

EVALUACIÓN PARAMÉTRICA Y SENSORIAL EN LA ENSEÑANZA DE ACÚSTICA DE SALAS

PACS: 43.55.Gx

Basturk, Seckin^{1,2}; Perea Pérez, Francisca^{1,2}; Álvarez-Morales, L.²; Zamarreño, T.²

¹Soundimensions, SC. Calle Páez de Rivