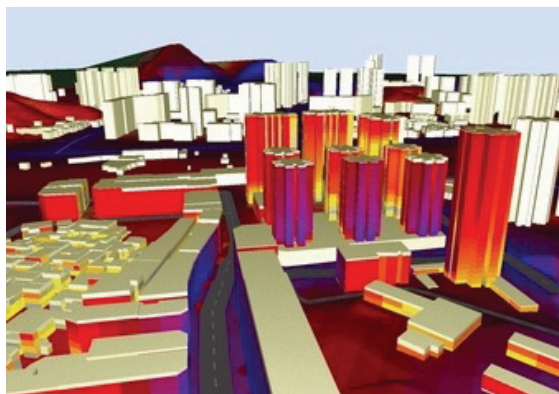
Para la simulación de la generación y propagación del Ruido de Tráfico Rodado, algunos estudios utilizan este método de cálculo, que cumple con:

- *Emission model: guide du Bruit des transports terrestres (Ministère des transports France, Novembre 1980)*
- *Propagation model: NMPB – Route – 96 French national computation method for the propagation of Road traffic Noise (SETRA, CERTU, LCPC, CSTB).*

CadnaA

El software DATAKUSTIK CadnaA permite la gestión de la inmisión de ruido de acuerdo con las normativas nacionales e internacionales, incluyendo los países que emplean los métodos recomendados por la Directiva 2002/49/CE (En España transpuesta en la Ley de Ruido 37/2003).

Con la utilización de CadnaA, se pueden modelizar todo tipo de emisores acústicos (industria, tráfico rodado, tráfico ferroviario, etc.), siendo una herramienta fundamental para proyectos urbanísticos y estudios de Impacto Ambiental (EIA), según Ley de Ruido 37/2003 y Decretos 1513/2005 y 1367/2007. Además, permite la realización de mapas estratégicos de ruido en aglomeraciones según las prescripciones de la Ley 37/2003 de Ruido Ambiental.



Para mapas acústicos de industrias, el CadnaA permite la introducción de datos de emisión y absorción de máquinas, aislamientos e instalaciones industriales completas. De esta forma, los datos de los fabricantes de maquinaria pueden ser importados a su base de datos global. Si no se disponen de datos de potencia, puede estimarse a partir de un nivel de presión sonora a una determinada distancia, o a partir de un nivel interior medido en un recinto industrial cerrado. A su vez permite la importación y exportación de más de 30 formatos diferentes y el intercambio de base de datos ODBC para importación de datos tales como: Ms-EXCEL, Ms-ACCESS, dBASE, Paradox, Visual Fox-Pro, SQL, etc.

Como vemos, es un software de predicción y evaluación del ruido ambiental, potente y sencillo de utilizar, que permite la elaboración de mapas de impacto acústico y mapas estratégicos.

El programa CadnaA (Computer Aided Design Noise Abatement) se comercializa por Datacustik GmbH Greifenberg, y en España por Alava Ingenieros. Siendo un simulador acústico (en realidad es un SIG limitado), que está capacitado para hacer interpolaciones acústicas sobre el terreno.

Este programa se utiliza para modelizar el territorio municipal y el nuevo recorrido de carreteras, instalaciones de transporte aéreo, etc., con el objetivo de conseguir simulaciones de ruido a lo largo de la zona afectada y poder llegar a hacer mediciones y comparaciones posteriores entre diferentes escenarios. Al parecer puede llegar a tratar todas la fachadas de hasta 16.000.000 de edificios en un mismo estudio, y pueden obtenerse fácilmente los valores estadísticos de impacto acústico en la población de acuerdo con la Directiva Europea 2002/49 CE, sin necesidad de introducir datos adicionales.

CadnaA está capacitado para recoger diferentes tipos de extensiones de archivos georeferenciados y permite la superposición entre ellos. Este tipo de estudios requiere de una gran cantidad de cartografía muy precisa y densa. Los archivos que se generan pueden ser exportados a una amplia gama de programas. En este aspecto este programa resulta ser muy completo puesto que es capaz de leer información de extensiones tipo Autocad, ArcView, Mapinfo, AtlasGIS, etc. Del mismo modo los diferentes programas señalados también son capaces de entender los resultados de este programa.

Obviamente, el programa requiere de información 3D para su simulación. Los cálculos que realiza son exclusivamente acústicos aunque su capacidad de desarrollar los mapas en cuando a calidad son limitados.

EL ARCGIS

Se utiliza el software ArcGIS versión 9 desarrollado por la empresa ESRI, porque incorpora numerosas herramientas para elaborar mapas con calidad y sobre todo porque es capaz de entender toda la información que desarrolla el programa Datakustic.

Mediante ArcMap se diseñan las salidas de los mapas resultantes de los valores acústicos con una buena calidad (en leyendas, norte, escalar, colores, símbolos, etc.). Por otro lado gracias al ArcMap se puede solapar información y valores acústicos con ortofotos que permiten acercarnos más al entendimiento del territorio y mejorar la calidad de los planos resultantes.

MODELO DIGITAL DEL TERRENO

Se utiliza la cartografía, a escala 1:10.000 y curvas de nivel cada 10 metros con la que se abarca por completo el ámbito de algunos estudios.

4. LOS PARÁMETROS NECESARIOS EN EL EDIFICIO. EL CUMPLIMIENTO DEL DB-HR EN LA OBRA NUEVA, LA RESTAURACIÓN Y LA REHABILITACIÓN

Como comenta mi amigo David Casadevall:

Existen dos tipos de software: **los gratuitos y los de pago**. Los de pago existen de hace tiempo y una de los más completos es el **Acoubat-dBMat**. Permite un diseño geométrico del recinto o de las superficies que tenemos que calcular, tiene una base de datos de más de 400 materiales y lo más importante se puede ir actualizando.

Otro software de reconocido prestigio, es el que ofrece la marca **Cype**. El módulo de CYPE. Es una opción barata y que no hace falta tener los otros módulos de Cype.

Otro programa realizado en España, es el **Sonarchitect**.

NoiseCad de MC4Software, es otra opción. Calcula según la UNE 12354-1,2,3. Calcula en DB y no en DBA tal y como cita el CTE.

INSUL es otro programa de pago, que predice el aislamiento acústico de nuestros edificios. Ha sido desarrollado basándose en modelos teóricos simples, sólo requiere obtener información de la construcción.

El **dBKAisla 2.0** es un programa de cálculo de predicción de aislamiento acústico adaptado al CTE DB-HR. Ha sido realizado por la Ingeniería para el control del ruido, ubicada en Barcelona. Basado en predicciones teóricas, permite calcular fácilmente el aislamiento acústico mediante las vías de transmisión laterales.

BASTIAN es un programa muy conocido y de mucho prestigio, con lo que nos lleva a un precio elevado. Calcula la transmisión sonora aérea y de impacto, tanto en edificios como en espacios abiertos. Los cálculos están basados en las normativas europeas, ya que su origen es alemán.

Los softwares gratuitos están relacionados directamente con marcas comerciales. El aparejador **Josep Solé**, Director Técnico de Ursa Ibérica Aislantes y todo un referente en la comunidad acústica, ha colgado en su web dos programas para poder calcular a través de los dos métodos que nos propone el DB-HR. Son programas muy intuitivos y de fácil manejo

Yo debo decir que conozco personalmente a David, y su trabajo siempre me ha resultado de confianza.

Otro programa gratuito es el que investigadores de la Universidad Politécnia de Gandía han creado para Chova. Se llama **ChovACUSTIC SOFT** y se está repartiendo a través del mail de su web. Sencillo y con un bonito resultado.

La empresa Saint Gobain Placo Ibérica proporciona en su página web una interesante herramienta online para la justificación de los requisitos de aislamiento acústico del Documento Básico DB-HR del Código Técnico de la Edificación. Su nombre es Placo DB HR y su uso es totalmente libre y gratuito, aunque requiere registro mediante una cuenta de correo electrónico. Se encuentra disponible en la siguiente dirección: <http://www.placo.es/placodbhr/>

ACOUBAT

En el año 2.008 realicé una serie de comentarios a este programa por encargo del Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España (CSCAE), que transcribo ahora sin alterarlos

- No es meramente una serie de "fórmulas" preestablecidas en un Excel como el programa aportado inicialmente por el Ministerio de Fomento para el cumplimiento del DB-HR. Este puede ser manejado a través de los iconos que contiene la pantalla con funciones establecidas que se encuentran explicadas en el manual del programa.
- La base de datos está clasificada en:



CAEd — Cálculo Acústico de Edificios

Autores: João Mariz Graça
Jorge Patricio
Luis Santos Lopes

1. Forjados Unidireccionales, Reticulares y Losas de hormigón macizo.
 2. Recubrimientos de suelo, Moquetas y revestimientos plásticos, Baldosas, tarimas y parqués y Losas flotantes.
 3. Paredes de una hoja, Ladrillos huecos, Ladrillos gran formato, Ladrillos/bloques ligeros ($<200 \text{ kg/m}^2$), Ladrillos/bloques pesados ($>200 \text{ kg/m}^2$) y Muros de hormigón armado.
 4. Paredes de doble hoja.
 5. Paredes secas con Armazón simple y Armazón doble.
 6. Fachadas de doble hoja (sólo para ruido exterior).
 7. Trasdosados sobre paredes y Falsos techos aislantes.
 8. Equipamiento técnico como cajas de persianas y Entradas de aire.
 9. Puertas y ventanas.
- Estos diferentes elementos están basados en ensayos realizados en el laboratorio de calidad de edificación del Gobierno Vasco (LABEIN)
 - Se da la opción a insertar nuevos elementos y a este se le podrán hacer las modificaciones que se crean pertinentes. Este "nuevo elemento" debe ubicarse dentro de alguna de las categorías y subcategoría correspondiente. Para ello, se le asigna un código, una breve descripción, la masa superficial (kg/m^2) y el espesor (m).
 - La geometría permitida es únicamente rectangular, la adyacencia debe ser total o parcial. Y se pueden modificar los recintos mientras se está realizando el análisis. Asimismo se le puede anexionar nuevas geometrías a un mismo proyecto.
 - Las definiciones de la geometría contemplan términos muy claros, como lo son la anchura, la profundidad y la altura.
 - Asimismo se pueden modificar las uniones y desplazarlas (para viviendas en calle con pendiente distinta a 0)
 - Se puede visualizar el proyecto en plantas, sección y/o en 3 dimensiones, al cual se le pueden hacer secciones.
 - Es posible la visualización en diferentes escalas, lo cual permitirá después hacer una impresión a cierta escala.
 - Los elementos constitutivos se pueden asociar por elementos verticales, horizontales, equipamientos técnicos y/o puertas y ventanas.
 - Al ir componiendo el modelo, asignándole revestimientos y trasdosados, el programa automáticamente calcula las mejoras que estas significan. Es decir, se va calculando la mejora a ruido aéreo y la mejora al ruido de impactos. Para el primer caso (ruido aéreo) se contempla que si el ensayo se ha realizado sobre un forjado/pared base incluido en la base de datos, el cálculo de mejora es automático. Si no existe este ensayo la mejora se realiza en base con el primer forjado pared base que encuentra. En el caso a ruido de impactos, realiza la mejora sobre el primer forjado base que encuentra.
 - Con la opción "puesta en obra" se puede elegir la ubicación de la banda elástica así como la dirección de los elementos unidireccionales que la componen, ya sea paralelos o perpendiculares, así como sus dimensiones.
 - En cualquier momento se pueden ir conociendo los resultados de cada uno de los elementos, para saber si es necesario realizar modificaciones al proyecto. Por ello resulta muy interactivo y agradable.
 - En el caso de las juntas, se puede seleccionar si esta es continua, con alineación exterior o interior o sin contacto. Asimismo es posible desplazar la unión entre dos recintos, por ejemplo si el forjado es de altura desigual en el recinto adyacente esta puede ser modificada, así como si la pared del recinto contiguo no continua.
 - Los cálculos siempre se hacen para el local receptor, y se pueden calcular, dependiendo del resultado del recinto que se quiere conocer, el D_n vertical, horizontal y/o diagonal (no necesaria para el HR), L_n vertical, horizontal y/o diagonal (idem) y el D_n de fachada. Estos resultados se van guardando y es posible visualizarlos cada vez que se quiera.
 - Los resultados pueden ser visualizados de manera general, en una hoja en donde se hace un resumen, así como en un documento en donde se den los detalles de la tabla y/o del gráfico. Asimismo estos resultados pueden ser exportados a otro programa para analizarlos o tenerlos de manera que puedan ser editados.
 - Los datos "institucionales" del estudio que se realiza se pueden integrar a las hojas de resultados. Esto implica también poder cambiar algunos parámetros, como el índice

- seleccionado por defecto; que puede ser aislamiento a ruido aéreo, a ruido aéreo exterior y el nivel de presión sonora a ruido de impactos.
- Para la auralización se puede configurar el "audio" que se le aplica al modelo, en cuanto al tiempo de reverberación, al tipo de sonido (conteniendo archivos de audio de aplausos, TV con partido de futbol, ruido de calle, etc) y al que se le pueden agregar nuevos archivos que se quieran aplicar para que el resultado sea lo más preciso posible y cercano a la realidad.
- Para la comprobación con el CTE se debe de ir al mismo, ya que el programa no comprueba los resultados obtenidos, ni tampoco los compara.

OTROS COMENTARIOS al programa

El programa parece mejor que la herramienta de cálculo del HR, ya que este es un programa y no una serie de pasos y/o fórmulas del Excel.

Sin embargo, lo que le falta al Acoubat (advierto que me estoy refiriendo a la versión que me pasaron el 2008) es que compare el resultado con lo establecido por el DB HR, ya que de esta manera será de utilidad en cualquier despacho, y no será necesaria la interpretación de los datos obtenidos. La comprobación con el documento HR debería ser automática.

Asimismo se desconocen las fórmulas con las que realiza el cálculo. Algunas formulaciones aparecen cuando la hoja final debe imprimirse.

La base de datos cuenta con los ensayos de algunos fabricantes específicos. Al dar la opción de agregar nuevos elementos se podrá abastecer de nuevos fabricantes, en los cuales habrá que confiar, ya que son los que proporcionarán sus resultados (y pueden haberse realizado en un laboratorio distinto del laboratorio origen del programa). No se conoce la fórmula con la que realizan las operaciones del nuevo elemento ingresado por el usuario.

Al igual que en la herramienta del DB HR, falta incluir balcones, miradores, etc. Sin embargo aquí se contemplan ventanas, aireadores y puertas con mediciones de laboratorio.

La búsqueda de cada elemento a asignar resulta un tanto engorrosa ya que al abrir cada una de las opciones aparece un listado interminable.

En este caso, es un acierto que no se puedan modificar los materiales que tiene el programa por *default*.

No se contempla el cálculo de la reverberación, se calcula, ya que se requiere para realizar otras operaciones, sin embargo no es un resultado que se proporcione para conocimiento del proyectista, faltando el cálculo específico para salas donde se requieren justificación según HR como las aulas y salones comedor de restaurantes.

Llegado a este punto, me atrevo, dado que estoy hablando de programas comerciales, a presentar mi programa.

Señoras y señores, les presento el programa que hemos desarrollado el Departamento de Construcciones Arquitectónicas I de la UPC (es decir yo), con la empresa QSAI, S.L., y que permite resolver la opción simplificada del DB-HR del Código Técnico, basándose escrupulosamente en la misma. (Aquí no existe misterio)

QSAI-HR



Es un software de ayuda al proyectista para comprobar y justificar documentalmente que el edificio cumple las exigencias básicas de protección frente al ruido según las especificaciones del documento básico "CTE-DB HR Protección Frente al Ruido", opción simplificada.

CYPE

Claro que ahora ya encontramos versiones para la opción general, como la de CYPE, lo cual es cómodo si se trabaja con otros programas del mismo grupo. Ahora estamos acostumbrados a ver que inclusive los fabricantes de placas de yeso laminado nos ofrecen sus programa de aislamiento.

Programa del DB-HR

Ahora bien, ¿Sabes lo que pensé al aplicar por primera vez ciertos “Excels” (ya que no puede llamarse de programa) que se presentaron inicialmente como instrumento de cálculo del Código Técnico de la Edificación, Documento Básico Habitabilidad Ruido (DB – HR)?



Debo decir que al realizar con dicho programa un ejemplo de cálculo de un caso real en el que tenía una ventana en esquina, resultó que no me cumplía el aislamiento de la fachada, y el Excel me insinuó que si con dos ventanas no daba, que proyectara con sólo una.

Me pregunté ¿Nos hemos quedado sin la ventana en esquina?

Los años de Coderch estudiando este caso arquitectónico se van al garete debido a un “programa” del que el ministerio no dió (por suerte) el nombre de sus autores! Me pregunté si eran proyectistas. Seguramente los conozca de los congresos del Tecniacústica, donde alguna vez (demasiado pocas por lo que veo) vamos algunos arquitectos. Acto de contrición. El error no es suyo. El error es del CSCAE por no dedicar mayor esfuerzo? ...

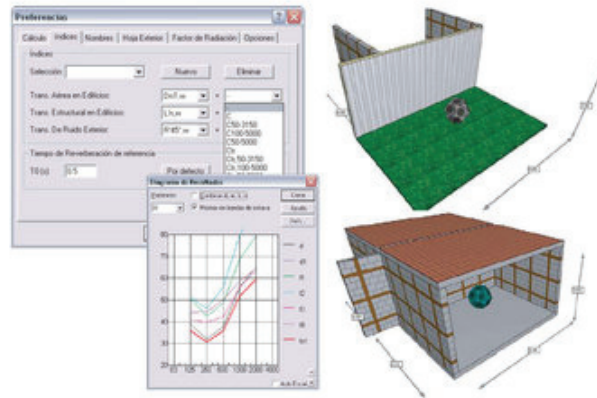
INSUL

El software MARSHALL DAY INSUL se basa en modelos teóricos que requieren escasa información constructiva. Permite modelizar materiales empleando la Ley de la Masa y la frecuencia crítica de los materiales, permitiendo correcciones por efectos de paneles gruesos.

Además, realiza estimaciones de las pérdidas de transmisión (TL) en 1/3 de octava, índice de reducción sonora (STC y R_w) y aislamiento a ruido de impactos (L_n , w).

BASTIAN

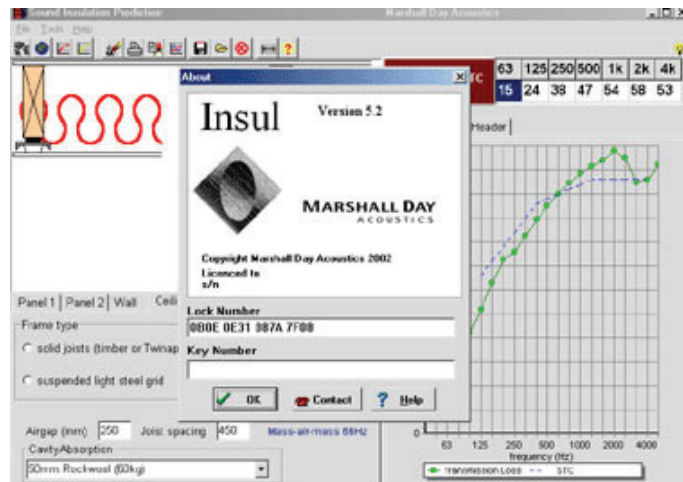
El software BASTIAN de la firma DATAKUSTIK, es un programa avanzado para el cálculo de la transmisión de ruido aéreo y de impacto entre estancias de un edificio, así como la transmisión de ruido aéreo desde el exterior, según las normativas EN-12354 e ISO-717.



El cálculo de la transmisión con BASTIAN considera todos los elementos y sistemas que son relevantes para la transmisión en situaciones entre estancias contiguas. Aparte de los paramentos principales, pueden insertarse puertas y ventanas como parte de la construcción principal. Por último, pueden ser también tenidos en cuenta elementos de unión y otros sistemas de transmisión de ruido aéreo, como por ejemplo conductos de ventilación.

INSUL

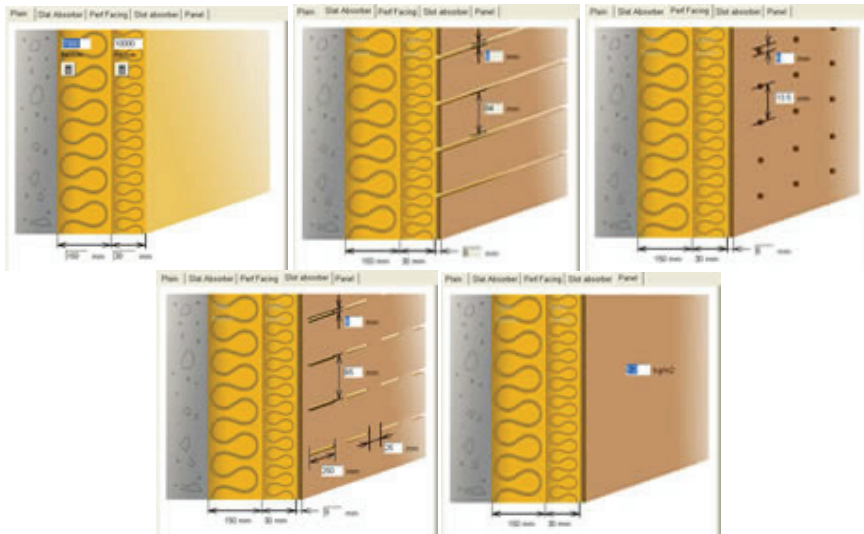
INSUL predice el aislamiento acústico de paredes, techos, suelos y ventanas. Ha sido desarrollado basándose en modelos teóricos simples, sólo requiere obtener información de la construcción. El programa puede efectuar estimaciones razonables de la pérdida de transmisión (TL) y clases de transmisión del sonido (STC) para calcular la transferencia de ruido.



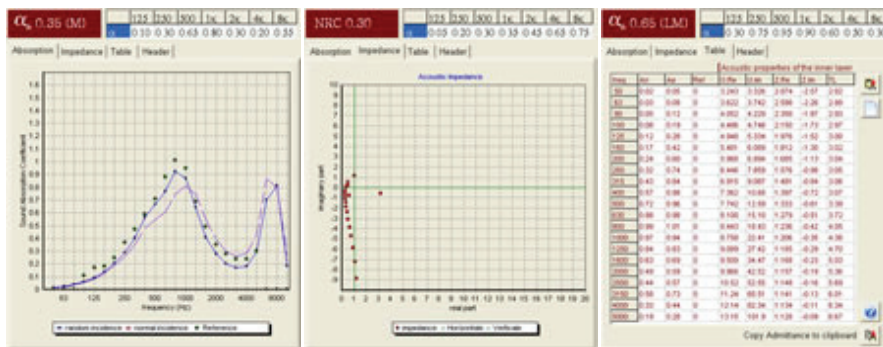
ZORBA

El nuevo software Zorba desarrollado por Marshall Day Acoustic es una herramienta rápida para predecir el rendimiento de la absorción de los sistemas de revestimientos porosos con caras perforadas. Esta herramienta es ideal para la investigación de salas acústicamente críticas, tales como estudios, salas de conciertos, sala de clase, salas de conferencias y otros. ZORBA ha sido desarrollado en colaboración con los consultores acústicos para asegurar características de uso fácil (generadores de informes, exportación de datos). Esto hace que el software sea conveniente y práctico.

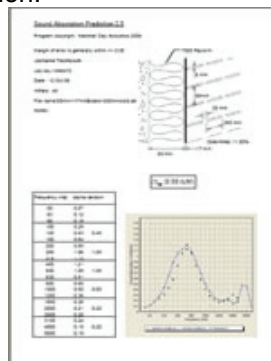
El modelo es construido por la elección de las diferentes pestañas. La primera pestaña permite al usuario definir las características del absorbente poroso (espesor, el flujo de la resistividad). Y las otras fichas corresponden a los diferentes tipos de revestimiento



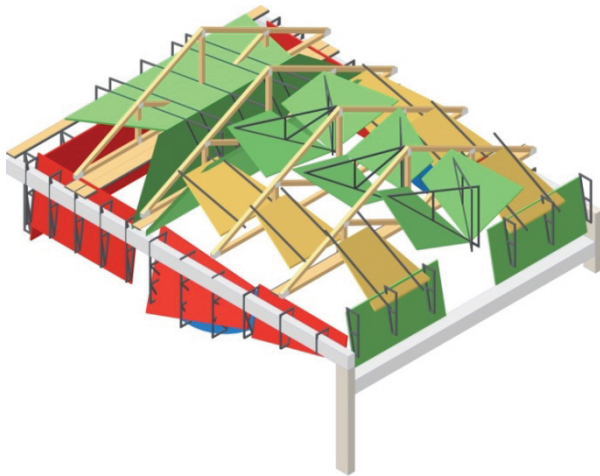
Todos los resultados se dan en la banda de tercio de octava. El acceso a estos resultados también se hace a través de pestañas, que permiten al usuario elegir entre una representación gráfica del coeficiente de absorción (incidencia normal o aleatorio), una imagen en el plano complejo de la impedancia específica del sistema, o una tabla que presenta los valores de la absorción del sistema, y la impedancia específica, el coeficiente de propagación y la pérdida de transmisión de la primera capa de material poroso.



ZORBA ofrece formas elegantes para exportar los resultados de los cálculos. El usuario puede generar una página de resumen de los cálculos y, o bien imprimir o crear un archivo PDF con él. También es posible copiar los resultados de absorción al portapapeles para que puedan transferirse a otros programas (Excel, Word, etc). Con el fin de poder comparar los resultados del diseño y la absorción de algunos datos requeridos, es posible importar un espectro de referencia en la gráfica de la absorción.



5. LOS PARÁMETROS NECESARIOS EN EL LOCAL/SALA. EL ACONDICIONAMIENTO Y LA RESTAURACIÓN/ REHABILITACIÓN

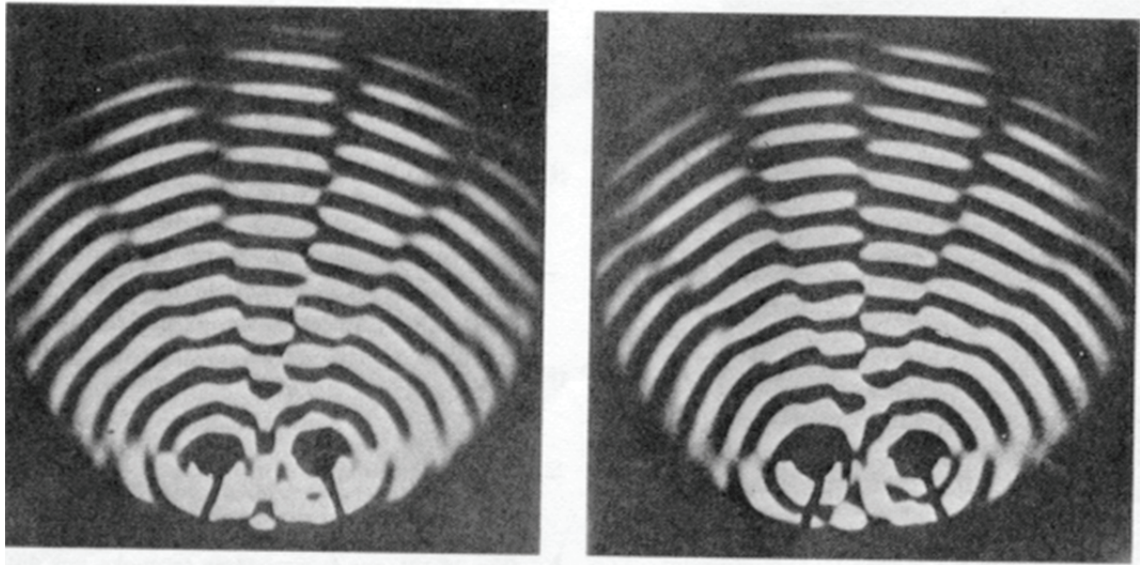


MÉTODOS ÓPTICOS

Resulta muy interesante utilizar la luz en sustitución del sonido en los estudios con modelos reducidos ya que las longitudes de onda de los rayos lumínicos son muy pequeñas (de 360 a 760 nanómetros), y en comparación con las dimensiones del modelo, aunque este sea reducido, estas longitudes continúan siendo pequeñas.

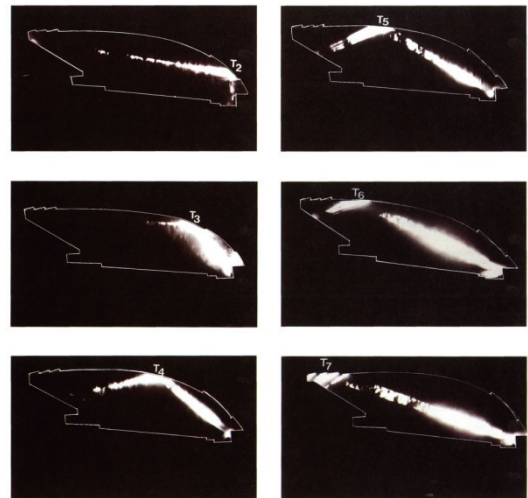
Los métodos utilizados son el de la cubeta de agua y el Light Tracing. El primero de ellos tiene el inconveniente de trabajar solamente en un plano en planta o en sección, y precisa un contenedor estanco con fondo transparente, y un proyector de luz potente (tipo proyector de diapositivas) que consiga presentar bien el efecto, directamente o por proyección en una pantalla. No obstante las dificultades, el método de trabajar con agua es muy didáctico para observar fenómenos como el de la difracción de los frentes de ondas. Actualmente muchos artistas que trabajan con el arte sonoro aprovechan el agua excitada por el sonido para sus instalaciones.

Con Higini Arau, durante el curso 1986/1987, impartimos la asignatura de doctorado Estudio y Modelos para la Acústica Arquitectónica de Grandes Salas, donde estudiamos en laboratorio las ventajas y desventajas del método de Light Tracing respecto al de la cubeta de agua.

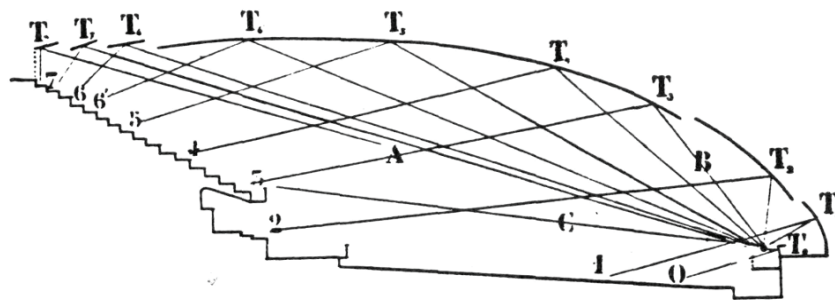
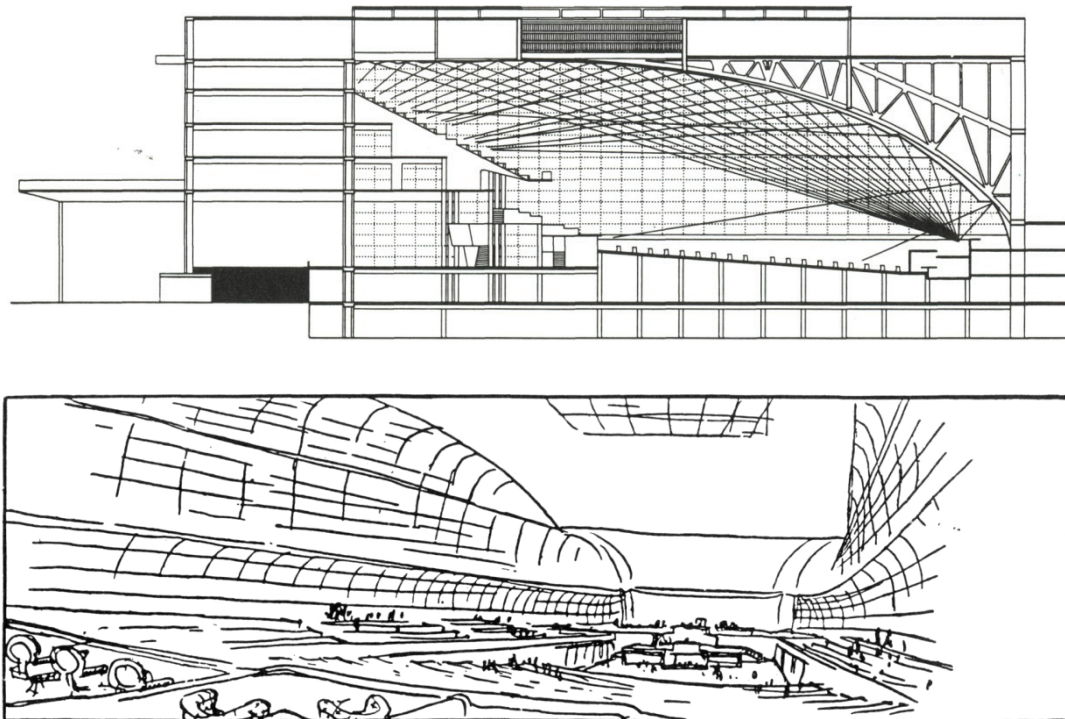


Difracción del sonido en cubeta de agua.

Los modelos sencillos se trabajan en planta o sección, como en el estudio realizado por este autor para la Sala de Asambleas del proyecto ganador del concurso para Palacio de las naciones de Ginebra, de Le Corbusier (no realizado por motivos de controversia con la Academia) y el de los teatros en Ciudad Badia no realizados por motivos económicos.



Ciudad Badia



En el modelo a escala, se precisa que los coeficientes de absorción lumínicos de los acabados sean parecidos a los de los acabados de la sala real. Esto es fácilmente realizable pintando de negro o pegando papel negro o tejido negro en las áreas altamente absorbentes, llegando hasta el blanco aplicado en las zonas más reflectantes. Asimismo, hay que utilizar superficies muy pulidas de metal, plástico o espejo para la reflexión especular, y de acabado mate para la reflexión difusa.

En general los modelos ópticos permiten ver lo que sucede en estado de régimen de la distribución de energía dentro del local, es decir, que concentraciones o focalizaciones aparecen y cuáles son las superficies importantes y las poco colaboradoras.

Así puede determinarse a un nivel suficiente de aproximación, aquellas partes de las paredes, techos, etc. responsables de ciertos defectos o cualidades.

Además, la planta puede variarse fácilmente, por lo que es un método muy didáctico dado que los propios alumnos pueden diseñar y construir sus propias formas y acabados arquitectónicos con muy bajo coste.

MÉTODO DE ULTRASONIDOS

En este caso, la visualización de los efectos ya no es posible, puesto que se utilizan sonidos inaudibles, pero presenta la ventaja de continuar trabajando con sonido.

La primera consideración consiste en que las velocidades de desplazamiento en la sala real i en el modelo son coincidentes. En efecto, el ultrasonido se desplaza a la misma velocidad que el sonido normal, razón por la cual obtenemos gran simplificación en las formulaciones.

De forma similar al caso lumínico, la absorción de los materiales de acabado del modelo (en este caso la absorción acústica), debe relacionarse con la de los materiales de acabado de la sala real, lo cual puede resultar en algunos casos poco fiable, ya que no todos los “sistemas constructivos conjuntamente con los materiales de acabado tienen un comportamiento similar.

MÉTODOS INFORMÁTICOS

Ahora existen multitud de programas en acústica de salas, desde los más sencillos a los de alta gama.

Veamos que opina un usuario

Estos programas permiten visualizar, y en algunos casos oír, simulaciones acústicas de un determinado equipo de sonido en cualquier recinto.

Hoy día existen numerosos programas de ordenador capaces de realizar predicciones de la acústica de un recinto, los más conocidos son EASE que distribuye Renkus Heinz (www.renkus-heinz.com) y ODEON (www.odeon.dk) distribuido por Brüel & Kjær (www.bksv.com), aunque podemos mencionar otros como CATT Acoustic, Bose Modeler, Epidaure...

Estos programas necesitan ciertos conocimientos en física y acústica para aprovechar al máximo su funcionamiento.

Empezaron a desarrollarse a mediados de los años ochenta, aunque hasta el año 1990 no empezaron a crearse como tal.

Estos programas permiten visualizar, y en algunos casos oír, simulaciones acústicas de un determinado equipo de sonido en cualquier recinto.

Tenemos que saber que para realizar simulaciones los datos que tenemos que introducir en el programa deberán ser los más numerosos posible, para obtener resultados lo más cercanos a la realidad. De ahí la complejidad de la simulación, ya que debemos conocer todas las dimensiones del recinto, así como el de los obstáculos existentes en él.

También el material y formas existentes en el local, para tener en cuenta su coeficiente de absorción.

O sea que si tuviéramos que entrar el máximo de datos para hacer la predicción, sería muy difícil usar este tipo de programas para hacer giras de cualquier artista, ya que, como mucho, en algunas ocasiones lo único que tenemos es una referencia del lugar donde se realiza la actuación, en otras el organizador nos puede facilitar planos informáticos en formato DXF, que es el original de AUTOCAD.

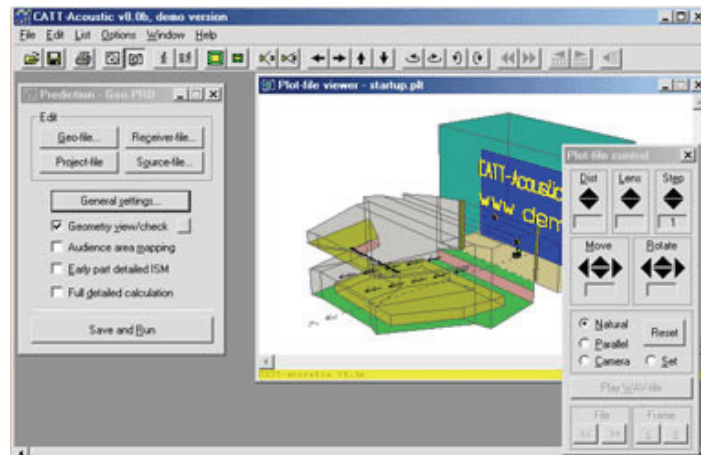
Como curiosidad mencionar que existe una opción en Internet, el programa MIREM que es una base de datos de los recintos escénicos en España, donde tenemos desde planos en formato AUTOCAD, fotos, equipo técnico y mucha información sobre todos los recintos.

Esto lo podemos visualizar en la página www.sgae.es, o ir directamente a www.artenetsgae.com/mire/index.htm, perteneciente a la Sociedad General de Autores de España.

Comentar que personalmente he realizado predicciones con algún plano descargado del MIREM, y al llegar al recinto he observado como existía alguna pequeña variación con respecto a éste.

CATT ACOUSTIC

El programa CATT acoustic es un simulador acústico que permite el diseño de salas (pueden ser importadas de CAD) y su posterior análisis. Permite estudiar virtualmente el comportamiento acústico de la sala a futuro, antes de construirla. Permite reproducir sonidos en la sala y ver el comportamiento de los mismos en la pantalla.



ODEON

ODEON es un software de simulación y cálculo de acústica de salas desarrollado por investigadores de acústica de la Universidad Técnica de Dinamarca. En la actualidad, investigación y desarrollo del software continúan en la compañía independiente Odeon A/S. puede manejar, en un mismo modelo, la acústica de una sala, la instalación de altavoces y, en cierta medida, la transmisión del sonido. Se extraen resultados en forma de parámetros acústicos, mapeo de sonido, animaciones gif y auralización de sonido envolvente o binaural que permite analizar los resultados por medio de auriculares o presentar el entorno de sonido de una futura sala a los clientes.

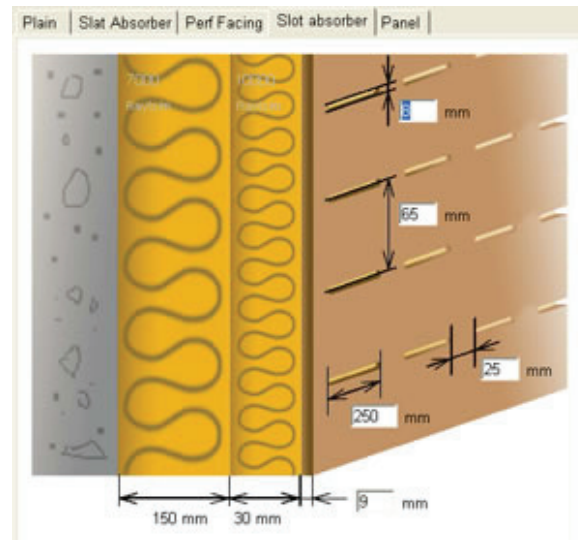
La simulación acústica de una sala que se realiza con ODEON equivale a predecir su respuesta impulsiva en un modelo 3D desde el origen hasta el receptor. El modelo de la sala se puede importar desde SketchUp u otro software CAD. También es posible derivar parámetros acústicos como el tiempo de reverberación T30, T20, EDT, SPL, STI, Claridad, etc., diseñar la acústica de una sala controlando las reflexiones, la absorción del sonido y las propiedades de dispersión del sonido en las superficies con el fin de lograr la acústica deseada y una reducción adecuada de ruidos para discursos, conciertos, etc., como software de predicción acústica, ODEON maneja correctamente el diseño de la acústica de una sala y los sistemas de amplificación para público para:

- Salas de concierto y ópera, cines, templos, estadios deportivos, oficinas abiertas, vestíbulos, restaurantes, estudios de música, metros, terminales aeroportuarias, entornos industriales. Además, es posible utilizar ODEON para zonas al aire libre con alguna superficie reflectante, como estaciones de trenes, plazas y parques, o incluso plataformas de petrolíferas.

ODEON es excelente para crear auralizaciones en diferentes entornos acústicos con una o varias fuentes. También permite simular una orquesta completa en una sala de conciertos de manera virtual o diseñar simulaciones de sonido para instalaciones futuras o para entornos antiguos con fines arqueológicos. También permite ver casos reales, escuchar auralizaciones, obtener descargas gratuitas o adquirir alguna de las ediciones de software: Industrial, Auditorio o Combinada.

ZORBA

El software ZORBA de la firma MARSHALL DAY, es una herramienta rápida y eficaz para predecir la absorción acústica de sistemas porosos con revestimientos perforados.



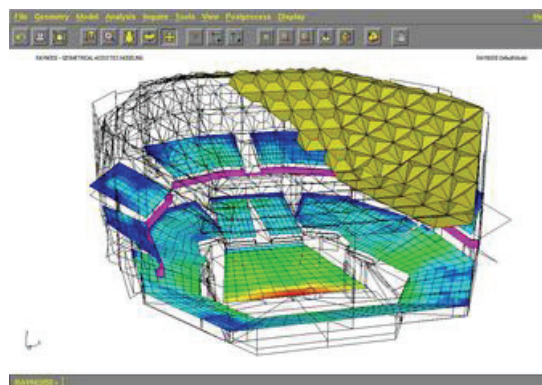
Así, ZORBA es ideal para la investigación de diferentes recintos sonoros que requieren un tratamiento especial, tales como: estudios, salas de conciertos, salas de clases, auditorios y otros.

El software ha sido desarrollado en colaboración con consultores acústicos experimentados, para garantizar sus características de uso fácil (Generador de informes, facilidad en la exportación de datos, interface amigable, etc.), lo que hace que a MARSHALL DAY ZORBA un software práctico y eficaz.

RAYNOISE

El software raynoise de la firma LMS es la herramienta más completa para el diseño y análisis de sistemas de acústica arquitectónica al utilizar avanzados métodos de trazado de rayos para predecir campos acústicos producidos por múltiples fuentes localizadas en cualquier parte del interior de un espacio 3D y en el campo lejano en el exterior.

Automatiza interacciones complejas, tales como las reflexiones múltiples de diferentes superficies y muestra los resultados en una variedad amplia de formas, desde espectros de 1/3 de octavas, ecogramas, mapas en color con niveles de presión acústica, reproducción binaural y diferentes parámetros de calidad de sonido.



Algunas de las aplicaciones del **software LMS RAYNOISE** son el Diseño acústico de salas (claridad, espaciosidad, etc.), Determinación del tiempo de reverberación, Realización de mapas acústicos en salas, Inteligibilidad de la palabra en edificios, Control del ruido industrial, Postprocesamiento binaural, etc.

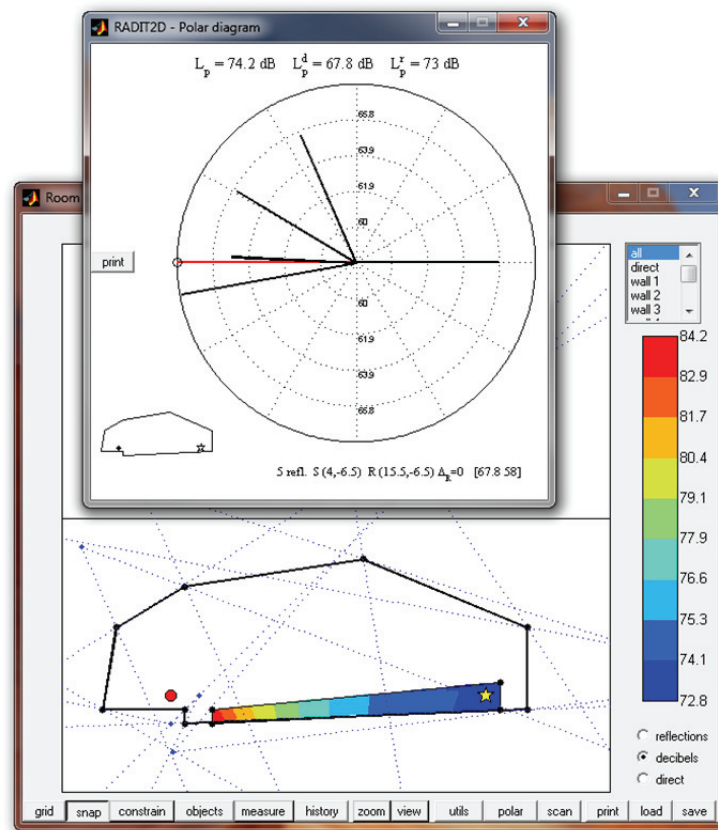
EASE

Los programas EASE Focus y EASE 4.2, ambos desarrollados por la empresa alemana Software Design Ahnert (SDA), permiten visualizar e incluso escuchar un determinado equipo de audio en un recinto (Los patrocina la empresa D.A.S. Audio para sus proyectos). EASE Focus es un programa de simulación y predicción acústica en 2D orientado a los line arrays (disposición de altavoces a ambos lados del escenario en conciertos de gran envergadura). EASE 4.2 trata el espacio en 3D, y sirve para el caso anterior ampliado a sistemas de audio convencionales, permitiendo no solo resultados del nivel de presión sonora SPL sino también el RASTI, %ALCos, etc. precisos para conocer la inteligibilidad de la palabra.

RADIT 2D

El programa Room Acoustic Desing with the Image Theory (RADIT), es muy sencillo, y trabaja eso sí, en dos dimensiones, lo cual es preferible en los primeros estadios del diseño de salas, plazas públicas, etc.

A diferencia de casi todos, se trata de un software gratuito. Está escrito en Matlab y fue diseñado para estudiar la primera reflexión dentro de un recinto.



Su premisa es la facilidad del uso y ser una herramienta didáctica más que una fuente de precisión a la hora de estimar el valor de los niveles de un campo sonoro.

Una cosa destacable es que se puede bajar su manual en español, que viene bastante bien explicado. Yo lo he utilizado en alguna ocasión, y debo felicitar a uno de sus creativos, Benoit Beckers, con el que colaboré en ciertos momentos, por la idoneidad de este programa.

OTROS CASOS

Desde el aspecto arquitectónico, debe indicarse que los parámetros son distintos si existe o no la sala.

Cuando no existe el local, todo proviene del proyecto, que en sí mismo ya representa cierto modelo, dado que el detalle en el que se ejecutan los planos viene en relación con la escala en la que se realizará la presentación y/o edición. Ahora, con el CAD se puede introducir incluso el nivel de detalle de una escala 1:1 o natural, pero debe tenerse cuidado si ese contenido se reproducirá luego en un formato de escala superior, como por ejemplo 1:100, ya que puede distorsionarse la calidad de la edición (por exceso de información) y la facilidad de su lectura.

Pero si la sala o local ya existe, entonces se presentan unos materiales y sistemas constructivos de los que desconocemos su exacto comportamiento acústico tanto a la absorción como a la difracción. Ciertamente, a nadie se le ocurre probar en laboratorio los datos acústicos de soluciones arquitectónicas actuales o antiguas si no existe una vinculación de los resultados con el ámbito comercial o el de la investigación para un doctorado. Poca salida tiene ensayar un pavimento mezcla de losas de piedra hostionera de Cádiz con otras partes realizadas mediante cantos rodados a sardinela. Realmente poco sabemos de la acústica de muchos "sistemas constructivos" del pasado, y también poco de su acabado superficial.

Los parámetros parecen conocidos; como los objetivos y subjetivos usuales, la intimidad, el efecto lateral, el tiempo de reverberación a frecuencias medias, el calor, la claridad, la brillantez, etc.

Preguntemelo a mí, o a mis amigos Arana, Giménez, Sendra, Zamarreño, Vera, etc. de las universidades de Cataluña, Navarra, Andalucía y València, con los que intentamos, en un proyecto coordinado de investigación del Ministerio, encontrar un nuevo parámetro de acústica de salas.

Pues no!

Los parámetros no son solamente físicos, sino que también son musicales, psicológicos, arquitectónicos, culturales, etc.

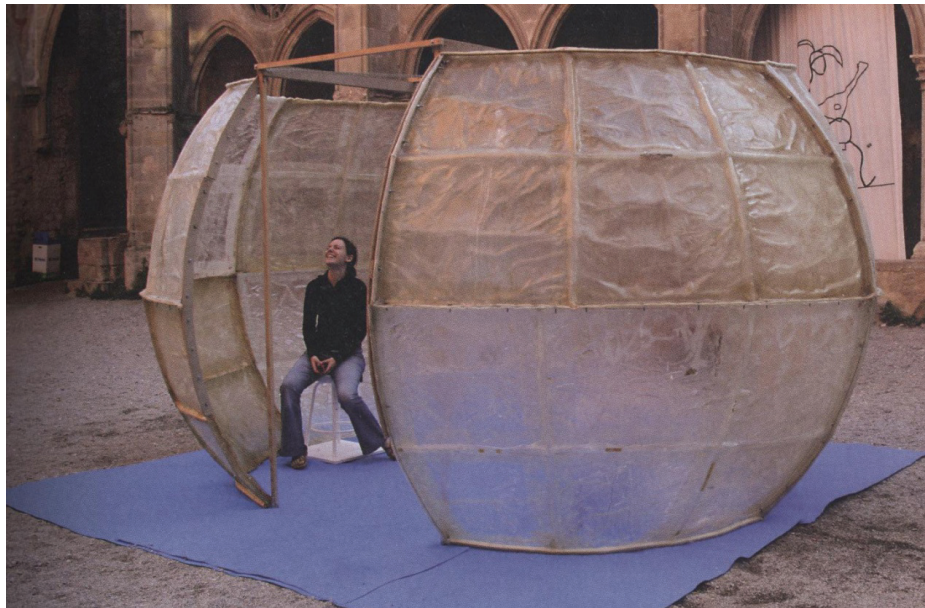
Estamos hablando de un evento que se mantiene entre el intérprete (Orador: conferenciante, profesor, locutor, traductor, etc, el Músico: cantante, solista, coro, orquesta, director, organista, etc., y el Auditor: melómano, aficionado, invitado, etc.

Es una comunicación sonora que debe romper el hielo inicial y en el que todo juega, y donde el aspecto acústico también, pero no solo de forma exclusiva como algunos pretenden.

6. LOS PARÁMETROS NECESARIOS EN EL DISEÑO / RESTAURACIÓN / REHABILITACIÓN DE ESCULTURAS SONORAS

La simulación realizada por nuestros compañeros de Valencia, para esta escultura o arquitectura acústica denominada "instrumento músico" en honor de un verso de Luís Cernuda, dentro del Mapapoètic para el FORUM 2004 de Barcelona, nos da idea de la dificultad de los programas de auralización en el caso de volúmenes especiales como en este caso (elipsoide)

Me imagino la comparación de la auralización de una palmada en el Panteón de Roma, respecto lo que viví en persona dentro del mismo. Alicia Giménez Pérez sabe que no me gusta la auralización, pero quizás dentro de poco deba quedarme en casa escuchando un concierto, y el sistema de reproducción doméstico me permita virtualizar como si me sentara en la butaca nº 56 del Palau de la Música de Valencia, o en la 84 del Palau de la Música de Barcelona. No solo deberán representarme las virtudes acústicas de ambos espacios, sino que espero sepan infundirme el carácter del espacio de García de Paredes o de Domènech i Montaner, respectivamente, es decir de la arquitectura con A mayúscula.



7. REFLEXIONES FINALES

Dejo unas reflexiones finales de un trabajo presentado en un congreso y que he encontrado en internet. No voy a citar la fuente, pero con el ejemplo práctico que seguía se ilustran estas conclusiones:

- Los parámetros a estudiar en la emisión de las fuentes de ruido de una ciudad no son sencillos; fuentes fijas y móviles, y fuentes asimilables a emisores puntuales o lineales. A su vez, la direccionalidad de las fuentes, el medio de propagación, la rugosidad de la superficie de éste, los eventuales obstáculos en el camino de propagación, son algunos de los factores a tener en cuenta (algunos de ellos son extremadamente complejos para ser incluidos de un modo simple en modelos predictivos explícitos).
- Es preciso considerar por lo menos el número total de vehículos que circulan y la composición del tráfico, aunque también inciden otros factores como la velocidad de circulación, ruido de rodadura, etc.
- Respecto la propagación, las variables son: la distancia del emisor al receptor, el ancho de calzada y aceras, el tipo de pavimento, el ancho de la calle, la altura de edificación a cada lado de la calle, la presencia o no de semáforos o pasos cebras, la pendiente aproximada de la calzada, el sentido ascendente o descendente de la circulación, etc.

Modelo Urbano:

Una de las fórmulas complejas ampliadas:

$$Leq = 53,2 + 6,00 \log V + 11,17 \log (L + 6M + 10H) - 4,50 \log d - 0,0107 S$$

Siendo:

- V Velocidad media en km/h
 - L Número de vehículos livianos por hora
 - M Número de vehículos medianos por hora
 - H Número de vehículos pesados por hora
 - d Ancho de la calzada en m
 - S Distancia a un punto singular de la calle (semáforo, rotonda, etc.)
 - D Retiro frontal detrás del sonómetro (m)
- } L + M + H = Q

Modelo Suburbano:

$$Leq = 56,5 - 6,53 \log V + 11,6 \log Q + 0,172 P - 6,48 F - 0,0098 S - 2,47 \log N$$

Siendo:

- V Velocidad media en km/h
- Q Tráfico medio total (veh./hora)
- P Porcentaje de vehículos medianos y pesados
- F Distancia entre el punto de medida y la fachada más distante (m)

- N Distancia entre el punto de medida y la fachada más cercana (m)
- S Distancia a un punto singular de la calle (semáforos, rotonda, etc.)

Método simplificado:

En este caso la fórmula es más sencilla.

$$Leq = A + B \log Q$$

Siendo:

- Q Tránsito horario total

Para el caso de ruido urbano se tiene $Leq = f(A, M, O, C, d)$:

Siendo:

- A, M, O, C Número de automóviles, motos, ómnibus y camionetas por hora
- d Distancia entre la fuente y el receptor

las conclusiones a las que llega aquel autor son:

- Los modelos predictivos obtenidos en diferentes ciudades dan resultados considerablemente diferentes, aún cuando sean válidos para los rangos de densidad de tránsito a la que se aplican.
- Existe un fuerte condicionamiento entre las ecuaciones predictivas y las características geográficas y fisiológicas de la ciudad, que si bien no aparece en forma explícita en la ecuación, puede inviabilizar su transferencia y aplicación a otra realidad.
- Las predicciones realizadas permiten obtener valores dentro de un rango de ± 3 dBA. Las reducciones que auguraban los modelos ante la modificación de tránsito en estudio fluctuaban sobre 5,3 dBA, y en ningún caso los valores de la predicción de esos mismos modelos una vez retirados los ómnibus lograron mantenerse en el rango de ± 3 dBA en relación a los valores reales que luego se constataron.

Fijémonos que si el estudio predictivo abierto de los niveles de ruido de una población, de la que se conocen muchos de sus parámetros físicos, urbanísticos y sus fuentes, poco tiene que ver con los resultados medidos, ¿cómo podremos fiarnos de los métodos comerciales herméticos?

8. BIBLIOGRAFÍA DEL AUTOR REFERENCIADA:

LA ACÚSTICA DE LA SALA DE ASAMBLEAS DEL PALACIO DE LAS NACIONES DE GINEBRA, DE LE CORBUSIER. (Daumal, F. et al) <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es>

PROGRAMA QSAI DB-HR (Daumal, F, y QSAI) <http://www.qsai.es/LANG-ES/QSAI-CTE-DB-HR.asp>

ARQUITECTURA ACÚSTICA: POÉTICA Y DISEÑO (Daumal, F) <http://www.upc.edu/sostenible2015/documents/mapa-de-la-sostenibilitat/daumal-domenech-francesc-de-paula/>

ESTUDI DE MODELS PER A L'ACÚSTICA ARQUITECTÒNICA DE GRANS SALES (Daumal, F y Arau, H) 1986-87, ETSAB, BARCELONA

PAPERS
COMUNICACIONES



INITIAL ACOUSTIC MODEL TO SIMULATE THE SOUND FIELD OF THE CATHEDRAL OF SEVILLE

Reference PACS: 43.55.Gx, 43.55.Ka

Álvarez, Lidia; Alonso, Alicia; Galindo, Miguel; Zamarreño, Teófilo; Girón, Sara

Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, Universidad de Sevilla, Avda. Reina Mercedes, 2, E. T. S. de Arquitectura, 41012 Sevilla, SPAIN.

calvarez6@us.es, aliciaalonso@us.es, mgalindo@us.es, teofilo@us.es, sgiron@us.es

ABSTRACT

The cathedral of Seville is one of the most emblematic heritage buildings of the city, world heritage and the largest gothic cathedral in the world. It is divided into 5 naves; the central nave contains the choir and the main chapel, and in the outer naves, chapels open along its entire contour. In this work, a 3D model of this liturgical space has been created in order to simulate the sound field. The virtual model created is calibrated, from experimental measurements of T30, through an iterative process. From this point, the simulated and measured results for the rest of the commonly used acoustic parameters are analysed.

RESUMEN

La catedral de Sevilla es uno de los edificios patrimoniales más emblemáticos de la ciudad, patrimonio de la humanidad, y la mayor catedral gótica del mundo. Se articula en 5 naves; la central alberga el coro y la capilla mayor, y en las exteriores se abren capillas en todo su contorno. En este trabajo se elabora un modelo 3D de este espacio litúrgico para simular el campo sonoro. El modelo virtual creado se calibra, a partir de las medidas experimentales de T30, mediante un proceso iterativo. A partir de ahí se analizan los resultados simulados y medidos del resto de los parámetros acústicos habituales.

INTRODUCCIÓN

Aunque la propagación del sonido en los recintos existentes o concebidos para la presentación de la música sinfónica ha constituido el objetivo primordial de la acústica de salas y de la práctica acústica de las últimas décadas [1], también las propiedades acústicas de los espacios religiosos han recibido gran atención en la comunidad científica internacional [2]. El interés está tanto en los edificios contemporáneos de culto, en los que se cuida la inteligibilidad del mensaje entre celebrante y los fieles [3], y que se han concebido con un cierto carácter multifuncional, como en la acústica de los espacios existentes clásicos, de gran valor histórico y patrimonial [4], ya que éstos se renuevan con fines culturales que comparten con usos litúrgicos.

Sin pretender ser exhaustivos destacan en este ámbito, el pionero trabajo de Raes et al. [5], comparando los tiempos de reverberación de dos basílicas romanas, estructuralmente muy diferentes, también Shankland et al. [6], amplían el estudio anterior incorporando la basílica de San Pedro, Tzekakis, estudia varias iglesias ortodoxas de Tesalónica [7], Fearn et al. algunas iglesias europeas occidentales [8], y Lewers presenta algunas características sonoras de la catedral de San Pablo en Londres [9]. A partir de estos primeros trabajos proliferan otros estudios más avanzados sobre las condiciones acústicas de iglesias en otros países, destacan la recopilación de Desarnaulds et al. de más de 150 iglesias suizas de diferentes épocas, [10], el estudio de iglesias portuguesas llevado a cabo por Carvalho [11], y también los tratamientos de las superficies para mejorar la inteligibilidad de la palabra y el apoyo electroacústico en mezquitas, con las contribuciones de Hammad [12], y Adel [13], entre otros.



Figura 1. Imagen interior de la Catedral de Sevilla.

La complejidad y características del campo sonoro de los espacios litúrgicos interesan asimismo al equipo investigador italiano liderado por E. Cirillo, al estudiar una tipología de iglesias italianas (iglesias románicas de la región de Apulia) [14], cuyos resultados extienden a otros espacios eclesiales de diferentes tipologías y volúmenes [15]. Los esfuerzos de este grupo en relación a la acústica de espacios religiosos católicos han abarcado múltiples aspectos: teóricos objetivos [16], subjetivos [17], y prácticos [18].

Las singulares características acústicas de los enormes y complejos espacios reverberantes como son las catedrales, han suscitado en estos años también el interés de los investigadores: existencia de espacios acoplados en la catedral de San Pablo (Londres) [19]; también la identificación de volúmenes acoplados en la basílica de San Pedro (Roma) [20]; y ajustes de acústica variable en la catedral de Boston (Estados Unidos) [21]; son algunos ejemplos.

Más recientemente, la fascinación por las capacidades de predicción de los modelos de simulación digital basados en la acústica geométrica ha alcanzado también a los recintos de culto [22, 23]. Estas poderosas herramientas de simulación permiten estudiar virtualmente el comportamiento acústico del espacio a futuro, antes de construirlo, y producir señales audio del mismo a partir de las respuestas al impulso binaurales sintéticas. También con estas técnicas de predicción resulta plausible controlar los experimentos de manera más enfocada, reduciendo el número de variables implicadas, lo que permite desentrañar las causas de los fenómenos, y ayudar a corroborar ciertas hipótesis [20]. Las posibilidades de recreación de situaciones acústicas pasadas permiten también llevar a cabo lo que se llama arqueología acústica, y posibilita incorporar en los grandes lugares de culto, de gran valor patrimonial, las características acústicas como otro importante aspecto de su patrimonio intangible.

En este trabajo se analiza el proceso de creación, ajuste, y validación del modelo computacional 3D de la catedral de Sevilla, teniendo en cuenta una única posición de la fuente de todas las consideradas en los ensayos experimentales, y analizando exclusivamente los resultados de los parámetros acústicos monaurales. Estos resultados constituyen el comienzo de un ambicioso trabajo sobre este espacio catedralicio que pretende incorporar la simulación de las respuestas al impulso binaurales y tridimensionales, y la implementación de auralizaciones, para recrear el comportamiento acústico del espacio y para su posible utilización en la valoración subjetiva de la percepción acústica del mismo.

DESCRIPCIÓN DE LA CATEDRAL

La catedral gótica cristiana de Sevilla, también conocida como “Santa María de la Sede”, se sitúa al sur del centro histórico de la ciudad andaluza. El solar en el que se encuentra estaba ocupado por una antigua mezquita aljama, la cual, tras la conquista, fue cristianizada y posteriormente derribada con el fin de construir el edificio gótico en la misma superficie rectangular de 116 metros de largo por 76 metros de ancho [24]. Ciertos historiadores datan el inicio de las obras en 1401, sin embargo, no existe testimonio escrito hasta 1433 [25]. El proceso constructivo, iniciado desde el trascoro hasta la cabecera, fue dirigido por diferentes maestros a lo largo de los años.

El espacio interior del templo gótico, se articula en cinco naves orientadas al este, siendo las más altas la nave del crucero y la nave central, llegando casi a los 40 metros de altura libre. Su estructura cuenta con 60 pilares de mampostería revestidos de piedra, 32 de ellos exentos,

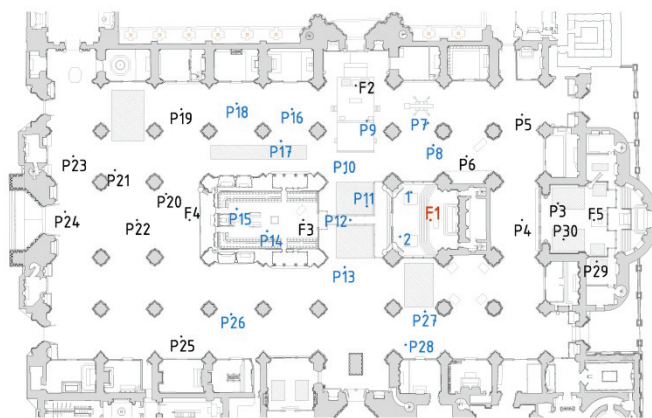


Figura 2. Plano de planta de la catedral mostrando las posiciones de fuente (F) y los puntos receptores (P).

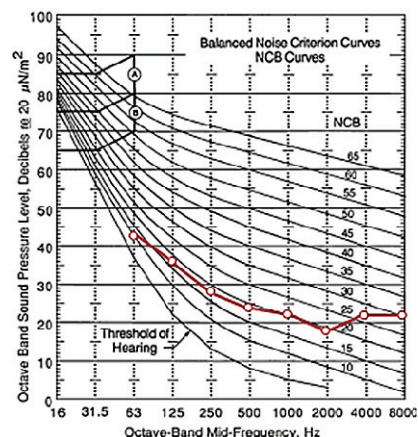


Figura 3. Espectro de ruido medido valorado sobre las curvas NCB.

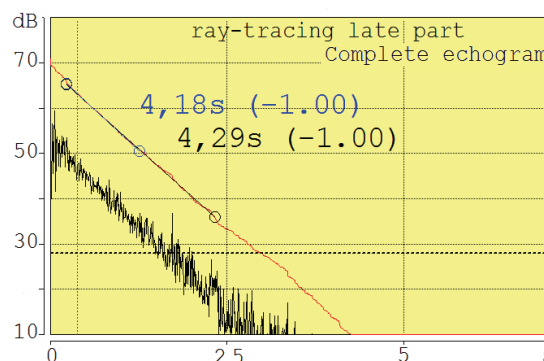
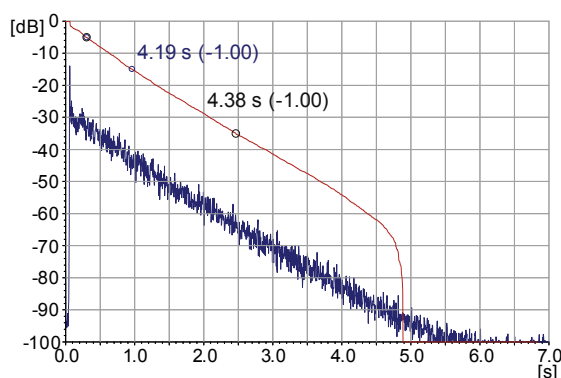


Figura 4. Curva de energía e integral de Schroeder, medidas (izquierda) y simuladas (derecha) para el punto 13 filtradas a 1 kHz.

sobre los cuales descansan las 68 bóvedas de crucería que cubren las diversas naves. La catedral presenta solería de mármol blanco y azul grisáceo. Ver Figura 1.

El coro, situado en la nave central, cuenta con una sillería de madera tallada por diversos artistas. Su entrada está delimitada por una gran reja renacentista, y los tres lados restantes están cerrados por muros de cantería, en los que se localizan cuatro capillas de alabastro abiertas a las naves laterales. El órgano está formado por dos grandes cajas situadas sobre los muros laterales, a ambos lados del coro. En la cabecera del templo se sitúa la Capilla Real, donde se celebra diariamente la liturgia. Forma un amplio, recinto cerrado por un ábside semicircular y cubierto por una solemne cúpula. Una gran reja cubierta con densas cortinas delimita la entrada a la misma.

En definitiva, la catedral se convierte en un lugar de culto y oración en el que en ciertas ocasiones se llevan a cabo grandes ceremonias y festividades que la transforman en un gran teatro sacro.

TÉCNICA EXPERIMENTAL

Las respuestas impulsivas (RI) se han obtenido siguiendo las recomendaciones de la norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010 [26]. Se han considerado 5 posiciones de fuente diferentes, que se corresponden con las ubicaciones habituales de los principales focos sonoros en las diferentes celebraciones que tienen lugar en el templo. Se fijaron un total de 28 posiciones de micrófonos distribuidas por toda la zona de audiencia, aprovechando la simetría del recinto (ver Figura 2), se han dispuesto 24 receptores en la parte de la izquierda y 4 en la derecha para que actúen como controladores. Se presenta aquí el estudio realizado para la posición de la fuente F1, ubicada en el altar mayor a 1,50 metros sobre el suelo.

Para cada posición de la fuente se han estudiado las posiciones del micrófono en el conjunto de puntos recepción en los que se recibe sonido directo. En cada punto de recepción, situado a 1,20 metros del suelo, se registraron las respuestas al impulso a partir de barridos de señales sinusoidales, en las que la frecuencia incrementa exponencialmente con el tiempo. El rango de frecuencias se ajustó para cubrir las bandas de octava comprendidas entre 63 y 16.000 Hz, así como la duración del barrido, para conseguir una relación señal-ruido superior a 45 dB para las bandas de octava de interés.

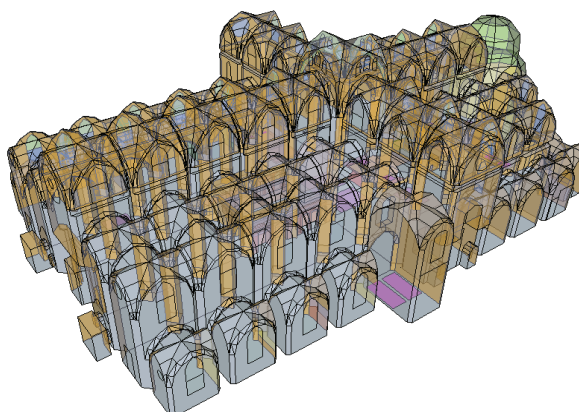


Figura 5. Modelo geométrico 3D de la Catedral de Sevilla.

Todos los ensayos experimentales se realizaron con el templo desocupado, en periodo nocturno. La temperatura y la humedad relativa variaron entre 25 y 25,5 °C y 55 y 58 %, respectivamente. El nivel del ruido de fondo se registró promediando durante 4 minutos con el analizador SVAN 958, de SVANTEK. El nivel sonoro continuo equivalente registrado fue de 30,7 dBA. En todo caso la relación señal-ruido se mantuvo muy por encima de 45 dB en todas las frecuencias de interés, valor mínimo requerido para medir con fiabilidad T30. En la Figura 3 se representa el espectro medido del ruido de fondo sobre las curvas NBC, que se puede valorar como NCB-30.

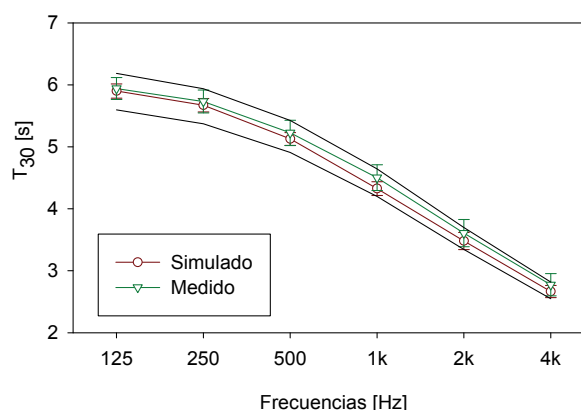


Figura 6. Tiempo de reverberación medido y simulado promediado espacialmente y dispersión espacial valorada por la desviación estándar asociada (barras verticales).

A modo de ejemplo en la Figura 4 se muestra la curva de energía y la integral de Schroeder, filtradas para la octava de 1 kHz, calculadas a partir de la RI medida en el punto 13, excitando la sala con la fuente situada en la posición F1. A partir de estas RI se derivan los valores de los principales parámetros acústicos: tiempo de reverberación (T30), tiempo de reverberación inicial (EDT), tiempo central (TS), definición (D50), claridad (C80), fuerza sonora (G), fracción de energía lateral precoz (JLF) e índice de transmisión de la palabra (STI).

El proceso de generación, adquisición y análisis de la señal se llevó a cabo con el programa WinMLS2004 mediante una tarjeta de sonido EDIROL UA-101. La señal barrido en frecuencia se reprodujo en el recinto usando una fuente omnidireccional AVM DO-12, siendo previamente amplificada con un amplificador de potencia B&K type 2734. La respuesta al impulso se capturó con un micrófono multipatrón Audio-Technica AT4050/CM5, en su configuración omnidireccional y bidireccional (figura de ocho), conectado a la fuente de polarización Earthworks-LAB 1.

SIMULACIÓN ACÚSTICA

Se ha creado un modelo geométrico virtual simplificado de la catedral de Sevilla para simular su comportamiento acústico, mostrado en la Figura 5. Dicho modelo está compuesto por 7.516 planos y tiene un volumen de 216.192 m³.

El modelo se ha calibrado siguiendo un proceso iterativo mediante el cual se ajustan los coeficientes de absorción de los materiales menos conocidos hasta conseguir que el tiempo de reverberación simulado promediado espacialmente para cada una de las bandas de octavas

Tabla 1. Coeficientes de absorción acústica asociados a los principales materiales utilizados en la simulación.

Material	Área [%]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Sillería*	65,1	0,13	0,13	0,13	0,14	0,16	0,16
Mármol Suelo	14,5	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Molduras*	5,3	0,13	0,13	0,13	0,14	0,16	0,16
Sillería Capilla*	2,8	0,10	0,10	0,10	0,12	0,14	0,14
Vidrieras	2,1	0,13	0,12	0,08	0,07	0,06	0,04
Retablos Madera	1,9	0,12	0,12	0,15	0,15	0,18	0,18
Órgano	1,4	0,12	0,14	0,16	0,16	0,16	0,16
Madera Coro	1,1	0,12	0,12	0,15	0,15	0,18	0,18

* Materiales usados para calibrar el modelo.

consideradas no difiera en más de 1 JND, just noticeable difference (5% para T) [26], del valor promedio medido experimentalmente. Aunque el JND tiene validez para los valores promedios de los parámetros, hemos aceptado dicho valor para cada banda de octava.

En la Figura 6 se representa el promedio espacial del T₃₀, tanto medido como simulado, con su desviación estándar correspondiente obtenida para cada banda de octava, así como los límites aceptados aplicando el criterio de 1 JND.

En la Tabla 1 se muestran los coeficientes de absorción asociados a los materiales cuyo porcentaje relativo de superficie es mayor al 1%. Los coeficientes de dispersión de estos materiales varían según sea el grado de irregularidades que presenta cada superficie, de modo que los materiales de superficie lisa tienen un coeficiente de scattering asociado que varía de 0,12 en la banda de 125 Hz a 0,17 en la de 4 kHz aumentando 0,01 en cada banda. Los de decoración moderada pasa de 0,20 en 125 Hz hasta 0,45 a 4 kHz aumentando 0,05 en cada banda, y en los más irregulares varía de 0,30 en la banda de 125 Hz a 0,80 en la de 4 kHz aumentando 0,10 en cada banda [20].

El software utilizado para realizar la simulación acústica ha sido CATT-Acoustic v8k. Se ha utilizado el modo "cálculo detallado completo" basado en el Randomized Tail-corrected Cone-tracing, un método híbrido desarrollado a partir de algoritmos de predicción basados en los métodos de fuentes imagen, trazado de rayos y trazado de conos. Tanto el número de rayos como el tiempo de truncado empleados en la simulación se determinaron de forma manual, siendo 300.000 rayos y 7 s respectivamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fijando la atención en las diferencias entre los valores promediados espacial y espectralmente, medidos y simulados, en términos de sus JND [20], [26], y recogidos en la Tabla 2, se aprecia como para la mayoría de los parámetros dichas diferencias son inferiores a 1 JND, y en ningún caso superan los 3 JNDs, lo que es un indicativo del buen funcionamiento del modelo. Los parámetros energéticos son los que presentan las diferencias más significativas.

Tabla 2. Valor promediado espacial y espectralmente de los parámetros acústicos estudiados, y diferencias JND.

Parámetros	Simulados	Medidos	JND
T ₃₀ [s]	4,73	4,86	0,56
EDT [s]	4,15	4,06	0,41
T _S [ms]	227,89	272,86	1,94
D ₅₀	0,37	0,26	2,28
C ₈₀ [dB]	-1,18	-3,63	1,64
J _{LF}	0,09	0,12	0,67
G [dB]	0,30	1,23	0,92
STI	0,52	0,48	-

En la Figura 7 se representan los valores medidos y simulados promediados espacialmente de los parámetros acústicos estudiados. Las barras de error muestran la dispersión espacial calculada a partir de la desviación estándar para cada banda de octava. Si se observan los valores medios del tiempo de reverberación inicial, puede comprobarse que, el comportamiento espectral del valor medido y simulado es muy similar, siguiendo la tendencia en frecuencia esperada, es decir, el EDT disminuye a medida que aumenta la frecuencia, sobre todo a partir de 2 kHz, donde se hace notoria la absorción del aire. En el resto de los parámetros, a nivel general, se obtienen valores simulados promediados espacialmente muy coincidentes con los medidos en medias y, especialmente, en altas frecuencias. Más deficientes resultados se obtienen para las bajas frecuencias, en especial para la banda de octava de 250 Hz. La fuerza sonora simulada, por ejemplo, difiere hasta en 5 dB de la medida experimental. En el caso de la fracción de energía lateral precoz las diferencias son aceptables en todas las bandas de octava. Además, las tendencias en frecuencia de los valores medidos y simulados son muy parecidas en todos los parámetros acústicos analizados.

Se observa también, que los valores de las desviaciones correspondientes a las simulaciones son del mismo orden, o menores, que las encontradas en las medidas experimentales. La mayoría de las desviaciones superan, para cada parámetro, frecuencia, fuente, medida in situ y simulado, un JND, por lo que en diferentes zonas de la catedral la sensación percibida será diferente.

Con objeto de verificar la validez de la simulación, punto a punto y por frecuencias en la Figura 8 se representa el porcentaje de puntos de medida cuyas diferencias, expresadas en términos de JND, entre los valores medidos y simulados de cada parámetro, se encuentran por debajo de cierto umbral. Cuando se fija por debajo de 2 JNDs, valor normalmente considerado como aceptable para la simulación, vemos que, para la mayoría de los parámetros y a excepción de la banda de 250 Hz, más del 50% de los puntos se sitúan dentro de este rango. Teniendo en cuenta las grandes dimensiones del recinto y su complejidad arquitectónica, consideramos aceptable una diferencia de hasta 3 JNDs, y en este caso el número de puntos bajo dichas condiciones crece al 70%, llegando en algunos casos hasta el 100%. Esto pone de manifiesto que con el modelo 3D creado se reproducen de una manera bastante aproximada las características del campo acústico creado en el recinto ubicando una fuente sonora en la posición F1. Respecto a la inteligibilidad, medida con el índice STI, cabe destacar que los valores medidos y simulados son muy aproximados en la mayoría de los puntos receptores. El STI es aceptable cuando la distancia emisor-receptor es pequeña, donde la relación señal ruido es mayor, pero como es de esperar, va decayendo conforme aumenta dicha distancia, ver Figura 9.

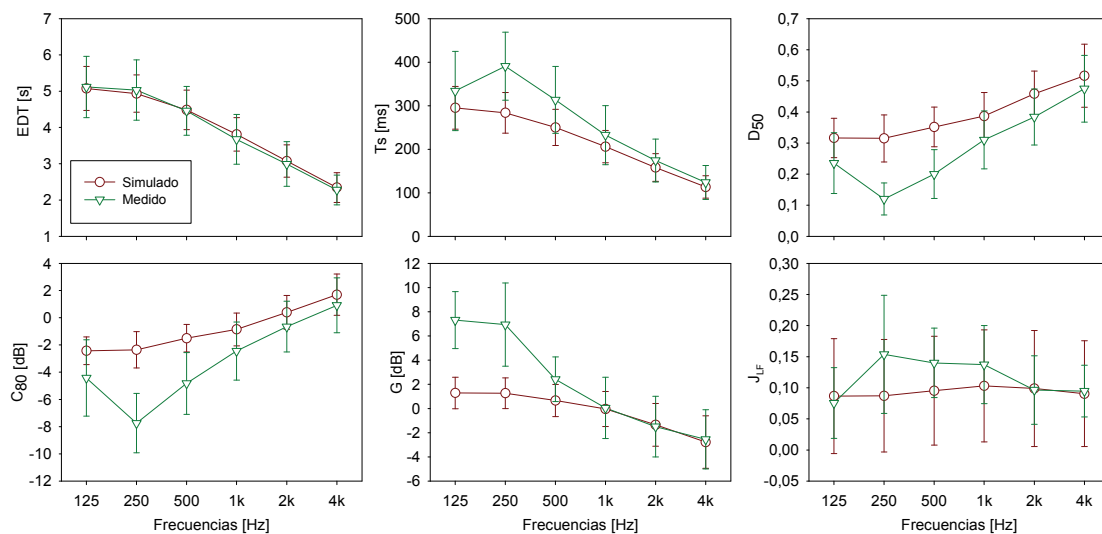


Figura 7. Comportamiento espectral simulado y medido de los parámetros acústicos estudiados, promediados espacialmente y su desviación estándar.

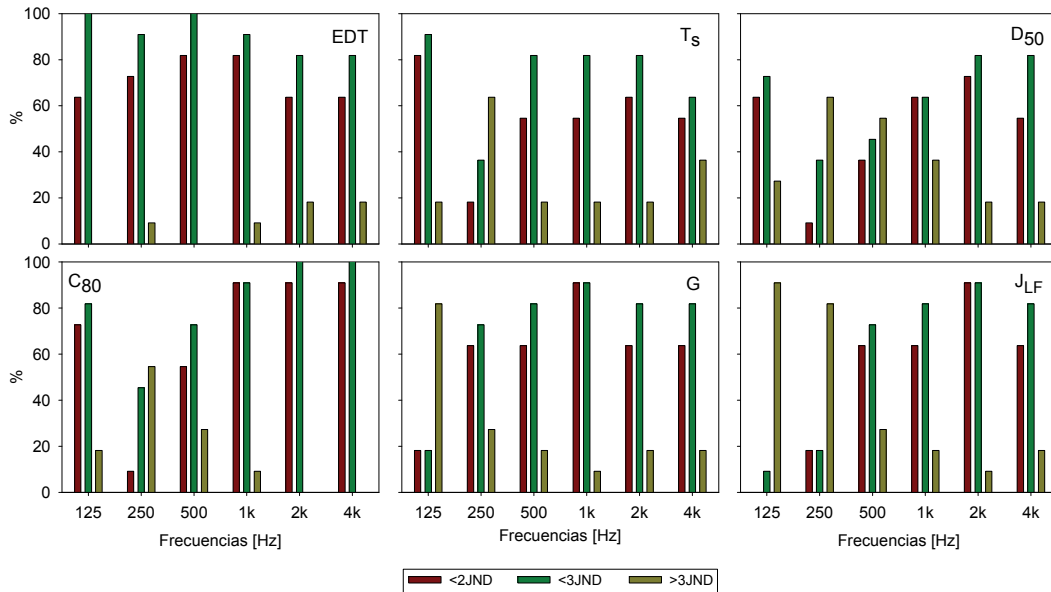


Figura 8. Porcentaje de puntos de medida cuyas diferencias JND entre los valores medidos y simulados se encuentran dentro de cada rango, para cada parámetro.

CONCLUSIONES

Se ha generado y calibrado un modelo de la catedral de Sevilla, patrimonio de la humanidad y la mayor catedral gótica del mundo, con objeto de simular el comportamiento del campo sonoro en su interior. La calibración se basa en un ajuste de los coeficientes de absorción de los materiales menos conocidos, hasta conseguir que el tiempo de reverberación simulado promediado espacialmente para cada una de las bandas de octavas consideradas no difiera en más de 1 JND del valor promedio medido experimentalmente.

Cuando se evalúa el valor medio en frecuencia de cada parámetro los resultados obtenidos son altamente satisfactorios. Al estudiar sus valores promediados espacialmente en cada banda de octava, se observa que la aproximación entre los valores medidos y simulados es, en general, bastante aceptable, presentando menores similitudes a bajas frecuencias. Por último, las diferencias entre valores medidos y simulados en cada punto receptor expresadas en términos del JND para cada banda de octava, se encuentran por debajo del umbral admitido para este espacio, 3 JND. Por lo tanto, puede aceptarse como buena la simulación implementada del campo acústico del templo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quieren expresar su más sincero agradecimiento al Deán y al arquitecto conservador de la catedral de Sevilla, por facilitarnos el acceso para la realización de las medidas. También agradecen a J. R. Barroso Morales la valiosa ayuda prestada en las medidas acústicas y a J. A. Garrido Alcázar su disponibilidad, colaboración, y su cuidada labor fotográfica de este espacio. Este trabajo ha sido financiado por fondos FEDER a través del I+D+I concedido por el Ministerio de Ciencia e Innovación (ref. BIA2010-20523).

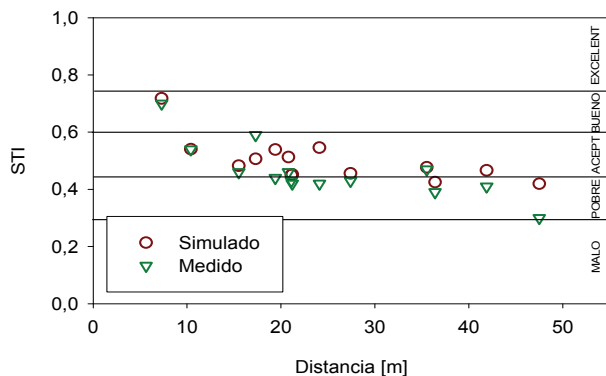


Figura 9. Variación del STI simulado y medido en función de la distancia a la fuente.

REFERENCIAS

- [1] L.L. Beranek, "Concert hall acoustics," *J. Acoust. Soc. Am.* 92(1), 1-39 (1992).
- [2] E. Cirillo, F. Martellota, "Worship, Acoustics and Architecture," Multiscience, Brentwood UK, (2006).
- [3] M. K. Abdelazeed, R. N. Hammad, A. A. Mustafa, "Acoustics of King Abdullah mosque," *J. Acoust. Soc. Am.* 90(3), 1441-1445 (1991).
- [4] Z. Karabiber, "A new approach to an ancient subject: CAHRISMA project," on de CD – ROM: Garmisch-Partenkirchen, July 4-7, Seventh International Congress on Sound and Vibration, Germany (2000).
- [5] A. C. Raes, G. Sacerdote, "Measurement of the acoustical properties of two Roman basilicas," *J. Acoust. Soc. Am.* 25(5), 925-961 (1953).
- [6] R. S. Shankland, H. K. Shankland, "Acoustics of St. Peter's and patriarchal basilicas in Rome," *J. Acoust. Soc. Am.* 50(2), 389-396 (1971).
- [7] E. Tzekakis "Data on the acoustics of the byzantine churches of Thessaloniki," *Acustica* 43(2), 275-279 (1979).
- [8] R. Fearn, "Reverberation in Spanish, English, and French churches," *J. Sound Vib.* 43(3), 562-567 (1975).
- [9] T. H. Lewers, J. S. Anderson, "Some acoustical properties of St. Paul's cathedral, London," *J. Sound Vib.* 92(2), 285-297 (1984).
- [10] V. Desarnoulds, K. Eggenschwiler, S. Bossoney, "Studie zur Raumakustik von Schweizer Kirchen" ("Acoustic study of Swiss churches"), Proceedings of DAGA, Zürich, 710-711 (1998).
- [11] A. P. O Carvalho, "Relations between rapid speech transmission index (RASTI) and other acoustical and architectural measures in churches," *Appl. Acoust.* 58(1), 33-49 (1999).
- [12] R. N. Hammad, "RASTI measurements of mosques in Amman, Jordan," *Appl. Acoust.* 30(4), 335-345 (1990).
- [13] A. A. Adel, "Measurement of acoustical characteristics of mosques in Saudi Arabia," *J. Acoust. Soc. Am.* 113(3), 1505-1517 (2003).
- [14] E. Cirillo, F. Martellota, "An improved model to predict energy-based acoustic parameters in Apulian-Romanesque churches," *Appl. Acoust.* 64(1), 1-23 (2002).
- [15] E. Cirillo, F. Martellotta, "Sound propagation and energy relations in churches," *J. Acoust. Soc. Am.* 118(1), 232-248 (2005).
- [16] F. Martellotta, "A multi-rate decay model to predict energy-based acoustic parameters in churches," *J. Acoust. Soc. Am.* 125(3), 1281-1284 (2009).
- [17] F. Martellotta, "The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces," *J. Acoust. Soc. Am.* 128(2), 654-663 (2010).
- [18] F. Martellotta, M. D'Alba, "On site validation of sound absorption measurements of occupied pews," *Appl. Acoust.* 72(12), 923-933 (2011).
- [19] J. S. Anderson, M. Bratos-Anderson "Acoustic coupling effects in St Paul's Cathedral, London," *J. Sound Vib.* 236(2), 209-225 (2000).
- [20] F. Martellotta, "Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome," *J. Acoust. Soc. Am.* 126(3), 1175-1186 (2009).
- [21] D. L. Klepper, "The distributed column sound system at Holy Cross Cathedral, Boston, the reconciliation of speech and music," *J. Acoust. Soc. Am.* 99(1), 417-425 (1996).
- [22] M. Galindo, T. Zamarreño, S. Girón, "Acoustic simulations of Mudejar-Gothic churches," *J. Acoust. Soc. Am.* 126(3), 1207-1218 (2009).
- [23] J. Segura, A. Giménez, J. Romero, S. Cerdá, "A comparison of different techniques for simulating and measuring acoustic parameters in a place of worship: Sant Jaume Basílica in Valencia, Spain," *Acta Acustica-Acustica* 97(1), 155-170 (2011).
- [24] D. A. Cardoso, "Sevilla, el casco antiguo. Historia, arte y urbanismo," Ediciones Guadalquivir (2006).
- [25] A. Jiménez, "Cartografía de la montaña hueca: notas sobre los planos históricos de la Catedral de Sevilla," Cabildo Metropolitano de la Catedral de Sevilla, (1997).
- [26] UNE-EN-ISO 3382-1:2010: Acústica, Medición de parámetros acústicos en recintos, parte 1: salas de espectáculos. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, (2010).



MULTISENSORY EVALUATION TO SUPPORT URBAN DECISION MAKING

Reference PACS: 43.50 Sr

Baştürk, Seçkin¹; Maffei, Luigi¹; Perea Pérez, Francisca²; Ranea Palma, Ángela²

¹*Institution: Built Environment Control Laboratory Ri.A.S., Second University of Naples
Via San Lorenzo, abbazia di San Lorenzo ad Septimum
Aversa (CE) ITALY seckin.basturk@unina2.it*

²*Institution: Dirección General de Cambio Climático y Medio Ambiente Urbano. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía
Avenida de Manuel Siurot 50, Sevilla –SPAIN-
francisca.perea.perez.ext@juntadeandalucia.es angela.ranea@juntadeandalucia.es*

ABSTRACT

Community noise measures are conventionally based on various indicators derived from sound pressure levels. However this approach usually encounters difficulties in evaluation of experienced quality of soundscapes. Furthermore, communication of the technical noise information through maps and numbers is far away of depicting complex sonic environments. Virtual Reality technology offers possible improvements in these issues introducing realistic experience of sound and its context. In this preliminary study it is aimed to demonstrate the potentiality of a multisensory (audio-visual) evaluation technique, involving the end users during the design process and administration. The multisensory evaluation technique has been applied to a case study in historic neighbourhood Triana of Seville (Spain). This initial study is concluded with a demonstrative virtual reality application and with insights on possible future directions including the experiment protocol that should be designed with objective and subjective psychological measures.

RESUMEN

Tradicionalmente los estudios sobre ruido se han basado en indicadores numéricos derivados de los cálculos de niveles de presión sonora. Sin embargo de esta manera resulta complicado evaluar de forma subjetiva la molestia que ocasiona el ruido. Las nuevas técnicas de realidad virtual ofrecen la posibilidad de mejorar este aspecto puesto que representan con mayor realismo un ambiente en todo su contexto. El objetivo de este estudio preliminar es el de demostrar la capacidad de una metodología de evaluación multisensorial que permite conocer la percepción ciudadana ante determinados entornos, muy útil en los procedimientos de información pública. Dicha metodología ha sido aplicada a un caso estudio en el barrio histórico de Triana (Sevilla) para obtener finalmente una aplicación en realidad virtual de la misma.

1. INTRODUCTION

Contemporary urban governance requires a multi-actor collaboration in decision making processes in order to achieve a more democratic governing practice. Traditional top-down practices in urban and environmental context are giving their place to negotiation, cooperation and co-production processes. Beside the governmental and private partners, the general public and its organizations should be involved in urban decision making process. Urban decision making requires a compromise and a good understanding between the actors so as to achieve successful resulting decisions. The involvement of general public in decision making process enables a better understanding of users' needs and expectations, and also helps to build trust, increase user satisfaction and facilitates acceptance of new interventions in urban area [1]. In

Europe the Aarhus Convention [2] is the underlying document that establishes rights of the public regarding environmental issues. The three basic rights of public pointed out in convention are; access to environmental information, public participation in environmental decision-making and access to justice.

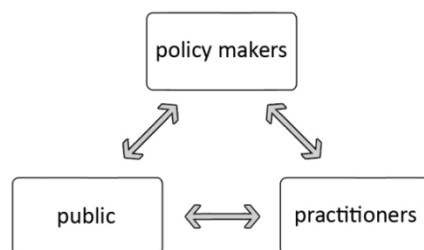


Figure 1. Actors of urban decision making.

In EU, environmental noise related issues are defined by 'Environmental noise Directive 2002/49/EC' putting emphasis, in accordance with Aarhus convention, on communicating environmental noise data to public. The presented noise information is required to be clear and comprehensible by general public. However, no definition of the public involvement process was specified. Noise maps and numerical data seem to be the tools pointed by the legislation for the public information. These tools are not easily understandable and do not give enough information to depict sonic environments for the non-technical users (general public).

Beside the legal necessity of public information and participation, it is getting more and more important to get consultancy of local experts (end users) in order to understand better the nature of human auditory perception and the reaction to the audio stimuli [3]. The generalized noise indicators of regulatory attempts do not consider the complex interactions that occur when people hear sounds. In our daily life we continuously sense sounds in our environment, these sensations recall our memories and previous experiences and trigger a multisensory processing that leads to identification and the recognition of environment. This process finally forms judgments as a function of the context in which the sound is heard. Standard regulatory processes can mislead the noise impact assessment when it is applied to different contexts, to different communities [4]. Therefore, an ecological assessment of environments should take into account the multisensory and interdependent nature of human perception.

There are several attempts to achieve better practices covering these gaps of standard procedures of noise impact assessment and public involvement. Three dimensional representations [5] [6] [7] [8] and virtual reality simulations [9] [10] [11] have shown promising results to overcome these issues. With the recent developments in VR technology and auralization techniques, it is much easier to communicate complex noise information making it audible and present it in its multisensory context [12]. Thus the general public can experience the urban environment with the changes in its aural and visual aspects in a realistic way and understand noise information without any prior knowledge of complex noise indicators.

In this preliminary study it is aimed to demonstrate the potentiality of a multisensory (audio-visual) evaluation technique which employs immersive virtual reality (IVR) simulations to involve the end users during the design process and administration. The multisensory evaluation technique has been applied to a case study in historic neighborhood Triana of Seville (Spain) in order to support technical understanding and awareness of regional legislation of Andalusia in terms of resources and possible solutions on noise and light pollution.

2. MULTISENSORY EVALUATION TECHNIQUE

Thanks to recent developments in virtual reality technology and audio-visual rendering techniques it's possible to experience new approaches for the assessment of urban sites [13]. The proposed methodology is based on objective and subjective assessments using an immersive virtual reality system. In order to assess the subjective reactions, regarding to the change of an existing scenario, the steps shown in Figure 2 should be executed comparing ante and post-operam situation at different locations.

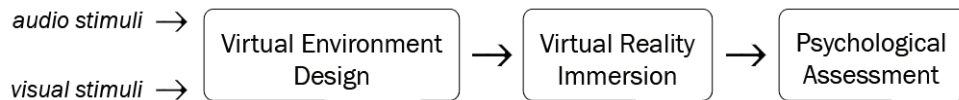


Figure 2. Scheme of IVR approach for multisensory assessment.

2.1 Audio Stimuli

In the design phase of the audio-visual scenarios, each chosen listener location is matched with two audio signals: in situ recording and auralized sound. They represent the ante/post-operam conditions. The in situ recordings are utilized as they are, considering the desired duration and representative time interval. On the other hand, for the post-operam conditions, the audio signals are obtained employing the auralization techniques. Each sound source contribution of the new project obtained according with the auralization tool in different listener location is merged with the in situ recordings of the appropriate position, to represent post-operam scenario (Figure 3).

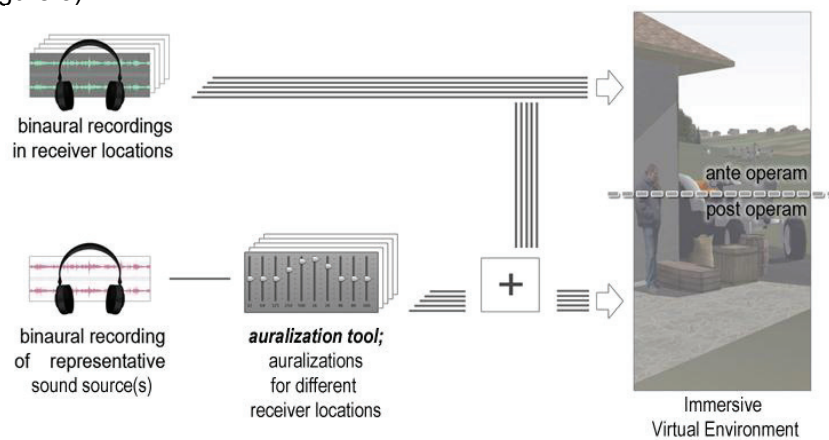


Figure 3. Scheme of the audio stimuli design.

2.2 Visual Stimuli

The visual stimuli are designed in three steps: 3D model by GIS data, texture mapping and IVR enhancement (Figure 4). In the first step a 3D model of the real environment, consisting of the built environment and of the ground, has been created by GIS data and satellite images. In the texture mapping step two series of images are used to be matched to the basic 3D model: in situ taken real photos and rendered images. The photos taken in the surroundings of the specified positions are utilized as they are, to represent the ante-operam conditions.

On the other hand, for the post-operam conditions, the images are obtained employing lighting simulation techniques. Each light source contribution of the new project considered to render post-operam scenario. In the third step, considering the sound sources recorded in situ, dynamic components like cars, people, animals, etc. have been added and programmed to act in line with the virtual reality.

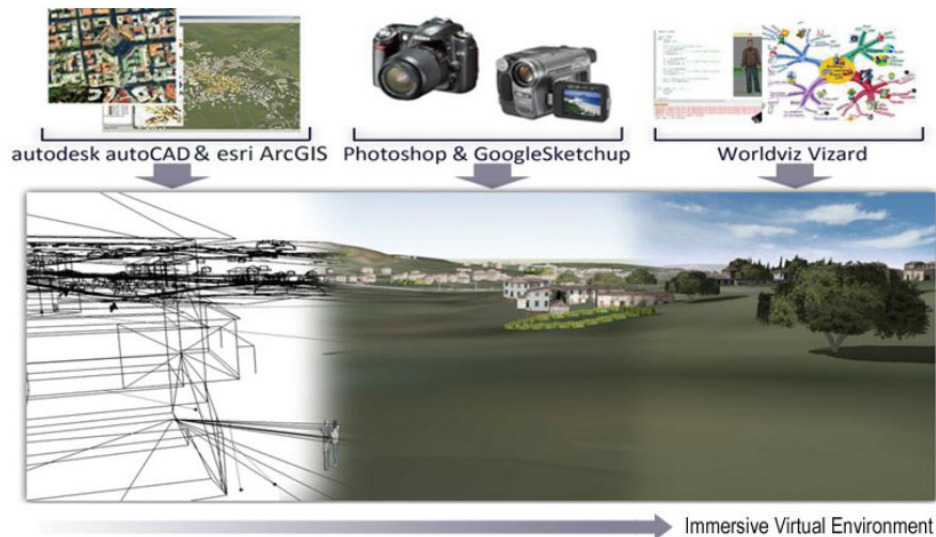


Figure 4. Organization of visual stimuli.

2.3 Virtual Reality Immersion Application

The reproduction of the prepared IVR scenarios can be carried out with an immersive virtual reality system that includes at least a work station linked to the 3-D Virtual Reality Toolkit . The 3D VR toolkit should be composed of the following devices: Head mounted display unit, two position trackers, equipped with high precision orientation sensors, one precise position tracker and earphones.

The audio reproduction system must be tested and calibrated with a dummy head, to get the accurate levels of audio stimuli.



Figure 5. Mobile IVR lab of Ri.A.S., Second University of Naples. (lab. in construction)

2.4 Psychological Assessment

In this phase according to the target of the study, the test subjects must be chosen in order to evaluate psychological reactions of general public. The subjects should well represent the variety of the local population.

Participants to test must perform a training session before the test starts. The degree of annoyance is evaluated with verbal and numerical rating scale. To analyze self-report ratings of annoyance, an ANOVA analysis is suggested [14].



Figure 6. Test phase of psychological assessment.

3. CASE STUDY: TRIANA – CALLE SAN JACINTO

Triana is a neighborhood in the city of Seville, Spain, across the river Guadalquivir from the center, and in fact the majority, of the city. The most common route of access to Triana, from the city center, is through the bridge of Isabel II. The bridge leads to the calle San Jacinto which is a vibrant street of the Triana neighborhood.

3.1 Analysis on Study Area

Several exploratory surveys have been carried out at different times of the day, in order to reveal the daily life dynamics as well as the built environment. During these surveys special attention paid to reveal pedestrian/traffic flow and identification of noise and light sources.

To build-up the simulation, several soundwalks carried out in study area. Binaural audio signals (16 bit/44.1 kHz) were recorded with a portable two-channel device "M-Audio Microtrack 24/96" and with binaural headphones "Sennheiser Noise Gard HDC 451". Photo and video acquisition were carried out in situ at the same time.



Figure 7. Scenes from calle San Jacinto.

After the exploratory surveys a representative part of the street was chosen to be studied. The chosen part is a 150 meters long pedestrian area.

3.2 Elaborating and Determining Future Scenarios for the Area

With the increasing public awareness on environment and sustainability of cities, governmental bodies are much more concerned about improving legal regulations to reduce pollutants and increase quality of life. Recently the General Directorate of Climate Change and Urban Environment, Andalusia, studied on noise and light pollution to introduce new regulations

[15][16][17]. Due to these efforts and new regulations, in near future it is expected to have better practices in urban environments.

In this study it is aimed to present possible changes in urban environment in accordance with new regulations to the public via IVR simulations and get their appraisal. In this way public information can be carried a step forward at which the public can proactively experience and evaluate the regulatory measures. Moreover the involved population can provide assistance to the administration with their appraisal on these measures experienced and be closely involved in improvement process of urban decisions.

For this purpose the future scenarios are prepared focusing on lighting design, lamp and luminaire types in accordance with the new decree 357/2010 on night-sky protection and also soundscape characteristics that meet regulatory measures. Two different types of light; LED and sodium-vapor, and a generic modern street lamp type with plane diffusor were chosen to simulate possible future scenarios with corresponding binaural audio stimuli. It is aimed to get public appraisal on the urban environment after the implementation of LED light which emits a white light with a certain wavelength unfavourable for the environment and people's health, compared to a sodium vapor lamp recommended by the new legislation.

The final simulation is decided to include 3 scenarios; daylight, sodium-vapor lighting and LED lighting, all accompanied with corresponding binaural soundwalk recordings.

3.3 Preparation of the Audio Visual Simulation

The audio stimuli are prepared extracting representative tracks from the soundwalk recordings. For the daylight scenario a 2 minute long audio stimuli is extracted from the soundwalk 18 February 2011, 14:00. The sodium-vapor lighting scenario has the audio stimuli extracted from the soundwalk 7 March 2011, 21:00. The LED lighting scenario has the audio stimuli extracted from the soundwalk 25 February 2011, 21:00.

The three dimensional model of the study area is prepared and the images acquired in situ are mapped on the 3D model in order to depict existing daylight situation. Other two scenarios with LED and sodium-vapor lighting are simulated with appropriate lighting simulation software and resulting textures are mapped on the 3D model in order to present in final virtual reality simulation. The chosen sodium-vapor light has 70 W power and 100 lm/W efficacy whilst LED light has 42 W power and 80 lm/W luminous efficacy. After that, the prepared visual stimuli are merged with corresponding audio stimuli in virtual reality application and dynamic components (people and cars) are added and programmed to act in a realistic way.



Figure 8. Snapshots of three prepared scenarios.

4. CONCLUSIONS AND FUTURE DIRECTIONS

The prepared simulation demonstrates the possible changes in urban environment due to the new regional regulation on an interactive virtual reality platform. This preliminary study is concluded with a virtual reality simulation which is not a high precision application of the innovative multidimensional assessment approach. Nevertheless it gives a qualitative insight and it is promising for further studies that support public and technical understanding and awareness of regional legislation of Andalusia in terms of resources and possible solutions on noise and light pollution.

The General Directorate of Climate Change and Urban Environment of Andalusia has been one of the first governmental bodies that consider such an innovative approach to evaluate urban environments that facilitates public information and participation obtaining public opinion to improve regulatory and decision making processes. The preliminary study should be improved in order to obtain greater precision and realism in virtual reality simulations so it can be a very useful tool for local administrations to involve public in urban decision making processes.

5. REFERENCES

- [1] K. Al-Kodmany, "Using visualization techniques for enhancing public participation in planning and design: process, implementation, and evaluation," *Landscape and Urban Planning*, vol. 45, no. 1, pp. 37 - 45, 1999.
- [2] "Aarhus Convention on Access to Information, Public Participation in Decision-making and Access to Justice in Environmental Matters," 38 *I.L.M.* 517, Jun. 1998. (entered into force Oct. 30, 2001)
- [3] B. Schulte-Fortkamp, "The tuning of noise pollution with respect to the expertise of people's mind," in *39th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering - Inter Noise 2010*, Lisbon, Portugal, 2010.
- [4] P. Lercher, B. De Greve, D. Botteldooren, and J. Rüdisser, "A comparison of regional noise-annoyance-curves in alpine areas with the European standard curves," in *Proceedings of the 9th Congress of the International Commission on the Biological Effects of Noise - ICBEN 2008*, Foxwoods, CT, USA, 2008.
- [5] E. Murphy, H. J. Rice, and C. Meskell, "Environmental noise prediction, noise mapping and GIS integration: the case of inner Dublin, Ireland," in *8th International Symposium Transport Noise and Vibration*, St. Petersburg, Russia, 2006.
- [6] F. Pilla and H. Rice, "Exploring Environmental Noise in a Virtual 3D World," in *19th International Congress on Acoustics (ICA)*, Madrid, Spain, 2007.
- [7] V. K. Kurakula and M. Kuffer, "3D Noise Modeling for Urban Environmental Planning and Management," in *CORP-Competence Center of Urban and Regional Planning 2008*, Vienna, Austria, 2008.
- [8] C.-wing Law, C.-kwan Lee, and M. K. Tai, "Visualization of Complex Noise Environment by Virtual Reality Technologies," 2006. [Online]. Available: http://www.science.gov.hk/paper/EPD_CWLaw.pdf. [Accessed: 03-Nov-2011].
- [9] C.-wing Law, C.-kwan Lee, A. S.-wai Lui, M. K.-leung Yeung, and K.-che Lam, "Advancement of three-dimensional noise mapping in Hong Kong," *Applied Acoustics*, vol. 72, no. 8, pp. 534-543, Jul. 2011.
- [10] P. McDonald, H. Rice, and S. Dobbyn, "The Sound of the City: Auralisation of Community Noise Data," in *38th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering - Inter Noise 2009*, Ottawa, Canada, 2009.
- [11] L. Maffei, S. Iachini, M. Di Gabriele, S. Basturk, and G. Ruggiero, "New Audio-Visual Approach For Environmental Noise Assessment," in *39th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering - Inter Noise 2010*, Lisbon, Portugal, 2010, p. 252.
- [12] L. Maffei, M. Masullo, and S. Basturk, "Potentialities of the Immersive Virtual Reality In Environmental Noise Annoyance Studies," in *TecniAcustica 2011*, Caceres, Spain, 2011.
- [13] L. Maffei, M. Masullo, and S. Basturk, "New Tools for the Noise Annoyance Assessment of Projects," in *2nd UNTREF International Congress on Acoustics*, Buenos Aires, Argentina, 2010.

- [14] F. Ruotolo, T. Iachini, L. Maffei, S. Basturk, and M. Di Gabriele, "Subjective and objective psychological measures of environmental noise assessment", in *1st European Congress on Sound and Vibration - EAA EuroRegio 2010*, Ljubljana, Slovenia, 2010.
- [15] Á. Ranea Palma and F. Perea Pérez, "Respuesta Normativa De Andalucía Y Sus Novedades En Materia De Contaminación Acústica," in *TecniAcustica 2011*, Caceres, Spain, 2011.
- [16] Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, "Decreto 357/2010 , de 3 de Agosto, por el que se aprueba el Reglamento para la protección de la calidad del cielo nocturno frente a la contaminación lumínica y el establecimiento de medidas de ahorro y eficiencia energética," 2010.
- [17] Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, R. San Martín Páramo, and M. García Gil, "Guía Técnica de Aplicación del Decreto 357/2010, de 3 de Agosto, por el que se aprueba el Reglamento para la protección de la calidad del cielo nocturno frente a la contaminación lumínica y el establecimiento de medidas de ahorro y eficiencia energética," Seville, Spain, Apr. 2011.



SIMULACIÓN ACÚSTICA DE LA IGLESIA DE SANTA ANA DE MORATALAZ

Reference PACS: 43.55.Gx; 43.55.Ka; 43.58.Ta

Bueno, Ana; León, Ángel Luís; Galindo, Miguel¹

*Universidad de Sevilla, Dpto. de Construcciones Arquitectónicas I ¹Dpto. Física Aplicada II, ETS
Arquitectura, IUACC.*

Avda. Reina Mercedes 2, 41012 Sevilla –SPAIN.

Tel.: + 34 954556595. Fax: +34 954557018. ¹Tel. + 34 954556672. Fax: +34 954557892.

anabueno@us.es, leonr@us.es, mgalindo@us.es

ABSTRACT

The church of Santa Ana in Moratalaz, Madrid (1965-1971), designed by architect Miguel Fisac, is a place of worship in which acoustics played an important role in shaping the spatiality of the temple. This paper presents the results of the simulation of the sound field of this enclosure using the software CATT-Acoustics, the virtual model calibration based on the impulse responses, obtained from acoustic measurements made in situ, and the correspondence between the measured and simulated parameters.

RESUMEN

La iglesia de Santa Ana de Moratalaz de Madrid (1965-1971), proyectada por el arquitecto Miguel Fisac, es un espacio de culto en el que la acústica fue uno de los elementos configuradores de la espacialidad del templo. En este trabajo se presentan los resultados de la simulación del campo sonoro de este recinto utilizando el programa informático CATT-Acoustics, la calibración del modelo virtual a partir de las respuestas al impulso obtenidas en la medición acústica realizada in situ, y la correspondencia entre los parámetros medidos y los simulados.

INTRODUCCIÓN. DESCRIPCIÓN DE LA IGLESIA

La iglesia parroquial de Santa Ana (1965-1971) del barrio madrileño de Moratalaz (Figuras 1-5), fue el primer templo que el arquitecto Miguel Fisac proyectó conforme a las directrices litúrgicas marcadas por el Concilio Vaticano II. El fomento de la participación plena y activa de los fieles, el carácter simbólico de las celebraciones y la importancia de la palabra y la predicación, constituyeron aspectos principales de la reforma litúrgica marcada por este concilio, y que Miguel Fisac contempló en su arquitectura eclesial postconciliar. En este contexto, donde los fieles deben escuchar y entender el acto litúrgico, el arquitecto Miguel Fisac se plantea, desde este momento, el problema acústico como una constante a tratar y resolver en su arquitectura religiosa.

La iglesia de Santa Ana presenta una ordenación en planta con forma de ovalo, para conseguir una eficaz agrupación de la asamblea en torno al presbiterio, pues el arquitecto pensaba que esta era la forma que esa misma asamblea tomaría, alrededor de una serie de focos, si se encontrara en un espacio libre. Como la *acústica ha sido el elemento configurador en el aspecto del templo* [1] y el problema del sonido constituyó una de las preocupaciones de su autor, Fisac dispuso en la cara posterior del óvalo unas superficies convexas, que él llamó *muros dispersivos*, cuya misión era evitar concentraciones acústicas que perturbaran la audición.

La razón de ser del muro que conforma el presbiterio, surge por la adecuación del mismo a los distintos momentos de la celebración litúrgica, que Fisac materializa y distribuye apoyándose en tres concavidades practicadas en dicho muro. En la primera concavidad se estableció el lugar para el ambón y la sede (liturgia de la palabra), en la segunda el altar (para la Consagración y Comunión) y la reserva del Santísimo Sacramento en la tercera concavidad.

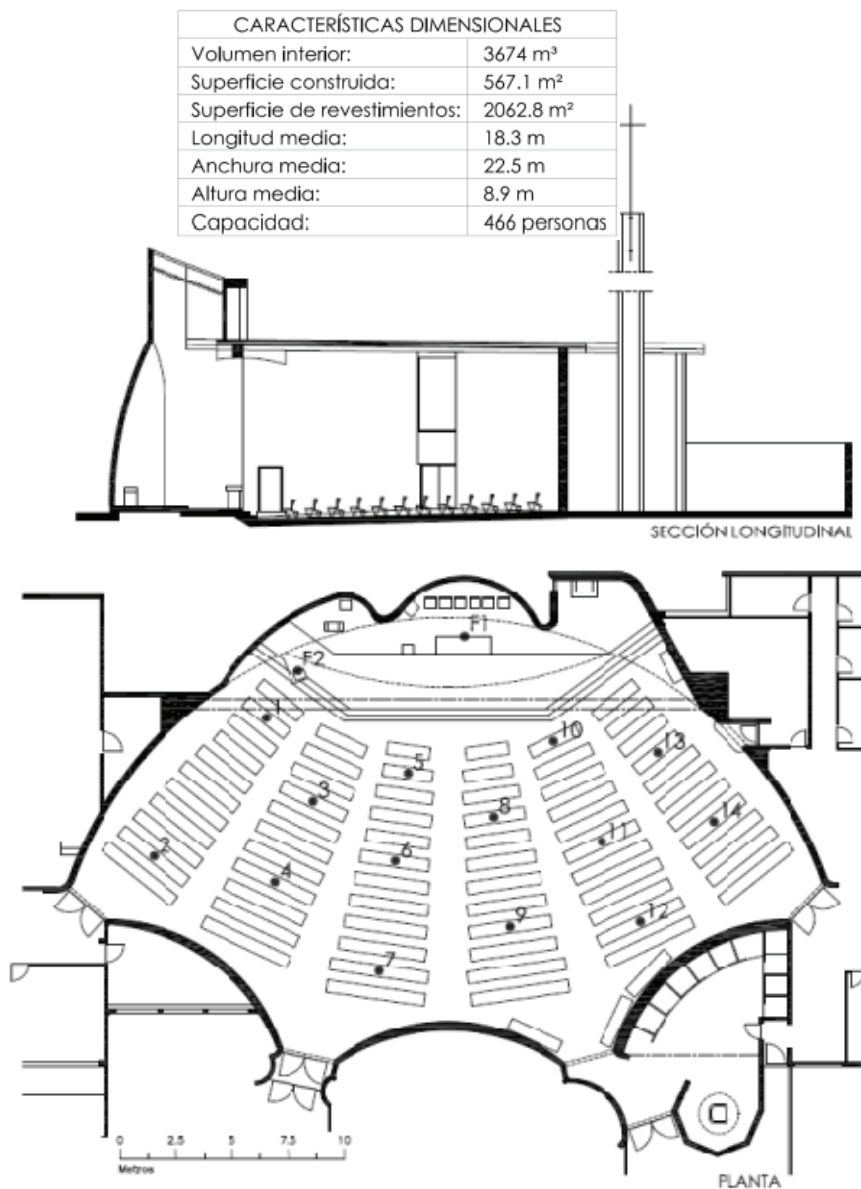


Figura 1. Sección longitudinal y planta: posiciones de fuentes y receptores.

En la iglesia, al igual que la totalidad del conjunto parroquial, el material empleado es el hormigón visto, ejecutado in situ en todos los paramentos verticales. La cubierta se resuelve mediante vigas hueso de hormigón prefabricado visto, según patente del arquitecto, dispuestas en la nave paralelamente al eje longitudinal que une el presbiterio y muros dispersivos. La cubierta, de piezas prefabricadas apoyada en los muros de carga perimetrales del templo, se interrumpe al llegar al presbiterio para dar lugar a un gran lucernario que se eleva en altura. El mobiliario principal lo constituyen los bancos de madera, agrupados en seis franjas dispuestas en forma de abanico.



Figura 2. Presbiterio.



Figura 3. Muros dispersivos.



Figura 4. Lucernario sobre el presbiterio.



Figura 5. Lucernario y vigas hueso.

MEDICIÓN ACÚSTICA *IN SITU*

Las medidas se llevaron a cabo siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE-EN-ISO 3382-1 [2] con la iglesia desocupada de fieles. Se utilizaron dos posiciones de fuente situadas a 1.5 m sobre el nivel del suelo, que corresponden a las ubicaciones naturales del oficiante (ver Figura 1). La primera situada en el altar y la segunda sobre el ambón. Los catorce puntos de recepción se situaron sobre la zona de bancos utilizados por los fieles a 1.2 m sobre el nivel del suelo. Se monitorizaron las condiciones ambientales durante el periodo de medida. La temperatura se mantuvo en torno a los 30°C y la humedad relativa alrededor del 22%. El espectro del ruido de fondo se registró promediando durante cuatro minutos en el punto 6, que dio lugar a un índice NR de 30.

En cada punto de recepción se obtuvieron las respuestas al impulso (RI) obtenidas a partir de barridos de señales de onda sinusoidales, donde la frecuencia se incrementa exponencialmente con el tiempo. El rango de frecuencias se ajustó para cubrir las bandas de octava desde 63 a 16000 Hz, así como la duración del barrido, para conseguir relaciones señal-ruido mayores de 45 dB. A partir de estas RI se derivan los valores de los parámetros acústicos.

El proceso de generación, adquisición y análisis de la señal se llevó a cabo con el programa WinMLS2004 mediante una tarjeta de sonido VX Pocket v2 de Digigram. La señal generada alimenta al amplificador de potencia INTER-M 1000 y se reproduce en el recinto por una fuente omnidireccional AVM DO-12. La respuesta al impulso se captura por varios tipos de micrófono.

Para las RI recurrimos a un micrófono multipatrón Audio-Technica AT4050/CM5 en su configuración omnidireccional conectado a la fuente de polarización ARTcessories. Para la

obtención de parámetros relacionados con la anchura percibida de la fuente y la envolvente del oyente se utilizó el micrófono multipatrón en su configuración omnidireccional y de figura de ocho. Con objeto de medir parámetros relacionados con la impresión espacial se empleó el simulador de torso HMS III de Head Acoustics junto con el acondicionador de señal OPUS de 01dB. Con el registro del espectro del ruido de fondo y la inteligibilidad de la palabra, se empleó un micrófono omnidireccional B&K 4165 con preamplificador B&K 2669, junto con un acondicionador de señal OPUS de 01dB. Cuando se estima la inteligibilidad mediante el índice RASTI, se usó una fuente de construcción propia que simula el patrón de directividad de la cabeza humana. Además se ajustó la señal al nivel estándar de la voz humana, que corresponde con 67 dB(A) a un metro de la fuente. El nivel de emisión de la fuente se fijaba utilizando un sonómetro integrador B&K 2231.

SOFTWARE EMPLEADO PARA LA SIMULACIÓN DEL CAMPO SONORO

Se elaboró un modelo tridimensional, que reproducía el interior de la iglesia desde el punto de vista geométrico, empleando un programa informático de CAD. Posteriormente, se efectuó la exportación de la geometría levantada al programa de simulación acústico *CATT-Acoustic* v8.0k, en el cual se asignan los coeficientes de absorción y dispersión acústica a las distintas superficies interiores que revisten interiormente la iglesia. También se definen las posiciones de fuentes, sus niveles de emisión y directividades así como las ubicaciones de los receptores, de forma que las distancias emisor-receptor no superen en más de 20 cm las determinadas a partir de las respuestas al impulso medidas. Por último se incorporan las condiciones de temperatura (30°C), humedad relativa (22%) y densidad del aire (1.15 kg/m³). El modelo del recinto, con un volumen de 3.674 m³, estaba compuesto por un total de 257 planos, que constituyen una superficie de revestimientos de 2063 m³.

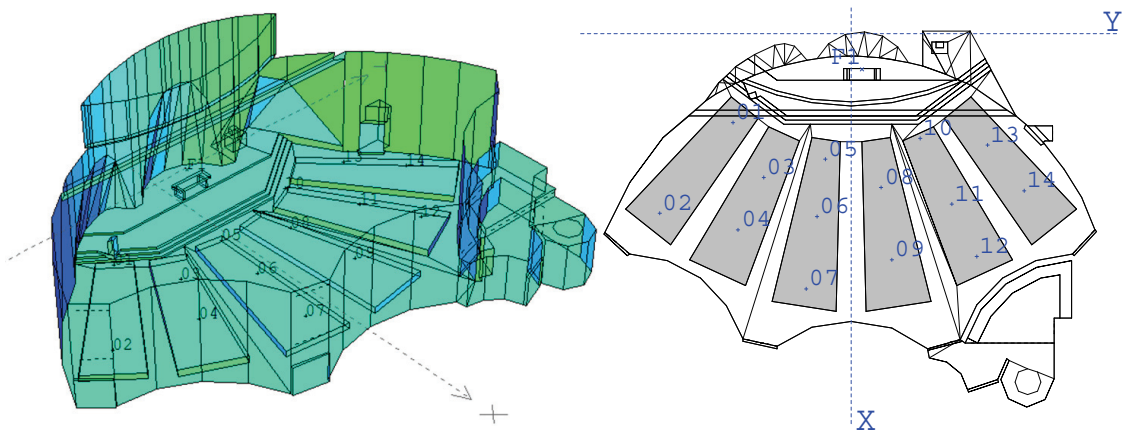


Figura 6. Modelo tridimensional de la iglesia de Santa Ana de Moratalaz.

Para el cálculo de la simulación del campo sonoro se ha empleado un nuevo *software* desarrollado por *CATT-Acoustic: The Universal Cone-Tracer CATT TUCT* v1.0f. Se trata de un nuevo motor de cálculo para la simulación acústica y auralización de recintos, integrado con *CATT-Acoustic*, que no dispone de herramientas para la realización de los modelos geométricos de los espacios a analizar, o para modificar las propiedades acústicas de las superficies que lo forman, por lo que necesita de *CATT-Acoustic* para la realización de las fases previas a la simulación, anteriormente descritas.

En el algoritmo usado el sonido directo y las reflexiones especulares de primer orden son siempre tratados de un modo determinista, no haciéndose necesario el uso de técnicas de trazado de rayos. Idéntico tratamiento reciben las reflexiones difusas de primer orden, para lo cual se introduce como novedad un proceso aleatorio de división de rayos (*random split-up*). El sonido reflejado de manera difusa es estudiado en función de la frecuencia.

Otra de las características novedosas incluidas en TUCT es la eliminación de cualquier tipo de recreación idealizada de la cola reverberante en la última parte del ecograma. La contrapartida

es la necesidad de considerar un mayor número de conos para asegurar la precisión suficiente en la respuesta al impulso que exige su uso en auralización.

Las condiciones para el cálculo de la simulación realizada con *CATT TUCT v1.0f* fueron las siguientes:

- Algoritmo de cálculo: 2, cálculo completo, auralización detallada.
- Número de rayos/conos: 30.000
- Ecograma / respuesta al impulso: 6 s
- Absorción del aire: activada
- Tiempo de cálculo: 35 horas, 11 minutos

CALIBRACIÓN DEL MODELO

El objetivo de esta fase es conseguir un modelo tridimensional con un comportamiento acústico lo más parecido al que posee realmente el espacio eclesial y cuyas características acústicas, fueron determinadas con las mediciones realizadas *in situ*. Para ello, en el modelo se modifican los coeficientes de absorción y difusión de los materiales con más incertidumbre, para ajustar el tiempo de reverberación estimado en dicho modelo, con los valores medidos *in situ* para las distintas bandas de octava. Como criterio válido de calibración [3], se estima que la coincidencia es adecuada si difieren menos del umbral perceptible *Just Noticeable Difference* (JND) que corresponde a un 5% de los valores medidos.

Resulta de utilidad, para este objetivo, la estimación interactiva del tiempo de reverberación (*Interactive RT Estimate*), una acción que se precisa, principalmente en las primeras etapas del proyecto, de cara a la asignación de las propiedades acústicas de las superficies.

Este ajuste del tiempo de reverberación se ha realizado empleado el motor de cálculo *CATT TUCT v1.0f*, hasta obtener la calibración del mismo a partir de los valores del tiempo de reverberación medidos *in situ* (T_{30}), en la hipótesis vacía de fieles y con la fuente en posición 1, coincidente con el altar.

En la Tabla 1 se muestran los coeficientes de absorción y difusión sonora de los materiales de revestimiento existentes en el recinto eclesial. En ella se destacan los materiales que han sido ajustados para la calibración del tiempo de reverberación T_{30} .

Para los coeficientes de absorción se han escogido los valores suministrados por la literatura [4], [5]. En los tres materiales ajustados, los valores del coeficiente de absorción para las frecuencias medias y altas también corresponden con los internacionalmente establecidos, mientras que es en las bajas frecuencias donde se ha realizado el ajuste. Este hecho es debido al comportamiento en frecuencia del tiempo de reverberación medido (Figura 7). El techo de la iglesia, formado por las vigas hueso de hormigón prefabricado, que salvan una gran luz, hace que este se comporte a modo de resonador, aumentando la absorción a bajas frecuencias. De igual forma podemos pensar en el caso del lucernario, con lamas de aluminio anodizado, y las vidrieras que constituyen grandes superficies con capacidad de vibración. Es por ello que los valores del coeficiente de absorción a bajas frecuencias de estos elementos se han aumentado, especialmente en la banda de octava de 125 Hz.

No obstante, junto a este hecho, se realizó, previamente, una primera estimación del coeficiente de absorción atendiendo a la superficie real de los materiales ajustados. Es reconocido [6], que simular como una superficie recta, una superficie con irregularidades debe afectar no sólo al coeficiente de dispersión sino también al de absorción. Es por tanto el efecto combinado de resonador y las irregularidades de las superficies el que nos llevó a la estimación de los coeficientes de absorción presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Coeficientes de absorción sonora (α arriba) y coeficientes de difusión sonora (s abajo) de los materiales existentes en el recinto eclesial (%)

MATERIAL	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
TERRAZO, GRANITO	1	1	1	1	2	2
HORMIGÓN VISTO	10	10	10	10	10	10
VIGAS HUESO DE HORMIGÓN*	16	6	2.8	2.8	2.8	2.8
LUCERNARIO*	34	15	4	3	2	2
VIDRIERAS*	24	10	4	3	2	2
PUERTA MADERA	14	10	6	8	10	10
TELA	3	4	11	17	24	35
BANCO MADERA VACÍO	16	18	16	16	17	7
BANCO MADERA OCUPADO**	30	40	50	60	70	80

* Materiales calibrados.

** Banco ocupado al 100% (suponemos 2 personas/m2).

Para los coeficientes de dispersión se ha admitido un valor por defecto del 10% en todas las bandas de octava analizadas, para el caso de los bancos de madera vacíos/ocupados se han escogido los valores de [3] y [5] respectivamente. Para el lucernario y el techo de vigas hueso de hormigón armado los valores se han estimado a partir del tamaño de las irregularidades.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados de algunos parámetros acústicos obtenidos mediante la simulación y se contrastan con los obtenidos a partir de las RI medidas *in situ* en el recinto.

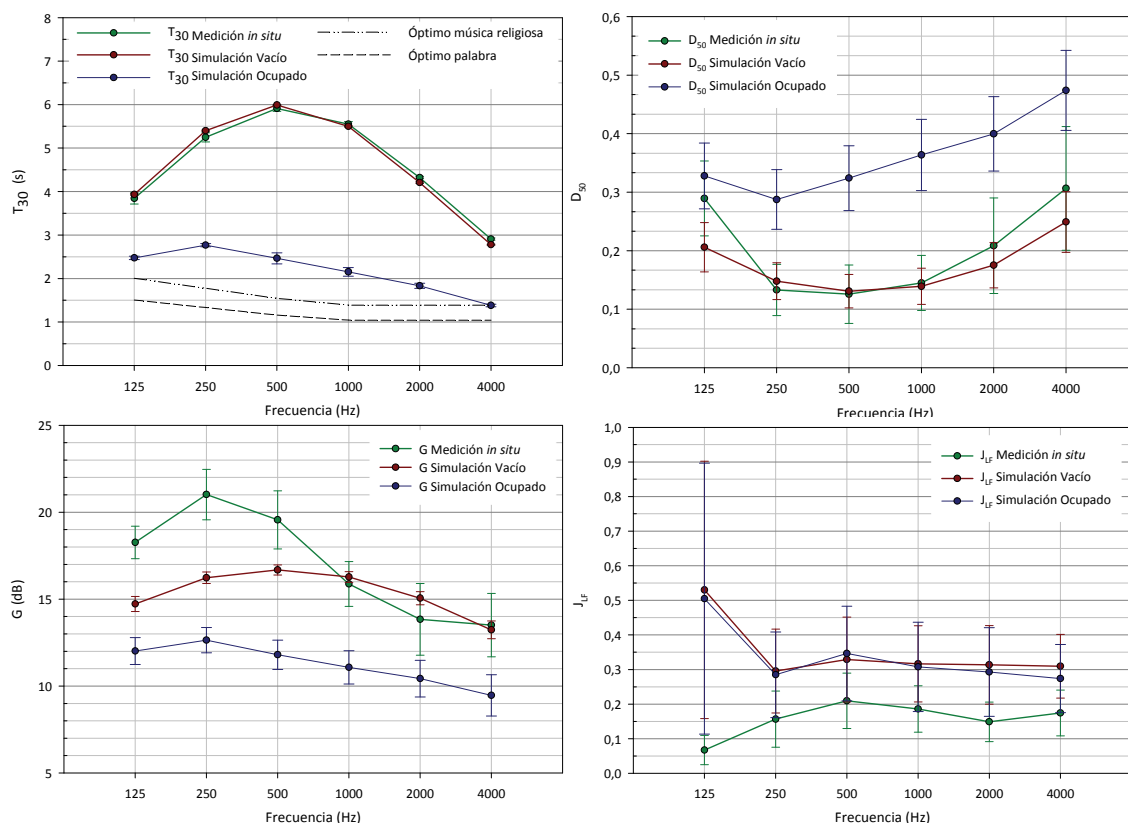


Figura 7. Comportamiento en frecuencia de algunos parámetros acústicos promediados espacialmente, correspondientes a la medición *in situ*, Simulación Estado Actual Vacío y Ocupado (Fuente 1).

En la Figura 7 se presentan los valores de los parámetros acústicos que proporcionarán información sobre los aspectos subjetivos de reverberación (tiempo de reverberación, T_{30}), inteligibilidad de la palabra (definición, D_{50}), nivel sonoro subjetivo (fuerza acústica, G) e impresión espacial mediante el ancho aparente de la fuente (energía lateral precoz, J_{LF}). Con objeto de dar una visión del comportamiento espacial, también aparecen representados las desviaciones estándar.

Los resultados de los parámetros calculados en la simulación acústica, relacionados con la sensación de reverberación, inteligibilidad de la palabra, claridad musical y nitidez del sonido son muy afines a los obtenidos en las medidas experimentales, a partir de la respuesta al impulso, para todas las bandas de octava estudiadas. Podemos afirmar, por tanto, que el comportamiento acústico del modelo calibrado con el tiempo de reverberación T_{30} , es muy similar al comportamiento acústico real del recinto en su estado original. Este grado de aproximación entre valores medidos y simulados se pone de manifiesto si admitimos los umbrales perceptibles recomendados JND [2] para los valores promediados en frecuencia, y los aceptamos como válidos para cada banda de octava. Existe un consenso [4] que admite que para las simulaciones acústicas se tomen por aceptables diferencias menores de 2 JND. En el caso presentado en la Figura 7, la definición presenta diferencias menores a un JND en todas las frecuencias.

La técnica de trazado de conos (*cone tracing*), en la que se fundamenta el algoritmo de cálculo del *software* de simulación, presenta una limitación en cuanto a precisión, a frecuencias inferiores a $4f_s$, siendo f_s , la frecuencia de Schröder que se define por la ecuación:

$$f_s \approx 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (\text{Hz})$$

donde T (s) es el tiempo de reverberación medio del recinto y V (m³) el volumen del mismo.

En nuestro caso, la frecuencia de Schroeder del recinto original es $f_s = 69$ Hz, con lo que los resultados de las simulaciones serán más fiables para frecuencias superiores a 276 Hz, es decir, para bandas de octava superiores a 500 Hz. Cuando el recinto se encuentra con los bancos de madera totalmente ocupados la frecuencia pasa a ser $f_s = 50$ Hz, lo que permite resultados fiables en la banda de octava de 250 Hz. Esto no implica de los resultados de frecuencias inferiores deben ser rechazados, sino que deben ser tomados con precaución.

Mención especial merece la fuerza sonora de la iglesia, donde se obtienen buenos resultados a partir de los 500 Hz. Es en las bajas frecuencias, las bandas con valores más cuestionables, donde los resultados difieren más allá de 2 JND. Este hecho es debido a que el valor de G se ha estimado a partir de la respuesta al impulso, pues no fue posible realizar una calibración de toda la cadena de medida. Además, el programa toma por defecto como sonido directo toda aportación energética dentro del intervalo de 5ms a partir de la llegada del sonido directo, lo que implica una baja resolución para estas frecuencias implicadas.

Los peores resultados los encontramos con los parámetros relacionados con el ancho aparente de la fuente, la envolvente y la audición binaural, representados aquí únicamente por J_{LF} . Las diferencias superan ligeramente 2 JND en la mayoría de bandas de octava analizadas.

El software de simulación empleado calcula también algunos índices, que no aparecen en los anexos de la citada norma. En la Figura 8 presentamos uno de ellos: el índice de transferencia de la palabra (STI) [7] relacionado con la evaluación de la inteligibilidad de la palabra. Se han representado los valores obtenidos en cada punto de recepción frente a la distancia fuente-receptor, junto con la escala de inteligibilidad subjetiva. Se muestran tanto los valores medidos como los simulados en la configuración desocupada/ocupada. Los resultados de la simulación en la configuración desocupada son muy parecidos a los resultados de la medida experimental, que en su conjunto permitan calificar la inteligibilidad de la sala entre pobre y mala para toda la zona destinada a los fieles. Los resultados son comparables a los obtenidos a partir de la

evaluación de D_{50} . La presencia de los mismos supondría una mejora en la inteligibilidad y un salto cualitativo de la misma a aceptable.

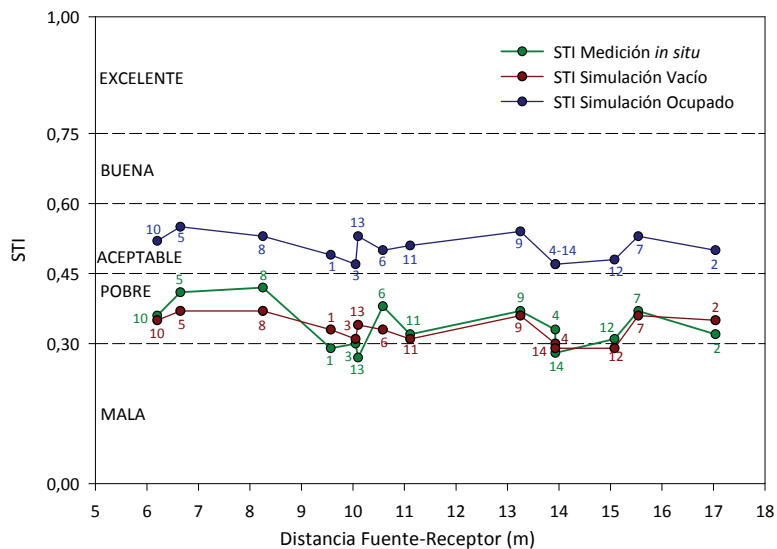


Figura 8. STI frente a la distancia para cada receptor y escala de cualificación de la inteligibilidad.

Por último, destacar, que el comportamiento frente a la distancia, aquí representado únicamente por sus desviaciones estándar, presenta tendencias y valores por punto de recepción muy similares para los parámetros de sala cuando los estimamos con número único, (valores promedio recomendados). De nuevo los valores más dispares, tiene lugar con la sensación subjetiva de la impresión espacial.

CONCLUSIONES

Se ha probado un nuevo motor de cálculo que no utiliza corrección estadística de la cola reverberante, lo que supuso un aumento del tiempo de cálculo considerable para el algoritmo escogido. El recinto utilizado es una iglesia de pequeñas dimensiones y muy reverberante. El modelo se calibra a partir de las respuestas al impulso medidas ajustando los coeficientes de absorción y dispersión menos conocidos para que el tiempo de reverberación simulado no difieran más de un JND respecto del simulado. Los resultados obtenidos son satisfactorios tanto en su comportamiento en frecuencia como en su dispersión espacial. Las mayores discrepancias surgen en aquellos parámetros que describen las sensaciones relacionadas con el ancho aparente de la fuente, la envolvente y la audición binaural.

REFERENCIAS

- [1] Memoria del proyecto recogida en E. Delgado, Santa Ana de Moratalaz, 1965-1971. Miguel Fisac, Colegio de Arquitectos de Almería, (2007).
- [2] UNE-EN-ISO 3382-1:2010: Medición de parámetros acústicos en recintos parte 1 salas de espectáculos. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR 2010.
- [3] M. Galindo, T. Zamarreño, S. Girón, "Acoustic simulations of Mudejar-Gothic churches", J. Acoust. Soc. Am. 126(3), 1207-1218 (2009)
- [4] M. Vorländer, Auralization, Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality. Springer-Verlag, Berlin, 2008.
- [5] T. J. Cox and P. D'Antonio, Acoustic Absorbers and Diffusers. Theory, Design and Application. Spon, London, 2004
- [6] F. Martellotta, "Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome", J. Acoust. Soc. Am. 126(3), 1175-1186 (2009).
- [7] T. Houtgast, H.J.M. Steeneken, "Evaluation of Speech Transmission Channels by Using Artificial Signals" Acustica 25, 355-367, (1971).



ON ABSORPTION AND DIFFUSION COEFFICIENTS IN ACOUSTIC SIMULATION SOFTWARES: EFFECTS ON PARAMETERS

Reference PACS: 43.55 Ev

Cerdá, Salvador¹; Lacatis, Radu²; Segura, Jaume³; Montell, Radha²; Barba, Arturo²; Cibrián, Rosa⁴; Giménez, Alicia²

¹ Departamento Matemática Aplicada, Univ. Politécnica de Valencia (UPV), Camino de Vera s/n Valencia - SPAIN salcerjo@mat.upv.es

² E.T.S.I.Industriales., UPV, Valencia –SPAIN rala1@doctor.upv.es, radmonse@fiv.upv.es, agimenez@fis.upv.es, arturo@arturobarba.com

³ IRTIC - Universitat de València, C/Catedratic Dr José Beltrán, 2 - Paterna, SPAIN jsegura@uv.es

⁴ Facultad de Medicina. Universitat de València, SPAIN rosa.m.cibrian@uv.es

ABSTRACT

The aim of this paper is to show the results provided by ODEON and CATT-Acoustic, two simulation programs, for a very simple model: a cube with all sides with the same absorption and with different diffusion coefficients. Our intend is illustrate the functioning of both programs and show how sometimes, for this simple model, there are important differences in predictions for each one of the programs. These differences could approach the reader to the internal differences of both programs.

RESUMEN

El propósito de este trabajo es mostrar los resultados que proporcionan ODEON y CATT-Acoustic, dos programas de simulación, para un modelo muy simple: un cubo con todas sus paredes con la misma absorción y con diferentes coeficientes de difusión. Nuestro propósito es ilustrar el funcionamiento de ambos programas y mostrar cómo a veces, para este modelo simple, hay importantes diferencias en las predicciones para cada uno de los programas. Estas diferencias podrían aproximar al lector a las diferencias entre ambos programas.

1. INTRODUCCIÓN

Los programas de simulación acústica incluyen la elaboración del modelo geométrico, utilizando un conjunto de superficies, y la asignación de los materiales a cada una de las superficies utilizadas. Esto último se realiza indicando las absorciones por bandas de frecuencia y los coeficientes de difusión. Los coeficientes de difusión se interpretan como el porcentaje de energía que no es especularmente reflejada. La conservación de la energía viene dada por la relación [1]:

$$(1-s) \cdot (1-\alpha) + \alpha + s(1-\alpha) = 1$$

Specular Absorbed Scatterea

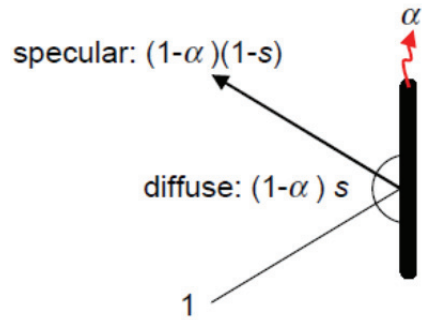


Figura 1. Conservación de la energía en una reflexión.

Desde el First International Round Robin on Room Acoustical Computer Simulations [2], se sabe que aquellos programas que incluyen la difusión son los que producen resultados de confianza. Además, el uso de coeficientes de difusión no es una simple forma de hacer los programas realistas, es también una herramienta que permite al usuario ajustar su modelo a los datos experimentales [3].

En este trabajo se han utilizado dos programas comerciales: CATT-acoustics v.8 y Odeon v10. Aunque ambos programas están basados en el trazado de rayos, su funcionamiento no es el mismo.

CATT-acoustics utiliza algoritmos de trazado de conos [4, 5]. La difusión es dependiente de la frecuencia, realizando trazado para cada octava. El sonido directo y la reflexión especular de primer orden son deterministas (en la figura en líneas continuas).

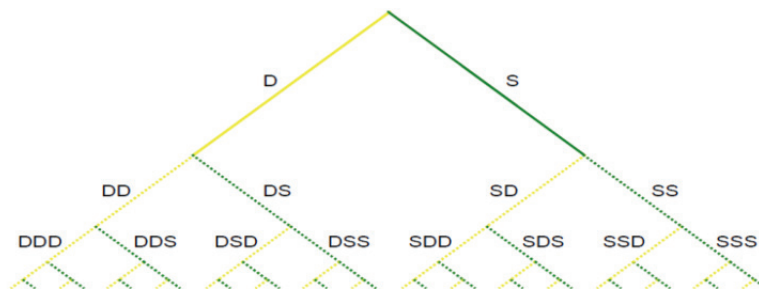


Figura 2. Esquema del algoritmo de CATT-acoustic.

A partir de la segunda reflexión, la reflexión especular y difusa se realiza aleatoriamente. Es decir, si se tiene un coeficiente $s=0.5$, la mitad de los rayos se refleja especularmente y la otra mitad lo hace siguiendo la distribución de Lambert (random ray split-up between diffuse and specular) [5].

Por su parte, Odeon utiliza un algoritmo híbrido [6]. Para las reflexiones tempranas, utiliza una mezcla de modelo de imágenes y trazado de rayos. Para las reflexiones tardías, utiliza un método especial de trazado de rayos con fuentes secundarias que irradian energía desde la superficie de las paredes. El parámetro TO (por defecto 2), es el que determina qué se considera una reflexión temprana o tardía. El programa también especifica el número de rayos que se incluyen como rayos tempranos que son emitidos por las fuentes que encuentra en la reflexión temprana.

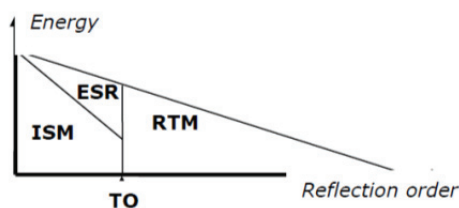


Figura 3. Esquema del algoritmo de ODEON.

Para las reflexiones de orden menor que TO, Odeon determina la fuente imagen y si es visible para la fuente, incluye la consiguiente reflexión en el reflectograma. La atenuación de la misma se realiza teniendo en cuenta absorción, distancia, difusión y absorción del aire. Se continúa con el método de las imágenes hasta el orden TO. Los rayos tardíos, se convierten en fuentes secundarias y se emite un rayo difractado según la distribución de Lambert. La resultante es la suma de los dos rayos con los pesos $1-s$ y s (ver Figura 4).

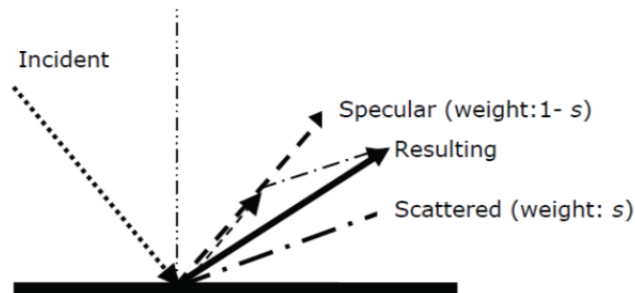


Figura 4. Conservación de la energía en el algoritmo de ODEON.

En resumen, la diferencia entre los dos programas se encuentra en las reflexiones de primer y segundo orden (según TO por defecto). En el caso de CATT (Algoritmo 1), se tratan de forma determinista las de primer orden, mientras que en el caso de ODEON, se utiliza una mezcla del método de las imágenes y el trazado de rayos.

2. OPCIONES POR DEFECTO

En la siguiente figura presentamos la ventana en la que se eligen las opciones que CATT-TUCT ofrece. Para nuestros cálculos hemos utilizado las opciones por defecto: Algoritmo 1, con 0 en la pestaña Max split order. Es decir, el tratamiento de la difusión para todos los rayos reflejados es estocástica. En cuanto al número de rayos hemos utilizado la opción Auto con el tipo Measures. De igual modo hemos seleccionado la opción Auto para la longitud de la respuesta impulsiva. También aparece marcada la opción de considerar la absorción del aire.

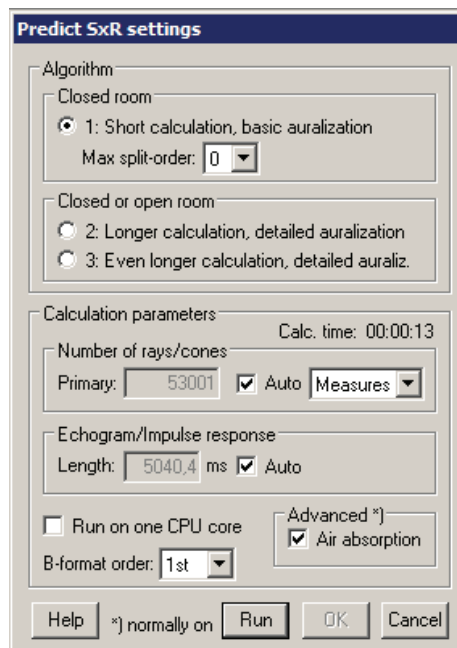


Figura 5. Opciones en CATT-TUCT.

En el caso de ODEON aparecen más opciones. Hemos utilizado las opciones que por defecto proporciona el utilizar el botón de Engineering. Una vez hecho esto, el programa nos pide que

seleccionemos la duración de la Respuesta Impulsiva. Hemos puesto 5000 ms, que es el tiempo que CATT-TUCT utiliza por defecto al seleccionar la opción Auto.

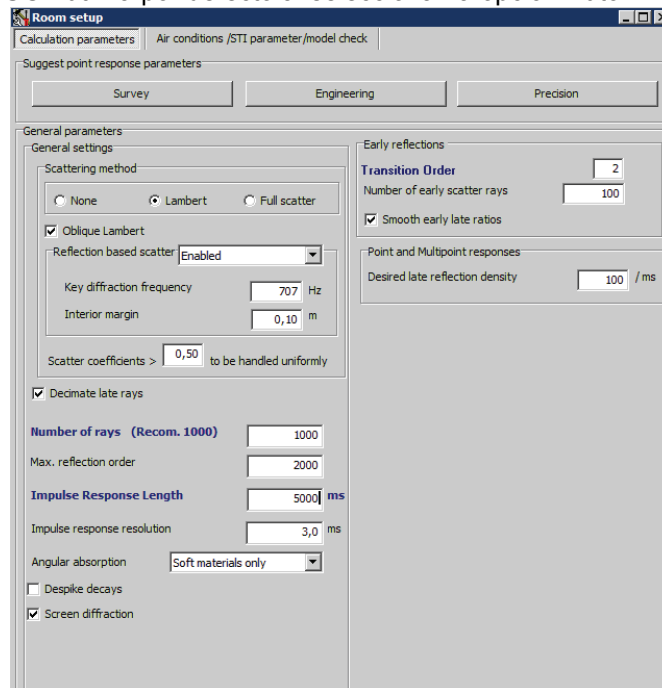


Figura 6. Opciones en ODEON.

3. UNA GEOMETRIA ELEMENTAL: EL CUBO DE 20 M DE ARISTA

Una de las geometrías más simples que se pueden estudiar es el cubo. Siguiendo la intención de los autores de comparar los resultados de ambos programas reduciendo al máximo la complejidad del modelo, hemos optado por utilizar el mismo coeficiente de absorción en todas las paredes y en todas las bandas de frecuencia. Además hemos utilizado el mismo coeficiente de difusión en todas las paredes. Ejemplos similares aparecen en [7], [8]. En este lugar los autores quieren hacer notar que no se pretende entrar a discutir en el funcionamiento de cada uno de los programas. Como hemos dicho con anterioridad, solo pretendemos comparar los resultados que proporcionan ambos programas en este modelo para que sirva de guía a los usuarios de ambos programas.

La comparación de las simulaciones se ha realizado para las siguientes absorciones: 10, 30, 50, 70 y 90. Para cada absorción, se han utilizado los coeficientes de difusión: 0, 20, 40, 60, 80 y 100.

3.1. EFECTO COMBINADO ABSORCIÓN-DIFUSIÓN

En este apartado estudiamos el efecto del coeficiente de difusión en la predicción de diferentes parámetros en cada uno de los programas fijada la absorción. Para ello comparamos los valores de cada parámetro con el valor obtenido para un coeficiente de difusión 0 [7].

En la Figura 7, presentamos los resultados para ODEON. Para poder comparar las diferencias obtenidas en este software, hemos utilizado la misma escala del eje del error. A continuación detallamos los comentarios para cada parámetro:

- EDT: Se observa que para una absorción baja (coeficiente 10), la variación con el coeficiente de difusión no supera 1 jnd. Para absorciones medias (30 y 50), las variaciones son del orden de 2 jnd y se aproximan a 5 jnd. Para absorciones altas, se observan grandes variaciones en el EDT con la difusión.
- RT30: Este parámetro permanece bastante estable con la variación de la difusión para absorciones bajas y medias. Incluso para absorciones altas su variación con la difusión no supera los 5 jnd.

- SPL: permanece estable en todos los casos. (Se ha considerado 1 dB como jnd)
- C80: Se aprecia una tendencia a aumentar su variación con el coeficiente de difusión para absorciones altas.
- D50: Se produce un fenómeno inverso al C80. Cuando las absorciones son bajas hay mayor dependencia con el coeficiente de difusión. La excepción es un coeficiente de difusión de 100 y absorciones muy altas.
- Ts: Ocurre algo similar a lo que ocurre con el D50: con el aumento de la absorción, la dependencia con la difusión es menor.

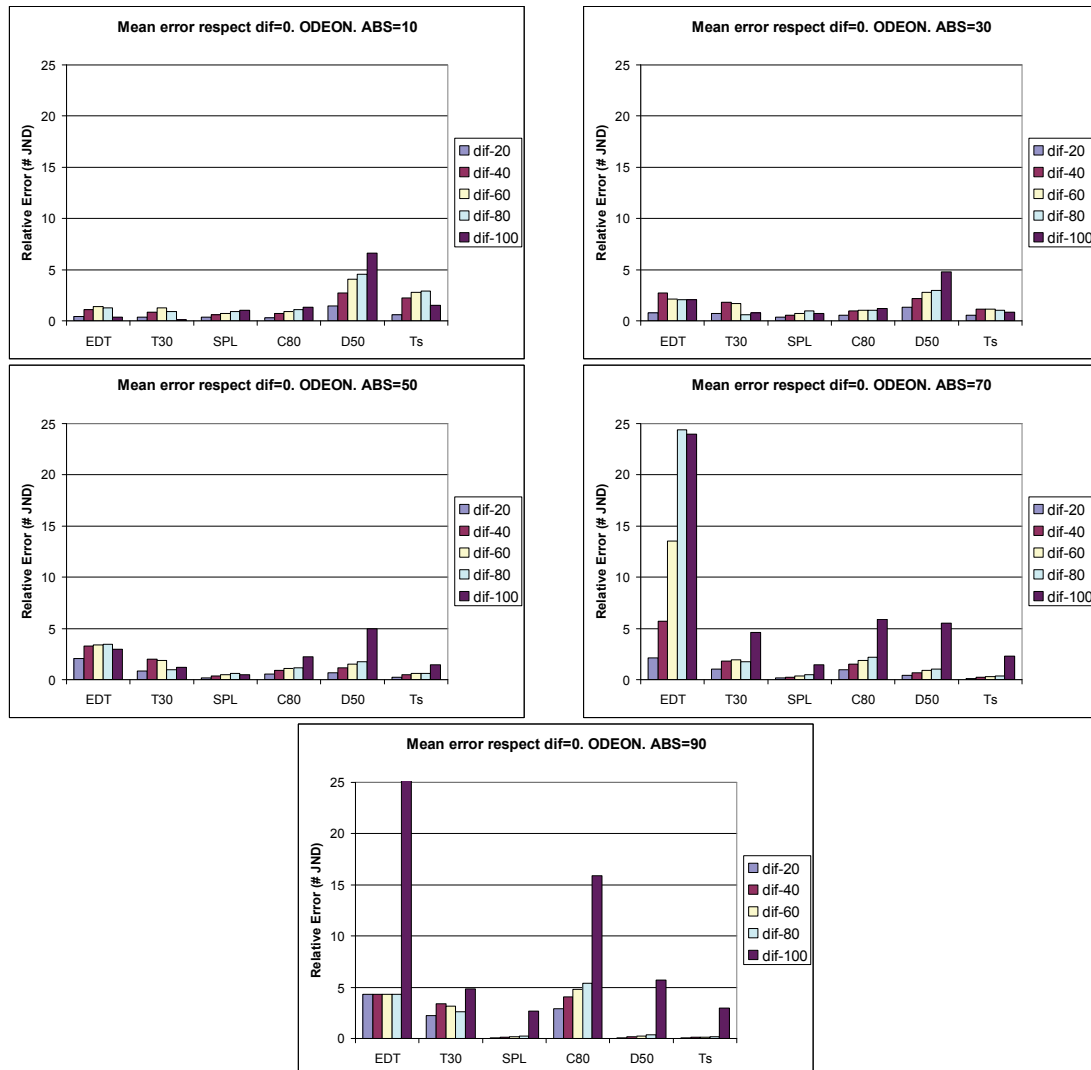


Figura 7. Variación de los parámetros con el coeficiente de difusión para una absorción dada. ODEON.

En la Figura 8, presentamos los resultados para CATT-acoustic. Para poder comparar las diferencias obtenidas en este software, hemos utilizado la misma escala del eje del error. A continuación detallamos los comentarios para cada parámetro:

- EDT: Se observa que para una absorción baja (coeficiente 10), la variación con el coeficiente de difusión no supera 1 jnd. Para absorciones medias (30 y 50), las variaciones se aproximan a 5 jnd. Para absorciones altas, se observan grandes variaciones en el EDT con la difusión.
- RT30: Este parámetro permanece bastante estable con la variación de la difusión para absorciones bajas y medias. Solo en el caso de muy alta absorción su variación con la difusión supera los 5 jnd.
- SPL: Para absorciones bajas hay variaciones del orden de 5 jnd (se ha considerado 1 dB como 1 jnd). A medida que aumenta la absorción disminuye menos con la difusión.

- C80: Se aprecia una ligera tendencia a aumentar su variación con el coeficiente de difusión al aumentar las absorciones. Sin embargo no supera los 5 jnd.
- D50: Para absorción baja y alta no muestra mucha variación con la difusión. Sin embargo para absorciones medias supera los 5 jnd llegando incluso a los 20 jnd.
- Ts: No muestra variaciones superiores a 5 jnd y al aumentar la absorción, la dependencia con la difusión disminuye.

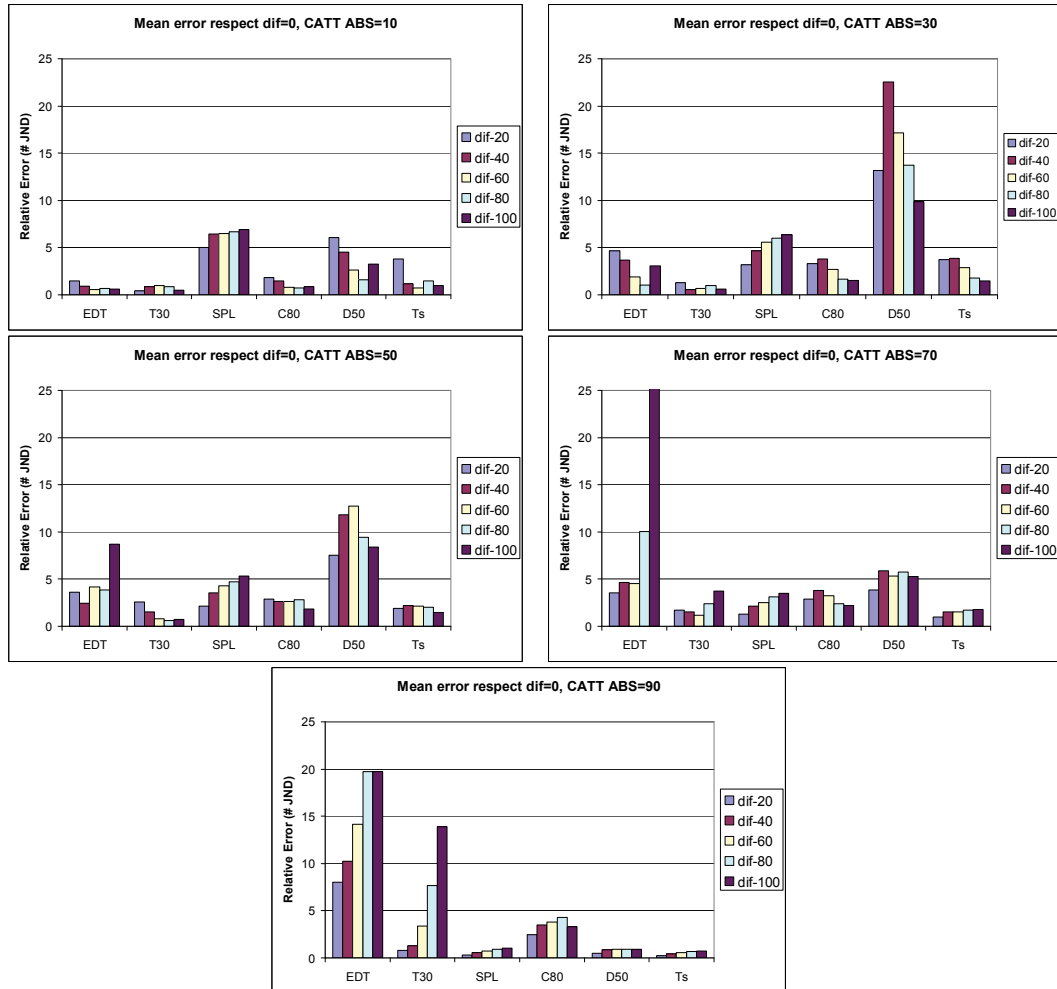


Figura 8. Variación de los parámetros con el coeficiente de difusión para una absorción dada. CATT-acoustic

En las figuras anteriores no hemos incluido el LF por su comportamiento especial. En la Figura 9 mostramos la variación que se produce en ODEON y en CATT-acoustic. Como se aprecia, en el caso de ODEON la dependencia con la difusión sólo es muy importante para la mayor absorción. Sin embargo, en el caso de CATT-acoustic la variación con la difusión es grandísima. Solo para la absorción más pequeña la variación es semejante a la de ODEON. Se explica esto dado que la predicción de LF que proporciona CATT-acoustic con un coeficiente de difusión 0 es un valor del parámetro muy próximo a cero. Lo que conlleva que los errores relativos con respecto a la predicción sin difusión sea tan grande por comportarse como una división por cero.

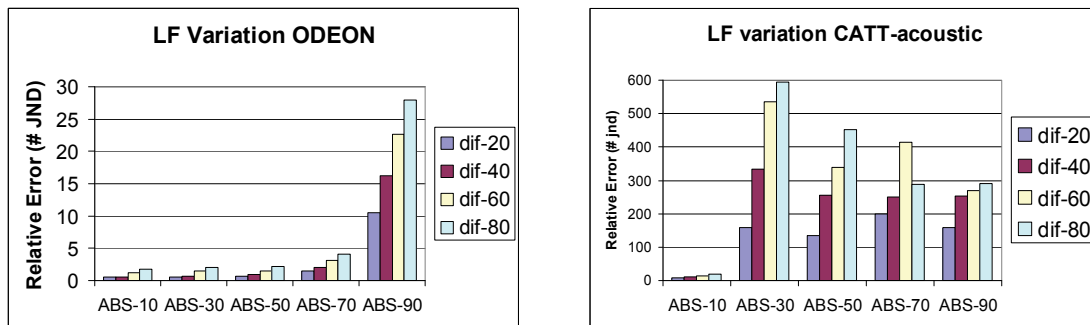


Figura 9. Variación del parámetro LF con el coeficiente de difusión para una absorción dada en ambos programas.

4. CONCLUSIONES

Mediante el estudio de una geometría simple con unas muy particulares características acústicas, hemos mostrado las diferencias que dos programas de simulación ODEON y CATT-acoustic presentan al trabajar con las opciones por defecto. Dado que los algoritmos utilizados por los programas no son los mismos, el hecho de que aparezcan diferencias puede parecer justificado de antemano. La intención de los autores no es discutir sobre las causas de las diferencias ni debatir si alguno de los programas es superior al otro. Con este trabajo queremos hacer hincapié en que existen modelos para los que hay diferencias notables en las predicciones.

Sin poder ser generalizadas a otros modelos, para el caso estudiado se observan los siguientes hechos que exponemos como conclusiones o notas finales:

1. En el caso de ODEON, para difusiones bajas solo D50 muestra variaciones del orden de 5 jnd con la difusión. Para absorciones altas son EDT y C80 quienes muestran variaciones importantes con la difusión.
2. CATT-acoustic, en general, muestra mayor variación de sus predicciones con la difusión para todos los parámetros. Para absorciones bajas, SPL y D50 son los parámetros que muestran mayores variaciones. Como en ODEON, al aumentar la absorción el EDT muestra mayor variación con la difusión.
3. Para el LF hemos visto que ODEON produce predicciones muy estables, salvo para la máxima absorción estudiada. CATT-acoustic solo presenta una predicción estable para la absorción más baja. En las otras absorciones las variaciones son extremas dado que el valor del parámetro LF con difusión 0 está próximo a cero.
4. Existen dos grupos de parámetros que muestran comportamientos antagónicos: EDT, TR30 y C80 aumentan sus diferencias con la difusión al aumentar la absorción. D50 y Ts disminuyen las diferencias con la difusión al aumentar la absorción.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está financiado por fondos FEDER y el Ministerio de Ciencia e Innovación Español, dentro del proyecto BIA2008-05485.

6. REFERENCIAS

- [1] Dalenbäck Bl. "Room acoustic prediction based on a unified treatment of diffuse and specular reflection". *J. Acoust. Soc. Am.* (1996).
- [2] Vorländer M. "International round robin on room acoustical computer simulations". ICA'95 1995:689.
- [3] Bistafa, S. R., and Bradley, J. S. "Predicting reverberation times in a simulated classroom" *J. Acoust. Soc. Am.* 108, 1721–1731. (2000).
- [4] CATT-Acoustic v8g. Room Acoustics Prediction and Walkthrough Auralization. User's Manual. CATT, Mariagatan 16A, 41471 Gothenburg, Sweden. <http://www.catt.se>, 2007.

- [5] TUCT v1.0e. User's Manual. Mariagatan 16A, 41471 Gothenburg, Sweden. <http://www.catt.se>, 2007.
- [6] C. L. Christensen: ODEON room acoustics program, version 10.1. Industrial, Auditorium and Combined Editions, ODEON A/S, c/o Acoustic Technology, Ørsted.DTU, Ørsteds Plads, Technical University of Denmark, Building 352, DK-2800 Lyngby, Denmark. www.odeon.dk, 2009.
- [7] Lily M. Wang, Jonathan Rathsam. "The influence of absorption factors on the sensitivity of a virtual room's sound field to scattering coefficients". *Applied Acoustics* 69 (2008) 1249–1257.
- [8] B.-I. Dalenbäck CATT, Sarah G. Brown. "Characterizing rooms regarding reverberation time prediction and the sensitivity to absorption and scattering coefficient accuracy". ASA Baltimore, April 2010. (<http://www.catt.se/papers.htm>)
- [9] Ingolf Bork. "A comparison of Room simulation software- The 2nd Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation". *Acta Acustica united with Acustica*. Vol. 86 (2000) 943-956.
- [10] Bengt-Inge Dalenbäck. Engineering principles and techniques in room acoustics prediction. Bergen, Norway. BNAM 2010. May 10-12.



RECORDING, SIMULATION AND REPRODUCTION OF SPATIAL SOUNDFIELDS BY PCM SPATIAL SAMPLING

Reference PACS: 43.60.Fg, 43.38.Hz

Farina, Angelo; Binelli, Marco; Capra, Andrea; Campanini, Simone; Amendola, Alberto

*University of Parma, Industrial Eng. Dept.
Parco Area delle Scienze 181/A 43124 Parma- ITALY
farina@unipr.it*

ABSTRACT

A new method for recording the spatial properties of a soundfield, or for generating a synthetic three-dimensional soundfield, is described. The spatial distribution of sound waves passing at a point in space is sampled by means of a number of virtual super-directive microphones, covering almost uniformly the surface of a sphere. This corresponds to a discretization of the spatial information, which is exactly the spatial equivalent of the PCM sampling of a waveform.

Continuing the comparison, traditional High Order Ambisonics can instead be seen as the correspondent of the Fourier transform of a periodic waveform, representing the spatial distribution of sound as the superposition of a number of spatial frequencies (the spherical harmonics). As with waveforms, the PCM model is generally more versatile and less constrained than the corresponding frequency-domain representation. Although some operations are easier in frequency domain, others are easier in the original PCM domain.

When dealing with spatial information, modifications of the sound field, such as rotation, stretching (zooming), and emulating sound effects such as reverb, shielding, etc., are easily performed on the spatial PCM signals, and when the spatial information must be reconstructed, by means of a suitable 3D loudspeaker array, it is possible to derive the speaker feeds employing a proper set of filters (which are, in practice, a "spatial FIR filter").

This paper shows how it is possible to record a 32-channels spatial PCM waveform employing a spherical microphone array, how a corresponding synthetic signal can be generated on a computer by "spatial encoding" of the signals corresponding to virtual sources located in space, and how a suitable matrix of "decoding filters" can be generated for recreating faithfully the original sound field inside a loudspeaker array. In the end, spatial PCM revealed to be a simpler and more general way of capturing, synthesizing, modifying, transmitting and reconstructing a 3D spatial sound field.

1. INTRODUCTION

The first comprehensive method for recording, synthesis, modification and reproduction of a truly three-dimensional sound field was Ambisonics [1], which describes the complete 3D information of the soundfield in a point by means of 4 signal, the sound pressure (W) and the three Cartesian components of the particle velocity (X , Y and Z). The 4-channels signal according to this definition is called "B-format".

However, extracting the complete and detailed spatial information from this B-format stream revealed to be quite hard. The traditional Ambisonics method provides very poor spatial resolution, resulting in "virtual microphone" signals that can replicate the polar pattern of 1st-order microphones (from omni to figure-of-eight, passing through cardioid and hypercardioid).

The spatial reconstruction, obtainable inside loudspeaker rigs, provides very little spatial separation of sound sources, and a lot of sound comes from everywhere.

Recently, more advanced processing methods for B-format signals were presented, such as DIRAC by Ville Pulkki [2], or Harpex-B by Svein Berge [3]. These methods are indeed tricks based on “intelligent steering”, they cannot really retrieve the complete spatial information from such a small number of channels.

The only robust approach relies on the usage of more channels for sampling the spatial information, and so High Order Ambisonics (HOA) was developed, in which the number of spherical harmonics signals employed for encoding the spatial information is much larger.

HOA relies on the similitude among the polar patterns of B-format microphones (spherical and figure of eight) with the shape of the molecular orbitals for electrons around the nucleus of an atom. Here, after the orbitals “s” and “p”, corresponding to the spherical harmonics of order 0 and 1, we have a number of higher-order spherical harmonics: 5 2nd-order harmonics, 7 3rd-order harmonics, 9 4th-order harmonics, and so on.

So, for example, the 3rd order HOA representation of a sound field requires 16 channels, corresponding to all the spherical harmonics signals up to 3rd order.

HOA revealed to work very well for creating synthetic spatial soundfields, for performing manipulations over them (rotation, zooming, etc.) and for replaying them inside loudspeaker rigs [4]. The possibility to employ HOA for recording live sound was very limited, and only in 2010 the Eigenmike™ microphone system was launched on the market. This system does not provide explicitly the HOA signals as output, but the raw signals coming from the 32 capsules can be processed with a software tools, which internally employing 3rd order HOA, for extracting a number of virtual microphones which can provide directivity polar pattern much sharper than those obtained from a 1st-order B-format signal.

Jerome Daniel [5] developed the first complete HOA solution, capable of transforming the raw signals coming from a spherical microphone array into the HOA components up to 4th order, to manipulate them by means of suitable VST plugins, and finally to render the results over a loudspeaker rig.

However, recording high-order signals revealed to be problematic, as the corresponding polar patterns have very complex shape, and it is very difficult that these shapes are accurately obtained. Furthermore, at low frequency the high-order signals exhibit a lot of noise, and at high frequency artefacts due to “spatial aliasing” colour significantly the sound.

2. SPATIAL PCM SAMPLING

We recently developed an alternative technology, which does not rely anymore on spherical harmonics, but instead employs simply a number of highly-directive cardioids, covering almost uniformly the surface of a sphere, for capturing the complete spatial information [6].

In practice, this is equivalent in space, to the representation of a waveform (in time) as a sequence of impulses (PCM, pulse code modulation), instead as the superposition of a number of sinusoids (Fourier transform).

We call this new approach Spatial PCM Sampling (SPS); for implementing it in practice, we start with the signal coming from a spherical microphone array (actually, an Eigenmike™). The signals coming from the 32 capsules are filtered by means of a matrix of 32x32 FIR filters, which synthesize 32 virtual high order cardioids, pointing in the same direction as the 32 capsules. So the Eigenmike is employed as a superdirective beamformer.

The 32 superdirective virtual microphones perform a spatial PCM sampling, as each of them can be thought as having a directivity pattern approximating a “spatial Dirac’s Delta function”.

Figure 1 compares the standard PCM representation of a waveform in time with the “spatial PCM” representation of a directivity balloon in space.

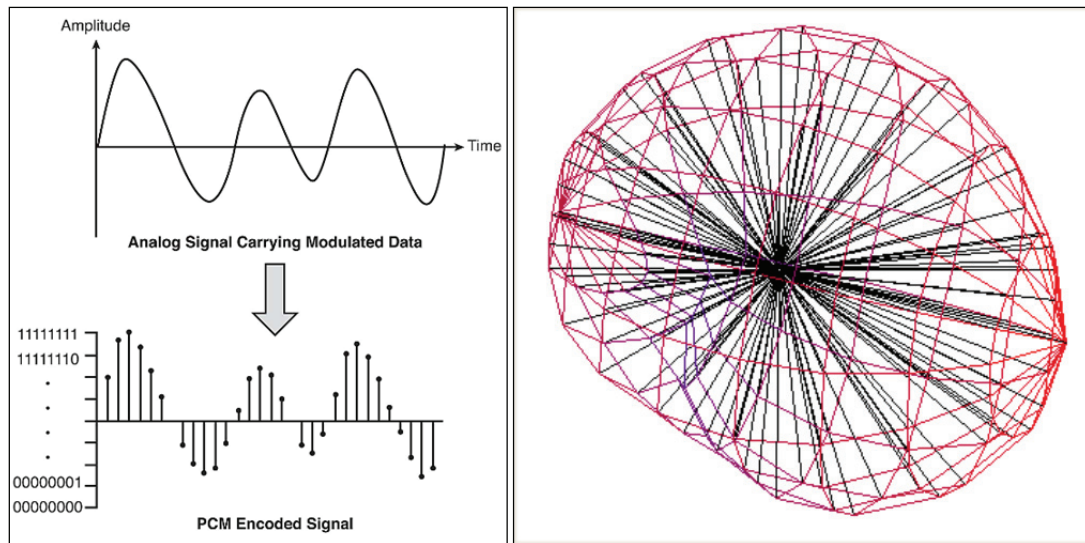


Figure 9: PCM sampling of a waveform in time (left) and of a balloon in space (right)

Figure 2, instead, shows the reconstruction of a waveform (in time domain) or of a spatial directivity balloon buy means of the Fourier principle, that is, the superposition of a number of sinusoids (in time) or of spherical harmonics (in space), each with proper gain.

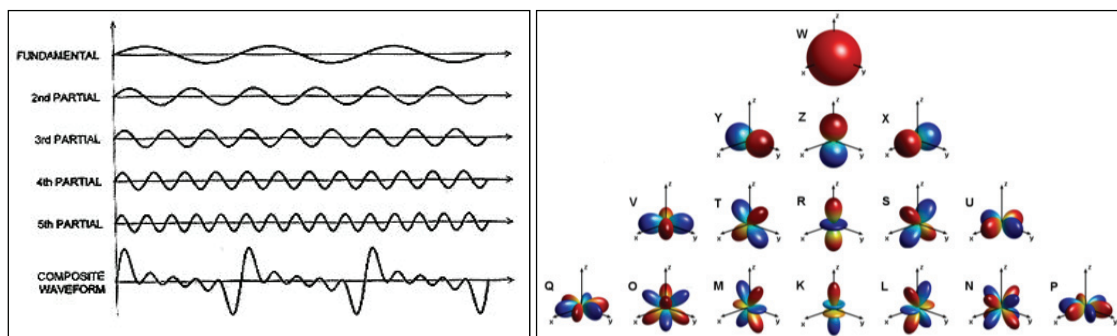


Figure 10: Fourier Analysis (left) and Spherical Harmonics (right)

Once the SPS signals have been obtained (either by recording or by synthesis), it is possible to manipulate them quite easily, performing standard operations such as rotation, stretching, zooming, etc.

Instead of performing these operations in the spherical harmonics domain, we can now perform them directly in the spatial PCM domain: hence, the most general transformation assumes the form of a spatial FIR filter...

Finally, it is possible to employ the SPS signals for deriving the speaker feeds, to be employed in a playback system. As it will be explained at the end of this paper, the math for designing these filters is substantially identical to the math employed for encoding the SPS signals.

We compared side-by-side the usage of the HOA method and of SPS, starting with the same signals captured by a spherical microphone array, and playing back the recording inside our listening room equipped with 16 loudspeakers. SPS outperformed HOA, for his better spatial resolution, wider frequency range and lower noise.

3. 32-CAPSULES SPHERICAL MICROPHONE ARRAY

For realtime recording/broadcasting applications, a new microphone system was recently developed by the RAI Research Center in Turin and by AIDA, a spinoff of the University of

Parma. It is based on a 32-capsules spherical microphone array (Eigenmike™), and a realtime filtering software that is capable to synthesize up to 7 virtual microphones, which can be moved in real-time, and with variable directivity (zooming) capability. The “virtual” microphones, are controlled by mouse/joystick gestures in order to follow actors on the stage in realtime, and to zoom in or out, by changing the sharpness of the directivity pattern. The pattern is chosen among a family of cardioid microphones of various orders, according to this formula:

$$Q_n(\vartheta, \varphi) = [0.5 + 0.5 \cdot \cos(\vartheta) \cdot \cos(\varphi)]^n \quad (1)$$

where n is the directivity order of the microphone.

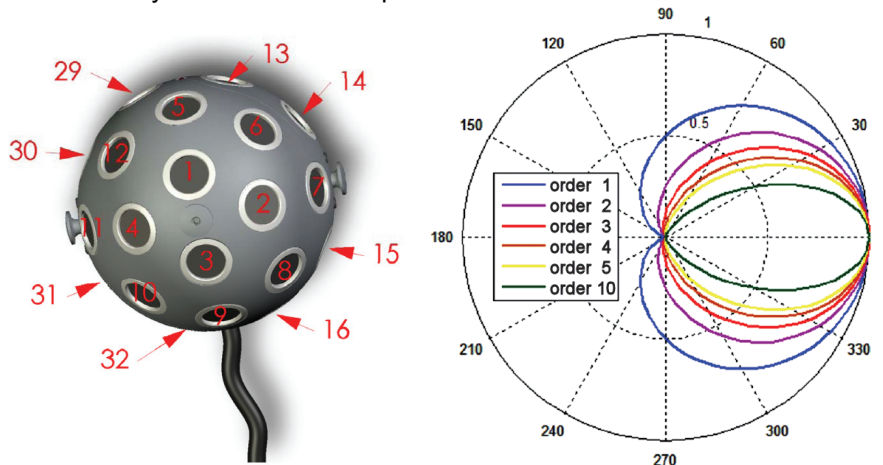


Figure 3 Capsule positions and directivity patterns of the 3D virtual microphone

When this system is employed for deriving the SPS signals, indeed, instead of synthesizing just 7 virtual microphones with variable aiming and directivity, a set of 32 static filters is employed, creating 32 signals corresponding to 32 4th order cardioids, pointing in the same direction of the capsules, as shown in figure 3.

If the aiming directions of the 32 virtual microphones are overplotted over a panoramic 360°x180° image taken from the microphone position, one can “see” where the 32 microphones are pointing, as shown in figure 4:

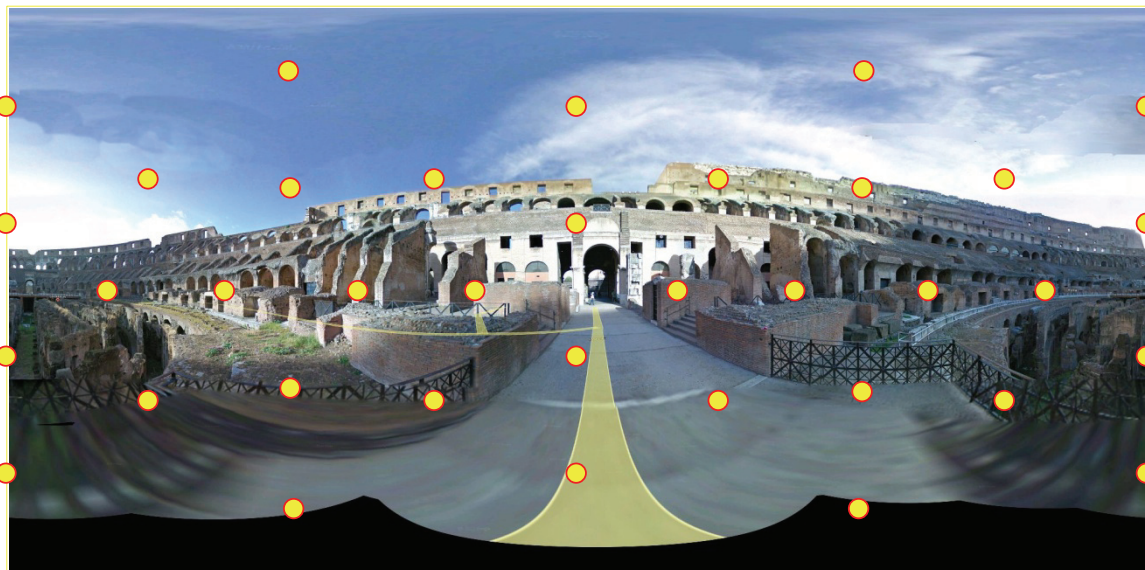


Figure 4: 32 virtual microphones pointing all around inside the Colosseum in Rome

As shown in Figures 5 and 6, the Eigenmike™ is a sphere of aluminium (the radius is 42 mm)

with 32 high quality capsules placed on its surface; microphones, pre-amplifiers and A/D converters are packed inside the sphere and all the signals are delivered to the audio interface through a digital CAT-5 cable, employing the A-net protocol.

The audio interface is an EMIB Firewire interface; being based on the TCAT DICE II chip, it works with any OS (Windows, OSX and Linux through FFADO). It provides to the user two analogue headphones outputs, one 8-channels ADAT digital output and the word clock ports for syncing with external hardware.

The preamplifier's gain control is operated through MIDI control; we developed a GUI (in Python) for making easy to control the gain in real-time with no latency and no glitches.



Figure 5 – The Eigenmike™ probe

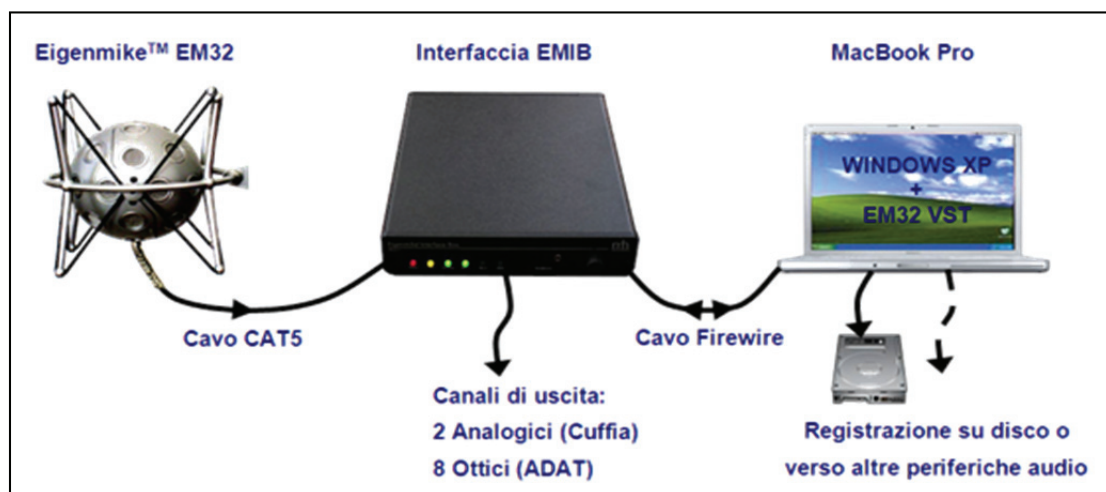


Figure 6 – The complete Eigenmike™ recording system

4. SYNTHESIS OF THE ENCODING FILTERS

Given an array of transducers, a set of digital filters can be employed for creating the output signals. In our case the M signals coming from the capsules need to be converted in V signals yielding the desired virtual directive microphones: so we need a bank of $M \times V$ filters. As always, we prefer FIR filters.

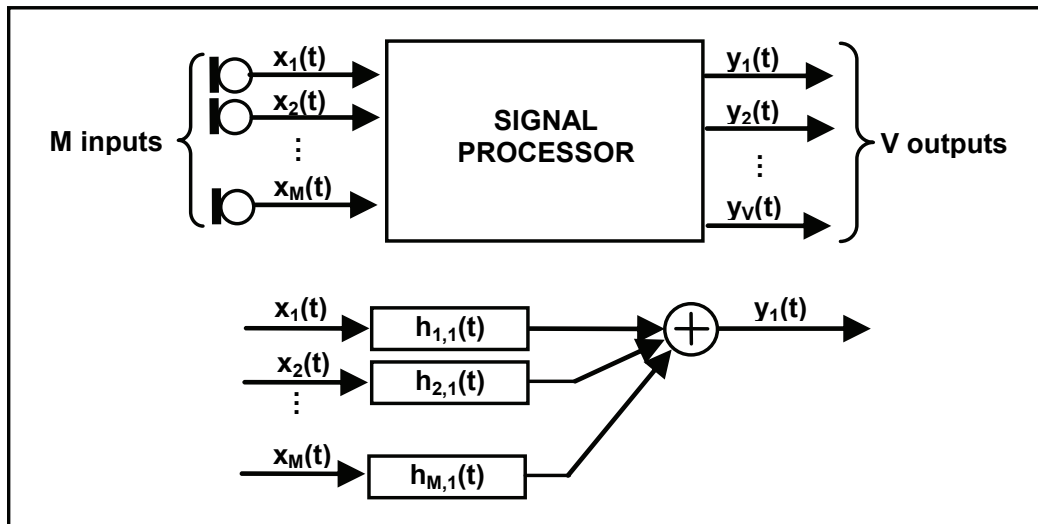


Figure 7: Scheme of the signal processing

Assuming $\{x_m\}$ as the input signals of M microphones, $\{y_v\}$ as the output signals of V virtual microphones and $[h_{m,v}]$ the matrix of filters, the processed signals can be expressed as:

$$y_v(t) = \sum_{m=1}^M x_m(t) * h_{m,v}(t) \quad (2)$$

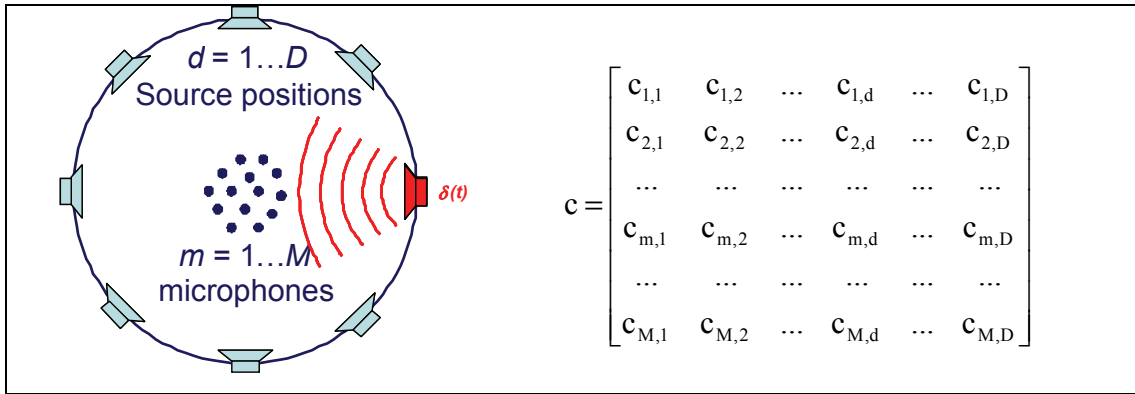
where $*$ denotes convolution, and hence each virtual microphone signal is obtained summing the results of the convolutions of the M inputs with a set of M proper FIR filters.

In our approach, the outputs of the processing system are directly the result of the digital filtering of the input signals, with a different set of filters for every virtual microphone.

In principle this allows for synthesizing virtual microphones having an arbitrary directivity pattern. In practice we decided, for now, to synthesize frequency-independent high-order cardioid virtual microphones, having the polar pattern described by eq. (1).

We are not assuming any theory for computing the filters h : they are derived directly from a set of measurements, made inside an anechoic room. A matrix of measured impulse response coefficients \mathbf{c} is formed and the matrix has to be numerically inverted (usually employing some approximate techniques, such as Least Squares plus regularization); in this way the outputs of the virtual microphone is maximally close to the ideal response prescribed. This method also inherently corrects for transducer deviations and acoustical artefacts (shielding, diffraction, reflection, etc.).

The characterization of the array is based on a matrix of measured anechoic impulse responses, obtained with the sound source placed at a large number D of positions all around the probe, as shown in Figure 8.


 Figure 8: Impulse response measurements from D source positions to the M microphones

The processing filters \mathbf{h} should transform the measured impulse responses \mathbf{c} into the prescribed theoretical impulse responses \mathbf{p} :

$$\sum_{m=1}^M c_{m,d} * h_m \Rightarrow p_d \quad d=1..D \quad (3)$$

Please notice that in practice the target impulse responses p_d are simply obtained applying a direction-dependent gain Q , given by eq. 1, to a delayed unit-amplitude Dirac's delta function δ :

$$p_d = Q_d \cdot \delta \quad (4)$$

Computation is easier in frequency domain (that is, computing the complex spectra, by applying the FFT algorithm to the N -points-long impulse responses \mathbf{c} , \mathbf{h} and \mathbf{p}). Let's call \mathbf{C} , \mathbf{H} and \mathbf{P} the resulting complex spectra. This way, the convolution reduces to simple multiplication between the corresponding spectral lines, performed at every frequency index k :

$$\sum_{m=1}^M C_{m,d,k} \cdot H_{m,k} \Rightarrow P_d \quad \begin{cases} d=1..D \\ k=0..N/2 \end{cases} \quad (5)$$

Now we pack the values of \mathbf{C} , \mathbf{H} and \mathbf{P} in proper matrixes, taking into account all the M input microphones, all the measured directions D and all the V outputs to create:

$$[\mathbf{H}_k]_{M \times V} = \frac{[\mathbf{P}]_{D \times V}}{[\mathbf{C}_k]_{D \times M}} \quad (6)$$

This over-determined system doesn't admit an exact solution, but it is possible to find an approximated solution with the Least Squares method, employing a regularization technique for avoiding instabilities and excessive signal boost [7]. The block diagram of the least-squares method is shown in 9:

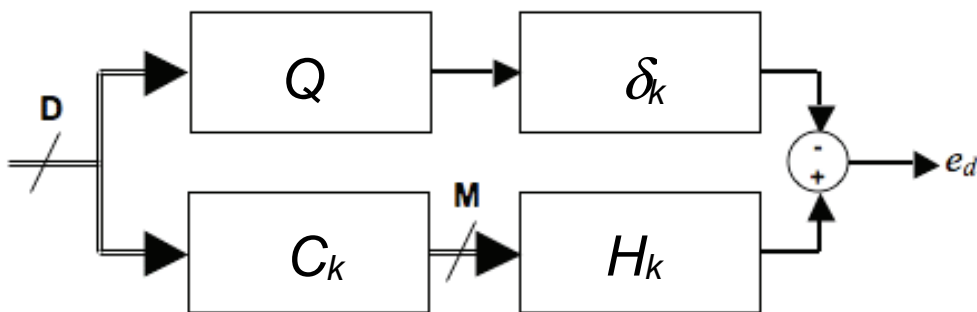


Figure 9: Scheme of the Least Squared method with a delay in the upper branch

In this scheme we observe the delay block δ_k required for producing causal filters, and the resulting total modelling error e_d , which is being minimized by the least-squares approach.

In general, the frequency-domain representation of a Dirac's delta delayed by n_0 samples is given by:

$$\delta_k = e^{-j2\pi k \frac{n_0}{N}} \quad (7)$$

Albeit various theories have been proposed for defining the optimal value of the causalisation delay n_0 , we did take the easy approach, setting $n_0=N/2$. Choosing $N/2$ samples is a safe choice, which creates inverse filters with their "main peak" close to their centre, and going smoothly to zero at both ends.

Furthermore, a regularization parameter is required in the denominator of the matrix computation formula, to avoid excessive emphasis at frequencies where the signal is very low.

So the solution formula, which was first proposed in Kirkeby et al. [7], becomes:

$$[H_k]_{M \times V} = \frac{[C_k]_{M \times D}^* \cdot [Q]_{D \times V} \cdot e^{-j\pi k}}{[C_k]_{M \times D}^* \cdot [C_k]_{D \times M} + \beta_k \cdot [I]_{M \times M}} \quad (8)$$

As shown in the image below, the regularization parameter β should depend on frequency [8]. A common choice for the spectral shape of the regularization parameter is to specify it as a small, constant value inside the frequency range where the probe is designed to work optimally, and as much larger values at very low and very high frequencies, where conditioning problems are prone to cause numerical instability of the solution.

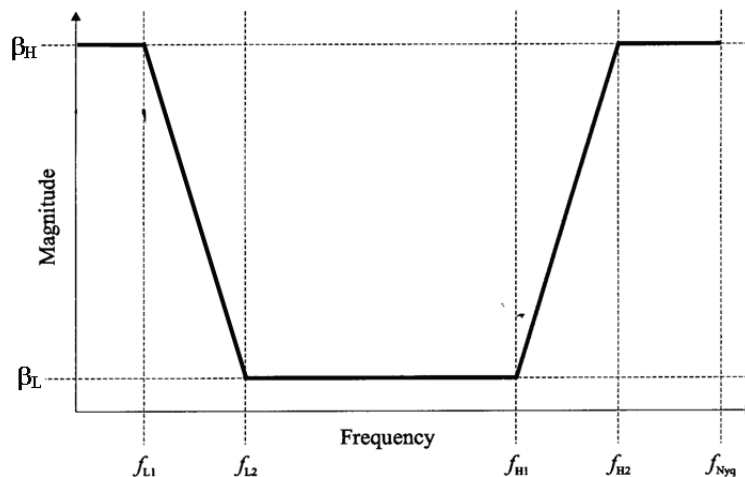


Figure 10: Regularization parameter in dependence of the frequency

In our case, the number of virtual microphones being synthesized is 32, and their directivity and aiming are those defined in chapter 3 (Fig. 3). Typically, each filter is 2048 samples long (at 48 kHz sampling rate). Each virtual microphone, thus, requires to sum the results of the convolution of 32 input channels with "his" 32 FIR filters. And for getting all the required 32 virtual microphone outputs, we need to convolve-and-sum over a matrix of 32x32 FIR filters, each of 2048 samples.

For performing these massive multichannel filtering operations, a special VST plugin was developed, called X-volver, and running either on Mac or Win32 platforms; this plugin is freely available in [9]. Figure 11 shows the X-volver plugin being used inside Audio Mulch, a multichannel VST host program: a 32x32 filter matrix is being employed for converting the signal coming from the 32-capsules spherical microphone array to the 32 SPS signals.

A modern laptop, equipped with at least an Intel i5 processor, can easily perform such filtering in realtime, during the recording.

Nevertheless, we usually prefer to always record the “raw” 32-channels coming from the capsules, for being able subsequently to reprocess them with different set of SPS-encoding filters, or for deriving directly other types of virtual microphones.

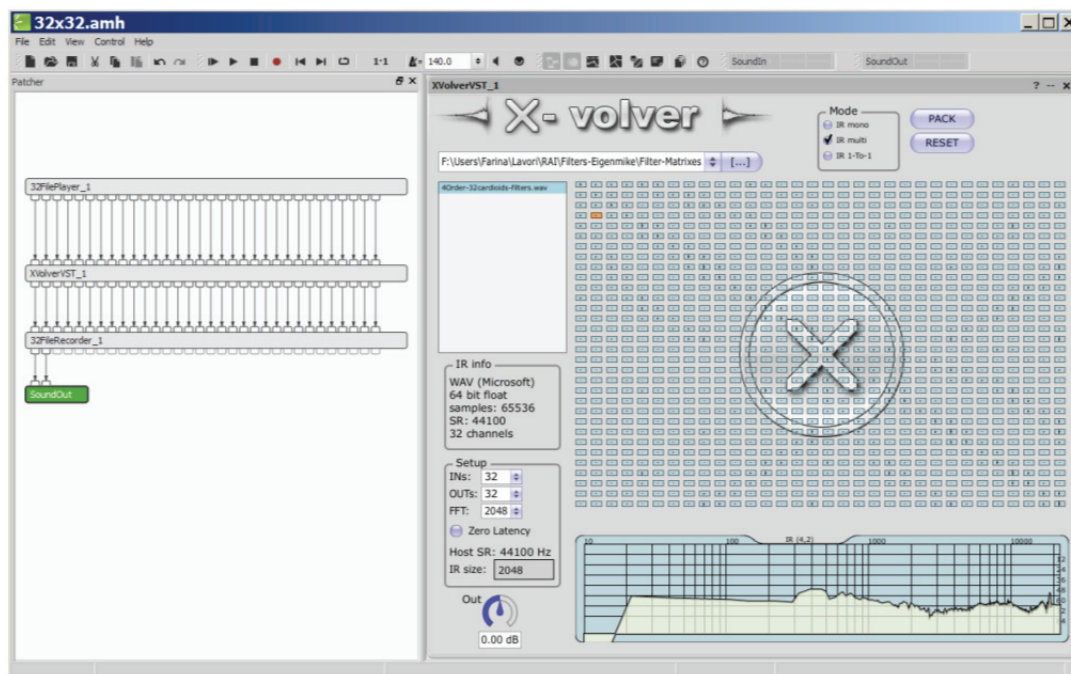


Figure 11: Graphical User's Interface of X-volver, inside the Audio Mulch host program

5. POST PROCESSING

After the SPS recording has been made, it is possible to post-process the results in two ways:

- A graphical analysis can be performed, showing the spatial distribution of the incoming energy along the running time – this allows to “see” from where the sound is coming.
- An audible rendering can be presented to a group of listeners, inside a special room equipped with a suitable array of loudspeaker, surrounding completely the listening area around a sphere.

The graphical analysis is performed thanks to a Matlab program, which creates an animated color video rendering of the sound map, overlapped over the 360°x180° panoramic image. A frame of such video rendering is shown in figure 6.

The audible rendering is obtained by reprocessing the SPS recording: a new set of virtual microphones is extracted, one feeding each loudspeaker of the playback array. The directivity and aiming of each of these virtual microphones is obtained by solving a linear equation system, imposing that the signals re-recorded placing the Eigenmike™ probe at the center of the playback system are maximally similar to the original recorded signals. This approach, which is NOT Ambisonics-based, also corrects inherently for deviations from ideality of the loudspeakers employed, both in terms of magnitude/phase response, and in terms of placement/aiming/shielding.

5.1 Mapping room reflections inside La Scala theater

A first “real-world” experiment was conducted inside La Scala theatre in Milan. A set of 32-channels SPS impulse responses has been measured in 10 positions, along the stalls and the boxes, as shown in figure 12.

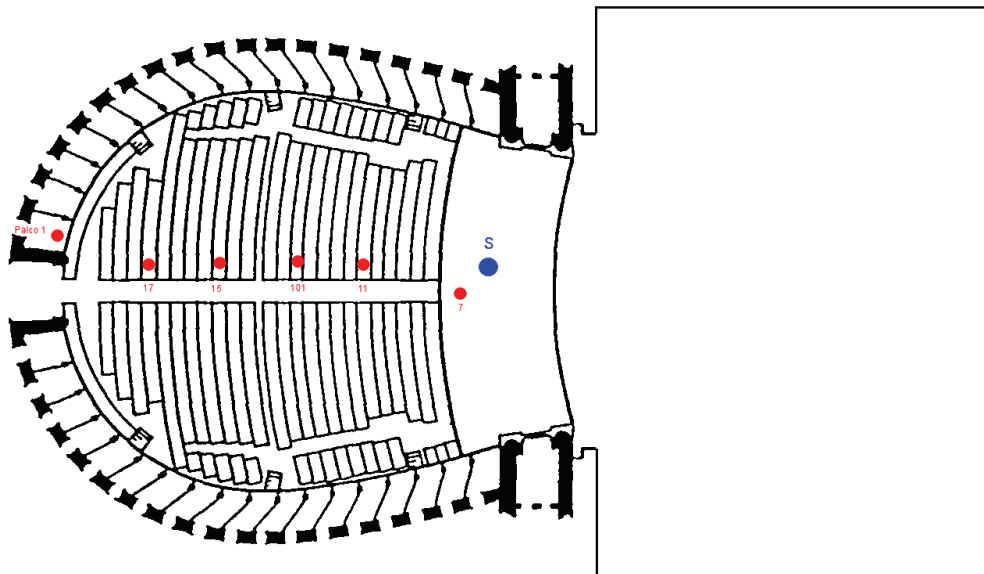


Figure 12: Measurement positions inside La Scala theater

At each recording positions, a set of photos have been taken, pointing the compact wide-angle camera in every direction. These photos are thereafter stitched together, thanks to a free software tool made available by the Microsoft Research Center, and called ICE (Image Composite Editor).

This software performs a geometrical transformation, known as the Mercator's Projection, as shown in figure 13.

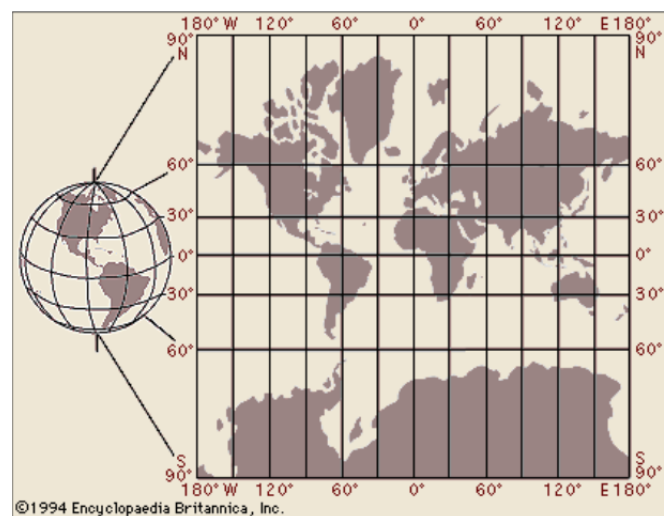


Figure 13: Mercator's Projection

Figure 14 shows Microsoft ICE in action, while creating the panoramic image of a box in La Scala theater:

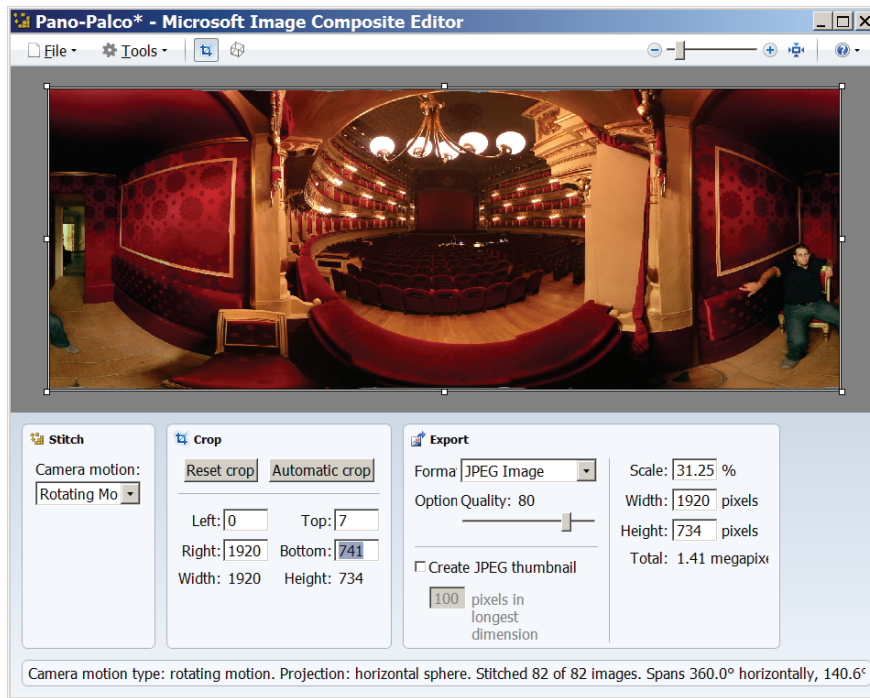


Figure 14: Microsoft ICE

By means of a Matlab program, the amplitude of the signals recorded by the 32 virtual microphones have been overplotted over these panoramic images, in the form a pseudo-color map. The map is recomputed every 5 ms, creating a slow-motion video of the sound distribution during the playback of the measured impulse response. This makes it possible to localize the direction-of-arrival of the most evident reflections.

Figure 15 shows a “frame” of the video rendering performed at the Director’s position, showing a strong reflection bouncing back from the side wall. The 3D impulse responses measured at La Scala have been employed also for high-quality spatial sound processing.

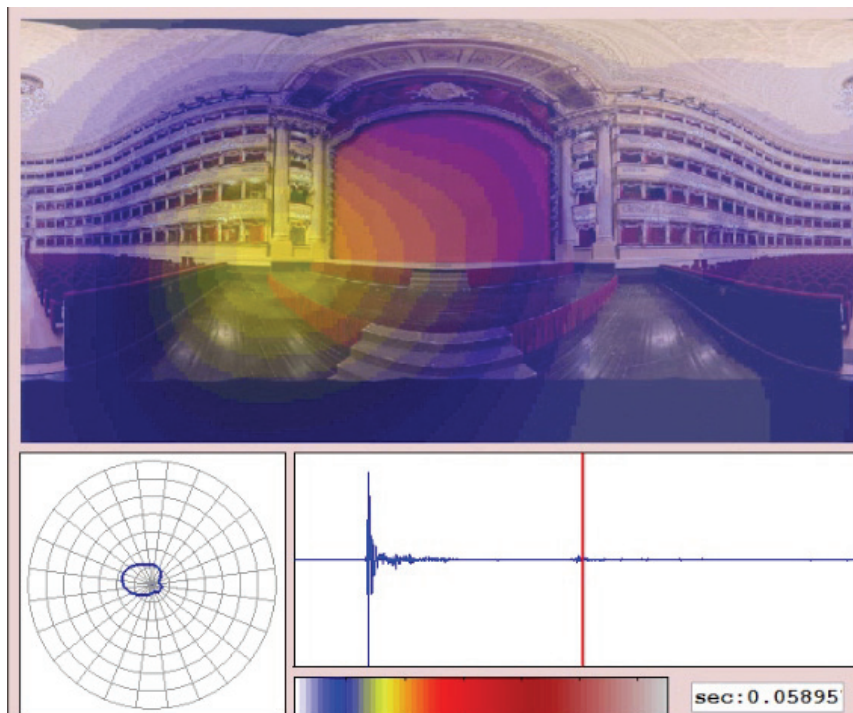


Figure 15 - Snapshot of the video processing, a strong reflection from the side wall

5.2 Sound reproduction over a 3D loudspeaker array

The SPS signals can be reproduced employing a suitable loudspeaker rig. This approach shares with Ambisonics the capability of rendering the signals over a generic loudspeaker array, in principle composed of an arbitrary number of transducer, and in arbitrary positions, as the SPS signals being transferred are not “speaker feeds”, such as in 5.1, 7.1, 10.2, 22.2, etc. Instead, the 32 signals of the SPS signal are a “spatial kernel”, codifying the whole spatial information, exactly as the Ambisonics signals. With the difference that the SPS signals are “PCM encoded”, whilst the Ambisonics signals are in the domain of “spatial frequency”.

So let’s assume that we have a suitable listening room, equipped with a reasonable number of loudspeakers, more-or-less uniformly covering the whole sphere, as shown in figure 16.

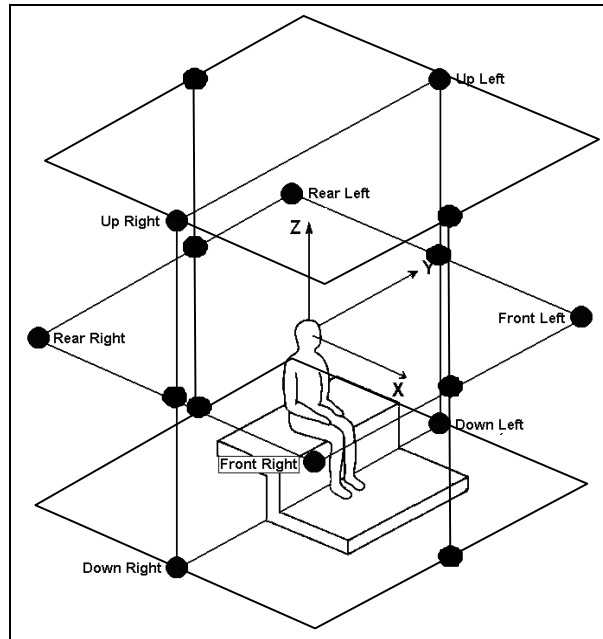


Figure 16: Loudspeaker array with 16 loudspeakers and a listener at the center

In our approach, there is no requirement for the loudspeakers to be equidistant from the listener, so they can be conveniently placed along the walls and in the corners of the room.

For feeding our 16-loudspeakers array with our 32-channels SPS signals, we need to create a “decoding matrix” of 32x16 FIR filters, with substantially the same mathematical approach employed for deriving the “encoding matrix” of 32x32 FIR filters, already described in section 4.

In practice, the 32 SPS signals $\{y\}$ must be convolved with the matrix of filters $[f]$, yielding the required speaker feeds $\{s\}$:

$$s_r(t) = \sum_{i=1}^{32} y_i(t) * f_{i,r}(t) \quad \Rightarrow \quad \{s\} = \{y\} * [f] \quad (9)$$

For determining the filters $[f]$, we start from a set of measurements of the loudspeaker’s impulse responses, performed placing our 32-capsules microphone array at the center of the listening room (in the “sweep spot position”, where the head of the listener should be). Let’s call $[k]$ the matrix of these measured impulse responses.

The conditions to be imposed for finding the values of $[f]$ are that the signals captured by the microphone array, if placed in the center of the listening room, are identical to the “original” SPS signals $\{y\}$:

$$\{y_{out}\} = \{s\} * [k] = \{y\} * [f] * [k] \quad (10)$$

Of course, the recovered signals $\{y_{out}\}$ will never be really identical to the original ones $\{y\}$, some error will always occur, as shown in figure 17.

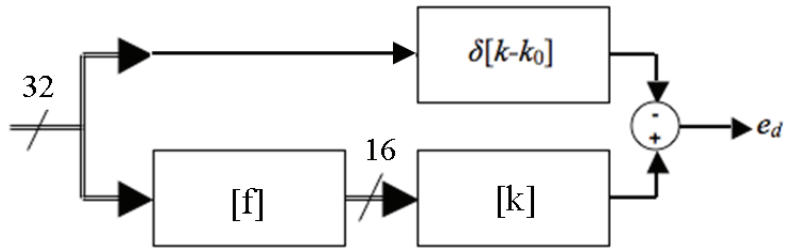


Figure 17: Block diagram of the playback system

As we did for computing the encoding filters $[h]$, we now set up a least-squares approach for finding the matrix of decoding filters $[f]$, operating in frequency domain and employing a frequency-dependent regularization parameter β , and setting up a “Modelization delay” δ of $N/2$ samples:

$$[F]_{16 \times 32} = \frac{[K]_{16 \times 32}^* \cdot e^{-j2\pi f \delta}}{[K]_{16 \times 32}^* \times [K]_{32 \times 16} + \beta_f \cdot [I]_{32 \times 32}} \quad (11)$$

Again, the frequency dependence of β is as shown in fig. 10, with frequency limits generally narrower than those used for encoding (typically loudspeakers have a more limited usable frequency range than microphones).

The creation of a pseudo-inverse of the reproduction matrix $[k]$ is much more difficult than the inversion of the microphone matrix $[c]$: the inversion is optimal only if the loudspeakers are all identical, placed on a perfect sphere, as shown in fig. 18. This is the playback system employed by Nelson and Fazi [10] at ISVR, in Southampton, UK.



Figure 18: ISVR's spherical playback system

In our case, we employ a much worse playback system, as shown in fig. 19 (panoramic image): as the room is not really anechoic, and the loudspeakers are not located at the same distance from the center, the matrix becomes more tricky to invert, and the resulting filters need to be much longer, typically 4096 or even 8192 samples.



Figure 19: Listening room of Casa della Musica, University of Parma, ITALY

Despite the acoustical and geometrical deficiencies of such a listening room, the matrix of inverse filters does the magic, and listening to SPS recordings inside the playback system provides an experience really very similar to listening inside the original concert hall.

At the moment, we successfully performed this experiment just once: we recorded a trio of classical instruments (arpa, spinetta and trumpet) inside the concert hall of La Casa della Musica, in Parma, as shown in figure 20, and performed listening tests in the playback room.



Fig. 20 – Recording of a trio at Casa della Musica, Parma, ITALY

6. CONCLUSIONS

This paper has described a new method for recording 3D sound signals, providing on one side a spatial resolution significantly better than what was obtainable with current technology, and, on the other side, allowing a very simple post-processing of the results, which allows both for an easy-to-understand graphical representation of the spatial-temporal information, and to replay the recorded signals inside a 3D surround system.

As the method is very new, we managed just to perform a single experiment for each of these two possible applications: indeed they confirmed that the method work significantly better than High Order Ambisonics, which is the alternative approach usable with the same microphonic probe and the same 3D sound playback system.

In the next future, other experiments will be conducted, employing this technology for different applications, such as analyzing the noise inside factories or outdoors, tracing the position of a moving sound source, extracting the voice of a single talker in the middle of a crowd, etc.

7. REFERENCES

- [1] M.A. Gerzon, "Ambisonics in Multichannel Broadcasting and Video", J. Audio Eng. Soc., vol. 33 no. 11, pp. 859-871 (1985 Nov.)
- [2] Vilkamo J, Lokki T, and Pulkki V., "Directional audio coding: Virtual microphone-based synthesis and subjective evaluation", J. Audio Eng. Soc., 57(9):709–724, September 2009.
- [3] Svein Berge, Natasha Barrett, "A new method for B-format to binaural transcoding", AES 40th international conference, Tokyo, Japan, October 8–10, 2010
- [4] Sebastien Moreau, Jerome Daniel, Stephanie Bertet, "3D Sound Field Recording with Higher Order Ambisonics – Objective Measurements and Validation of Spherical Microphone" in 120th Convention of the Audio Engineering Society (2006)
- [5] Daniel, J., Nicol, R., Moreau, S., (2003) "Further Investigations of High Order Ambisonics and Wavefield Synthesis for Holophonic Sound Imaging" Presented at the 114th AES Convention, Amsterdam, 2003 March
- [6] Angelo Farina, Alberto Amendola, Andrea Capra, Christian Varani "Spatial analysis of room impulse responses captured with a 32-capsules microphone array", 130th AES Conference, London, 13-16 May 2011
- [7] Kirkeby, O., Nelson, P.A., Hamada, H., Orduna-Bustamante, F., "Fast deconvolution of multichannel systems using regularization", IEEE Transactions on Speech and Audio, 6, (1998).
- [8] O.Kirkeby, P.A. Nelson, P. Rubak, A. Farina, "Design of Cross-talk Cancellation Networks by using Fast Deconvolution", 106th AES Convention, Munich, 8-11 may 1999.
- [9] <http://pcfarina.eng.unipr.it/Public/Xvolver/>
- [10] Poletti, M., Fazi, F.M. and Nelson, P.A. "Sound-field reproduction systems using fixed-directivity loudspeakers", Journal of the Acoustical Society of America, 127, (6), 3590-3601, (2010).



PERCEIVED FEASIBILITY OF COMPUTER-GENERATED AURALIZATION IN CONCERT HALLS

Reference PACS: 43.55.Gx , 43.55.Hy, 43.55.Ka

Garrido, José A.¹; Zamarreño, Teófilo²; Girón, Sara²; Ruiz-Padillo, Diego P.¹

¹Dpto. de Física Aplicada, Universidad de Granada, Facultad de Ciencias, Avda. Fuente Nueva s/n, 18071-Granada (SPAIN) Tel.: +34 958244161. Fax: +34 958243214.

²Dpto. de Física Aplicada II, Universidad de Sevilla, ETS de Arquitectura, IUACC, Avda. de la Reina Mercedes 2, 41012-Sevilla (SPAIN) Tel.: + 34 954556612. Fax: +34 954557892
josegarridoalcazar@gmail.com, teofilo@us.es, sgiron@us.es, druiz@ugr.es

ABSTRACT

Over the years auralization has become a useful tool for simulating and evaluating the listening experience in virtual environments. Psychoacoustic phenomena, embodied by the human hearing system, highly determine the accuracy of sound-field recreation that is required for seemingly feasible auralization. In this scenario, the main aim of this study is to assess the suitability of computer-generated room impulse responses when used for auralizing spaces. To this purpose, simulated and experimentally measured binaural room impulse responses (BRIRs) have been convolved with iconic musical excerpts for various representative seats within a medium-sized concert hall. Listening tests have been thereby conducted and their results will be shown, analyzed and discussed.

RESUMEN

En estos últimos años, la auralización se ha convertido en una herramienta útil para la simulación y evaluación de la experiencia del oyente en entornos virtuales. En este ámbito, son de especial importancia los aspectos psicológicos y perceptivos, derivados del funcionamiento del sistema auditivo y del cerebro humanos, que determinan la precisión que se requiere para una recreación aparentemente creíble del campo sonoro. En este contexto, el principal objetivo de este estudio es evaluar la validez de respuestas al impulso de la sala generadas por ordenador para su utilización en la auralización de espacios. Con este propósito, para algunas localidades representativas de una sala de conciertos de tamaño medio, se han convolucionado varias respuestas al impulso binaurales (BRIRs), simuladas y medidas experimentalmente, con fragmentos musicales conocidos. Con los datos obtenidos, se han llevado a cabo pruebas de audición, cuyos resultados se presentan, analizan y discuten en esta comunicación.

1. INTRODUCTION

Although auralization has been proved an important tool for multiple applications in fields as diverse as Architecture, Telecommunications, Psychology or Virtual Reality, very little is still known about the accuracy of the output audio files generated by the commercial computer programmes featuring this ability that are currently available in the market. Trying to evaluate the quality of the performance achieved by some of these pieces of prediction software when confronted with in situ measurements, three round-robin tests have been held in history [1][2][3][4]. However, none of them embraced auralization within its scope.

When it comes to auralization, physical accuracy does not constitute the only cornerstone for this kind of software, but achieving correctness in the listening experience eventually created

also plays a decisive part [5]. Therefore, Psychoacoustics ought to take over the task of drawing the fuzzy line that determines whether the sound field created with this software is precise enough to generate auditory events deemed correct by a majority of listeners.

In order to shed some light on the feasibility of computer-aided auralization, a three-dimension geometric model of a 1,311-seat concert hall, whose acoustic performance had already been validated for the most common parameters, was simulated to obtain impulse responses at various locations spread over the audience area. Experimental measurements previously done at analogous positions in the actual room had already gathered equivalent data. Finally, auralized audio files corresponding to impulse responses from both sources have been produced and subjected to comparison with the assessment of a panel of untrained individuals, who will ultimately look for differences between stimuli throughout listening tests.

Likewise, auralizations coming from simulating the concert hall under changing acoustical conditions because of refurbishment works have been judged against those attained in the former state. In this case, an eventual statement will go in the necessity of the undertaking.

2. MANUEL DE FALLA AUDITORIUM

First inaugurated on June 10, 1978, Manuel de Falla Auditorium in Granada (Spain) could be proudly counted amongst a selected group of Spanish concert halls with remarkable acoustic qualities. The auditorium is located at La Sabika hill beside the *carmen* once inhabited by the Gaditan composer after whom the edifice was named, and within the area of influence of La Alhambra, a world-wide admired landmark. Sevillian architect José María de Paredes along with renowned German acoustician Lothar Cremer account respectively for the architectural design and acoustical consultancy towards the executed blueprints of the building⁶.

As illustrated by the photograph in Figure 1(a), the room features a rotund bilateral symmetry on whose axis the stage is disposed at nearly two-thirds of the way, providing an uncommon arrangement of the audience into two main areas, A and B –labelling seats in front of and behind the stage in that order-. One of the main advantages derived from this unusual plan lays on the adaptability of the venue to spectacles of various kinds. Changeable capacity and volume allow for several configurations and, thereof, variable acoustics.

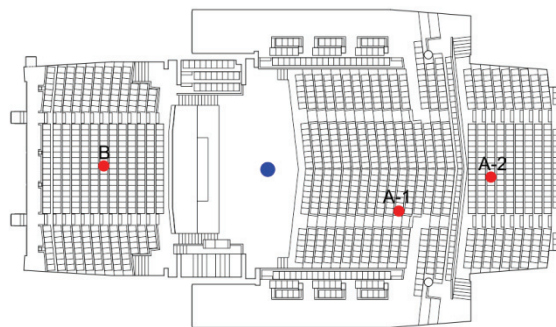


Figure 11. Manuel de Falla Auditorium, in Granada (Spain): (a) general view of the room after the recent completion of refurbishment works –on the left-, and (b) ground plan showing the placement of the source (in blue) and three receivers (in red) considered in this study –on the right-. Architect: J. M. García de Paredes.

As shown in the ground plan of the auditorium displayed in Figure 1(b), three seats within the room have been carefully chosen to carry out this work. It must be said that receiver locations close to either the source or large reflecting surfaces have been ruled out since experimental measurements at such intricate positions usually yield defective results. To properly sample the room, two of them –noted A-1 and A-2- have been placed in front of the stage whereas only one –namely B- has been located in the backstage.

In recent times, refurbishment works involving roof renovation, heating, ventilation and air conditioning system remodelling, restitution of deteriorated finishes and replacement of

audience seating have been undertaken in the grand concert hall. After their completion, the Manuel de Falla Auditorium reopened to the general public in September, 2010.

3. EXPERIMENTAL MEASUREMENTS

Extensive on-site measurements were performed in the auditorium under empty-room and cleared-stage conditions, in attendance to what established in the ISO 3382-1 [7] international standard. Temperature and humidity were monitored during the measurement campaign with a digital thermo-hygrometer. Temperature ranged from 19.6 °C to 20 °C, whereas relative humidity exhibited values within the 49% to 50% interval.

Binaural room impulse responses (BRIRs) for each receiver location have been obtained by means of 30-second sine sweep signals covering the entire audible frequency range, generated and subsequently analyzed in WinMLS 2004, through the Digigram VX Pocket v2 soundcard. The audio signal so-produced was sent –via an INTER-1000 amplifier- to a 01-dB Stell AVM DO12 dodecahedral loudspeaker –omnidirectional sound source- placed onstage at a central position, 1.5 metres high above the stage level.

Head Acoustics head and torso simulator Type HSU III (Code 1323) has been used for recording BRIRs at the three seats of choice, allocating both entrances to the ear canals at a 1.2-metre height above the floor. Monaural room impulse responses (RIRs) have been measured as well, allowing for the calculation of widely-known acoustic parameters. Regarding the previously-described set-up, a couple of additional microphones –namely, B&K 4190 ½” omnidirectional and Audio-Technica AT4050/CM5 multi-pattern condenser microphones- with suitable 01dB-Stell pre-amplifiers have been utilized instead of the head and torso simulator to this purpose.

4. COMPUTER SIMULATION

CATT TUCT v1.0f was the piece of room acoustics prediction software chosen to carry out the simulations whose results are hereby presented. TUCT –acronym for The Universal Cone Tracer- was recently born as a CATT-Acoustic-dependent bare calculation engine capable of performing acoustic simulation and auralization of virtual environments. However, CATT-Acoustic keeps on being necessary to build up the three-dimension geometrical model of the room and later define the acoustic features of enclosing surfaces.

For the time being, three distinct algorithms have been implemented in TUCT for the generation of echograms and impulse responses for any given source-receiver combination specified in the digital model [8]. Differences among themselves mainly affect the way diffuse reflections are handled. The three of them deal with direct sound and 1st order specular reflections deterministically. So do they with 1st order diffuse reflection by means of the so-called *random split-up*, a brand-new technique made gradually extensive to higher orders of diffuse reflection in algorithms 2 and 3. It is for that reason that run-to-run variability traditionally associated to computer-aided acoustic simulation due to the usage of Lambert's law [9] accounting for scattering phenomena has been significantly reduced. TUCT's algorithm 2 has been the one of choice for attaining the data utilized in this work.

It must be noticed that TUCT predictions of the most common acoustic parameters are based on the previous calculation of either echograms or impulse responses, which gives rise to slightly different results coming from energy (E) or pressure (h) analyses respectively. Since the

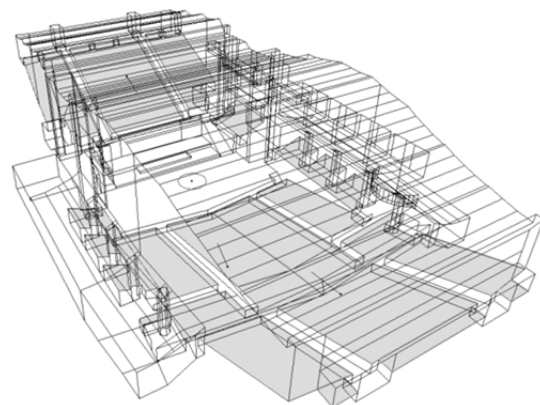


Figure 12. Geometrical model for the acoustic simulation of the Manuel de Falla Auditorium. Audience area is shaded in grey colour.

outcome of the latter follows a procedure that is identical to that instituted by the international standard ISO 3382-1 [7] for experimental measurements –successive octave frequency-band filtering, squaring and pressure-function time integration-, a good agreement of in situ measured descriptors and their IR-based simulated counterparts is to be expected, providing as well clear evidence of similarity between recorded and predicted impulse responses. Additionally, BRIRs at the specified locations can be generated and exported into suitable formats making it possible their later usage for auralization.

In order to simulate the acoustical behaviour of the Manuel de Falla Auditorium, a three-dimension geometric model of the room –illustrated in Figure 2- has been implemented, in accordance to the guidelines supplied by the developers of prediction software [10] and stated in the literature [11]. Acoustic characteristics for the materials in the model were first estimated and defined with scattering and absorption coefficients [11][12], which have been subsequently fine-tuned by means of an iterative calibration process based on achieving a match in the comparison between measured and simulated reverberation times at various inner locations [13]. Finally, the model resulting from such a procedure has been validated for the rest of conventionally-accepted room acoustics parameters in terms of just noticeable differences (JNDs) as proposed by Bork [3][4].

Moreover, starting from this former model, another one has been developed in an attempt to mimic the changed acoustic features within the concert hall due to a recently finished refurbishment. Both models have been acoustically simulated, main descriptors calculated, and BRIRs produced.

As for the initial prediction settings adopted in the computer software, 26,611,576 cones –in application of the formula suggested by Vorländer [11]- have been traced. Truncation time for the calculation of impulse responses and echograms was set at 3 seconds counted from the arrival of direct sound –thus, beyond experimentally-measured reverberation times, as recommended by some authors [10][11].

5. AURALIZATION

Auralization is the technique that allows for the creation of sound files suitable for reproduction from mere numerical data obtained by simulation, measure or synthesis [11]. Physically speaking, such a task requires the definition of the so-called binaural room impulse response, $h(t)$, temporal function based on a three-dimension sound propagation model whose calculation involves the computational technique previously explained. BRIRs can be also depicted as actual filters, $f(t)$, incorporating additional components, to wit: source directivity, head-related transfer function (HRTF) and exact equalization for the sound-reproduction system of choice.

The convolution of input sound signals recorded in anechoic environments, $s(t)$, with filter impulse responses, $f(t)$, to produce output audio files as heard by the listeners at any given location, $g(t)$, is the basis of signal processing for auralization, and can be mathematically written as the following linear-time invariant system:

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau)f(t - \tau) d\tau$$

A little stand-alone piece of software called MultiVolver WCP included in CATT-Acoustic package has been used for carrying out the auralizations to be later on presented to the assessors. MultiVolver is intended as a flexible multichannel convolver for multiple applications whose purpose is to convolve input WAV-files into output WAV-files [14]. A mono to binaural configuration –one to two channels-, making use of previously measured and simulated finite binaural impulse response filters, has been taken up in this work.

Three short, dry, soloist classical-music samples differing from one another in rhythmical pattern, frequency spectrum and, above all, timbre have been chosen as input signal for auralization:

- C. Weber: Theme; for cello [15].
- F. Chopin: Prelude, Op. 28, No. 12 in G-sharp minor; for piano [16].
- Bruckner: Symphony No. 8 in C minor, I. Allegro moderato; for timbales [17].

It must be noted that, in order to have auralizations from impulse response filters of diverse nature suitable for comparison, the gain in dB applied to each of the three input audio files in either case was the result of a prior calibration process aimed to yield a match in terms of average loudness monitored at the closest location to the sound source.

6. LISTENING TESTS

Twenty-seven people have been subjected to listening tests in order to discriminate whether there are sensory differences between audio stimuli. A triangle-test structure [18] has been deemed well fitted to determine both whether:

- A significant difference exists between auralizations obtained from measured and simulated BRIRs in the Manuel de Falla Auditorium.
- Such a difference can be stated between auralizations from simulated BRIRs before and after the completion of some refurbishment works within the concert hall.

To this purpose, a panel of untrained assessors consisting of Spanish university students with normal-hearing between ages eighteen to twenty-eight was gathered. The campaign of listening tests was carried out in a quiet, windowless room, free from bias. In this environment, acoustical stimuli were administered to the panellists via an ASUS Xonar Essence ST internal sound card and Sennheiser HD 600 over-ear headphones. A picture of one of the individuals undergoing the listening tests immerse in this setup is shown for better illustration in Figure 3(a).

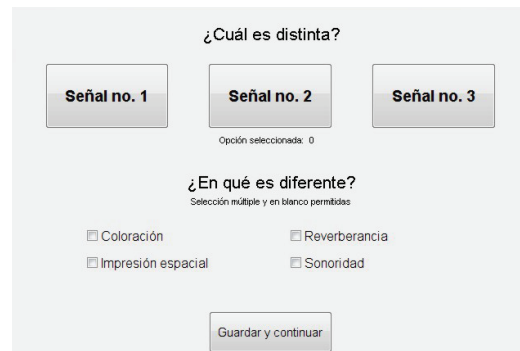


Figure 13. On the left, one of the voluntary assessors undergoing the tests is being subjected to the experiments (a). On the right, the short questionnaire -in Spanish- to be answered in a window environment after listening to every train of stimuli is shown (b).

The tests have been designed to figure out answers to two questions: Is there a difference between the pair of stimuli under comparison? And were that the case, what is the nature of this difference?

To find out, assessors were presented with three of them and told that two are identical and one is different. According to a triangle-test design, six possible orders of sample presentation have been considered: AAB, ABA, BAA, BBA, BAB, and ABB.

The use of naïve assessors made it advisory to use a forced-choice mode in the experiments. Panellists were asked to carefully listen to the samples in the order of supply and single the odd one out. After hearing each set of three stimuli for the first time, assessors were not permitted to re-listen to the samples. To do so, panellists could use all available information without any restraints.

In addition to this, they have been questioned about the nature of the difference noticed. To facilitate for a panel of untrained individuals to answer to such an inquiry, four key acoustical features –coloration, spaciousness, reverberance and loudness- were suggested. Having been easily defined to every assessor at the beginning of the experimental session, from none to all of them could be marked in the pop-up window displayed in Figure 3(b), which turned up after the presentation of each set.

Up to eighteen so-conformed sets of three stimuli have been administered in random arrangement to every assessor, regarding three receiver locations, three musical excerpts, and two distinct experiments with the same structure. Prior to the commencement of the actual listening tests, a trial run with two different samples was presented twice to the panellists, as to provide a brief explanation on the sort of variations that might be encountered between stimuli throughout the experiments.

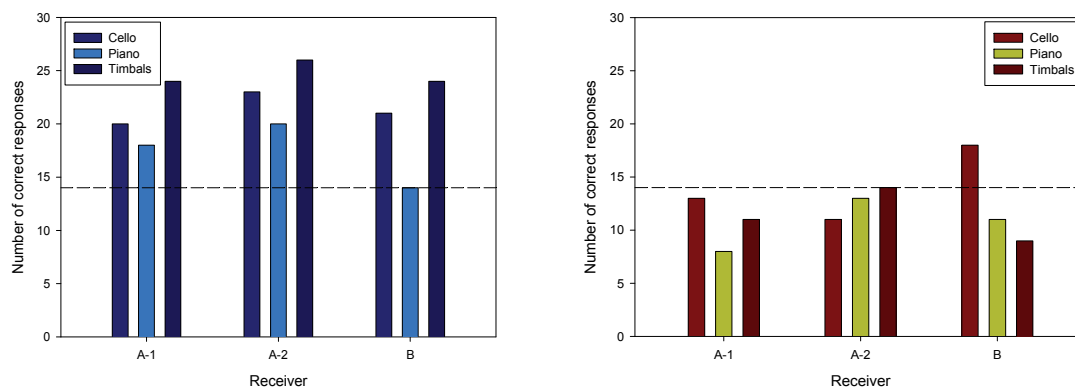


Figure 14. Number of correct identifications of the odd sample collected from the two experiments conducted, classified by receiver location and nature of the input signal. On the left: measured vs. simulated-IR auralization (a). On the right: before- vs. after-refurbish auralization (b).

7. RESULTS AND DISCUSSION

According to plan, the campaign of listening tests aimed to unearth significant differences between the auralized samples in the cases studied has been conducted. The total number of responses correctly identifying the uneven stimulus has been counted, and the collected data regarding each experiment has been summarized in the vertical bar charts shown in Figure 4.

For a panel conformed of twenty-seven assessors and at a discretionary significance level of 5%, the minimum number of correct answers required before concluding a significant difference from either experiment is 14 –marked by the horizontal line plotted with dashed trace in the diagrams-. At that level of significance, the amount of right responses must hence exceed this critical value for a positive statement.

For the sake of clarity, the analysis of the results for the two experiments presented in this work will be reported separately.

7.1. Measured-BRIRs Auralization versus Simulated-BRIRs Auralization.

In view of the data coming from the triangle tests for the first experiment, it can be stated that a significant difference exists between auralizations from field-measured BRIRs and their simulated equivalents in the concert hall under investigation. Only one out of nine possible combinations of receiver placement and musical excerpt does not yield such a conclusion, to wit, piano sample at the seat located behind the stage.

Nevertheless, it is also worth pointing out that the difference between the pairs of audio signals under comparison turned out to be less noticeable in auralizations of the piano anechoic recording than in the rest of assessed cases. By contrast, using a percussion sample –i.e. timbales- seems to have made it the easiest for the assessors to tell the difference between auralized files from measured IRs and their simulated counterparts.

Looking at acoustic spectrograms of the original reverberation-free musical excerpts to be auralized illustrated in Figure 5, it is of no wonder the striking dependence found between the degree of difficulty encountered by the assessors when making their judgments and the nature of the musical sample that was being administered in this first experiment. Frequency spectra

(FFT) versus time in terms of A-weighted sound pressure level show an irregular energetic distribution in the frequency range of analysis for the anechoic input signals in use. Whereas the piece of piano music goes with fundamental frequencies falling within the 500-hertz-centred octave band, cello and timbales reveal greater amounts of energy within the 250 and 125-hertz octave bands correspondingly.

On the other hand, it is well known that some acoustic parameters are closely related to certain subjective features. Likewise, sound strength (G) is a good indicator of the subjective level of sound. So applies to perceived reverberance and early decay time (EDT), perceived clarity and clarity itself (C_{80}), and spatial impression and interaural cross-correlation coefficients (IACC). As a consequence, salient mismatches in the comparison between measured and simulated figures for these descriptors must have been translated into noticeable differences between their subsequent auralizations.

In consideration of the exemplary data plotted in Figure 6, corresponding to the values of the above-mentioned acoustic parameters at the receiver labelled as A-1, the most outstanding deviances between measured and simulated ciphers concentrate in the 125 and 250-Hz-centred octave frequency bands, mainly affecting strength (G) and clarity (C_{80}) respectively – counting up to 10 JND and 5 JND in either case-. That is the reason why differences happen to be fairly more perceptible when timbales and cello excerpts, in that order, are administered to the assessors within the experimental sessions.

Asked about the nature of the difference, an overwhelming majority of the panellists was inclined towards coloration. As illustrated by the polar plot in Figure 7, the choices of the individuals undergoing the listening tests favoured coloration and reverberance over loudness and spaciousness. Going back to the descriptors whose ciphers have been spectrally depicted in Figure 6, the assessors' responses to this question correlate fairly well to the findings in the graphs, regarding significant deviations between measured and simulated numerical data in strength (G), early decay time (EDT), and clarity (C_{80}).

No noteworthy dependence upon the location of the receiver has been found in the experiment.

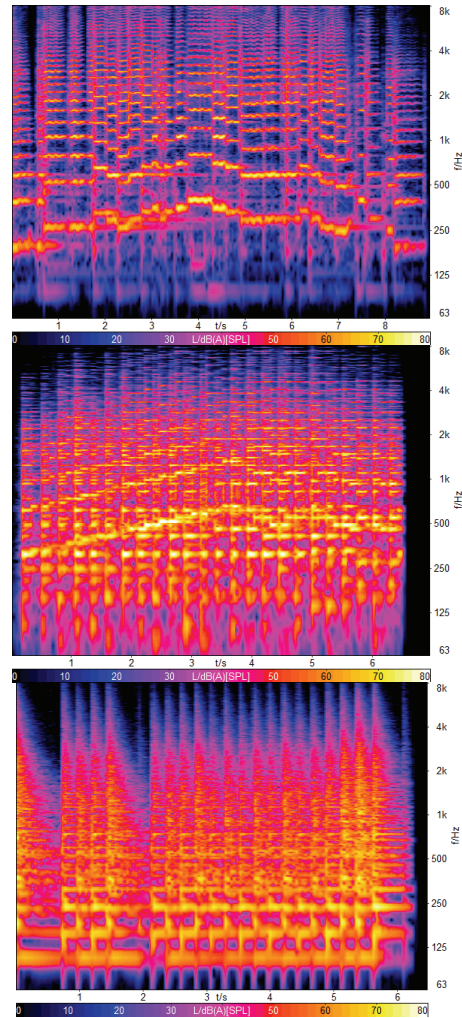


Figure 15. Frequency spectra (FFT) versus time for A-weighted sound pressure level (SPL) in dBA of the original fragments of anechoic recordings auralized for the experiments. From top to bottom: cello, piano and timbales sample spectrograms.

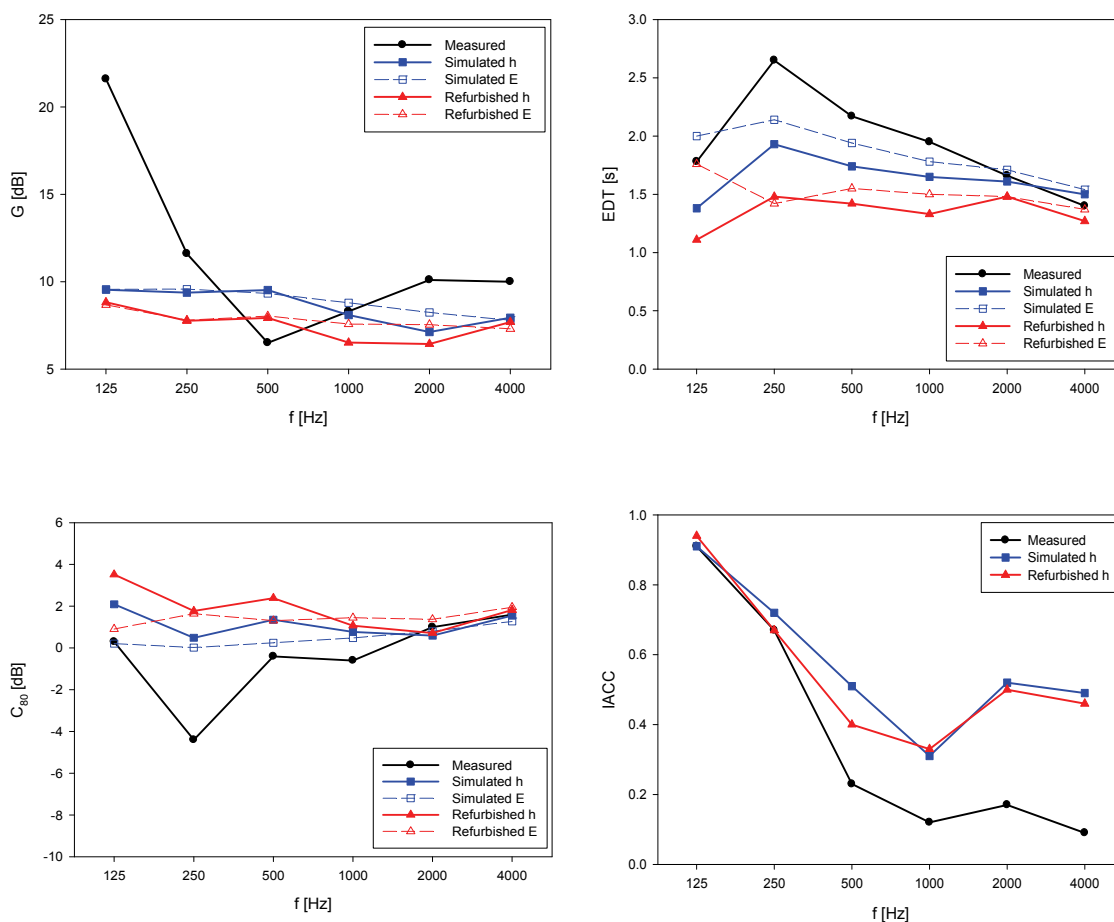


Figure 16. Measured -in black- and simulated -in blue and red, regarding before and after refurbish- data for some room acoustics parameters at receiver A-1. From top to bottom, and left to right: sound strength (G), early decay time (EDT), clarity (C_{80}), and interaural cross-correlation coefficient (IACC). For the sake of comparison, simulated values from energetic analysis (E) -in contrast to those from IRs (h)- are depicted with dashed trace.

7.2. Simulated-BRIRs Auralization: Before versus After Refurbishment.

As for the second of the experiments conducted, whose results are broken down in Figure 4(b), a significant difference between auralizations from impulse responses respectively referring to the conditions before and after the refurbishment of the auditorium cannot be concluded. Just in the scenario of the cello anechoic recording being convoluted with the binaural room impulse response obtained at the backstage seat included in this study, a statement of significant difference would be statistically justified.

Surprisingly enough, prominent deviances in terms of spatially-averaged reverberation time (T_{30}) between the states in comparison are manifest in the data plotted in Figure 8. Moreover, such mismatches get to a peak value beyond 5 JND falling at the 250-hertz-centred octave band, which should have yielded an easier recognition, above all, with cello music. Nonetheless, it must also be said that none of the rest of acoustic parameters herein analyzed put on display disparities surpassing 2 JND -with the exception of early decay time (EDT), connected to the subjective discernment of reverberance as well- as shown in Figure 6. On the whole, however, the number of correct responses does not seem to have been linked to either the receiver's location or the nature of the stimulus administered in this case.

To the question on how the odd sample was different, fewer answers were collected from this experiment than the preceding one. Among the assessors who did provide a response, reverberance and loudness were the most popular. But, given the fact that a low percentage of the panellists were truly able to tell the difference between the stimuli being presented for

comparison, these answers must have been the result of a guesswork, and are, therefore, inappropriate for further analysis.

8. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

It has been proven that there is still a significant difference between auralizations from experimentally recorded binaural room impulse responses and their simulated equivalents obtained by means of a numerically-validated acoustic model of the enclosure. Consequently, slightly different approaches should be attempted in the near future in order to reach room acoustics digital models specifically suited for feasible auralization. To do so, a strategy based on calibrating the geometric model by using figures for the best-known descriptors coming out of post-processed impulse responses –following standard procedures analogous to those considered when handling in-situ registers-, instead of resorting to data from energetic echograms might be advisable.

Interesting conclusions associated to the use of stimuli of varied nature can be reached from the listening tests conducted. The highly frequency-dependent behaviour usually demonstrated by most of the conventional room acoustics parameters makes it crucial to carry out specific spectral analysis of those anechoic input signals to be utilized in auralization prior to opting for one of convenience. It has been demonstrated that such a choice does play a fundamental role in disclosing dissimilarities in central acoustic features between auralizations eventually subjected to comparison.

Furthermore, considerable divergences found in descriptors correlating with certain subjective aspects of sound have been revealed to be capable of correctly foreseeing latter noticeable differences from eventual panellists' assessments in this sort of sensory experiments. That is the case for early decay time (EDT) and clarity (C_{80}) -conversely connected to reverberance- and sound strength (G) -in close relation to perceived sound level-. Therefore, analyzing numerical data for some acoustic parameters could help warn of juiceless and unnecessary campaigns of listening tests before being undertaken.

However, such a translation from numerical into perceptual differences turns out not to be so straight when it comes to reverberation time (T_{30}) being the only descriptor showing noteworthy variations. Given the fact that the seats removed from the concert hall were still in seemingly sound condition at the time of replacement, the outcome from the second experiment would have made it acoustically pointless. Nevertheless, not only is Acoustics in the architect's mind

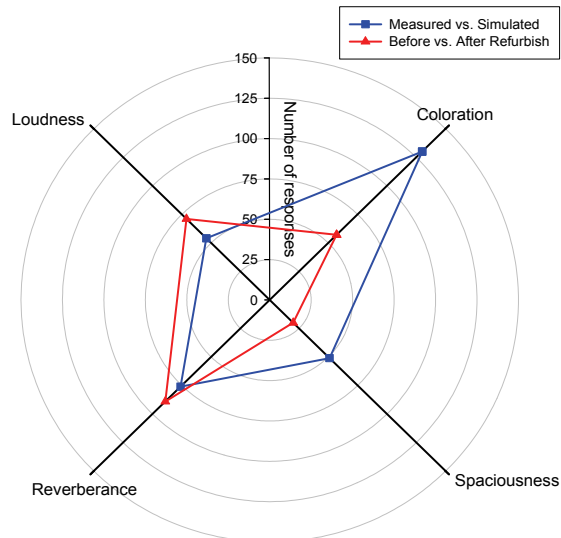


Figure 17. Combined polar diagram of panellists' preferences a propos of the nature of the difference between stimuli compared in the experiments. In blue: measured vs. simulated-IR auralization. In red: before- vs. after-refurbish auralization.

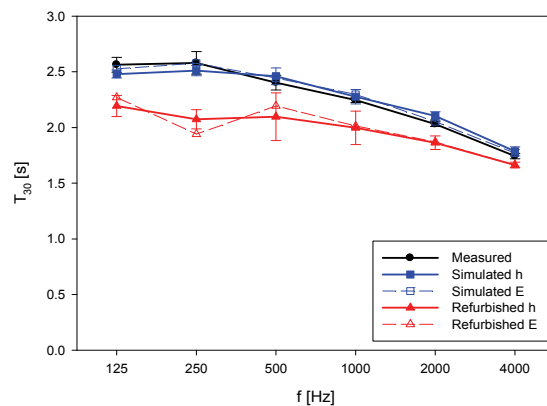


Figure 18. Spatially-averaged reverberation time (T_{30}) assessed at the three receivers in this work. Measured –in black- and simulated records –distinctively using blue and red colours for before- and after-refurbish states- are shown. Energy (E) and pressure analyses (h) have been also differentiated by dashed plot for the latter.

when taking on the design and management of this kind of projects. Visual aesthetics and budget restraints are key factors to be pondered over as well.

9. REFERENCES

- [1] Vorländer, M.: International round robin on room acoustical computer simulation. Proceedings of the 15th International Congress on Acoustics, Trondheim (Norway), 577-580, 1995.
- [2] Bork, I.: A comparison of room simulation software – The 2nd round robin on room acoustical computer simulation. *Acta Acustica united with Acustica* 86, 943–956, 2000.
- [3] Bork, I.: Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation. Part I: Measurements. *Acta Acustica united with Acustica*, 91, 740–752, 2005.
- [4] Bork, I.: Report on the 3rd round robin on room acoustical computer simulation. Part II: Calculations. *Acta Acustica united with Acustica*, 91, 753–763, 2005.
- [5] Vorländer, M.: Auralization of spaces. *Physics Today*, 62(6), 35-40, 2009.
- [6] Cremer, L.: Early lateral reflections in some modern concert halls. *Journal of the Acoustical Society of America*, 85(3), 1213-1225, 1989.
- [7] ISO 3382-1:2009(E): Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part 1: Performance rooms. International Organization for Standardization. Geneva (Switzerland): 2009.
- [8] Dalenbäck, B-I.: CATT TUCT v1.0 user's manual. Gothenburg (Sweden): 2010.
- [9] Kuttruff, H.: Room Acoustics. 4th edition. London: Spon, 2000.
- [10] Dalenbäck, B-I.: CATT-Acoustic v8 user's manual: Room acoustics prediction and walkthrough auralization. Gothenburg (Sweden): 2007.
- [11] Vorländer, Michael: Auralization: fundamentals of Acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality. 1st edition. RWTH Edition, Aachen (Germany). Berlin: Springer, 2008.
- [12] Zeng, X.; Christensen, C.L.; Rindel, J.H.: Practical methods to define scattering coefficients in a room acoustics computer model. *Applied Acoustics*, 67, 771-786, 2006.
- [13] Galindo, M.; Zamarreño, T.; Girón, S.: Acoustic simulations of Mudejar-Gothic churches. *Journal of the Acoustical Society of America*, 126(3), 1207-1218, 2009.
- [14] Dalenbäck, B-I.: CATT MultiVolver VST/WCP user's manual. Gothenburg (Sweden): 2011.
- [15] Bang and Olufsen: Music for Archimedes. Monophonic recording. CD B&O 101. 1992.
- [16] CATT-Acoustic user's webpage: anechoic recordings. Available online from: <http://www.catt.se/users.htm> (accessed 11 November, 2011).
- [17] Pätynen, J.; Pulkki, V.; Lokki, T.: Anechoic recording system for symphony orchestra. *Acta Acustica united with Acustica*, 94(6), 856-865, 2008.
- [18] Kemp, S.E.; Hollowood, T.; Hort, J.: Sensory evaluation: A practical handbook. 1st edition. Chichester (United Kingdom): Wiley-Blackwell, 2009.



ON THE USE OF BINAURAL RECORDINGS FOR DYNAMIC BINAURAL REPRODUCTION

Reference PACS: 43.60.Dh

Hoffmann, Pablo F.; Christensen, Flemming

*Acoustics, Department of Electronic Systems, Aalborg University
Fredrik Bajers Vej 7, DK-9220 Aalborg East, DENMARK
pfh@es.aau.dk, fc@es.aau.dk*

ABSTRACT

Binaural recordings are considered applicable only for static binaural reproduction. That is, playback of binaural recordings can only reproduce the sound field captured for the fixed position and orientation of the recording head. However, given some conditions it is possible to use binaural recordings for the reproduction of binaural signals that change according to the listener actions, i.e. dynamic binaural reproduction. Here we examine the conditions that allow for such dynamic recording/playback configuration and discuss advantages and disadvantages. Analysis and discussion focus on two case studies of reproduction of background sound in a car interior and of the rowing sound captured from elite athletes.

RESUMEN

Las grabaciones binaurales se consideran sólo aplicables a la reproducción binaural en condiciones estáticas. Esto se debe a que la reproducción de grabaciones binaurales sólo es válida para la posición y orientación de la cabeza usada durante las grabaciones. Sin embargo, dada ciertas condiciones es posible reproducir grabaciones binaurales que cambien de acuerdo a las acciones del oyente. Este tipo de reproducción lo llamamos reproducción binaural dinámica, y ofrece ciertas ventajas en la reproducción de audio tridimensional de alta fidelidad. En el presente artículo examinamos las condiciones que permiten el uso de reproducción binaural dinámica, y discutimos cuáles son las ventajas y desventajas de esta forma de reproducción de audio tridimensional. Análisis y discusión se dan en el marco de dos casos específicos, el primero correspondiente a la reproducción de ruido de fondo en el interior de un auto, y el segundo correspondiente a la reproducción del sonido de remo producido por remadores profesionales.

1. INTRODUCTION

Binaural technique implementations can be divided into two main categories: Binaural recording and binaural synthesis. Typically, binaural recordings are associated with the capturing of sound events that can be played back and thus accurately reproduce the recording scenario, whereas binaural synthesis is relying on simulations and eventually allowing the listener to move in the simulated scenario. This paper investigates a new idea of a hybrid method allowing listeners to move in recorded binaural scenarios.

1.1 Binaural Recording and Playback

Binaural recordings can be made with microphones mounted in the ear canal of an artificial head, or if the microphones are small enough, in the ear canals of humans. In both cases all sounds contained in a given scenario are captured in the recording process. The positioning of the recording head (human or artificial) defines the perspective of the sound scenario at the time

of recording. When the recording is played back over headphones, what was recorded in the ears of the recording head is fed to the ears of the listener in a one to one transmission. In a real life listening situation, movements by the listener will result in a different perspective relative to the individual sound sources i.e. the listener can move in the scenario. When listening to binaural recordings, however, the listener will hear the sound scenarios from listening positions defined by the recording heads position and orientation at the time of recording, and as such eventual movements done by the listener are not reflected in the sound scenario.

1.2 Binaural Synthesis

Binaural synthesis is usually implemented as mathematical convolution of impulse responses with anechoic sound recordings. The impulse responses are measured (or calculated) as either:

- Head Related Impulse Responses (HRIR) i.e. impulse responses measured in the ears of a human or artificial head. To make these responses describe sound from a direction rather than a specific loudspeaker, the impulse response from the sound source to a position in the centre of the head (head absent) are de-convolved.
- or Binaural Room Impulse Responses (BRIR) i.e. impulse responses measured from a sound source in a room to the ears of a human or artificial head.

If HRIRs are collected from many directions, BRIRs can be modelled by a calculated Room Impulse Response where the individual parts (direct sound and individual reflections) are convolved with the HRIRs from the corresponding directions. This allows for the BRIRs to be changed according to listener movements at the time of sound reproduction.

Real sound scenarios are often very complex, and re-creating sound scenarios in this manner is complicated since one BRIR is needed for every different sound source in a sound scenario. Simplifications are often introduced in order to overcome the task e.g. assumption of point sources, and simulation of space distributed sound sources by a limited number of point sources.

Thus, the binaural synthesis allows for the creation of interactive sound scenarios, but the complexity of the sound scenarios i.e. number of individual sound sources and shape of the sound sources are restricted by the computation power among other factors.

1.3 A hybrid method

The idea of the hybrid method is to be able to utilize the advantages of binaural recording in capturing all parts of a sound scenario in one recording process and making the playback system responsive to listener movements to the same degree as in binaural synthesis systems. This idea is further pursued in the following.

2. METHODS

In the following, two different practical cases are described with the aim of studying the hybrid method of Dynamic Binaural Reproduction.

2.1 Case A: Car Audio Simulator

In the development of car audio equipment there is a need to optimize systems by comparing e.g. different loudspeaker types or signal processing algorithms in listening tests. Such tests can be very hard to perform in the real car environment since e.g. different loudspeaker sets would have to be installed in the same car simultaneously. Similarly it is difficult to make a direct subjective comparison of an audio system installed in different cars, due to the unreliability of human auditory memory required when moving from car to car. For this reason a binaural simulation system for car audio equipment was constructed. For an extended description of the system and the related investigations see [1].

The system should simulate automotive audio through headphones with the purpose of making listening experiments in the laboratory. It consists of two main components, one for reproducing

the sound of the audio system itself and another for reproducing the background noise in the cabin, which could e.g. mask parts of the music from the audio system and therefore influence subjective judgements.

The use of binaural room synthesis i.e. measurement and application of Binaural Room Impulse Responses are straightforward for the audio system part, and comparable to methods used in e.g. binaural room scanning as described by [2]. A measurement signal is fed into the audio system and recorded with an artificial head at the listeners' position, and the system impulse response is calculated. However, the sound from the audio system is by far not the only one reaching the listeners ears. A car environment has – depending on the type of car – a substantial amount of background noise coming from e.g. the engine, exhaust pipe, tyres, suspension, side mirrors (turbulent air flow) and external noise sources such as sound from other cars, reflections of the cars own emitted noise by nearby objects, rain on the wind shield, etc. The source signal and the transmission characteristics can, for these parts of the sound, not be separated easily. For some parts of the background sounds, the source and transmission path interacts, so the system is non-linear, and the transmission can as such not be described by an impulse response [3]. So modelling such a system would require a complicated mathematical model including both a sound or vibration source and transmission structure.

A way of getting around the modelling problem would be to make a binaural recording of a real system i.e. inside a driving car. A normal binaural recording would facilitate only a fixed head position in the recording and listening situation. This is inadequate since e.g. rotation of a listeners head (in a real life listening situation) could result in one or both ears moving in or out of mode-positions in the sound field and result in different degrees of masking of the music from the audio system. To solve this issue, the binaural reproduction is implemented by recording the cabin noises with the artificial head rotated to various positions and reproducing the recordings through headphones. During playback the listener's head rotations are tracked and both the binaural synthesis (of the car Hi Fi) and the playback of binaural recordings are updated accordingly in real time.

The binaural audio system and cabin synthesis would typically be handled by simultaneous convolution of the sound source signal with the impulse responses of the relevant directions followed by a sort of cross fading to handle transitions between measured directions as the head is turned (illustrated in upper part of figure 1). The same strategy is used for the dynamic reproduction of binaural recordings (lower part of figure 1). However, in order for this to work we should be able to cross-fade between recordings from adjacent directions without a clearly audible transition from one to the other caused by differences in the source signals. Such differences could appear for many types of live signals (e.g. music or speech signals). A transition from one recording to the next can happen at arbitrary periods in time depending on the movement of the listener. The only situation where one can be sure that a live signal will result in the right cross-faded signal is if the signal can be considered stationary (for the time of the recording session). Such signals could for instance be random or quasi-random signals with unchanging timbre as for instance the noise in a car cabin. In the car background noise situation, it should thus be possible to use this strategy.

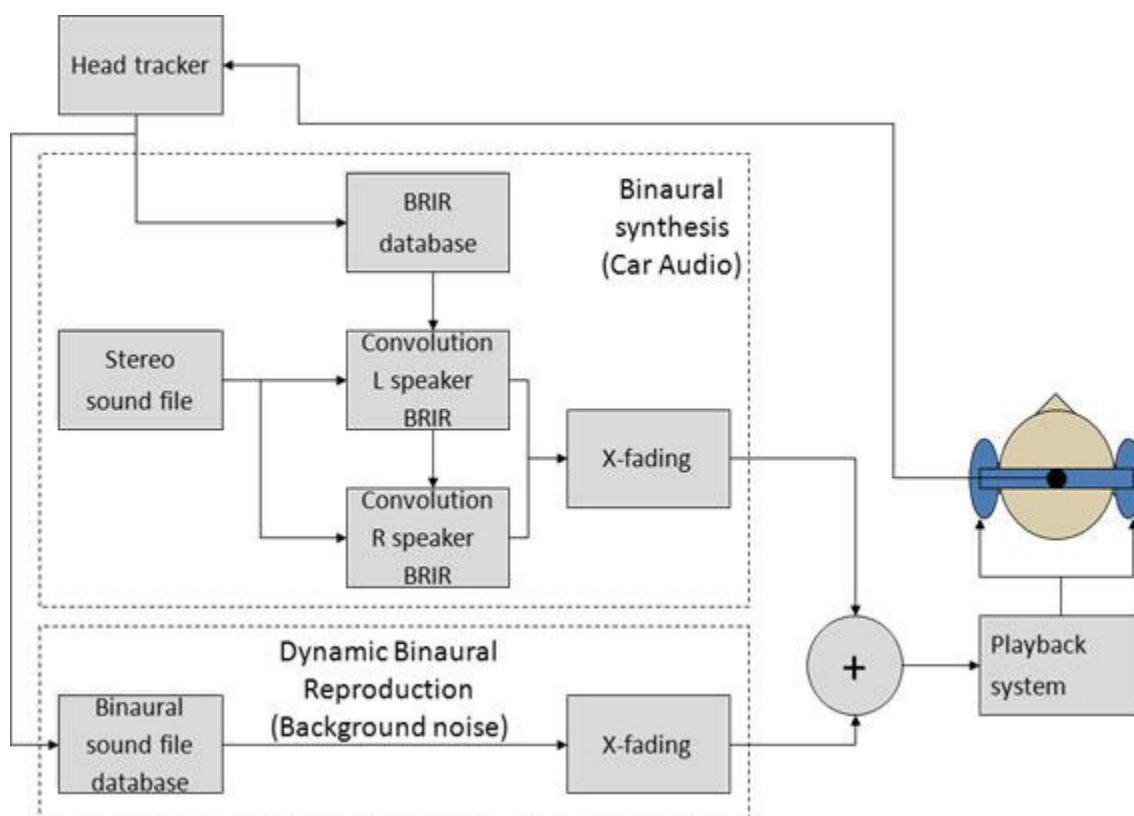


Figure 1 Car audio and background noise simulation system

2.2 Case B: Binaural Sound of Rowing

As part of the implementation of a virtual training environment for rowing [4], a sound rendering module has been included that enables dynamic binaural reproduction of real-life sounds recorded at the ears of experienced athletes.

In addition to the natural sounds that are present in a typical rowing setting, the sound of rowing is mostly dominated by the sound of the rowing stroke. Among the sounds that constitute the sound of the rowing stroke we can identify the sounds from the athlete's movements, splash sounds from the oar blades entering and exiting the water, the propelling sound of the boat as it cuts the water, the mechanical sounds produced by the interaction between the oars and oar locks, and the general transmission of sound through the structure of the boat. Same as for the sound of the car environment, the complex sound of rowing poses a challenge to its rendering if a high level of authenticity is desired. Conventional binaural synthesis and mixing of the individual sources require the rendering of a prohibitive large number of sources. Instead, we analysed binaural recordings that were obtained from experienced rowers. Specifically, binaural recordings were segmented according to velocities, in strokes per minute (SPMs), that span a range between 18 SPMs and 40 SPMs, and stroke phase corresponding to entry, drive, recovery and finish.

The sound rendering system for rowing was implemented as follows. For each velocity, given in SPM, and each stroke phase, three sound excerpts were manually selected from the binaural recordings of the most experienced rower. A database of audio files was constructed using these sound excerpts. Audio files were stored in WAV format (16-bit and 48-kHz sampling rate) and had a fixed duration of 2 seconds. The duration of the longer stroke phase was approximately about 1.2 seconds, and thus each audio file in the database started with the sound of its corresponding phase and the remaining part was filled with environmental sound, i.e. sound from the boat when not in motion or receding in speed, birds, trees moving with the wind, etc. Figure 3 provides a schematic description of the sound rendering system. The sound renderer was synchronized with velocities and rowing phases reported by the rowing simulator. Every 10 ms (100-Hz update) the system received velocity and phase information that used to index and retrieve at random one of the three audio files corresponding to that particular

combination of velocity and phase (as an example, the selected sound is represented by the yellow box in the figure). The idea of having more than one sound per velocity and phase was borrowed from audio rendering techniques for games, and the reason was an attempt to avoid making the sound rendering too boring or predictable [6].

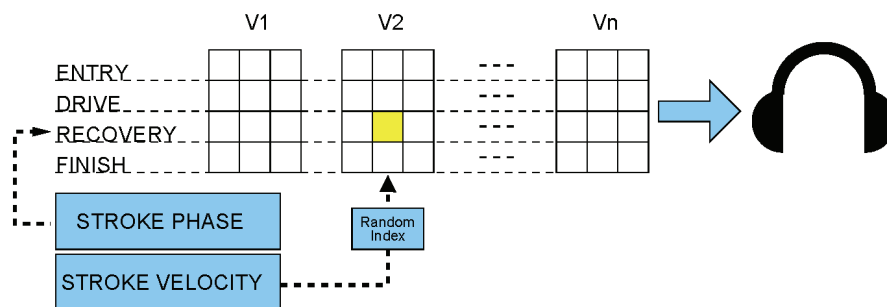


Figure 2 Schematic representation of binaural dynamic reproduction of rowing sounds

The aspect of the rendering system we want to emphasize is that the implementation combines binaural recordings and concatenative synthesis [5] in the sense that different recordings are selected, concatenated and reproduced in response to the user's inputs. It seems that provided the sound to be rendered has a strong cyclic component, as in this case, it is possible to render a realistic simulation of that sound based on binaural recordings. This appears to be particularly advantageous considering that for complex sound fields having numerous sound sources that cannot all be accounted for, or recorded individually, binaural synthesis cannot achieve the same degree of perceived quality as that of binaural recording and reproduction.

3. DISCUSSION

We have presented two cases in which we propose the use of dynamic binaural reproduction for interactive virtual environments. This approach is feasible provided that certain conditions are met. What seems common to the two cases described is that for dynamic binaural reproduction to work one requires that one or some physical dimension in the recording is independent of sound direction. That is, in the first case the main assumption is that timbre in the background noise of a car interior is constant with respect to spatial position. In the second case we assumed that when the sound field is strongly influenced by rhythmic or cyclic components, the binaural recordings can be parsed into segments representing specific static auditory spatial scenes whose sequential concatenation renders the desired sound field, e.g. the phases in rowing stroke.

Because the rendering principle behind dynamic binaural reproduction is based on the concatenation of binaural recordings, dynamic binaural reproduction can reconstruct all the spatial, temporal and qualitative characteristics of the captured sound field in the same way as conventional binaural reproduction. Although we do emphasize the binaural aspect of reproduction in terms of the level of authenticity that can be achieved without much processing on the reproduced signals, it is important to mention that probably the most critical aspect of dynamic reproduction is the procedure used to concatenate the different binaural audio segments. During playback of a single event all the spatial information can be authentically reproduced except at the time the concatenation or cross-fade takes place. That is, it is critical to evaluate whether artefacts produced by the concatenation and looping of the audio segments are not audible, or whether they can be masked by the sounds being concatenated.

A limitation of dynamic binaural reproduction is that it is necessary to impose constraints on the user movements within the virtual auditory environment. That is, user's actions need to be bounded. For example, sound rendering on the rowing simulator works well as long as the simulator provides a valid rowing phase and the user is moving the head backwards and forwards according to the motion required by the correct rowing technique. If the user rotates the head around, the system is not capable to respond to these changes and thus the sound does not update accordingly. Allowing this would require an even bigger data base of recordings, where the expert rower turned the head in several directions at which the recordings were repeated.

We hope to further explore the possibilities that binaural recordings may offer for their implementation in dynamic interactive virtual environments.

4. ACKNOWLEDGMENTS

Pablo Hoffmann acknowledges support from the SKILLS Integrated Project (IST-FP6 #035005, <http://www.skills-ip.eu>) funded by the European Commission.

5. REFERENCES

- [1] Christensen, F., Martin, G., Minnaar, P., Song, W., Pedersen, B., & Lydolf, M. (2005). A listening test system for automotive audio-part 1: System description. Proceedings of AES 118th Convention, Barcelona, Spain. Paper Number 6358.
- [2] Karamustafaoglu A., Horbach U., Pelegrini R., Mackensen P., Theile G. (1999): "Design and Applications of a Data-based Auralisation System for Surround Sound", *Proceedings of 106th Audio Engineering Society Convention, Munich, Germany, May 8-11, 1999, preprint 4976.*
- [3] Oppenheim A. V., Schaffer, R. W. (1989): "Discrete-time Signal Processing", *Prentice-Hall, Inc. 1989. ISBN 0-13-216771-9*
- [4] Ruffaldi E., Filippeschi. A., Avizzano, C. A., Bergamasco, M. (2010) Skill modeling and feedback design for training rowing with virtual environments, *in Proceedings of 3rd International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*, ed. David B. Kaber, Edward P. Fitts, CRC Press / Taylor & Francis, June 2010
- [5] Schwarz, D. (2005) Current research in concatenative sound synthesis, *Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC)*, Barcelona, Spain, September 5-9.
- [6] Vachon, J-F. (2009) Avoiding tedium – Fighting repetition in game audio, *Proceedings of the 35th AES International Conference: Audio for Games*, London, UK, February 11-13.



EXPLORATION OF VIRTUAL ACOUSTIC ROOM SIMULATIONS BY THE VISUALLY IMPAIRED

Reference PACS: 43.55.Ka, 43.66.Qp, 43.55.Hy

Katz, Brian F.G.¹ ;Picinali, Lorenzo²

¹LIMSI-CNRS, Orsay, France.

brian.katz@limsi.fr

²Fused Media Lab, De Montfort Univ., Leicester, UK.

LPicinali@dmu.ac.uk

ABSTRACT

Virtual acoustic simulations of two interior architectural environments were presented to visually impaired individuals. Interpretations of the presented acoustic information, through block map reconstructions, were compared to reconstructions following in-situ exploration as well as playback of binaural and Ambisonic walkthrough recordings of the same spaces. Results show that dynamic exploration of virtual acoustic room simulations outperforms passive recording playback situations, despite dynamic rotation cues offered by Ambisonic playback. Simulations used off-line HOA RIR synthesis and a hybrid rendering combining pre-convolved signals and real-time convolutions for sounds related to user displacement and self-generated noise.

1. CONTEXT

The use of virtual acoustics auralization has become common practice in recent years in the domain of architectural acoustic consulting. Such simulations are also often used in historical and acoustical archaeological studies, offering audio results for aesthetic judgments or qualitative comparisons on standardized parameters. However, these types of applications rarely focus on the true realism of the simulation from a non-aesthetic point of view. In contrast, this study presents a study where virtual room acoustic simulations are presented to visually impaired individuals to evaluate if these simulated environments are sufficiently accurate so that visually impaired users can correctly describe the architectural space. If successful, such a virtual simulation could be used as an aid for visually impaired individuals to learn the configuration of new and unknown spaces. For example, upon taking a new job in a new building, the individual could explore the building at home so as to be able to move more freely once on-site. In addition, details of room acoustic simulation calculation and rendering methods can be explored relative to which acoustic cues are more pertinent for spatial acoustic perception. With such information, virtual acoustic simulations for the visually impaired could be improved, by refining such cues, and optimized, by reducing calculation costs for non-relevant cues. In the following sections, the different stages of the study will be described. Special attention will be paid to the system rendering architecture for real-time navigation.

2. OVERVIEW

Various studies have attested to the capacity of the blind to navigate in complex environments without relying on visual inputs [3][7]. In the absence of sight, kinesthetic experience is a valid alternative source of information for constructing mental representations of an environment. Typical protocols consist of participants learning a new environment by locomotion (with or

without a guide), followed by various mental operations on their internal representations of the environment. For instance, participants could estimate distances and directions from one location to another one [3].

Recent studies have employed virtual auditory reality simulations to investigate the role of the learning experience in the acquisition of spatial knowledge by blind people (see [2]). Active exploration in the virtual environment was compared to verbal descriptions. When participants performed localization tasks (pointing towards the location of different targets within the environment), errors were higher with the verbal description group. Furthermore, following a mental distances comparison task between pairs of targets, response times confirmed that longer distances systematically required longer scanning times, reflecting that the metrics of the original scene were preserved in the internal representation of the environment [1].

Most interactive systems (e.g. gaming applications) are visually-oriented. While some engines take into account source localization of the direct sound, reverberation is often simplified and the spatial aspects neglected. Basic reverberation algorithms are not designed to provide such geometric information. Room acoustic auralization systems though should provide such level of spatial detail (see [10]). The study presented in the following sections proposes to compare the acoustic cues provided by a real architecture with those furnished both by *in-situ* recordings and by using a numerical room simulation, as interpreted by visual impaired individuals. This is seen as the first step in responding to the need of developing interactive systems specifically created and calibrated for visually impaired individuals.

In contrast to previous studies, this work focuses primarily on the understanding of an architectural space, and not on the precise localization of sound sources. As a typical case, this study was performed in two corridor spaces in a laboratory building (see Fig. 1). These spaces are not exceptionally complicated, containing an assortment of doors, side branches, ceiling material variations, stairwells, and static noise sources. In order to provide reference points for certain validations, some additional sound sources were added using simple audio loops played back over portable loudspeakers. Results for distance comparison tasks have been previously presented elsewhere (see [4][5][9]). This paper presents the technical aspects of the *in-situ* recordings and the virtual room acoustics simulations. Results concerning map reconstructions of the spaces are also presented.

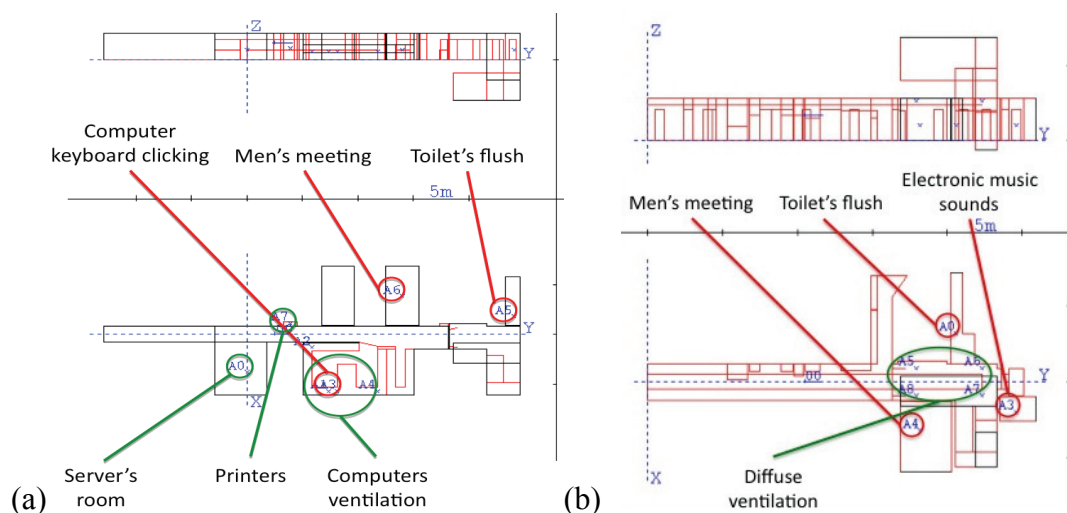


Figure 1. Geometrical acoustic model of the (a) first and (b) second experimental spaces, including positions of real (green lines and circles) and installed audio loop playback (red lines and circles) sources.

3. IN-SITU 3D RECORDING

3.1 Recording method

Recordings were carried out in two different sessions. In the first session, a blind person equipped only with in-ear binaural microphones navigated the environment while his path, body, and head movements were tracked via multiple synchronized CCTV cameras and a system of

markers positioned along the walls of the environment. No white-cane or guide-dog was allowed, and the individual was asked to avoid contact with any surfaces, and recommended to remain along the centerline. No walking speed or head movements were imposed, and he was asked to make any movements or noises as necessary to obtain a confident sense of the architectural space. The subject made one down and back trip for each corridor; no contact was ever made with any wall or other object.

Subsequent to this, in a second session, an operator equipped with both binaural and B-format microphones precisely repeated the trajectories. The path, movements, and any self-generated noises (other than commentaries) were reconstructed following a precise timeline established from analysis of the first session's recording.

3.2 Playback method

Two methods were employed in order to reproduce the different recorded signals. For the binaural playback, a simple stereo player was used. In the case of the B-Format recording, a conversion to binaural was necessary. The 1st order recorded Ambisonic signal was rendered over binaural headphones using the virtual speaker approach. The conversion from Ambisonic to stereo binaural signal was realized through the development and implementation of a customized software platform using MaxMSP and a head orientation tracking device (XSens MTi). The use of head tracking allowed for the orientation of the 3D sound-field to be modified in real-time, performing rotations in the Ambisonic domain as a function of participant's head movements, thereby keeping the scene stable in the world reference frame. The rotated signal was then decoded on a virtual loudspeakers system with the sources placed on the vertices of a dodecahedron. These twelve decoded signals were then rendered as individual binaural sources via twelve instances of a binaural spatialization algorithm, converting each monophonic signal to a stereophonic binaural signal. The twelve binauralized virtual loudspeaker signals were then summed and presented to the subject.

The binaural spatialization algorithm used [6] employs time domain convolution with Head Related Impulse Responses (HRIR) from IRCAM's Listen project database (<http://recherche.ircam.fr/equipes/salles/listen/>). More information about this approach can be found in [5]. Full-phase HRIRs were used, rather than minimum-phase simplifications, in order to maintain a highest level of spatial information. Customization of the Interaural Time Differences (ITD), using a head circumference model of the participant, and an HRTF selection phase, were also performed to improve so that an optimal binaural rendering could be achieved.

3.3 Exploration protocol

Each subject was presented with one of the two types of recordings for each of the two environments. Participants were seated during playback. The initial part of the session comprised a learning phase, consisting of repeated listenings to the playback until the participants felt they understood the environment. In the binaural recording condition, participants were totally passive, and instructed to remain still with a fixed head orientation. Acoustic cues related to head movements and orientation in the scene were dictated by the state of the operator's head during the recording. In the Ambisonic recording condition, participants were able to freely perform head rotations, which resulted in real-time modification of the 3D sound environment, ensuring stability of the scene in the world reference frame. Participants were allowed to listen to each recording as many times as desired. As these were playback recordings, performed at a given walking speed, it was not possible to dynamically change the navigation speed or direction. Nothing was asked of the participants in this phase.

Two tasks followed the learning phase. Upon a final replay of the recording, participants were invited to provide a verbal description of every sound source or architectural element detected along the path. Following that, participants reconstructed the spatial structure of the environment using a set of LEGO® blocks. This map reconstruction was assumed to provide a valid reflection of their mental representation of the environment.

4. VIRTUAL ROOM ACOUSTIC SYNTHESIS

A key element observed in the in-situ recording playback condition was the lack of interactivity and free movement within the simulated environments. Discussions with the initial participants of the in-situ experimental condition highlighted this fact, and the difficulty in interpreting the recordings. Through the use of an interactive virtual environment, it was hoped that this issue could be addressed, at least to some degree. While interactivity is more feasible in a virtual simulation, the accuracy of the numerical simulations and the complexity or richness of the audible soundscape may be more limited. For this initial study, a truly interactive real-time room acoustic simulation was considered too costly in computational resources. As such, a hybrid simulation was developed, combining off-line calculated room impulse responses (RIR) and convolutions with real-time panning and mixing.

4.1 Acoustical model

3D architectural acoustic models were created for the two corridors using the CATT-Acoustics software (<http://www.catt.se>). Within each of these acoustic models, in addition to the architectural elements, the different sound sources from the real situation were included in order to present a comparable scene. A third, simple geometry model was also created for a training phase, so that subjects could become familiar with the overall interface and exploration protocol. The geometrical models of the two experimental spaces are shown in Fig. 1. Acoustical surface material definitions were determined and adjusted iteratively so as to match the materials present in the real environments. RIR measurements were performed in two positions for each environment (one position in the middle and one at the far end, near the staircase). The simulation's material definitions were adjusted so as to obtain the same room acoustical parameters, RT60 in octave bands, between the simulated and measured RIR.

It was observed in the real navigation phase that blind individuals made extensive use of self-generated noises, such as finger snapping and footsteps, in order to determine the position of an object (wall, door, table, etc.) by listening to the reflections of the acoustic signals. As such, the simulation of these noises was included. With the various elements taken into account, a large number of spatial impulse responses were required for the virtual active navigation rendering. A 2nd order Ambisonic (HOA) rendering engine was used (as opposed to the pre-recorded walkthrough using 1st order) to improve spatial precision while still allowing for dynamic head rotation.

4.2 The navigation platform

Due to the large number of concurrent sources and to the size of HOA RIRs, a real-time accurate rendering was not feasible. A more economical yet high performance hybrid method was developed. As a first step, navigation was limited to one dimension only. Benefiting from the fact that both environments were corridors, the user was restricted to movements along the centerline. Receiver positions were defined at equally spaced positions (every 50 cm) along this line, at head height. The different noise source positions, as indicated in Fig. 1, were included, providing a collection of HOA RIR for each receiver position. In order to provide real-time navigation of such complicated simulated environments, a pre-rendering of the HOA signals for each position of the listener was performed off-line using in-situ recordings or the same audio file loops as were used in the real condition. At navigation time, a simple Ambisonic panning was performed between the nearest points along the centerline pathway, rather than performing all convolutions in real-time.

To include self-generated noises, source positions at ground level (for footfall noise) and waist height (finger snap noise) were also included. Finger snap and footfall noises were rendered off-line and added in real-time to the final Ambisonic soundscape. The final Ambisonic mix was converted to binaural using the same approach described in Section 3.2, though extended to account for 2nd order Ambisonic format.

In the experimental condition, participants were provided with a joystick as a navigation control device and a pair of headphones equipped with the head-tracking device (as in Section 3.2). Footfall noise was automatically rendered in accordance with the participant's displacement in

the virtual environment, approximating a 50 cm stride. The navigation speed was continuously variable from 0.1 to 1 m/s, proportional to the degree of forward pressure applied to the joystick. The finger snap was played each time the listener pressed a button on the joystick.

In total, 44 receiver positions were calculated for the first corridor and 31 for the second. As can be seen in Fig. 1, for the first environment 4 virtual sound sources were created for simulating the real sources in the real environment (2 sources were used for simulating the computer ventilation noise), while an additional 3 virtual sources were created for simulating the artificial looped audio playback sources. Similarly for the second corridor, 4 real sources (used to simulate the diffuse ventilation noise) and 3 artificial ones were defined. In both virtual spaces, a total of seven HOA source-receiver pair RIRs were synthesized for each receiver position (308 and 217 RIRs for the first and second corridor respectively). In addition, for each receiver position, a corresponding RIR was synthesized for simulating the finger snapping noise: the source, in this case, was different for each receiver, positioned at a height of 110 cm and a distance of 50 cm ahead of the receiver in order to more accurately represent the position of the hand's location. Finally, to account for the footstep noise, a RIR was synthesized for each receiver position at a height of 1 cm, and at a distance of 10 cm to the left of the centerline for the left step, and correspondingly to the right for the right step. The step side was alternated, starting with the right foot forward. A total of 396 HOA RIRs were synthesized for the first corridor and 279 for the second.

Each RIR was pre-convolved with the corresponding audio source signal. For the real sources, signals have been recorded in the real environment (as close as possible to the noise sources in order to minimize acoustical contributions of the room in the recordings). For the virtual sources, the same signals used for the audio playback loops in the real navigation condition were used. Two audio samples were selected for the finger snap and footstep noise, allowing for source variation. A total of 3564 and 2511 signals were convolved for the first and second corridor respectively.

The convolved HOA signals corresponding to the seven static sources were summed for each receiver's position. The resulting 9-channel mixes were then read in a MaxMSP patch and played back synchronously in a loop (the length of the signals was approximately 2 minutes). In order to make the processing more efficient, the multichannel player only played the signals corresponding to the two receiver positions closest to the actual position of the individual during the virtual navigation. A cosine-based crossfade was performed between these two HOA signals relative to the position. The playback of the convolved signals of the finger snapping noise was activated when the individual pressed one of the buttons on the joystick, cross-faded in a similar fashion. The footstep noise, with the position chosen relative to the current navigation position, was played at every displacement interval of 50 cm without any cross-fade. The resulting HOA 9-channel audio stream, comprising the sum of the static sources, finger snapping, and footstep noise, was then sent to the virtual loudspeakers conversion algorithm as previously described.

5. EVALUATION

The experiment consisted in comparing two modes of navigation along two different corridors, with the possibility offered to the participants to go back and forth along the path at will. Along the corridor, a number of sources were placed at specific locations, corresponding to those in the real navigation condition. The assessment of spatial knowledge acquired in the two conditions was examined through the creation of a map reconstruction of each environment. A distance comparison task was also performed (for results, see [1]). For the first navigated corridor, the two tasks were executed in one order (block reconstruction followed by distance comparison); while for the second learned corridor the order was reversed.

Two congenitally blind and three late blind participants (two female, three male) took part in the in-situ recording condition. Verbal descriptions for the in-situ recording condition revealed that participants acquired a rather poor understanding of the navigated environments. This was further confirmed by analysis of the reconstructions. Fig. 2 shows reconstructions of the second corridor space for the different conditions. For the real navigation condition, the overall structure

and a number of details are correctly represented. The reconstruction shown for the binaural playback condition reflects strong distortions as well as misinterpretations, as confirmed by the verbal description. The reconstruction shown following the Ambisonic playback condition reflects similar poor and misleading mental representations. Due to the very poor results for this test, indicating the difficulty of the task, this experiment was terminated prior to any additional participants completing the experiment.

In the virtual condition, three congenitally blind and two late blind individuals (three females, two males) explored the same two corridors. As a reference condition, two congenitally blind and three late blind individuals (three females, two males) performed the exploration and reconstruction task via real exploration for the two corridors.

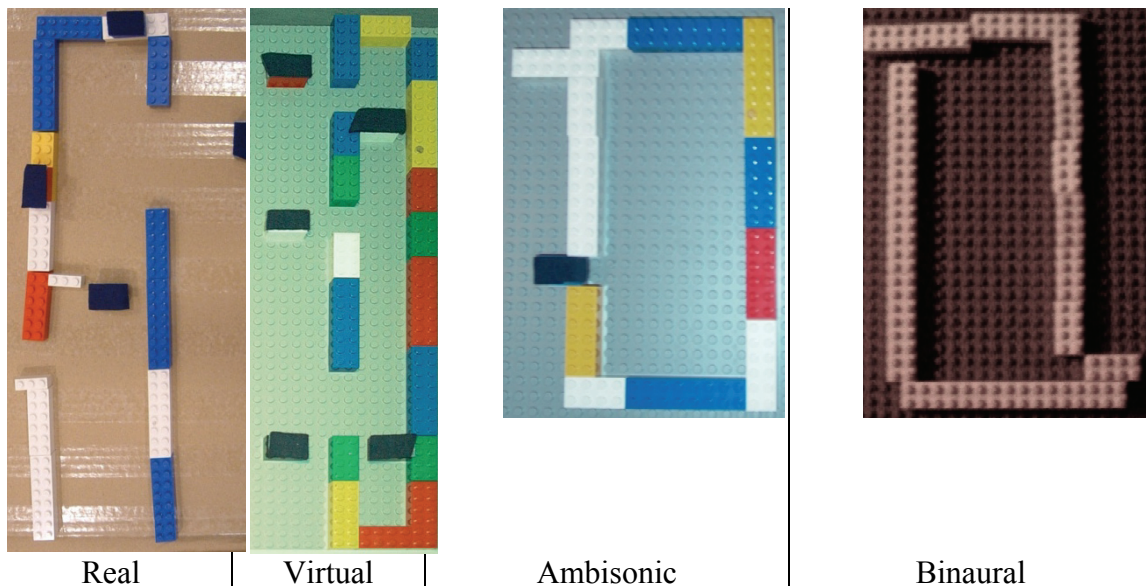


Figure 2: Photographs of representative map reconstructions of the second corridor space following real navigation, virtual navigation, Ambisonic playback, and binaural playback.

5.1 Maps

The map reconstructions made by each participant were photographed. Each map also included a corresponding audio description by the participant, to help understand the elements used. An example of a reconstruction for each exploration condition is shown in Fig. 2. Several measures were made on the resulting block reconstructions: number of sound sources mentioned, number of open doors and staircases identified, number of perceived changes of the nature of the ground, etc. Beyond some distinctive characteristics of the different reconstructions (e.g. representation of wide or narrower corridor), no particular differences were found between real and virtual navigation conditions; both were remarkably accurate as regards the relative positions of the sound sources (see example in Fig. 2). Door openings into rooms containing a sound source were well identified, while greater difficulty was observed for rooms with no sound source present. Participants were also capable of distinctively perceiving the various surface material changes along the corridors.

Participants' comments about the binaural recordings pointed to the difficulties related to the absence of information about displacement and head orientation. Ambisonic playback, while offering head-rotation correction, still resulted in poor performance, worse in some cases relative to binaural recordings, because of the comparably poorer localization accuracy provided by this particular recording/restitution technique. Interestingly, participants in the playback conditions failed to comprehend that the recordings were made in a straight corridor with openings on the two sides.

In order to perform more detailed comparisons, each map was manually transcribed into MatLab in order to create a numerical version. A reference template (see Fig. 3(a) for the first corridor template) was created which included all sound sources and the basic architectural dimensions. A total of 93 different coordinate elements were included for the first corridor, while

only 46 were include for the simpler second corridor. Examples of numerical map reconstructions for different conditions are shown in Fig. 3. From analysis of the reconstructions, participants identified a mean of 46 ± 12 points for the first corridor and 20 ± 9 for the second.

5.2 Correlation

An objective evaluation, as opposed to a human visual comparison, on how similar the different reconstructions are from the actual maps of the navigated environments was carried out. A 2D bidimensional regression analysis [8] provided a correlation index between the reference map and each reconstructed map. This method included some normalization in order to account for different scales used between participants, as well as for the reference map. Only those elements present in each individual's reconstruction were used in the correlation computation. This resulted in a bias for maps with very few identified elements, as for example a simple rectangle would have a high correlation index, but would not represent a high degree of understanding for the space. Results for the correlation analysis of all conditions and subjects are shown in Fig. 4 with respect to the relative number of identified elements in each map reconstruction.

While the number of subjects in the experiment is relatively low, due to time and conditions necessary for both the environment and the participant, there are some clearly observable tendencies. In the real exploration condition, both the correlation index and the quantity of identified elements are rather high. For both corridors, the Ambisonic and Binaural conditions present rather low correlations and number of identified elements, relative to the other conditions. As no participant performed more than one condition, there are likely to be some individual variance effects, but all subjects expressed their comfort in the task and their understanding of the space at the time of the experiment.

There was a notable difference in the results between the two corridors, with the virtual condition in general providing higher correlation values than even the real condition. In contrast, in the second corridor, while the virtual condition still performed generally better than the two *in-situ* conditions, it was not comparable to the real condition. Due to the limited number of participants, no analysis was performed comparing the results between early and late blind individuals.

6. CONCLUSION

Overall, results showed that listening to passive binaural playback or Ambisonic playback, which also included interactive head-movements, provided less usable information than a virtual simulation with respect to the acquisition of spatial information of an interior architectural environment. The presence of both dynamic cues relative to displacement and controlled events such as finger snaps, as included in the virtual condition, were deemed highly valuable by the participants. Virtual acoustic simulations provided acoustic information that allowed for highly correlated detailed map reconstructions relative to a real exploration condition. Some differences were found between the two experimental corridors, with the more complex environment offering better results than the corridors with more diffuse noise sources.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

This study was supported in part by a grant from the European Union (STREP Wayfinding, n° 12959). Experiments conducted were approved by the Ethics Committee of the National Centre for Scientific Research (*Comité Opérationnel pour l'Ethique en Sciences de la Vie*).

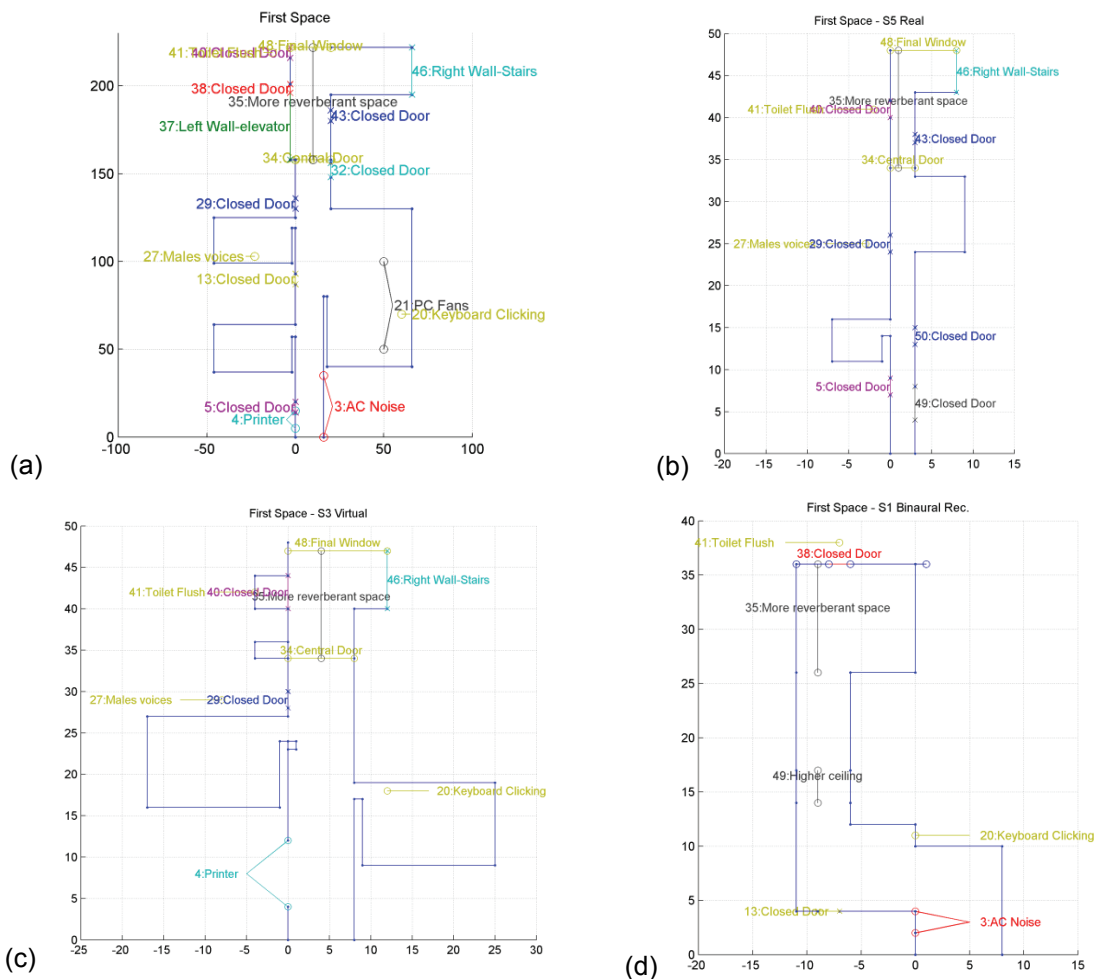


Figure 3. (a) Reference map for the first corridor space, units in decimeters. Example transcribed map reconstructions for (b) real, (c) virtual, and (d) binaural recording exploration conditions, units in LEGO pips.

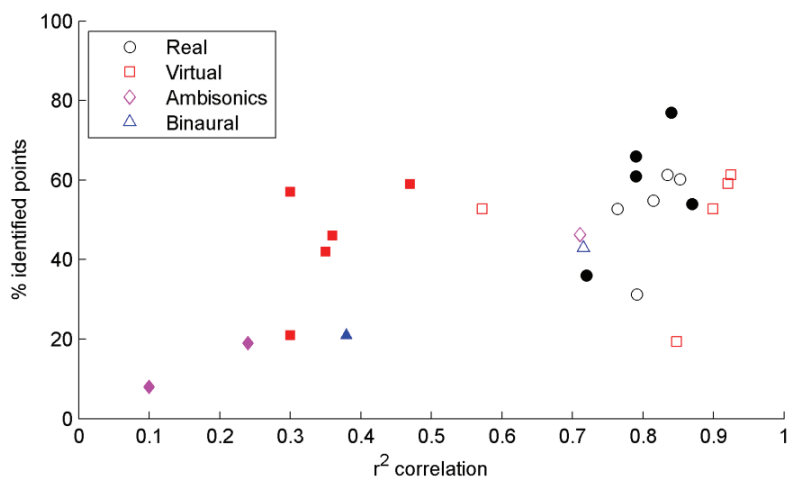


Figure 4. Correlation index versus percentage of identified elements in the map reconstruction for all subjects for the first (open markers) and second (filled markers) corridor spaces.

8. REFERENCES

- [1] Afonso, A., Blum, A., Katz, B.F.G., Tarroux, P., Borst, G., Denis, M. (2010) *Structural properties of spatial representations in blind people: scanning images constructed from haptic exploration or from locomotion in a 3-D audio virtual environment*. *Memory & Cognition*, vol. 38.
- [2] Afonso, A., Katz, B. F. G., Blum, A. & Denis, M. (2005). *Spatial knowledge without vision in an auditory VR environment*, Proc. of the XIV meeting of the European Society for Cognitive Psychology, Leiden, the Netherlands.
- [3] Byrne, R. W. and Salter, E. (1983). Distances and directions in the cognitive maps of the blind, *Canadian Journal of Psychology*, 70.
- [4] Denis, M., Afonso, A., Picinali, L. & Katz, B.F.G (2009). *Blind people's spatial representations: Learning indoor environments from virtual navigational experience*. Proc. of the 11th European Congress of Psychology, 7-10 July 2009, Oslo, Norway.
- [5] Katz, B.F.G. & Picinali, L. (2011) Spatial Audio Applied to Research with the Blind. *Advances in Sound Localization*, Strumillo, P., ed., INTECH, 2011.
- [6] LSE (2010) IDDN.FR.001.340014.000.S.P.2010.000.31235 LSE (LIMSI Spatialization Engine)
- [7] Loomis, J. M., Klatzky, R. L., Golledge, R. G., Cicinelli, J. G., Pellegrino, J. W., & Fry, P. A. (1993). Nonvisual navigation by blind and sighted: Assessment of path integration ability. *Journal of Experimental Psychology: General*, 122.
- [8] Nakaya, T. Statistical inferences in bidimensional regression models. *Geographical Analysis*, Vol. 29 (1997).
- [9] Picinali, L., Katz, B.F.G., Afonso, A. & Denis, M. (2011). *Acquisition of spatial knowledge of architectural spaces via active and passive aural explorations by the blind*. Proc. of the Forum Acusticum 2011, Aalborg, 27-June - 1-July, 2011.
- [10] Vorländer, M. (2008). *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. Springer-Verlag, Aachen, Germany, 2008.



HERRAMIENTA 3D-FDTD PARA EL ANÁLISIS DE SISTEMAS DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO MEDIANTE VISUALIZACIÓN DEL CAMPO SONORO RESULTANTE

Referencia PACS: 43.55.Ka, 43.60.c

Machín, Jorge¹; San Martín, Ricardo¹; Ferrer, Miguel²

¹Universidad Pública de Navarra, Campus Arrosadía s/n, Pamplona, España.
jorge.machin@unavarra.es, ricardo.sanmartin@unavarra.es

²Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, Valencia, España.
mferrer@ocom.upv.es

ABSTRACT

This work shows the potential of the finite difference time domain method (FDTD) for those simulations that require some type of signal processing. A tool in MATLAB ® language has been implemented which can perform FDTD simulations and verify the correct functioning of different signal processing algorithms, such as Active Noise Control (ANC). Since it is a time simulation, FDTD method provides information about resulting sound field at each moment, reflecting the behavior of the algorithms and the room both in transient and stationary states.

RESUMEN

Este trabajo muestra el potencial de la técnica de diferencias finitas en el dominio temporal (FDTD) para el estudio de la propagación del campo acústico en recintos donde se generan sonidos en base a algún tipo de procesamiento de las señales acústicas existentes en el recinto. Se ha diseñado una herramienta, en lenguaje MATLAB®, en la que se pueden realizar simulaciones mediante FDTD y comprobar el correcto funcionamiento de diferentes algoritmos de procesamiento de señal para la aplicación de Control Activo de Ruido (CAR). La técnica FDTD, al tratarse de una simulación en tiempo, ofrece información del campo acústico resultante en cada instante, reflejando el comportamiento de los algoritmos y de la sala tanto en el transitorio como en el estacionario.

1. INTRODUCCIÓN

Mediante las técnicas FDTD la propagación del campo sonoro se simula numéricamente aproximando las derivadas parciales en espacio y tiempo de la ecuación de ondas mediante diferencias finitas. De esta manera se determina el nivel sonoro para cada momento en los puntos de una malla que comprende el espacio a simular, permitiendo modelar todos los fenómenos acústicos ondulatorios, como pueden ser la difracción, interferencias, etc. Esta técnica es ampliamente utilizada en la actualidad aplicándose, por ejemplo, en el estudio de la influencia del *seat deep effect* en auditorios [1], o el análisis de las prestaciones de diferentes tipos de difusores acústicos [2].

La interfaz implementada permite diseñar y analizar infinidad de geometrías tanto en 2D como en 3D. Se convierte por tanto en una herramienta flexible para el estudio de fenómenos ondulatorios cuya principal limitación es el tiempo necesario para realizar las simulaciones. Sin embargo, la creciente potencia computacional invita a pensar que esta limitación será en breve minimizada.

Por otro lado, para mostrar el potencial de la herramienta presentada en este estudio, se ha elegido un algoritmo aplicado al Control Activo de Ruido (CAR). Esta técnica consiste en reducir el ruido presente en un punto o zona a partir de una señal generada electroacústicamente en contrafase al ruido. Se basa en el principio de superposición de ondas sonoras, más concretamente en el de interferencia destructiva. Pueden encontrarse en la literatura numerosas referencias de su aplicabilidad [3] [4].

2. SIMULACIÓN DEL CAMPO SONORO MEDIANTE FDTD

La técnica FDTD simula la propagación del campo sonoro, para lo que utiliza una aproximación numérica en derivadas parciales de la ecuación de ondas. Para la resolución de estas ecuaciones se aproximan las primeras derivadas por diferencias finitas centradas.

La expresión de la aproximación utilizada para la solución de las derivadas parciales es la siguiente:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_0} = \frac{f(x_0 + \frac{1}{2} \Delta x) - f(x_0 - \frac{1}{2} \Delta x)}{\Delta x} \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_{t=t_0} = \frac{f(t_0 + \frac{1}{2} \Delta t) - f(t_0 - \frac{1}{2} \Delta t)}{\Delta t} \quad (3)$$

El método elegido estima los valores en instantes alternos; se calculan las velocidades¹ u_x , u_y y u_z en el mismo instante de tiempo mientras que la presión p se obtiene en otro instante, con la finalidad de conseguir un error de segundo orden debido a las aproximaciones utilizadas en las derivadas temporales. Las expresiones a resolver en cada instante de tiempo son las siguientes:

$$p(x, t + \frac{\Delta t}{2}) = p(x, t - \frac{\Delta t}{2}) - \Delta t \rho c^2 \frac{u(x + \frac{1}{2}, t) - u(x - \frac{1}{2}, t)}{\Delta x} \quad (4)$$

$$u(x + \frac{1}{2}, t + \Delta t) = u(x + \frac{1}{2}, t) - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{p(x + 1, t + \frac{\Delta t}{2}) - p(x, t + \frac{\Delta t}{2})}{\Delta h} \quad (5)$$

La herramienta diseñada realiza simulaciones cumpliendo siempre la condición de estabilidad de que el número de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) sea siempre inferior o igual a la unidad, una condición de convergencia de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales.

Para que la interfaz fuese lo más versátil posible se decidió introducir en la frontera de nuestro dominio de simulación determinadas condiciones de contorno y estudiar las diferencias entre distintas absorciones en las paredes. Para ello, las paredes fueron definidas mediante Perfectly Matched Layer (PML) [5]. Al mismo tiempo, se consideró impedancia infinita en la frontera del dominio con velocidad de partícula nula ($u_n = 0$) en las superficies, donde n es la dirección perpendicular a la dirección del contorno [6]. Cabe destacar que el usuario sólo debe elegir la geometría de la sala y el coeficiente alpha del PML, y la interfaz se encarga de crear las matrices necesarias para la simulación, lo que facilita el cambio de la geometría a estudio y un ahorro importante en el tiempo de diseño de las diferentes experiencias. Todos los transductores que aparecen en estas simulaciones son puntuales, y se comportan de manera omnidireccional.

¹ El vector velocidad se resuelve dos o tres veces, según la dimensión 2D o 3D del dominio, una para cada uno de los ejes que lo forman.

3. ALGORITMO DE CONTROL ACTIVO DE RUIDO (CAR)

Como algoritmo de procesamiento de señal para el estudio del campo acústico resultante se decidió implementar un sistema de Control Activo de Ruido basado en el algoritmo LMS con estructura de filtrado-x, uno de los más usados para este fin [7] [8] [9]. Este algoritmo usa filtros adaptativos que recalculan sus coeficientes en cada iteración de la simulación, lo que se asemeja a una aplicación en tiempo real. Dichos coeficientes varían minimizando la potencia de la señal de error (señal que se compone de la originalmente existente en el sensor de control, llamado sensor de error, mezclada con la señal generada por el algoritmo).

Tanto la interfaz como el algoritmo están diseñados para ser capaces de funcionar con tantas fuentes de ruido, fuentes secundarias “anti-ruido” y sensores de error (micrófonos) como se desee, lo que da un amplio abanico de posibilidades al usuario. Para el correcto funcionamiento de la simulación, deben calcularse tantos filtros adaptativos como pares señal de referencia – fuentes secundarias haya en la simulación.

En el caso de sistemas genéricos multicanales (cuando se tiene más de un sensor de error), los coeficientes de cada filtro adaptativo varían intentando minimizar la suma de las potencias de las señales de error en cada micrófono, es decir, los nuevos coeficientes se calculan como la media de todas las señales de error e_k por su correspondiente señal de referencia filtrada xf_{ijk} [7]. Dado un sistema genérico con I fuentes de ruido, J fuentes secundarias y K sensores de error, la señal de referencia i -ésima filtrada por la estimación del camino acústico que enlaza la fuente secundaria j -ésima con el sensor k -ésimo la llamaremos xf_{ijk} .

A los coeficientes del filtro adaptativo que relacionan la fuente de ruido i con la fuente secundaria j se les denomina w_{ij} y se calculan conforme a la siguiente expresión:

$$w_{ij} = w_{ij} - 2 \cdot \mu \cdot (xf_{ij1} \cdot e_1 + xf_{ij2} \cdot e_2 + \dots xf_{ijk} \cdot e_k) \quad (6)$$

A su vez, se generan tantas señales “anti-ruido” como fuentes secundarias J :

$$y_j = x_1 \cdot w_{1j} + x_2 \cdot w_{2j} + \dots x_I \cdot w_{Ij} \quad (7)$$

Existen tantas señales x_i de referencia como fuentes de ruido I . A su vez estas señales de referencia son filtradas por las plantas acústicas, que enlaza la fuente secundaria j -ésima con el sensor k -ésimo, B_{ij} :

$$xf_{ijk} = x_i \cdot B_{ij} \quad (8)$$

Y, por último, se monitoriza la señal de error e_k (señal a minimizar) en tantos puntos como sensores K se hayan definido.

La adquisición de las señales de referencia x_i , necesarias para el correcto funcionamiento del CAR, se realiza mediante un sistema mecánico, es decir, se considera que la señal de ruido es captada por un acelerómetro o similar. Este paso se realiza en casos reales [10] de forma mecánica para evitar la retroalimentación acústica del sistema o en motores encapsulados, para conocer la señal de referencia.

4. APLICACIONES IMPLEMENTADAS

En este apartado se presentan algunas simulaciones, tanto en 2D como en 3D, de ejemplos desarrollados con la interfaz diseñada que analizan el correcto funcionamiento del sistema CAR. De este modo se muestra la potencialidad de la herramienta al mismo tiempo que se visualizan diferentes fenómenos presentes en un sistema de este tipo.

4.1 Simulaciones 2D

La primera demostración del funcionamiento de la interfaz, en 2D, se trata de dos simulaciones en una sala en forma de “L” invertida, de 6x4 m en sus lados mayores, con una fuente de ruido

emitiendo, de forma continua, una señal senoidal de 300 Hz, y situada en la esquina inferior izquierda a 0.5 m de las dos paredes. La primera de ellas se realiza con un sistema CAR formado por cuatro fuentes anti-ruido (marcadas en la Figura 1 con círculos) y un único sensor de error (marcado en la Figura 1.izda con un guión), mientras que la segunda simulación está compuesta por las mismas cuatro fuentes secundarias y tres sensores de error (marcados con guiones en la Figura 1.dcha).

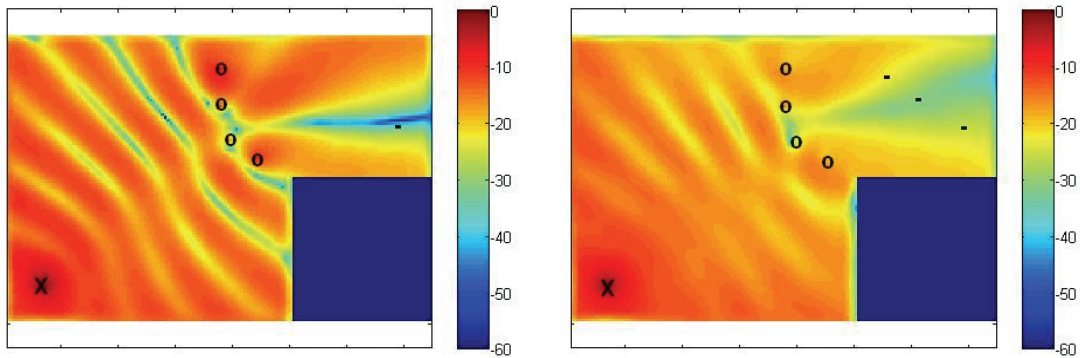


Figura 1. Presión media de las simulaciones, en dB ref. 1, con sistema CAR de 4 Fuentes secundarias y 1 sensor (izda) y 4 fuentes secundarias y 3 sensores (dcha).

La Figura 1 muestra el campo acústico resultante calculado integrando la presión sonora durante 10 ms ya en el estacionario del filtro adaptativo. En la misma gráfica se muestra un fenómeno presente en los sistemas de control activo de ruido local: se obtienen importantes atenuaciones en torno a los sensores de error, pero sólo en una pequeña zona alrededor de los sensores (directamente proporcional a la longitud de onda del ruido a eliminar), por lo que para que el sistema cree mayores zonas de atenuación, debemos añadir más sensores de control y situarlos estratégicamente en el espacio para que el efecto de cancelación local de ruido en cada uno se vaya solapando a través del espacio. Puesto que en la actualización de los coeficientes de cada filtro intervienen todas las señales de error, es posible que no se alcancen atenuaciones tan elevadas como en el caso en el que el sistema tiene un único sensor, puesto que los filtros adaptativos intentarán encontrar una solución de compromiso para minimizar la suma de la potencia de las señales de error en todos los sensores a la vez.

Se debe ser consciente de este efecto para diseñar el sistema CAR que más pueda interesar: se tiene que elegir entre atenuar una mayor zona de la sala o sacrificar esa zona por una atenuación mayor en un único punto.

A modo de ejemplo, en la Figura 2, se ofrece una representación de las señales grabadas en los sensores de error, para una nueva simulación. El sistema CAR es exactamente igual al de la Figura 1.dcha, pero la fuente de ruido emite una señal de ruido filtrada paso bajo a la frecuencia de 300 Hz.

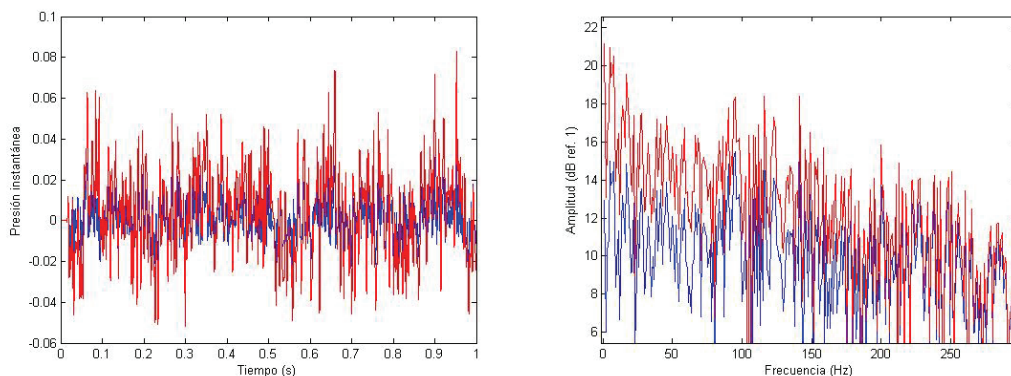


Figura 2. Presión instantánea en uno de los sensores con (azul) y sin (rojo) sistema CAR de 4 Fuentes secundarias y 3 sensores. Izda – en tiempo y dcha – en frecuencia y en dB ref. 1.

Se observa cómo el control activo de ruido es eficiente para señales aleatorias de baja frecuencia. Las mayores atenuaciones se consiguen a muy baja frecuencia, por debajo de los 100 Hz, como se puede ver en la Figura 2.dcha.

Por último, en la Figura 3, se muestra la diferencia entre activar o no el sistema CAR en la misma simulación. Como puede observarse, se aprecia una atenuación del ruido en toda la zona de interés.

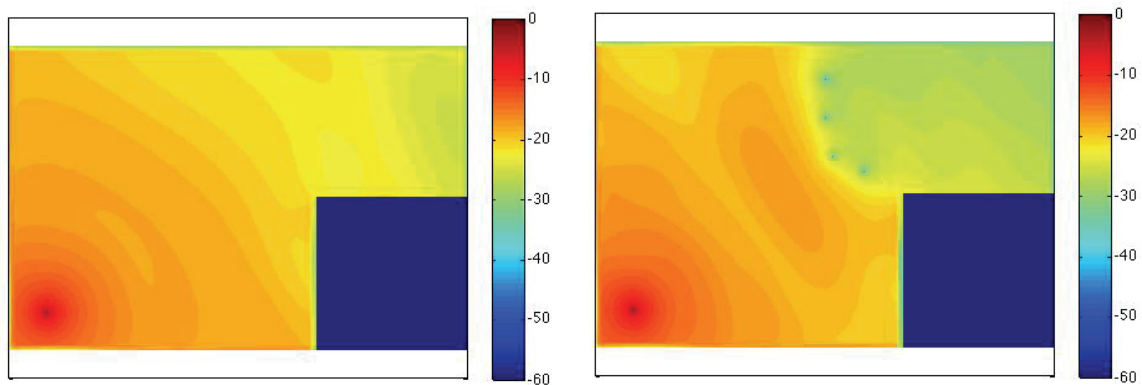


Figura 3. Diferencia entre CAR activado y desactivado, en dB ref. 1, a la izquierda la sala sin sistema CAR y a la derecha con sistema CAR de 4 Fuentes secundarias y 3 sensores.

4.2 Simulaciones 3D

Tras comprobar el correcto funcionamiento de la interfaz en el caso dos dimensiones se pasó al diseño de la interfaz en 3D. Dado que la simulación en 2D se consideró una primera aproximación al problema, se decidió realizar una simulación muy similar a la realizada en el caso de 2D (el mismo dibujo del sistema CAR, pero con variaciones en la altura) para ver el comportamiento de la sala y del sistema CAR en 3D.

La simulación llevada a cabo en 3D consiste en una sala en forma de L invertida con unas dimensiones de 6x4m en sus lados mayores y altura constante de 3 m. El sistema CAR está compuesto por 4 fuentes secundarias, todas ellas a 0.75 m de altura (puntos azules de la Figura 4) y 3 sensores de error a una altura de 1.5 m (puntos verdes de la Figura 4), la fuente de ruido (punto rojo en la Figura 4) está situada en la esquina inferior izquierda a una altura de 0.5 m sobre el suelo, emitiendo una señal senoidal de 100 Hz.

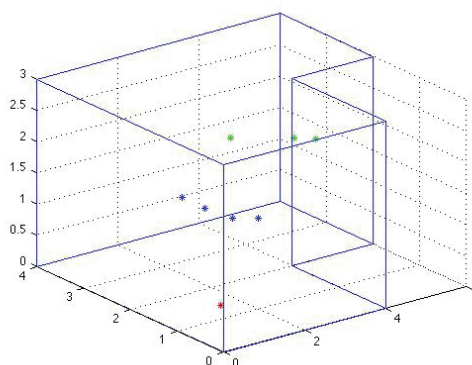


Figura 4. Esquema del sistema CAR simulado.

En la Figura 5 (izda), se muestran las presiones medias (integrando 10 ms en el estacionario del filtro adaptativo) de la sala con CAR a diferentes alturas. Se representan cortes horizontales con alturas 0.5, 0.75, 1.5 y 2 metros (de izda a dcha y de arriba abajo). Al mismo tiempo, en la Figura 5 (dcha) se presenta la misma simulación pero con el sistema CAR desactivado.

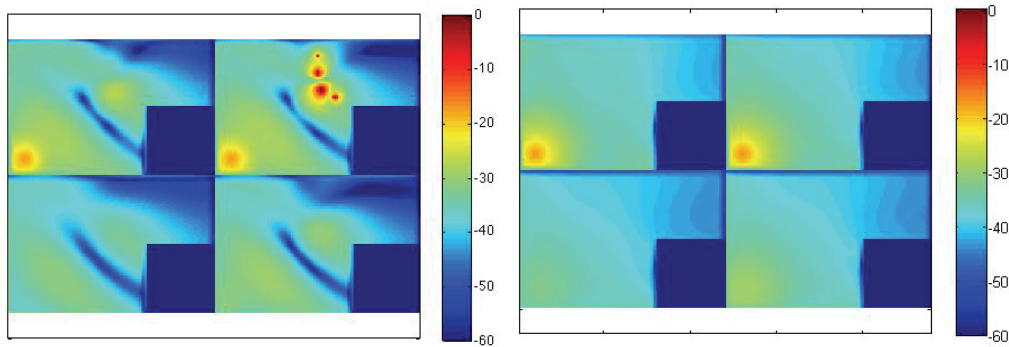


Figura 5. Presiones medias en la sala con CAR (izda) y sin CAR (dcha). De izda a dcha y de arriba a abajo se muestra el resultado de la simulación a diferentes alturas, 0.5, 0.75, 1.5 y 2 metros.

Por último, y para apreciar mejor la atenuación producida por el sistema CAR se representa en la Figura 6 la relación en dB (ref. presión media sin CAR) entre las presiones medias con y sin CAR activado para las mismas alturas.

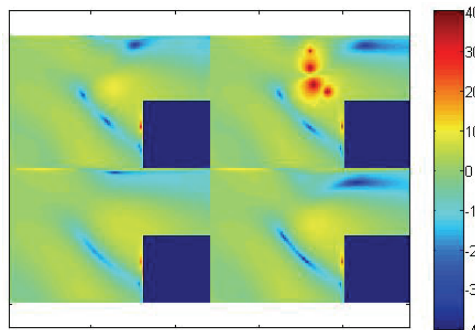


Figura 6. Atenuación producida por el CAR (dB ref. presión media sin CAR). De izda a dcha y de arriba abajo, resultado de la simulación a 0.5, 0.75, 1.5 y 2 metros.

Se observa claramente la actuación del sistema CAR. Puede apreciarse cómo en las posiciones de las fuentes secundarias el ruido ha aumentado considerablemente, consecuencia de los niveles emitidos por las mismas, y cómo en la mayor parte de la sala el ruido ha aumentado de nivel frente a los niveles obtenidos sin CAR. Sin embargo, también se observa cómo estos niveles de ruido sí que han disminuido en la zona de interés, alrededor de los sensores de error.

5 .CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Este trabajo muestra la potencialidad de combinar la técnica de simulación FDTD con distintos algoritmos de procesado de la señal, más concretamente algoritmos adaptativos aplicados al Control Activo de Ruido (CAR). Al tratarse de una simulación en el dominio temporal, permite obtener información acerca de cómo actúan los diferentes algoritmos aplicados con el paso del tiempo. De esta manera, proporciona una representación del comportamiento de los algoritmos y de la sala tanto en el transitorio como en el estacionario, facilitando la comprensión y eficiencia de los algoritmos utilizados.

Se ha desarrollado una herramienta de simulación tridimensional en lenguaje MATLAB®, sencilla en su uso pero robusta en su rendimiento, que analiza el resultado del campo acústico en un recinto de un sistema CAR. Esta herramienta posibilita la observación tanto del campo acústico en cada momento como la evolución de los filtros adaptativos, analizando las señales en los sensores y permitiendo la modificación de la geometría y la absorción de la sala. Se ha comprobado que la técnica FDTD es apropiada para realizar esta tarea.

Se debe tener en cuenta la propagación del sonido en un recinto para elegir la mejor posición posible tanto de las fuentes secundarias “anti-ruido” como de los sensores de error. Una de las aplicaciones de esta herramienta es la posibilidad de realizar distintas simulaciones para

optimizar estas posiciones y aumentar la eficacia del sistema CAR [11]. Se ha observado que un sistema CAR puede ofrecer mayores atenuaciones en las zonas cercanas a los sensores con una única fuente secundaria y sensor. Sin embargo, utilizando más fuentes y/o sensores se observa una mayor superficie de atenuación.

La interfaz diseñada está optimizada para la simulación de diferentes algoritmos de procesamiento de señal, que pueden implementarse con relativa facilidad. Sin embargo, puede adaptarse para otros campos como la cancelación de eco, el estudio de difusores activos, o para la realización de exposiciones didácticas sobre fenómenos ondulatorios como la difracción, superposición de ondas, efecto Doppler, etc. Incluso podría utilizarse en caracterización de salas mediante la obtención de la respuesta al impulso, aunque con la limitación de la relación entre el tamaño de la malla y la frecuencia máxima a analizar.

Disminuir el tiempo de cálculo de las simulaciones es otro de los objetivos a desarrollar. Para ello, se están estudiando alternativas de depuración de código, optimización del cálculo numérico, hardware basado en unidades de procesamiento de gráficos (GPU) o líneas de simetría para reducir el espacio de cálculo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. Lokki, A. Southern and L. Savioja. "Studies on seat deep effect with 3D FDTD modeling". Forum Acusticum, Denmark 2011.
- [2] J. Redondo. "Time domain simulation of sound diffusers using finite-difference schemes". Acta Acustica united with Acustica 93 (4), 611-622. 2007.
- [3] S. M. Kuo, D. R. Morgan, Active Noise Control Systems-Algorithms and DSP Implementation, New York, John Wiley & Sons, 1996.
- [4] S.M. Kuo, S. Mitra, W.-S. Gan. "Active noise control system for headphone applications", IEEE Transactions on Control Systems Technology 14 (2), 331-335. 2006.
- [5] Thomas L. Geers. "Evaluation of the Perfectly Matched Layer for Computational Acoustics". Journal of Computational Physics 139 (1), 166-183. 1998.
- [6] J. Escolano, S. Bleda, B. Pueo, J. J. Lopez. "Wave Field Synthesis simulation by means of finite-difference time-domain technique". EUSIPCO 2004 (European Signal Processing Conference), Austria 2004.
- [7] B. Widrow. Multichannel adaptive filtering for signal enhancement. IEEE Transactions on circuits and systems CAS-28 (6), 606-610. 1981.
- [8] E. Bjanarson. "Analysis of the filtered-X LMS algorithm". IEEE Transactions on Speech and Audio Processing 3 (6), 504-514, 1995.
- [9] S.M. Kuo, D.P. Das, G. Panda. "New block filtered-X LMS algorithms for active noise control Systems". IET Signal Processing 1 (2), 73-81. 2007.
- [10] M. Cuesta and P. Cobo Parra. "Control activo de ruido de escape de una fuente encapsulada utilizando una referencia múltiple". TecniAcústica 1999, Spain 1999.
- [11] S. Alireza and M. Hossein. "Optimizing Secondary Source Location in Acoustics ANC Systems". Information and Communication Technologies, ICTTA . vol (2), 1953 – 1957. 2006.



SIMULACIÓN ACÚSTICA DE AUDITORIOS Y EDIFICIOS PATRIMONIALES. INTEGRACIÓN CON ENTORNOS DE REALIDAD VIRTUAL

Reference PACS: 43.55.Ka

**Montell, Radha¹; Segura, Jaume²; Planells, Ana¹; Barba, Arturo¹; Cerdá, Salvador³;
Cibrián, Rosa⁴; Lacatis, Radu¹; Giménez, Alicia¹**

¹ E.T.S.I. Industriales, Univ. Politécnica de Valencia (UPV), Camino de Vera s/n, Valencia -SPAIN
radmonse@upvnet.es, agimenez@fis.upv.es, arturo@arturobarba.com, rala1@doctor.upv.es

² IRTIC, Universitat de València, Polígon de la Coma s/n, Valencia, SPAIN jsegura@uv.es

³ Departamento Matemática Aplicada, UPV, salcerjo@mat.upv.es

⁴ Facultad de Medicina, Universitat de València, rosa.m.cibrian@uv.es

ABSTRACT

The binding of the concepts of virtual reality and acoustics simulation has generated, in recent years, a rather broad field of work. In this direction, we present the research that we are developing in the framework of the project R&D&I BIA2008-05485. Graphic and acoustic simulations have been computed from several specific environments grouped according to their characteristics as Auditoriums and Patrimonial Buildings. A prototype for the navigation of virtual environments has been tested with the graphical and acoustical models in two different virtual reality environments to obtain a set of subjective assessments.

RESUMEN

La unión de los conceptos de realidad virtual y simulación acústica ha generado en los últimos años un amplio campo de trabajo. En esta línea, presentamos la investigación que estamos desarrollando en el marco del proyecto de investigación (I+D+I), BIA2008-05485. Se ha realizado la simulación visual y acústica de diferentes entornos que por sus diferentes características hemos agrupado en Auditorios y Edificios Patrimoniales. Con el modelo gráfico visual y acústico se ha testado un prototipo de navegación de entornos virtuales para la obtención de respuestas subjetivas en diferentes tecnologías inmersivas.

1. INTRODUCCIÓN

El concepto de simulación acústica apareció ya en los tempranos años 30. Spandöck [1] creó el primer sistema de modelado del campo sonoro, basado en señales ultrasónicas, en un modelo a escala y un equipo de grabación. Desde estos primeros experimentos, hasta los modernos programas de auralización que se utilizan hoy en día, numerosos investigadores han trabajado con la idea de capturar la respuesta sonora de un entorno y extraer de ella los parámetros esenciales que permitan conocer la descripción numérica del entorno y cómo podría percibirse la señal sonora en cualquier punto del recinto.

El trabajo que aquí se expone se enmarca en el proyecto BIA2008-05485, en el cual se plantea el estudio acústico de edificios históricos y patrimoniales en los que la calidad de audición es un factor preferente, añadido a su valor histórico. Este trabajo se basa en la utilización de la metodología creada en el proyecto anterior (BIA2003-09306-C04) pero introduciendo la aplicación de técnicas de realidad virtual y auralización.

En el proyecto mencionado se elaboró una metodología de estudio objetivo-subjetivo en salas de concierto, en la cual se obtuvo el diseño y se comprobó la fiabilidad y validez de una

encuesta para recoger las muestras subjetivas [2]. La motivación para aplicar técnicas de simulación y de realidad virtual parte de la idea de poder recoger las muestras subjetivas en un entorno controlado. Además, el trabajo se basa en la premisa de que, 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 [3].

El principal objetivo planteado en este trabajo es obtener una integración de auralización y simulación gráfica mediante la cual, con la utilización de un entorno de realidad virtual inmersivo, se crea una plataforma de recogida de información subjetiva donde la característica básica es el control sobre el entorno y la reproducibilidad. Los recintos estudiados se pueden dividir en dos tipos: auditorios y edificios patrimoniales. La motivación para estudiar estos tipos de entornos proviene de sus marcadas diferencias tanto en su finalidad de uso como en su geometría o características arquitectónicas y, por consiguiente, su comportamiento acústico. Dentro del primer grupo, se presenta el estudio con las salas: Auditorio de Torrent, Auditorio de Castellón y Palau de les Arts Reina Sofia. Y en el segundo grupo se presenta: la Capilla del Santo Cáliz de la Catedral de Valencia y la Lonja de los Mercaderes de Valencia.

2. METODOLOGÍA

El trabajo realizado puede dividirse en tres líneas diferenciadas: la toma de medidas acústicas en el entorno a estudiar, la simulación acústica, para la cual se utilizan los resultados obtenidos en las medidas *in situ*, y la simulación visual. Estas fases pueden apreciarse en el esquema mostrado en la Figura 1.

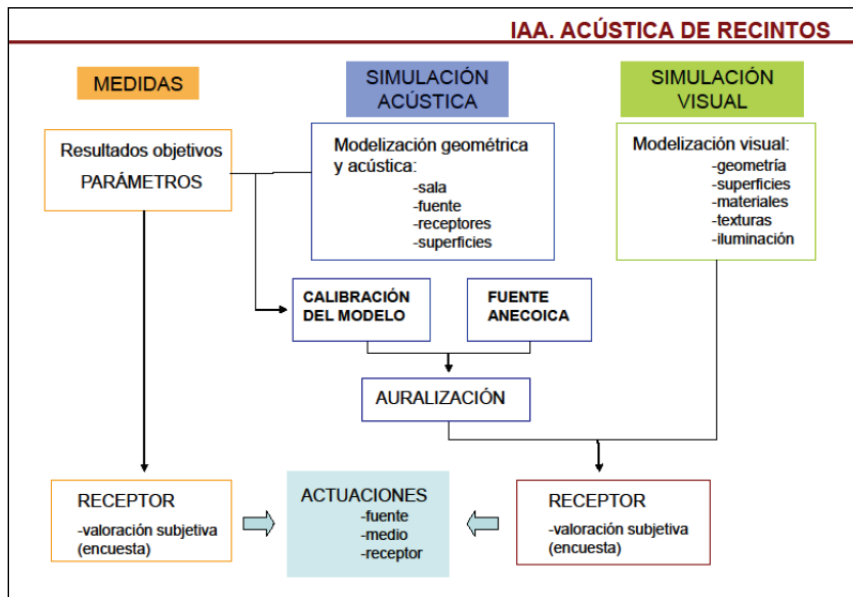


Figura 1. Esquema de las fases del trabajo.

Las medidas se realizaron siguiendo la norma ISO 3382 [4] [5] y el protocolo validado. Cabe destacar que el número de posiciones se sobremuestreó para obtener medidas más fiables y una base de datos más amplia. Asimismo, se establecieron diferentes posiciones de fuente emulando los posibles orígenes sonoros.

Para realizar la simulación acústica, se parte de un modelo geométrico de la sala, construido a partir de los planos arquitectónicos de la sala y siguiendo los requerimientos necesarios para que esta simulación sea válida. Entre éstos podemos encontrar: modelar solo las superficies que puedan ser accesibles por el modelo, tener en cuenta el orden de las normales para designar la cara visible, definir las intersecciones vértices-aristas para evitar dejar huecos y evitar modelar detalles que puedan ser emulados con el ajuste de la difusión. El modelo geométrico se ha calibrado ajustando los coeficientes de absorción y de difusión a partir de los

valores T_{30} promediados espacialmente y manteniendo el criterio que los valores simulados y los medidos no difieran más de 1 JND (*Just Noticeable Difference*). A partir del modelo calibrado, se ha calculado la respuesta impulsiva de la sala (RIR) en las posiciones elegidas para realizar el estudio subjetivo y, convolucionando ésta con una señal anecoica, hemos obtenido las diferentes auralizaciones de la sala. Para el cálculo de las respuestas impulsivas y la auralización se ha utilizado el programa *CATT-Acoustics* [6].

Paralelamente, se ha realizado el modelo gráfico visual a partir de planos arquitectónicos (estructura de la sala) y visitas a las salas (detalles y texturización). En este caso, se ha intentado modelar tantos detalles como fuera posible para obtener una representación lo más ajustada a la realidad. Sobre el modelo, se han aplicado las texturas, creadas previamente a partir de fotografías realizadas en la sala y post-procesadas. Éstas, permiten darle un aspecto realista a las superficies del entorno y recrear aquellos detalles que no han podido ser modelados geoméricamente. Finalmente, se ha ajustado la iluminación obteniendo el efecto deseado.

El producto obtenido en las dos últimas líneas, las auralizaciones y el modelo gráfico se combinan mediante la utilización de una herramienta desarrollada que permite la navegación por el entorno virtual y la reproducción sonora correspondiente a la posición. Este trabajo se presentó en [7].

Para proporcionar al usuario una sensación de inmersión, las pruebas se han realizado en entornos de realidad virtual inmersivos. Las instalaciones utilizadas en el estudio han sido el CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) de la Universitat de València y la Powerwall de la Universitat Politècnica de València. El CAVE es un espacio compuesto por cuatro superficies retroproyectadas (tres paredes y suelo). En éstas, se proyectan imágenes estereoscópicas que, con la ayuda de unas gafas polarizadas sincronizadas con los proyectores, son percibidas como 3D. Además de las gafas, el usuario lleva unos sensores que captan sus movimientos en la sala y permiten al ordenador actualizar la imagen proyectada de acuerdo al nuevo punto de vista. En esta entorno inmersivo, el sonido se reproduce mediante auriculares. Por otro lado, la Powerwall consiste en una gran pantalla retroproyectada de alta definición (2x5 metros) que, al igual que el CAVE, emite imágenes estereoscópicas que se visualizan con la ayuda de gafas polarizadas sincronizadas con los proyectores. La Powerwall se encuentra en una sala con capacidad para 25 personas situadas en una grada de 4 filas. Actualmente, ésta dispone de un sistema de altavoces 5.1 para emitir sonido espacial, aunque está prevista la migración a auriculares para minimizar el efecto de la sala sobre el sonido reproducido y reducir problemas de aislamiento.

3. ENTORNOS

En este apartado se presentan los productos generados en cada una de las fases de la metodología. En primer lugar, se realiza una breve descripción de las principales características de las salas diferenciándolas en dos grupos según su finalidad de uso: Auditorios y Edificios Patrimoniales. En segundo lugar, se presentan los detalles técnicos de los entornos junto con sus planimetrías. Seguidamente, se muestran los modelos geoméricos tanto visuales como acústicos y su texturización. Finalmente, se presentan imágenes de los entornos de realidad virtual dónde se han realizado los ensayos de recogida de muestras subjetivas de los entornos presentados.

3.1. Auditorios

Este grupo de entornos se caracteriza principalmente por tener un diseño orientado a la audición. En la mayoría de casos, contando con un diseño acústico previo a su construcción.

Comparando las características de los modelos construidos, este grupo se caracteriza por tener, generalmente, una geometría más simple. Suelen ser de más reciente construcción por lo que la definición de los materiales del modelo acústico conlleva menos trabajo. En estos entornos, los materiales de construcción son conocidos, por lo que los valores reflejados en las tablas de materiales encontrados en la literatura suelen producir resultados bastante ajustados.

En este grupo de entornos se hace patente la utilidad de las técnicas de simulación acústica ya que permiten realizar cambios en el modelo simulado y conocer su resultado antes de su realización.

Los entornos presentados correspondientes a este grupo son: el auditorio de Castellón, el auditorio de Torrent y el Palau de les Arts Reina Sofía.

3.2. Edificios patrimoniales

Este segundo grupo de entornos difiere principalmente con el anterior en su finalidad de uso. Mientras que el primer grupo de salas son entornos donde prima la comunicación y por tanto es necesaria una buena audición, en este segundo grupo, la finalidad de uso que podemos encontrar es variada. Actualmente, la motivación para estudiar la acústica en estos recintos proviene del creciente interés en aprovechar éstos para múltiples actividades, entre las cuales se encuentran los conciertos.

Respecto a las características geométricas de los modelos construidos, estos suelen tener un mayor número de superficies que los modelos del primer grupo. En cuanto a los materiales, aunque se sabe qué tipo de materiales forman la sala, es una tarea muy difícil obtener los coeficientes de absorción y difusión y, por ello, suelen ser fijados mediante un proceso iterativo con complejidad creciente con el número de materiales.

En este grupo de entornos, las técnicas de simulación tanto acústicas como gráficas junto con un conocimiento histórico de las salas permitirían la retrospcción y, de esta forma, conocer y escuchar los sonidos que se escucharían en estos recintos en distintas épocas y fases de su construcción o remodelación.

Los entornos presentados correspondientes a este grupo son: la Capilla del Santo Cáliz de la Catedral de Valencia y la Lonja de los Mercaderes.

3.3. Datos salas

En la Tabla 1 pueden verse las características de los auditorios y los edificios patrimoniales presentados y en la Figura se muestran las características de la forma de las salas mediante las secciones y las plantas, en las que se indican, además, los puntos de medida establecidos en cada sala.

SALA	Año construcción	Volumen	Capacidad (personas)	Num. Receptores medidos	RT
Auditorio Castellón	2004	14850m ³	1200	51	2.43s
Auditorio Torrent	1997	6430m ³	606	48	1.87s
Palau de les Arts Reina Sofía	2005	39125m ³	1.412	151 (47 en platea + 104 en palcos)	2.45s
Capilla Santo Cáliz	1356 - 1369	3205m ³	150	8	2.47s
Lonja de los Mercaderes	1482 - 1548	13250m ³	500/600	16	3.1s

Tabla 1. Características auditorios

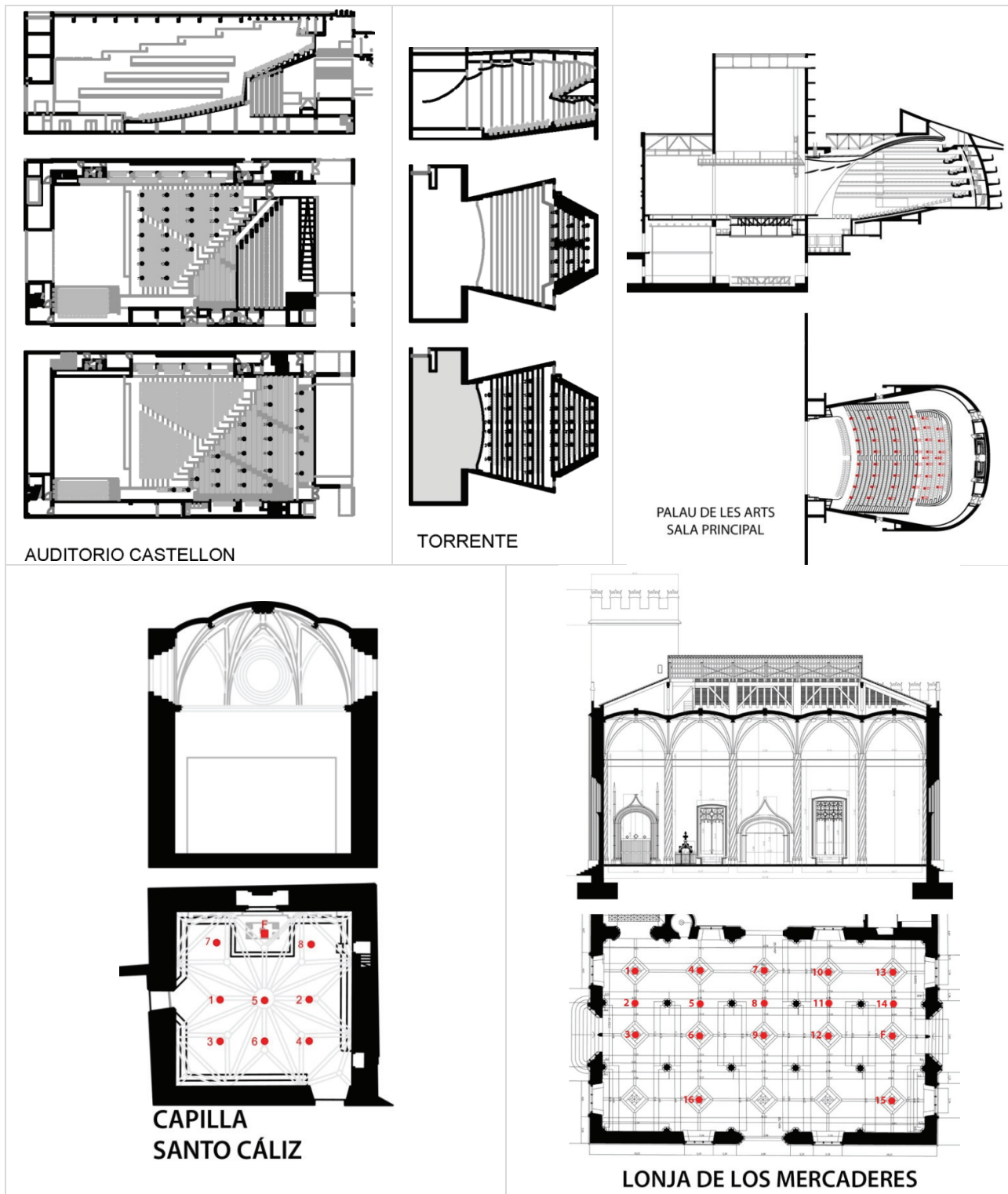
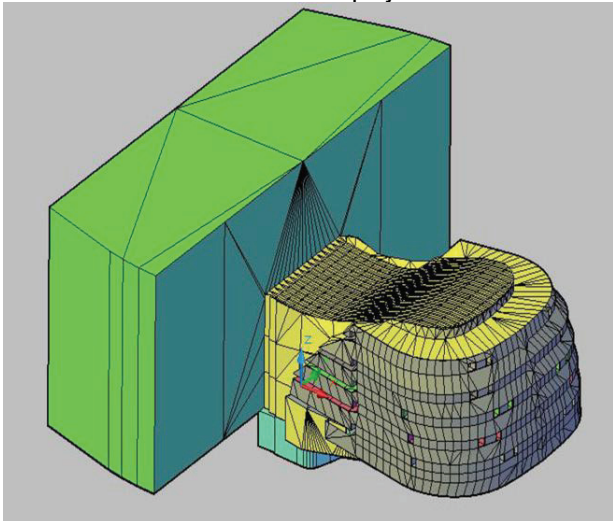


Figura 2. Secciones y plantas con puntos de medida

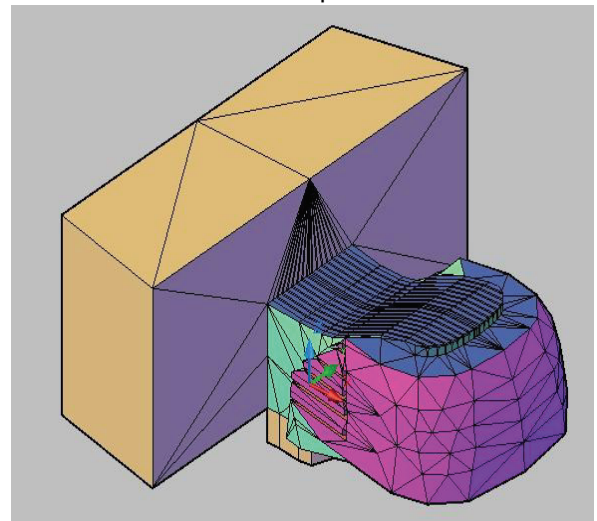
3.4. Modelado geométrico

En la Figura 3 se presentan, a modo de ejemplo, las imágenes correspondientes a los modelos geométricos de cada una de las salas presentadas. De cada sala, se muestra el modelo geométrico visual, donde se puede apreciar la complejidad de las formas y que se utilizará posteriormente en la texturización; y el modelo geométrico acústico, donde se han simplificado las formas y se han aplicado los requerimientos que debe tener un modelo acústico. En la Tabla 2, puede observarse el número de polígonos que han sido necesarios en su construcción.

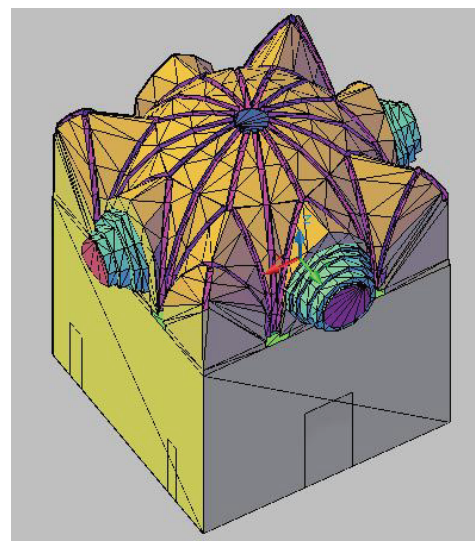
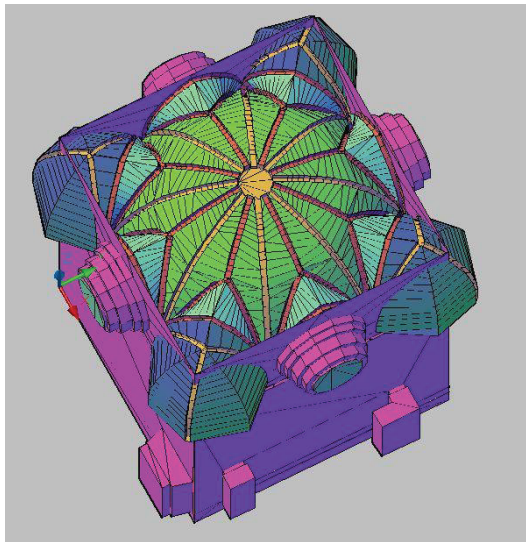
Modelo complejo



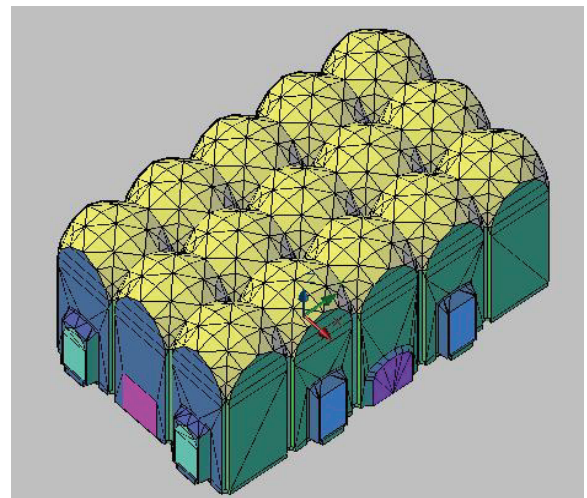
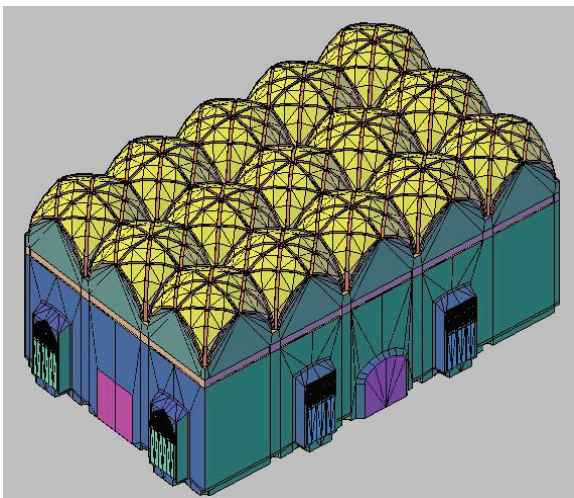
Modelo simplificado



PALAU DE LES ARTS REINA SOFÍA



CAPILLA SANTO CÁLIZ



LONJA DE LOS MERCADERES

Figura 3. Modelos geométricos visuales y acústicos de las salas para las cuales se han construido los dos modelos.

SALA	Núm. polígonos modelo gráfico	Núm. polígonos modelo acústico
Palau de les Arts Reina Sofía	6520	2272
Capilla Santo Cáliz	8669	2372
Lonja de los Mercaderes	18262	3875

Tabla 2. Número de polígonos correspondientes al modelo visual y al modelo acústico

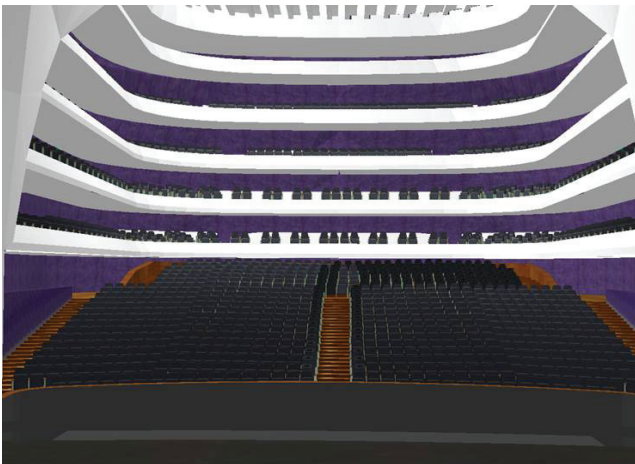
3.5. Texturización



AUDITORI DE CASTELLÓ



AUDITORI DE TORRENT



PALAU DE LES ARTS REINA SOFÍA



CAPILLA SANTO CÁLIZ



LONJA

4.6. Entornos de realidad virtual



4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado la investigación en desarrollo dentro del marco del proyecto de investigación (I+D+I), BIA2008-05485. Se ha presentado la metodología establecida, dentro de la cual se realiza el modelado gráfico visual y acústico de las salas, la simulación acústica y la auralización. Se ha seleccionado un conjunto de entornos agrupados por sus características

en Auditorios y Edificios Patrimoniales. Se ha testado el prototipo de navegación de entornos virtuales y se ha obtenido un conjunto de respuestas subjetivas que se utilizarán para validar la equivalencia con las obtenidas *in situ*. Se han utilizado diferentes tecnologías inmersivas de realidad virtual: el CAVE y el Powerwall.

5. AGRADECIMIENTOS

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

6. REFERENCIAS

- [1] F. Spandöck, «Akustische Modellversuche,» *Annalen der Physik*, vol. 412, nº 4, 1934.
- [2] A. Giménez, R. M. Cibrián, S. Girón, T. Zamarreño, J. J. Sendra, A. Vela y F. Daumal, «Questionnaire Survey to Qualify the Acoustics of Spanish Concert Halls». *ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA*, vol. 97, 2011.
- [3] J. Segura, «¿Cómo suena una sala donde se realizan actuaciones musicales?. Acústica virtual: una herramienta de evaluación acústica.,» de *Congreso Internacional de Investigación en Música de Valencia (ISEACV)*, 2010.
- [4] ISO3382-1:2009, *Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part1: Performance spaces.*, 2009.
- [5] ISO3382-2:2008, *Acústica: Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: tiempo de reverberación en recintos ordinarios.*, Asociación Española de Normalización y Certificación (AECOR), 2008.
- [6] CATT. Acoustics, «<http://www.catt.se/>,».
- [7] R. Montell, J. Segura, A. Giménez, A. Planells, A. Barba, S. Cerdá, R. Lacatis, L. Vera y B. Martínez, «Simulación acústica y gráfica. Prototipo de navegación entornos virtuales,» de *Actas del 41º Congreso Nacional de Acústica- 6º Congreso Ibérico de Acústica. Tecniacústica.*, León, 2010.



ELABORACIÓN DE MODELOS PARA EL ESTUDIO ACÚSTICO EN ENTORNOS VIRTUALES

Reference PACS: 43.10.Pr, 43.55.Ka

Planells, Ana¹; Montell, Radha¹; Segura, Jaume²; Barba, Arturo¹; Cerdá, Salvador³; Cibrián, Rosa⁴; Lacatis, Radu¹; Giménez, Alicia¹

¹ E.T.S.I. Industriales, Univ. Politécnica de Valencia (UPV), Camino de Vera s/n, Valencia -SPAIN
radmonse@upvnet.es, agimenez@fis.upv.es, arturo@arturobarba.com, rala1@doctor.upv.es

² IRTIC, Universitat de València, Polígon de la Coma s/n, Valencia, SPAIN jsegura@uv.es

³ Departamento Matemática Aplicada, UPV, salcerjo@mat.upv.es

⁴ Facultad de Medicina, Universitat de València, rosa.m.cibrian@uv.es

ABSTRACT.

The virtual reproduction of an environment through a 3D model allows us to evaluate the objective and subjective parameters of its acoustics quality.

This paper presents the modelling process conducted in BIA2008-05485 project in order to study halls, auditoriums and other heritage buildings through virtual environments, as well as the difficulties found and the strategies adopted to solve them.

RESUMEN.

La reproducción virtual de un espacio a través de un modelo tridimensional permite evaluar los parámetros objetivos y subjetivos de la calidad acústica del mismo [1].

En este trabajo se expone el proceso de modelización llevado a cabo en el proyecto BIA2008-05485 para el estudio de salas, auditorios y edificios del patrimonio mediante entornos virtuales; así como las dificultades encontradas y las estrategias adoptadas para solventarlas.

1. CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS

El estudio de un espacio mediante entornos virtuales en nuestro proyecto se realizó a partir de un modelo tridimensional del mismo que reproducía las características de las distintas superficies que lo componen y lo cierran. El proyecto consistía en el estudio de varios edificios patrimoniales emblemáticos, se eligieron los siguientes:

- Catedral metropolitana de Valencia
- Palau de la Música de Valencia
- Palau de les Arts "Reina Sofia"
- Lonja de los Mercaderes de Valencia
- Basílica de Santa María de Elche (en este caso se estudió con el montaje para la representación del Misteri d'Elx y sin él)

Para construir cada modelo tridimensional se partió de la documentación gráfica de la que se disponía. En la mayoría de los casos, esta documentación incluía planta y sección de la sala. Excepcionalmente, como en el caso de la Basílica de Elche, fue necesario dibujar la sección a ordenador ya que sólo existían planos en papel.

A partir de los planos se procedió a realizar los modelos en 3D utilizando la herramienta de dibujo asistido por ordenador AutoCAD para su posterior conversión a 3Dstudio max y aplicación de materiales y texturas. Se partió de la planta de cada sala colocando sobre ella la altura correspondiente a cada punto del espacio. Las alturas se midieron en la sección correspondiente. La complejidad de algunas de las salas, como es el caso de la Catedral de Valencia, hizo que la documentación resultara insuficiente. Por este motivo fue necesario recurrir a fotografías o visitas que proporcionararan un conocimiento global del espacio a modelar.

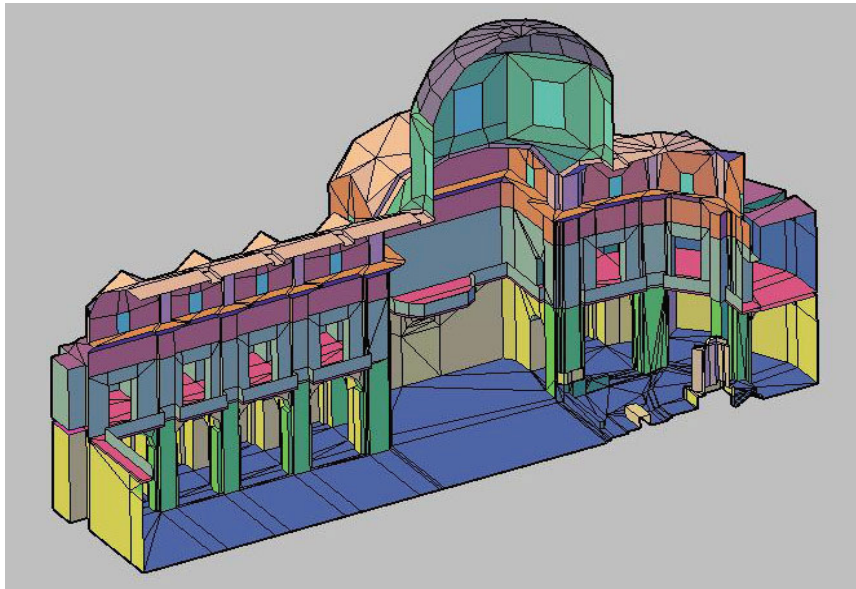


Figura 1: Basílica Santa María de Elche.

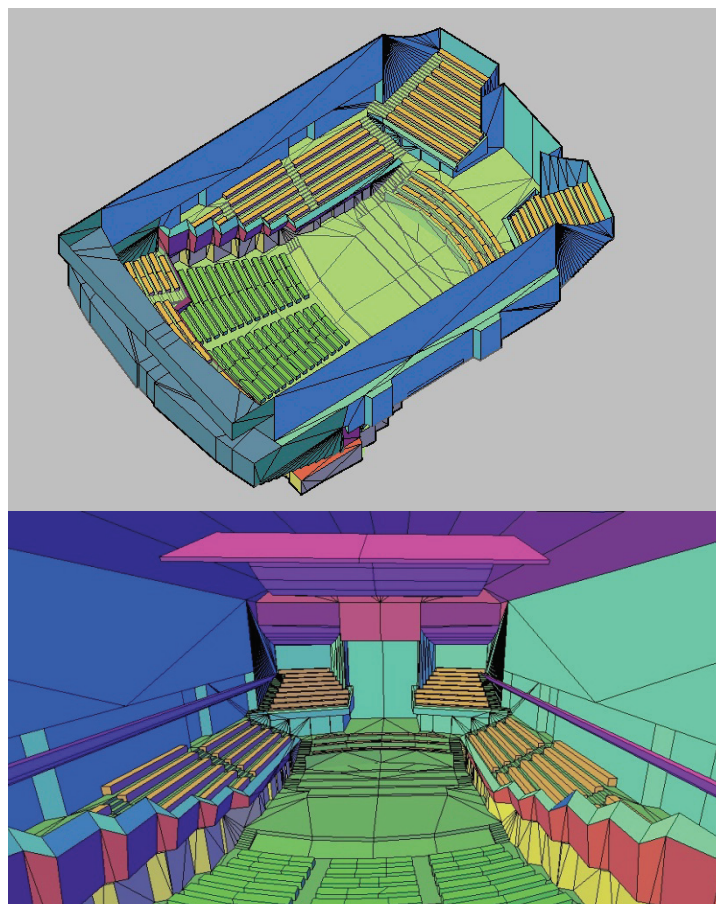


Figura 2: Palau de la Música. Sala Iturbi. Modelo complejo.

2. DIFERENCIAS ENTRE SIMULACIÓN VISUAL Y ACÚSTICA

El modelo virtual empleado en la simulación visual debía ser lo más detallado posible para obtener una visión realista al colocar la textura correspondiente a cada elemento y superficie. Esto se tradujo en modelos compuestos por un elevado número de caras.

En un primer momento se pensó en utilizar los mismos modelos tanto para la simulación visual como para la acústica. No obstante, la naturaleza de los algoritmos de trazado de rayos obliga a que el modelo cumpla una serie de restricciones. Además, se ha demostrado que se obtienen mejores resultados en la simulación si la complejidad de la sala se representa mediante los parámetros de las superficies (absorción y difusión) [2]. Por otro lado, a mayor número de superficies, mayor es la posibilidad de aumentar el número de errores. Por tanto, para este proceso, como las exigencias eran totalmente distintas, se requería un modelo lo más sencillo posible que redujera las posibilidades de error.

Los programas de simulación acústica exigen que los modelos estén totalmente cerrados para que los rayos que simulan las ondas sonoras reboten en las superficies sin producirse escapes. Cuanto mayor es el número de caras que compone el modelo mayor es la cantidad de aristas y vértices de encuentro entre caras por los que pueden producirse los escapes, por ello la complejidad espacial y geométrica de las salas de estudio debía simplificarse. El modelo debía elaborarse con el mínimo número de planos sin perder las características esenciales del espacio que le otorgan un determinado comportamiento acústico.

Como consecuencia de esta contradicción entre los requerimientos exigidos en un caso y en otro y apoyándonos en estudios que corroboraban la necesidad de simplificar, se tomó la decisión de realizar dos modelos para cada una de las salas de estudio. A partir de los modelos complejos empleados en la simulación visual se realizaron otros más sencillos, reduciendo notablemente el número de planos para hacerlos compatibles con los programas de simulación acústica y reducir el número de errores.

Tabla 1: Modelización de diferentes salas con modelos complejos y simplificados.

SALA DE ESTUDIO	NÚMERO POLÍGONOS MODELO	
	COMPLEJO	SIMPLIFICADO
CATEDRAL	12778	2399
PALAU DE LA MÚSICA	3685	1040
PALAU DE LES ARTS "REINA SOFIA"	6520	2272
BASÍLICA ELCHE	4114	2334
BASÍLICA ELCHE CON MISTERI	4106	2450
LONJA DE LOS MERCADERES	18262	3875

3. LIMITACIONES DEL PROGRAMA DE DIBUJO

En esta etapa, las mayores dificultades se encontraron a la hora de compaginar la precisión requerida por dichos programas con las limitaciones de los programas de dibujo y modelado. [3]

El modelado para la simulación acústica exige un nivel de precisión muy alto:

- Fue imprescindible modelar con elementos del tipo cara 3D ya que los programas de simulación no admiten sólidos.
- Para que el modelo estuviera completamente cerrado y evitar fugas los vértices de todas las caras adyacentes debían coincidir exactamente. Aquí se encontraron dificultades importantes en elementos complejos como nervios y bóvedas de los primeros modelos ya que la ubicación de algunos puntos concretos en el espacio resultó muy complicada. La experiencia de modelos iniciales permitió superar estas dificultades en los posteriores.
- Para que el modelo estuviera completamente cerrado y evitar fugas los vértices de todas las caras adyacentes debían coincidir exactamente. Aquí se encontraron dificultades

importantes en elementos complejos como nervios y bóvedas de los primeros modelos ya que la ubicación de algunos puntos concretos en el espacio resultó muy complicada. La experiencia de modelos iniciales permitió superar estas dificultades en los posteriores.

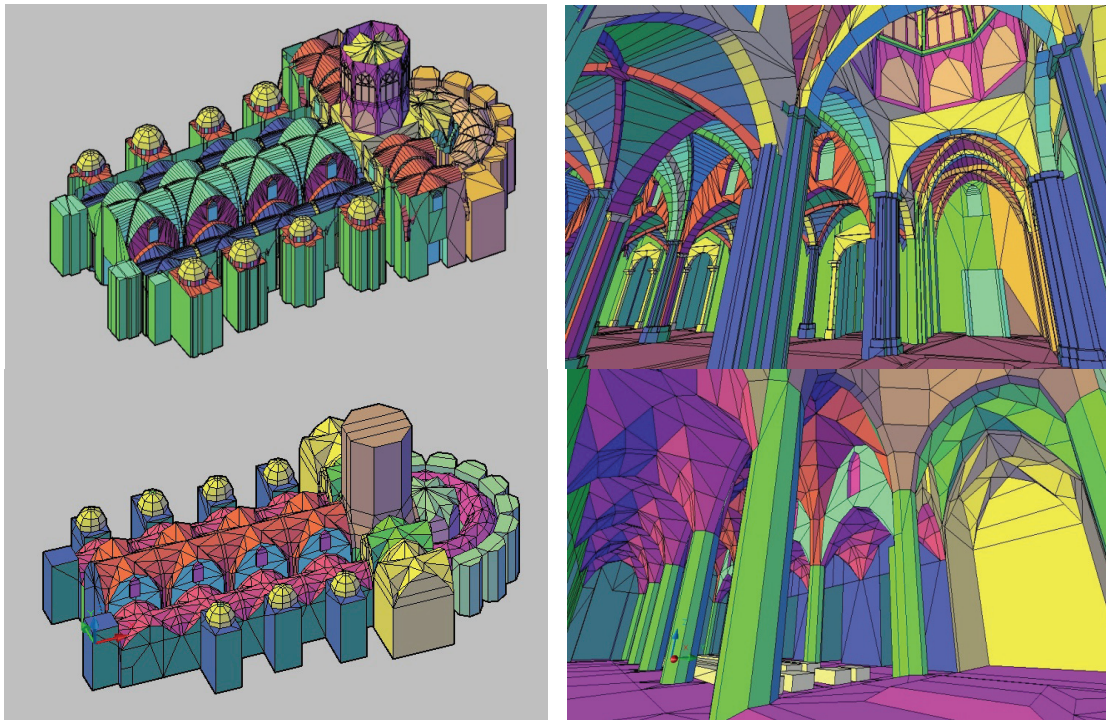


Figura 3: Catedral de Valencia. Modelos complejo y simplificado (vistas exterior e interior).

La principal limitación de AutoCAD a la hora de modelar es que sólo permite realizar caras de tres o cuatro lados. Como consecuencia, dada la complejidad de las salas incluso tratándose de un modelo simplificado, fue necesario un mayor número de caras en cada superficie aumentando las posibilidades de errores y escapes entre ellas. Se detectó asimismo cierta falta de precisión ya que muchas veces los vértices eran aparentemente coincidentes siendo necesario ampliar extremadamente la vista del encuentro entre caras para apreciar una mínima separación entre ellos traducida posteriormente en un error.

Por último señalar que no permite conocer el sentido de las normales de las caras por lo que resultó imposible saber si las superficies estaban o no bien orientadas hasta que no se introdujo el modelo en el programa de simulación acústica.

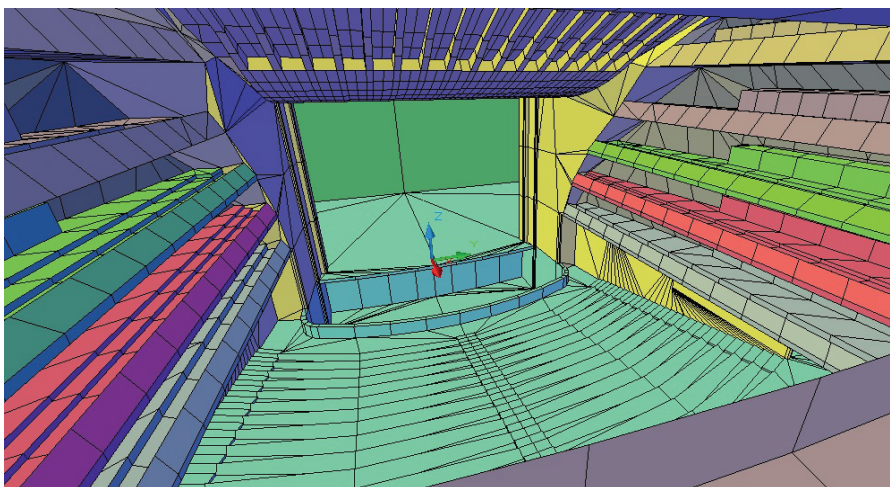


Figura 4 a: Palau de Les Arts "Reina Sofia". Modelo complejo.

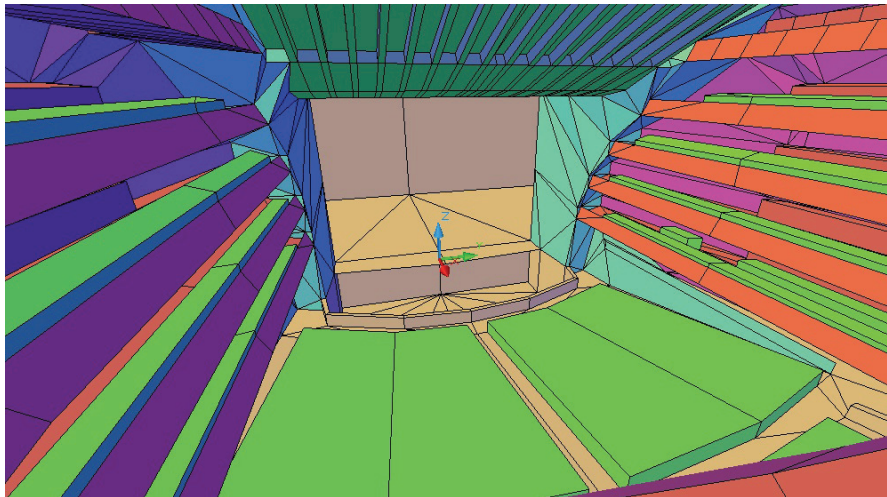


Figura 4 b: Palau de Les Arts "Reina Sofia". Modelo simplificado.

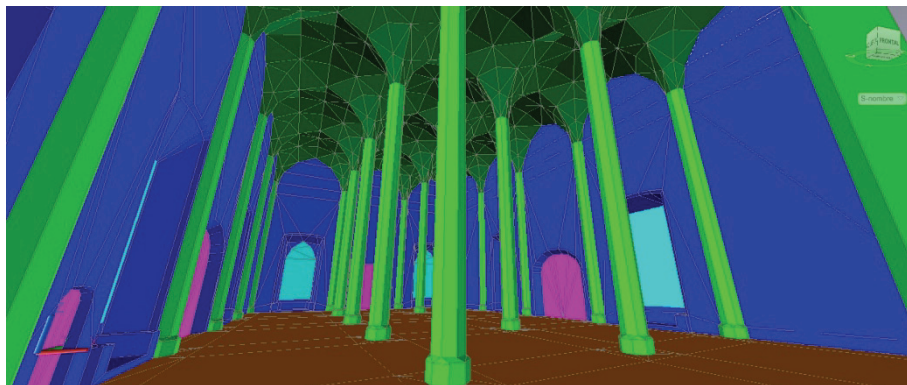
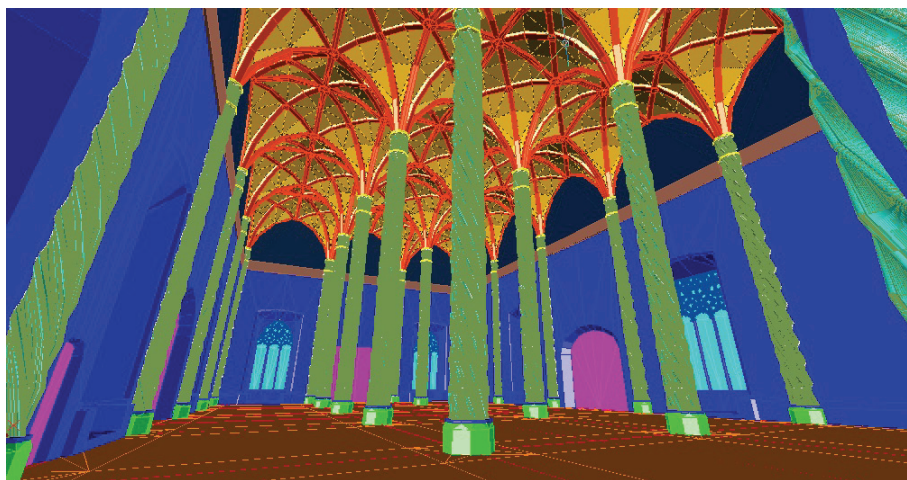


Figura 5: Lonja de los Mercaderes de Valencia. Modelos complejo y simplificado.

5. CONCLUSIÓN

Los modelos empleados para simulación acústica han de cumplir unas condiciones determinadas que los hagan compatibles con los programas informáticos y que difieren notablemente de las requeridas para la simulación visual. Por este motivo es recomendable realizar un modelo específico para cada caso.

El trabajo realizado ha posibilitado el desarrollo de herramientas de soporte a la corrección y además es fundamental la experiencia del modelizador para minimizar errores y disminuir el tiempo de desarrollo de los modelos especialmente en geometrías complejas

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está financiado por fondos FEDER y el Ministerio de Ciencia e Innovación Español, dentro del proyecto BIA2008-05485.

7. REFERENCIAS

- [1] A. Giménez; J. Segura; R. Cibrián; S. Cerdá; A. Barba; R. Montell; A. Planells; J. Navasquillo; J. Romero; S. Ponz; R. Lacatis; M. Fernández; J.L. Miralles. "Estudio acústico de edificios del patrimonio histórico-arquitectónico en entornos de realidad virtual. Dificultades y ventajas." TECNIACUSTICA'11. CÁCERES, OCTUBRE 2011.
- [2] S. Siltanen, T. Lokki, L. Savioja. "Geometry Reduction in Room Acoustics Modeling." ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA. Vol. 94 (2008) 410 – 418, Nov/Dec 2008.
- [3] 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.



ANÁLISIS DE LA POLICORALIDAD EN ESPACIOS SACROS

Referencia PACS: 43.55.Ka

Romero Moreno, Álvaro¹; Segura García, Jaume²; Navarro Camba, Enrique A.²

¹Universidad Católica de Valencia, Valencia, SPAIN alvaro.romero@ucv.es

²IRTIC - Universitat de València, Paterna, SPAIN jaume.segura@uv.es; enrique.navarro@uv.es

ABSTRACT

Towards the end of the Renaissance period and mainly in the Baroque was a common habit to delocating sources (vocals and instruments) to create new sound effects in sacred spaces. So the concerts 'in battle', in echo or other distributed settings throughout the churches were widely used resources by composers at that time. In this paper, we intend to study some settings of sources in two churches in order to analyze how different acoustic parameters are affected.

RESUMEN

Hacia finales del periodo renacentista y fundamentalmente en el barroco fue muy común el hábito de deslocalizar fuentes (coros e instrumentos) para crear nuevos efectos sonoros en los espacios sacros. Así los conciertos 'en batalla', en eco u otras disposiciones distribuidas a lo largo de las iglesias fueron recursos muy utilizados por los compositores en aquella época. En este trabajo, pretendemos estudiar algunas disposiciones de fuentes no únicas en dos iglesias para así analizar cómo se ven afectados diferentes parámetros acústicos.

1. INTRODUCCIÓN

En el presente estudio se realiza una primera aproximación al análisis de la distribución multifuente a través de la policoralidad o multicoralidad, como ejemplo de disposición real en gran número de obras religiosas destinadas a ser interpretadas en espacios sacros. Se analiza la distribución del campo sonoro (LP), la claridad (C80) y el índice de transmisión de la palabra (STI y RASTI), sin entrar a estudiar cuestiones relacionadas con la localización de las fuentes. Para realizar este análisis se emplean dos ejemplos tipológicos eclesiales diferentes, la iglesia de planta de cruz latina y la iglesia de planta basilical o uninave, que caracterizan a un gran número de espacios sacros presentes en la Comunitat Valenciana. Así, la iglesia de Sant Agustí situada en la localidad castellanense de Vinaròs representa el ejemplo de iglesia de planta de cruz latina con un volumen de unos 4.900 m³ y la iglesia de Sant Jaume situada en la ciudad valenciana de Algemesí, el modelo de iglesia de planta basilical con un volumen de 11.000 m³. Ambos espacios sacros fueron construidos en el siglo XVI. Se consideran iglesias tipo, ya que en la mayoría de las poblaciones de esta zona geográfica se pueden encontrar espacios sacros de características similares, tanto en la tipología estructural como en sus dimensiones. De este modo se pretende ofrecer resultados que, en primera aproximación, se puedan extrapolar para un gran número de iglesias presentes en esta área geográfica.

La policoralidad, polifonía multicoral o polifonía policoral es una de las primeras manifestaciones de distribución multifuente en el ámbito musical. Este fenómeno tiene su origen en la música sacra y aparece en el siglo XVI en la Escuela Veneciana fundada por Adrian Willaert maestro de capilla de la iglesia de San Marcos de Venecia, desarrollándose con total plenitud en el barroco musical. La iglesia de San Marcos con su particular disposición arquitectónica, posee dos coros enfrentados cada uno con su propio órgano, favoreció la

colocación de coros o conjuntos instrumentales simultáneos separados en diferentes posiciones, para producir efectos antifonales, 'en batalla' y de eco, abrumando de este modo al oyente con una envolvente sonora plena de magnificencia, poder y esplendor. Los coros se situaban en diferentes puntos de las galerías elevadas de la iglesia [1]. Esta técnica policoral, multicoral o del coro spezzato abrió acústicamente el espacio y produjo timbres nuevos con la utilización de conjuntos instrumentales. Se produce así una música rica en colorido dentro de un espacio con fuertes impresiones sensoriales, con oposición y fusión de los sonidos. Se busca por tanto una nueva sonoridad en base a un procedimiento acústico, colocando a los diversos coros en distintas posiciones y produciendo un efecto equivalente a la estereofonía, efecto que se perdería si el sonido viniese de una misma dirección [2]. La colocación de órganos en sitios distintos servía de apoyo a estos coros. En la Península Ibérica ya desde ese siglo XVI se va a emplear el género multicoral o policoral en las composiciones de música sacra. Destaca la figura de Juan Bautista Comes introductor en Valencia de la policoralidad, autor que indicaba en sus obras la colocación de los distintos coros en lugares muy lejanos unos de otros. El Barroco también fue muy productivo en España en cuanto a música policoral sacra, con numerosos ejemplos a tres o cuatro coros, con o sin instrumentos [3]. El uso de varios coros e instrumentos, por lo general de viento, fue una constante en este siglo en la mayoría de iglesias importantes. En el caso de la iglesia de Sant Jaume destacan las figuras de Juan Bautista Cabanilles y José Pradas.

2. HISTORIA Y CARACTERIZACIÓN

La respuesta a la policoralidad de un tipo y otro de iglesia difieren, ya que tanto la forma constituyente como el volumen difieren. El volumen de una es mayor que el de la otra y la forma de la iglesia grande suele ser más compleja. Los problemas acústicos se hacen más importantes y más difíciles cuando aumenta el tamaño de la nave y cuando su forma se hace más compleja [4].

San Agustín forma parte de los restos del antiguo convento de los Padres Agustinos. Esta iglesia del siglo XVI es un edificio de estilo barroco que presenta forma de cruz latina, con tres capillas laterales por banda entre contrafuertes comunicados entre sí; crucero con cúpula sobre tambor y pechinas, y presbiterio techado con bóveda de aristas, al igual que las capillas laterales de la nave, que en la actualidad están totalmente vacías. A los pies del templo, se levanta un coro sobre elevado. La iglesia sufrió un gran deterioro en el año 1936, utilizándose eventualmente para el culto, y se cerró al público en el año 1975. En los años 80 la antigua iglesia fue acondicionada y rehabilitada funcionalmente como auditorio, perdiendo su función eclesial [5], aunque para el presente análisis se considere en su estado anterior a la rehabilitación y acondicionamiento.

Sant Jaume fue construida entre 1550 y 1582. 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 11.000 m³. La planta de la iglesia tiene cinco tramos, cubiertos con arquivoltas nervadas con capillas laterales. Se cierra con un ábside de forma poligonal de cinco lados y vueltas estrelladas. 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. El edificio en sí es una mezcla de estilos renacentista y barroco valenciano. La iglesia de Sant Jaume sigue empleándose para su función primigenia, es decir, para el culto religioso, aunque también acoge audiciones musicales eventualmente.

3. MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN

Para modelizar acústicamente ambas iglesias se ha empleado el algoritmo del método de trazado de rayos. El método de trazado de rayos o ray-tracing method, está basado en los principios generales de la acústica geométrica. EPIDAURE ha sido el programa de simulación empleado [6], [7] y [8] para la realización del modelo geométrico. La fuente estadística emite una serie de rayos con una energía específica que, sobre la incidencia de las superficies de las paredes u obstáculos en el modelo geométrico, pierden energía en cada reflexión. La

correspondiente energía disminuye en función del coeficiente de absorción del material que forma dicha pared u obstáculo. Por medio de ciertos detectores -micrófonos virtuales-, los citados rayos pueden ser detectados en cualquier punto de la sala estudiada. Se deben tener en cuenta las reflexiones especulares y difusas, y en el caso de EPIDAURE, esto se lleva a cabo sobre la base de la definición del orden de la reflexión en el cálculo de los ecogramas. Este procedimiento se justifica para este tipo de ambiente de baja absorción. Este modelo de rayo es especialmente conveniente cuando la longitud de onda es pequeña (frecuencia alta), en relación con las dimensiones de los objetos interceptados por las ondas. En el campo acústico esto implica que las superficies que delimitan el recinto sean grandes en comparación con las longitudes de los sonidos transmitidos [9], hipótesis válida para el estudio del comportamiento acústico de recintos arquitectónicos sacros.

Después de trazar todos los rayos y procesar toda la información correspondiente a una determinada simulación, se puede reconstruir la respuesta impulsiva pertinente en el detector considerado admitiendo las siguientes simplificaciones: la duración de la extinción del sonido debe ser independiente de la posición de la fuente y de los receptores, así como también debe existir independencia en la posición de los materiales absorbentes presentes. En general, los sistemas de simulación emplean la teoría de la acústica geométrica mediante modelos de rayos que inciden y se reflejan sobre superficies, para longitudes de onda menores que las dimensiones de las superficies del recinto, y considerando campos sonoros incoherentes o difusos. Para modelizar, tanto la iglesia de Sant Agustí (SA) de Vinaròs, como la iglesia Sant Jaume (SJ) de Algemesí [10], se ha utilizado el formato requerido por el método de trazado de rayos que utiliza el programa informático EPIDAURE para el análisis de la policoralidad.

Para ambos casos, las coordenadas han sido calculadas a partir de los planos de de las iglesias, y para Sant Agustí de Vinaròs además se realizaron medidas mediante un sensor de ultrasonidos de las cotas de alzado, necesarias para realizar el modelo matemático en 3D que permiten la simulación. En el proceso de modelización se definen todas las superficies presentes en las iglesias, un total de 530 superficies para Sant Agustí y un total de 1.314 superficies para Sant Jaume, que permiten la simulación completa del comportamiento acústico de las dos iglesias. Se introducen los datos referentes al medio de propagación, como son la humedad relativa (%), la temperatura ambiente (°C) y la absorción del aire (dB / 100 m).

Como cada una de las superficies que componen las iglesias están constituidas por un determinado material, es necesario proporcionar los valores correspondientes de los coeficientes de absorción (α) de cada uno de ellos. Se definen las superficies y se estructuran en grupos, atribuyendo a cada una de las superficies o grupos el tipo de material del cual están constituidas. En la figura 1 se muestran imágenes del interior de las dos iglesias modelizadas.

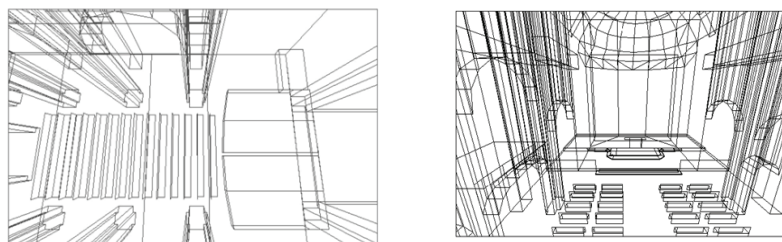


Figura 1: Vistas de la modelización de las iglesias (SA y SJ).

Para la iglesia de Sant Agustí se han considerado un total de siete materiales y para Sant Jaume un total de nueve. La configuración de materiales para la modelización de la iglesia de Sant Agustí es la que tiene mármol para el suelo; enlucido de yeso y vermiculita para las capillas, toda la vuelta central, laterales de la iglesia y para los muros anteriores y posteriores de la sala, así como, pilares, pilastras, las bóvedas y la cúpula; madera ordinaria para la parte del coro y para la puerta de entrada y bancos de madera. La configuración de materiales para la modelización de la iglesia Sant Jaume [11] es la que tiene mármol para el suelo y los escalones del presbiterio; enlucido de yeso y vermiculita para las capillas, toda la vuelta central, laterales de la iglesia y para los muros anteriores y posteriores de la sala, así como, para las columnas, las bóvedas y la cúpula; madera de pino para las balaustradas de los balcones y para la puerta de entrada; fieltro ligero para el retablo del altar mayor; piedra para los arcos centrales; madera para la sillería del presbiterio y bancos de madera para los feligreses. En la

tabla 1 se reproducen los valores de los correspondientes coeficientes de absorción α [4] y [12], para las frecuencias comprendidas en las bandas de octava entre 125 y 4.000 Hz, para cada uno de estos materiales.

Material	Coeficiente de absorción α					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Enlucido (Yeso)	0,120	0,100	0,070	0,090	0,070	0,050
Madera de pino	0,098	0,110	0,061	0,081	0,082	0,110
Madera ordinaria	0,200	0,160	0,130	0,100	0,060	0,050
Mármol	0,010	0,010	0,010	0,020	0,020	0,010
Fieltro (Retablo)	0,020	0,040	0,100	0,210	0,570	0,920
Piedra	0,010	0,012	0,020	0,020	0,023	0,035
Bancos de madera	0,100	0,160	0,130	0,100	0,060	0,050

Tabla 1: Coeficiente de absorción en función de la frecuencia para cada material.

Para proseguir el proceso de modelización es necesario especificar también la posición y características de las fuentes sonoras presentes en el recinto, así como las posiciones o localizaciones de los respectivos receptores. Para la simulación de las fuentes se definen su posición, orientación, ángulos límites, retardo en la emisión, nivel sonoro y potencia sonora. Las fuentes utilizadas son omnidireccionales.

Para la modelización de las fuentes se ha empleado el programa de análisis sonoro ARTEMIS, con el que se han obtenido los espectros sonoros de cada una de las fuentes musicales. Posteriormente se obtienen los niveles sonoros de los respectivos espectros sonoros para bandas de tercio de octava. A partir de los tercios de octava se calculan los niveles sonoros, tabla 2, y la respectiva potencia sonora de las fuentes, para las bandas de octava comprendidas entre 125 y 4.000 Hz, que son los empleados para la modelización y simulación en EPIDAURE. El análisis multifuente de la policoralidad en las dos iglesias se realiza considerando las siguientes distribuciones de las fuentes: fuente de voces acompañadas por órgano (VO) situada en el coro alto al pie de la iglesia para Sant Agustí y en la posición del antiguo coro, punto de partida de la vía sacra en la iglesia de Sant Jaume, más dos fuentes de voces acompañadas por instrumentos musicales de cuerda y viento (VI) situadas a ambos lados del crucero o transepto para las dos iglesias.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
VO	60,92	65,48	68,71	62,64	57,78	54,99
VI	66,07	69,69	77,99	78,12	72,16	67,13

Tabla 2: Niveles sonoros (dB) de las fuentes por bandas de octava

Estas disposiciones representarían dos de las posibles disposiciones características de la policoralidad (PC). Se ha considerado una red con un total de 24 receptores distribuidos en la zona de la audiencia a lo largo de toda la iglesia. En ambos casos los cálculos se han realizado con las mismas fuentes. Las posiciones de los 24 receptores considerados y de las fuentes se muestran en la figura 2.

Una vez realizado el proceso de modelización, ya se está en disposición de lanzar un determinado número de rayos, en número suficientemente alto si se pretenden obtener resultados válidos, procedentes de las fuentes sonoras que se quieran tomar en consideración en el proceso y calcular los valores de los parámetros anañlizados para esa configuración concreta. En cada uno de los cálculos que se han realizado para el análisis se han lanzado un total de 20.000 rayos, considerando en cada caso un total de 10 reflexiones por rayo. Esta elección presenta una fórmula de compromiso en la obtención de resultados satisfactorios para un tiempo de cálculo razonable. Mediante el programa EPIDAURE se pueden obtener resultados de niveles sonoros, valores de claridad e índices STI para las octavas de frecuencia entre 125 y 4.000 Hz. También se pueden obtener mapas de distribuciones sonoras, de claridad y de índices RASTI, globales o por octavas de frecuencia.

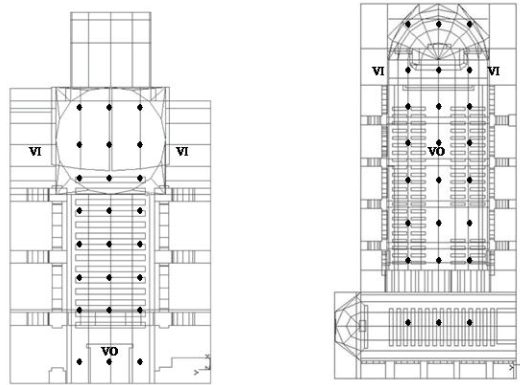


Figura 2: Posiciones de los 24 receptores y de las fuentes para SA y SJ

4. RESULTADOS

A continuación se presentan los parámetros estudiados para las dos iglesias, con el objeto de obtener unas conclusiones respecto a la policoralidad que se puedan extrapolar, en primera aproximación, para otros espacios eclesiales o sacros con tipologías similares al de estas dos iglesias. En la tabla 3 se resumen los valores obtenidos. Se emplea un código de colores para mostrar la adecuación o no a los valores óptimos (buena-verde, regular-amarillo, mala-rojo).

Parámetros indicadores	Policoralidad	
	SA	SJ
LP (dB)	74,31	74,54
C80 (dB)	1,90	-2,58
STI	0,53	0,42
RASTI	0,6-0,7	0,5-0,6

Tabla 3: Resumen valores de los parámetros

Para la distribución del campo sonoro LP (dB) se muestran sus tendencias comparadas con el modelo de Barron y Lee (fig.3), sus valores medios y sus mapas de distribución (fig. 4)

Distribución del nivel sonoro L_p (dB)

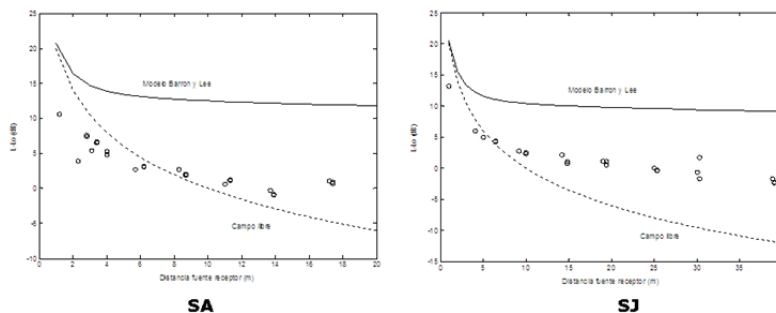
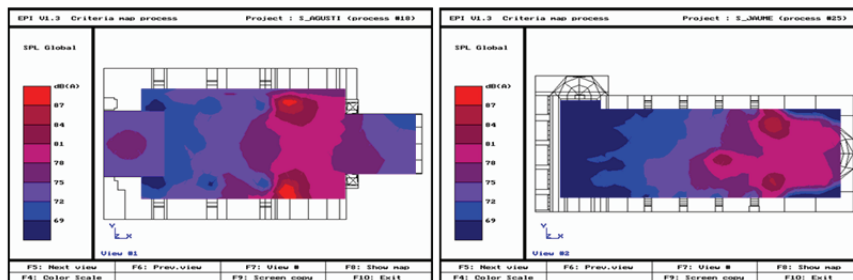


Figura 3: Distribución del campo sonoro (24 receptores)



L_p SA = 74,31 dB

L_p SJ = 74,54 dB

Figura 4: Mapas del nivel sonoro para la policoralidad

A continuación se muestran los mapas obtenidos para el índice de claridad C80 (fig. 5) con los valores máximos y mínimos, y los mapas obtenidos para el índice RASTI (fig. 6).

5. CONCLUSIONES

En el análisis de la policorralidad para estos espacios sacros se aprecia que la distribución del campo sonoro en el interior de las dos iglesias se observa como la tendencia se aproxima a la del algoritmo propuesto por Barron y Lee, figura 3, con un campo sonoro difuso. Los valores de los niveles sonoros LP obtenidos son prácticamente los mismos para las dos iglesias con valores en torno a los 74 dB. Los mapas de la figura 4 presentan distribuciones del campo sonoro aceptables para las dos iglesias.

El índice de claridad C80 presenta un valor medio para la iglesia de Sant Jaume por debajo del límite inferior óptimo, para Sant Agustí los valores están dentro de los márgenes deseables. Al observar los mapas de distribución del índice C80 se comprueba que los valores mejoran en las proximidades de las fuentes y que en todos los casos presentan distribuciones con valores aceptables para la buena audición tanto de la melodía como de la armonía, cubriendo de forma homogénea toda la zona destinada tanto a la audición como las zonas destinadas para la interpretación, es decir, para las fuentes - música.

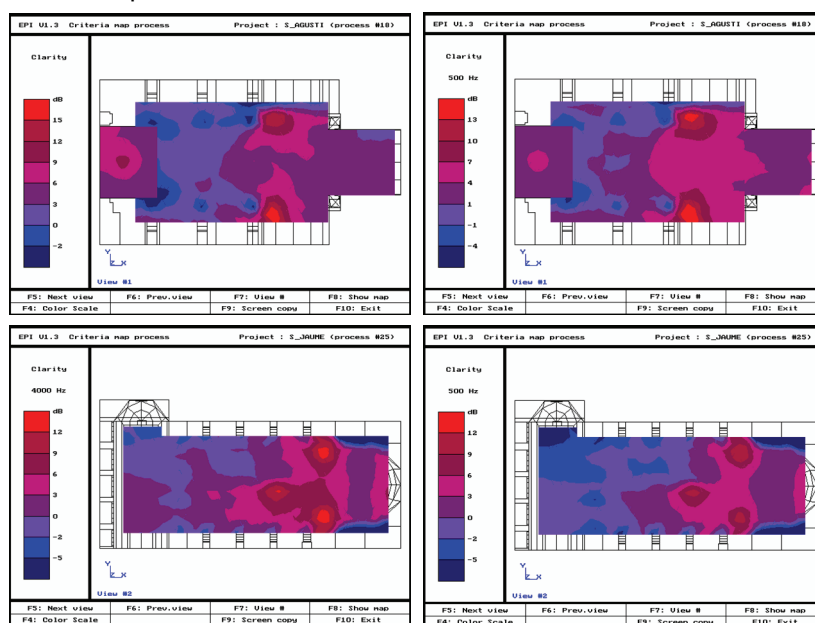


Figura 5: Mapas C₈₀ con los valores máximos y mínimos para la policorralidad PC

Mapas RASTI PC

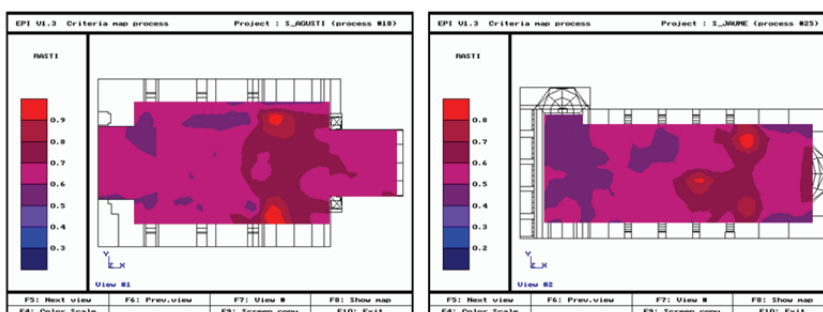


Figura 6: Mapas RASTI policorralidad PC

El estudio y análisis de la inteligibilidad de la palabra se realiza a partir del índice de transmisión de la palabra STI y del índice rápido RASTI. Los resultados obtenidos en ambas iglesias para el índice STI están por debajo de lo deseable, 0,6, para poseer unas buenas condiciones acústicas para la palabra, con valores medios de 0,53 para Sant Agustí y de 0,42 para Sant Jaume, valores calificados como pobres.

Sin embargo al analizar la distribución en los mapas obtenidos del índice RASTI los resultados mejoran tomando valores entre 0,6 y 0,7 para Sant Agustí y entre 0,5 y 0,6 en Sant Jaume. Estos valores están calificados de buenos a débiles. Se puede concluir que la respuesta a la transmisión de la palabra en las dos iglesias será débil, con tendencias hacia pobres o buenas según la distribución y la naturaleza de las fuentes. Es notable el aumento en estos índices en zonas cercanas a las fuentes, lo que todavía pone más de manifiesto la dependencia en la distribución de estos índices con la disposición de las fuentes.

Los resultados obtenidos para las dos iglesias del índice STI, índice de transmisión de la palabra, se consideran débiles, con tendencia hacia pobre para la iglesia de Sant Jaume. La transmisión de la palabra será débil o pobre, dificultando la inteligibilidad de la misma, si bien es cierto, que este fenómeno se acusa más en Sant Jaume que en Sant Agustí, cuyos índices mejoran hasta casi alcanzar los valores superiores a 0,6 que califican a las salas como buenas para la inteligibilidad de la palabra.

A partir de este análisis se pueden obtener unos resultados orientadores que permiten caracterizar la identidad acústica de un espacio sacro y su respuesta respecto al estilo musical sacro de la policoralidad, que tuvo su mayor apogeo hacia finales del renacimiento y durante el barroco fundamentalmente. Como ejemplo se ha realizado el análisis en dos iglesias de estructura y tamaño diferente, que responden a dos modelos arquitectónicos tipo y cuyos resultados pueden ser extrapolados para la mayoría de las iglesias presentes en la Comunitat Valenciana. Funcionan pues como dos modelos diferenciados, cuyo análisis puede servir, en primera aproximación, para el análisis de la policoralidad en otros espacios eclesiásticos de características similares. Es cierto que cada iglesia, catedral, basílica, ermita o capilla, tienen particularidades arquitectónicas u ornamentales que las diferencian y que a su vez influyen en su comportamiento acústico. Para un análisis más detallado y particularizado de cada caso se deberán tener en cuenta tanto las diferencias estructurales como los detalles ornamentales.

6. REFERENCIAS

- [1] J. J. SENDRA, J. NAVARRO: La evolución de las condiciones acústicas en las iglesias: del paleocristiano al tardobarroco, IUCC, ETSA, servicio publicaciones Universidad Sevilla, 1997.
- [2] J. L. LÓPEZ GARCÍA: Conjunto Coral, Artes Gráficas Mariano Bo, 1986.
- [3] J. LÓPEZ-CALO: Historia de la música española, 3. Siglo XVII, Alianza Música, 1983.
- [4] M. RECUERO Y C. GIL: Acústica arquitectónica, E.U. de Ingenieros Técnicos de Telecomunicaciones, U.P.M., 1993.
- [5] A. ROMERO, J.SEGURA, E. A. NAVARRO: Sant Agusti Church Acoustic Rehabilitation. A case of Study, Lambert Academic Publishing, 2011.
- [6] L. CREMER, H. A. MÜLLER: Principles and Applications of Room Acoustics, Applied Science Publishers Ltd. England, 1982.
- [7] D. MAERCKE, J. VAN MARTÍN: "The prediction of echograms and impulse responses within the Epidaure software", Applied Acoustics, vol. 38, pp. 93-114, 1993.
- [8] C.S.T.B.: Epidaure. Prediction of auditorium acoustics, User's manual. Version 1.0. 0'1dB. Villeurbanne, 1994.
- [9] J. J. SENDRA, T. ZAMARREÑO, J. NAVARRO, J. ALGABA: El problema de las condiciones acústicas en las iglesias: principios y propuestas para la rehabilitación, IUCC, ETSA, servicio publicaciones Universidad de Sevilla, 1997.
- [10] 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, pp. 155-170.
- [11] J. SEGURA, L. VERA, A. BARBA, R. MONTELL, A. GIMÉNEZ, M. FERNÁNDEZ, R. CIBRIÁN, S. CERDÁ, J. ROMERO; "Análisis de auralizaciones del nuevo órgano de la Basílica de San Jaume de Algemesí (Valencia)". TECNIACUSTICA'09. CÁDIZ, SEPTIEMBRE 2009.
- [12] M. RECUERO: Acústica arquitectónica aplicada, Paraninfo, 1999.



ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE VALORES MEDIDOS C80 EN AUDITORIOS

Referencia PACS: 43.55 Ka

Segura, Jaume³; Cerdá, Salvador¹; Montell, Radha²; Barba, Arturo²; Cibrián, Rosa⁴; Giménez, Alicia²

¹Departamento Matemática Aplicada, Univ. Politècnica de València, Camí de Vera s/n, Valencia –SPAIN
salcerjo@mat.upv.es

²E.T.S.I.Industriales., Univ. Politècnica de València, rala1@doctor.upv.es, radmonse@fiv.upv.es,
agimenez@fis.upv.es, arturo@arturobarba.com

³IRTIC - Universitat de València, C/Catedratic Dr José Beltrán, 2 - Paterna, SPAIN jsegura@uv.es

⁴Facultad de Medicina. Universitat de València, SPAIN rosa.m.cibrian@uv.es

ABSTRACT

The requirements of ISO-3382 do not allow a deep analysis of the variability of different parameters in a room from the measures. In this paper, we propose to study the distribution of sound in rooms using the technique of Krigin applied to experimental measurements of musical clarity (C_{80}). This has allowed us to get more values of this parameter throughout several rooms and we have compared the results with analytical models.

RESUMEN

Los requisitos de la ISO 3382 en la medida de salas no permiten un análisis profundo de la variabilidad de diferentes parámetros en una sala a partir de las medidas. En este trabajo, se propone el estudio de la distribución de sonido en las salas usando la técnica de Kriguin aplicada a la medida de la claridad musical (C_{80}). Esto nos ha permitido conseguir más valores de este parámetro en diversas salas y comparar los resultados con modelos analíticos.

1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas de estadística espacial permiten el estudio de la variación estadística de parámetros áreas limitadas. Estas técnicas fueron propuestas por R.A. Fisher en 1935, y desarrolladas por otros matemáticos e ingenieros como D.G. Krige (1951) [1] o G. Matheron (1962) [2], los cuales desarrollaron una técnica de predicción geoestadística llamada Kriguin. Esta técnica estadística ha sido aplicada a diferentes áreas, tales como la epidemiología, ecología, agricultura, meteorología, geología, oceanografía, etc. En el campo de la acústica, esta técnica ha sido aplicada en acústica ambiental para generar modelos semiempíricos y monitorizar la variación espacial de ruido ambiental [3].

El método de Kriguin se usa como una técnica para interpolación espacial de datos. Estos datos se componen de una serie de observaciones de variables de interés las cuales tienen cierta correlación espacial. Normalmente, el resultado del Kriguin es el valor esperado (promedio "Kriguin") y su varianza (varianza del "Kriguin") calculada para cada punto del área determinada. El promedio Kriguin en cada localización puede considerarse como el promedio del conjunto total de resultados condicionado a los datos. Por otra parte, la varianza Kriguin será la varianza del conjunto completo.

A fin de comparar con el modelo teórico, hemos usado el modelo de Barron [4][5]. Este modelo considera que la energía puede calcularse como el sonido directo, temprano y tardío. Así, el valor de la claridad (C80) usando el modelo de Barron viene dado por la expresión:

$$C_{80}(r) = 10 \cdot \log \left[\frac{\frac{100}{r^2} + \frac{31200T}{V} e^{-\frac{0.04r}{T}} (1 - e^{-1.11/T})}{\frac{31200T}{V} e^{-\frac{0.04r}{T}} e^{-1.11/T}} \right] \quad (1)$$

El método de Barron predice bastante bien este parámetro en una sala con un techo razonablemente difusor, cierta difusión en las paredes laterales, sin superficies cóncavas que produzcan focalizaciones, sin subdivisiones en espacios independientes, con espacios razonablemente proporcionados y sin recintos en forma de abanico. Una sala como esta puede ser considerada una sala razonablemente difusa [5]. De acuerdo con este modelo, la claridad en un auditorio viene dada en función del tiempo de reverberación, el volumen y la distancia fuente-receptor, como muestra la ecuación 1.

Por otra parte, Zamarreño & al. [6] mostraron que las relaciones energéticas no eran predichas correctamente en el caso de salas, como las iglesias, que tienen determinadas características especiales (con volúmenes acoplados, etc), por lo que en determinados casos, los valores determinados a partir del modelo de Barron estaban bastante separados de los datos experimentales. El modelo evolucionado que propusieron lo llamaron modelo μ y la de terminación del valor predicho de la claridad (C80) a partir de este modelo viene expresada en la ecuación 2.

$$C_{80}(r) = 10 \cdot \log \left[\frac{\frac{100}{r^2} + \frac{31200T}{V} e^{-\frac{\mu r}{T}} (1 - e^{-1.11/T})}{\frac{31200T}{V} e^{-(1.11+0.04\mu r)/T}} \right] \quad (2)$$

La norma ISO 3382 [7] sugiere que el número de medidas a realizar en la sala depende del número de asientos y del volumen, por lo que para salas pequeñas este número es bajo. Si quisiéramos comparar medidas y modelos teóricos o computacionales, necesitaríamos un número mayor de medidas. Usando técnicas de estadística espacial, podemos obtener un número mayor de medidas interpoladas/extrapoladas y, por tanto, la comparación con los modelos teóricos puede hacerse más fácilmente.

En este trabajo proponemos la aplicación de esta técnica al estudio de la distribución del sonido en una sala. A partir de medidas experimentales, podemos obtener el Kriging correspondiente y esto nos permite obtener un gran número de valores y así podemos entender mejor cómo varía C80 con la distancia. En nuestro caso, utilizamos un mallado 12x12 para realizar el Kriging de las medidas. Los valores medidos han sido comparados con los obtenidos a partir del modelo de Barron [4][5] y del modelo μ [6].

2. METODOLOGÍA

La metodología experimental usada se ha realizado a partir de la medida de los valores de los parámetros determinantes en las salas consideradas basándonos en la norma ISO-3382 [7] y la IEC 60268 [8][9][10]. El equipo usado consistía en: un ordenador portátil con una tarjeta de sonido profesional (VxPocket v2), dos micrófonos GRAS Tipo 40 AK y los preamplificadores asociados y su alimentación correspondiente (GRAS Tipo 26AK y GRAS 12AA), una etapa amplificadora M-1000 y una fuente dodecaédrica DO12. Se utilizó el software WinMLS [11] para la captura y el análisis de las señales impulsivas. La respuesta impulsiva en cada sala fue obtenida mediante el uso de una señal *sweep* logarítmica sinusoidal. Todas las medidas fueron realizadas con las salas vacías y la fuente sonora situada en el centro del escenario.

En la tabla 1, se muestran las salas estudiadas y sus principales características.

Sala	Uso	# Asientos	# Medidas	V(m ³)	RT(s)
Salón de grados ETSII, UPV	Conferencias, congresos y recitales solistas	142	16	434	0.68
Paraninfo UPV	Conferencias, congresos y recitales solistas; Orquesta de cámara y coro	385	24	2700	1.3
Auditori Ribarroja	Teatro, ópera, danza y conciertos	783	39	7830	1.79

Tabla 1: Salas estudiadas

2.1 Método de Krigin.

Se han analizado los datos para la claridad musical en las tres salas y se han dispuesto espacialmente con las coordenadas correspondientes dentro de la sala donde fueron medidas. Si utilizamos la notación $Z(x)$ como C80, entonces el conjunto de datos puede expresarse como $\{Z(x), x \in D\}$, donde D son todas las localizaciones de medida en cada sala.

En este contexto, lo que pretendemos predecir es el valor del proceso $Z(x_0)$ en la localización x_0 , particularmente en el conjunto de validación. El registro de parámetros disponible contiene información del conjunto de covariables que pueden ejercer una influencia. Como resultado, se modela $Z(x)$ como la suma de una tendencia y una función de las covariables que influyen al proceso que expresa la variación a gran escala más un error aleatorio que muestra la variación a pequeña escala.

$$Z(x) = \mu(x) + \delta(x) \quad (2)$$

donde $E[Z(x)] = \mu(x)$ y $\delta(x)$ son procesos estacionarios intrínsecamente Gaussianos con media cero, cuya caracterización de la dependencia espacial viene dada por el variograma $2\gamma(h) = \text{Var}[Z(x+h) - Z(x)] = \text{Var}[\delta(x+h) - \delta(x)]$. Estos cálculos han sido realizados mediante el uso del paquete estadístico R [12] para ajustar los variogramas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 1 muestra los valores de C80 para las salas estudiadas comparadas con el modelo de Barron y el modelo μ . Para estos resultados, podemos establecer que:

- Sala de Grados de la ETSII: Esta es una sala pequeña y muy seca. Los valores de C80 están próximos a la curva de Barron. El ajuste de los valores de C80 medidos mediante el modelo μ , con una correlación $R=0,5948$.
- Paraninfo: Los valores medidos de C80 están dispersos y son mayores que los que predice el modelo de Barron. El ajuste de los valores de C80 medidos con el modelo μ no da una buena correlación.
- Auditorio de Ribarroja: Los valores experimentales de C80 están también dispersos muy por encima de la curva de C80 obtenida mediante el modelo de Barron, lo cual muestra a primera vista que posiblemente esta sala no siga los principios de este modelo. Por su parte, el modelo μ ajustado con estos valores tampoco da buena correlación.

En la siguiente tabla presentamos los valores de μ calculados a partir de su ajuste de C80 medidos.

	μ	V	L
Sala ETSII	0,0261	504	15,1
Paraninf	0,0234	2571	25
Audit. Ribarroja	$2,4902 \cdot 10^{-14}$	11704	38

Tabla 2: Valores de μ calculado en las diferentes salas

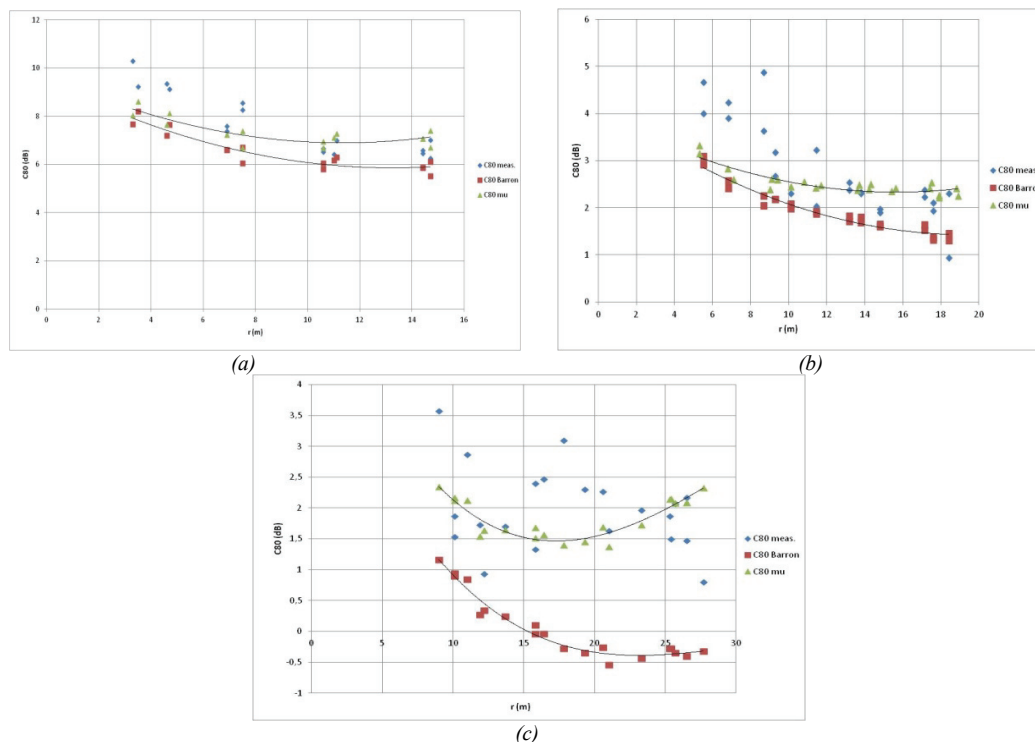


Figura 1: Comparación de valores de C80 medidos con los obtenidos mediante el modelo de Barron y el modelo μ . (a) Sala de Grados de la ETSII, (b) Paraninf and (c) Auditorio de Ribarroja

La aplicación del Kriguin ordinario permite una mayor precisión en la obtención de la distribución espacial de parámetros en la sala. Teniendo en cuenta sus peculiaridades, hemos realizado la aplicación de esta técnica a las medidas de C80 a las tres salas rectangulares consideradas, con el fin de obtener sus valores en una malla 12x12. La figura 2 muestra estos valores calculados mediante esta técnica y comparados con los modelos analíticos de Barron y μ para las salas estudiadas.

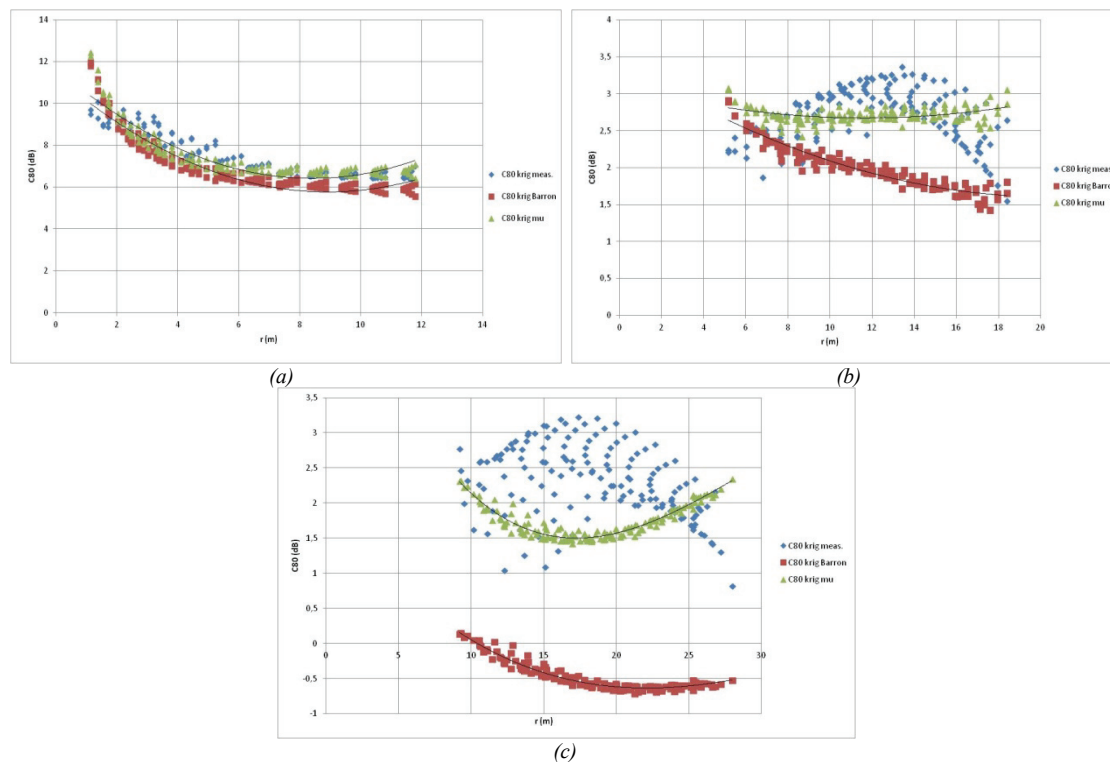


Figura 2: Comparación de valores de Kriguin de C80 con los obtenidos mediante el modelo de Barron y el modelo μ . (a) Sala de Grados de la ETSII, (b) Paraninf and (c) Auditorio de Ribarroja

En la siguiente tabla presentamos los valores de μ calculados a partir de su ajuste de C80 medidos e interpolados mediante Krigin.

	μ	V	L
Sala ETSII	0,0274	504	15,1
Paraninf	0,0193	2571	25
Audit. Ribarroja	$4,1915 \cdot 10^{-15}$	11704	38

Tabla 3: Valores de μ calculado a partir de los valores de Krigin en las diferentes salas

A la vista de los resultados obtenidos mediante la técnica de Krigin, podemos decir que:

- Salón de grados de la ETSII: los resultados del Krigin confirman que es una sala seca y vemos que la distribución de C80 se ajusta bastante bien al modelo de Barron, aunque el ajuste del modelo μ a los valores experimentales es mucho mejor y produce menor error.
- Paraninfo: en esta sala, los valores calculados mediante Krigin están claramente dispersos por encima de los valores de la curva que perfila el modelo de Barron. El modelo μ vuelve a ajustar mejor estos valores produciendo menor error en la comparación con los valores experimentales. La distribución de valores experimentales muestra una clara curva negativa que no predice ni el modelo μ ni el de Barron.
- Auditorio de Ribarroja: en este caso, la distribución de valores de C80 están también esparcidos muy por encima de la curva de Barron. La curva de μ se ajusta mejor a los valores experimentales. La tendencia de la distribución de C80 tiene curva negativa (segunda derivada), como en el caso anterior, cosa que no predice ni el modelo μ ni en de Barron.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha hecho la aplicación del método de Krigin ordinario, basado en estadística espacial, a conjuntos de medidas en diferentes salas. Esta interpolación/extrapolación ha producido un mayor número de puntos de los que recomienda la ISO 3382. Esto nos permitirá comparar con resultados simulados.

A partir del análisis y comparación con otros modelos analíticos (en este caso el modelo μ y el de Barron), hemos observado diferencias entre la distribución de valores medidos y los predichos por estos modelos en salas de tipo rectangular. Aunque el modelo μ se ajusta mejor a los valores experimentales en ambos casos, las diferencias observadas indican que existen características adicionales que afectan al diseño acústico de salas, las cuales marcan la diferencia en los supuestos de estos modelos y tienen un impacto significativo en la claridad musical de la sala.

Con este método, pensamos que es posible identificar qué factores afectan a la distribución espacial de diferentes parámetros, por lo que nuestra intención es continuar trabajando en esta línea para encontrarlos.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está financiado por fondos FEDER y el Ministerio de Ciencia e Innovación Español, dentro del proyecto BIA2008-05485.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Krige D.G., "A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand", *J. of the Chem., Metal. and Mining Soc. of South Africa*, 52 (6), pp.119-139. 1951
- [2] Matheron G., *Traite de Géostatistique Appliquée*. Éditions Technip, Paris, 1962

- [3] O. Baume, B. Gauvreau, M. Brengier, F. Junker, H. Wackernagel, and J.P. Chils, "Geostatistical modeling of sound propagation: Principles and a field application experiment". *J. Acoust. Soc. Am.*, 126 (6), pp. 2894-2904, 2009.
- [4] Barron M. "Bass sound in concert auditoria". *J. Acoust.Soc. Am.* 97(2), p.1088-1098, 1995.
- [5] Barron M, Lee L.J., "Energy relations in concert auditoriums I". *J Acoust Soc Am*, 84(2), p. 618-628, 1988.
- [6] Zamarreño T., Girón S., Galindo M., "Acoustic energy relations in Mudejar-Gothic churches". *J. Acoust.Soc. Am.* 121(1), p.234-250, 2007.
- [7] ISO 3382:1997(E), Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters. Second Edition, 1997-06-15
- [8] IEC 60268-3, Sound System Equipment –Part 3: Amplifiers – Third Edition. International Electrotechnical Commission.
- [9] IEC 60268-4, Sound System Equipment –Part 4: Microphones – Third Edition. International Electrotechnical Commission.
- [10] IEC 60268-5, Sound System Equipment –Part 5: Loudspeaker – Third Edition. International Electrotechnical Commission.
- [11] L. Morset, WinMLS 2004 user manual, Morset Sound Development, <http://www.winmls.com/>, 2004.
- [12] K. Hornik, The R statistical software. <http://cran.r-project.org>, 2011.

COMPLEMENTARY ACTIVITIES
ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS

COMPLEMENTARY ACTIVITIES

ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS

November / Noviembre 24, 2011

1.

Visit to patrimonial buildings simulated in virtual reality and auralized by Acoustics group of UPV-UVEG:

Chapel of the Holy Grail of the Metropolitan Cathedral of Valencia (14th century). *Merchants Lonja* (15th century).

Visita a edificios patrimoniales simulados en realidad virtual y auralizados por el grupo de Acústica de la UPV-UVEG: *Capilla del Santo Cáliz de la S. I. Catedral Metropolitana de Valencia* (siglo XIV). *Lonja de los Mercaderes* (siglo XV).

2.

Organ Concert in the heritage church of the Society of Jesus in Valencia. Organist Mr. Arturo Barba Sevillano

Concierto de Órgano en el edificio patrimonial de la Compañía de Jesús de Valencia. Organista D. Arturo Barba Sevillano

November / Noviembre 25, 2011

3.

Visit to the Polytechnic University of Valencia virtual reality facilities: CAVE and POWERWALL.

Visita a las instalaciones de realidad virtual de la Universitat Politècnica de València: CAVE y POWERWALL.

ORGAN RECITAL / RECITAL DE ÓRGANO

<p>MUSICAL FORMS AND COLORS IN THE EUROPEAN ORGAN FORMAS Y COLORES EN EL ÓRGANO EUROPEO</p>

Thursday, November 24, 2011, 20:00
Jueves 24 de noviembre de 2011, 20:00h

**Church of the Society of Jesus / Iglesia de la Compañía de Jesús,
VALENCIA. Monumental Organ “Cabanilles”**

- Batalla Imperial atr. J. B. Cabanilles
(1644-1712)
- Diferencias sobre la Gallarda Milanesa A. de Cabezón
(1510-1566)
- Tiento de 8º tono de tiple P. Bruna
(1611-1679)

- Preludio en re menor (*Prelude in D minor*) J. Pachelbel
(1653-1706)
- Partita sobre el coral *Sei gegrüsset, Jesu gütig* BWV 768 J. S. Bach
(1685-1750)
- Coral *Ich ruf zu Dir, Herr Jesu Christ* BWV 639 J. S. Bach
(1685-1750)

- Suite Gothique op. 25 (IV. *Toccata*) L. Boëllmann
(1862-1897)
- Andante “Choeur de Voix humaines” L. Lefébure-Wély
(1817-1870)
- Symphonie nº 5 (V. *Toccata*) Ch. M. Widor
(1844-1937)

Arturo Barba (Organ / Órgano)

ORGAN RECITAL

The concert we are going to listen to echoes the international focus of the **Seminar ISVA-Valencia-2011**, taking us across three of the main European organ music schools from the point of departure of Valencia and Spanish music.

The recital begins with the Imperial Battle (*Batalla Imperial*) that has been for a long time attributed to Juan Bautista Cabanilles, the greatest Valencian organist of all times, whose originality and personal stamp marked the apex of **Spanish baroque music**. After listening to the powerful outer trumpets of the organ in this first composition, the Milanese Galliard (*Gallarda Milanese*) of master of variations Antonio de Cabezón will take us back to the origins of the Spanish organ music school in times of King Philip II. A *tiento partido* for the right hand from Aragonese composer Pablo Bruna puts an end to the first section of this program, exemplifying the characteristic split keyboard compositions of 17th century Spanish music. Battles, Variations and Tientos. Pieces that embody perfectly the musical forms of the Spanish Baroque and in which we can perceive clearness, immense fantasy achieved through limited means, and even a certain ingenuousness in their composition.

Next we enter the **Germanic world**, led by the free and extroverted form of a prelude, one of the works of Johann Pachelbel. It is as if we were listening to a new instrument; it has a new colour, register and character. We perceive clearly the solemnity and solidness of the great full sounds, built on broad low pitches and crowned by bright high pitches, which characterize baroque German music. Two Lutheran chorales by Johann Sebastian Bach, the pinnacle of the European Baroque, give us a glimpse at the polyphonic writing that distinguishes this exceptional composer. We can hear in both of them an intimate and subtle treatment of sound, with the long vocal phrases typical of the chorale form.

Then we close our eyes, and on opening them everything seems to have changed. Through Léon Boëllmann's famous Toccata we come into **French Romanticism**, while the church blinks rapidly between the darkness of reed sounds and the brightness and liveliness which characterize nineteenth-century virtuosity. An andante by Lefébure-Wély brings us back to calmness with a stable rhythm and an almost heavenly timbral reverie. But that is not meant to last for long. An unstoppable force, unprecedented, manifests itself in Charles-Marie Widor's work, a force which grows until achieving a final tutti that puts to test the instrument's capacities.

Was that your experience?...

A. Barba

RECITAL DE ÓRGANO

El concierto que escucharemos se hace eco de la vocación internacional de las **Jornadas ISVA-Valencia-2011** y presenta un recorrido por tres de las principales escuelas organísticas europeas tomando como punto de partida la ciudad de Valencia y la música española.

El recital se inicia con la Batalla Imperial durante años atribuida a Juan Bautista Cabanilles, el organista valenciano más grande de todos los tiempos cuya originalidad y personal impronta supuso el culmen de la **música barroca española**. Tras escuchar la fuerza de la trompetería exterior del órgano en esta primera obra, la Gallarda Milanese del maestro de la diferencia Antonio de Cabezón nos retrotraerá al origen de la escuela organística española en tiempos del monarca Felipe II. Un tiento partido de mano derecha del compositor aragonés Pablo Bruna finaliza esta primera sección del programa ejemplificando las obras de medio registro tan propias de la escritura organística española del siglo XVII. Batallas, Diferencias y Tientos; piezas que encarnan a la perfección las formas musicales del barroco español en las que podremos escuchar timbres claros, enorme fantasía con medios limitados y hasta cierta ingenuidad en la composición.

A continuación nos adentramos en el **mundo germánico** a través de una forma tan libre y extrovertida como el Preludio, en esta ocasión de la mano de Johann Pachelbel. Parece que escuchamos un nuevo instrumento; un nuevo color, registración y carácter. Se hacen patentes la seriedad y solidez de los grandes llenos sonoros contruidos sobre amplios graves y coronados por brillantes agudos que caracterizan la música alemana del periodo barroco. Dos corales luteranos de Johann Sebastian Bach, cima del barroco europeo, dejan entrever la escritura polifónica característica del excepcional compositor. En ellos escucharemos un tratamiento íntimo y sutil del sonido, con largas frases de carácter vocal propias de la forma del Coral.

Cerramos los ojos y al abrirlos todo parece haber cambiado. De la mano de la famosa Toccata de Léon Boëllmann nos asomamos al **romanticismo francés** y la Iglesia parpadea rápidamente entre la oscuridad de los sonidos de lengüeta y el brillo y agilidad propios del virtuosismo decimonónico. Un Andante de Lefébure-Wély nos devuelve la calma con un ritmo estable y una ensoñación tímbrica casi celestial. Pero por poco tiempo; una fuerza imparable inédita hasta el momento se hace presente de la mano de Charles-Marie Widor y va a más, hasta alcanzar un tutti final que pone a prueba el potencial del instrumento.

¿Lo han sentido así?...

A. Barba



Monumental organ "Cabanilles". Church of the Society of Jesus
Órgano Monumental "Cabanilles". Iglesia de la Compañía de Jesús
VALENCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



BIA2008-05485



Ingenieria para el Control del Ruido



Brüel & Kjær



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

EDITORIAL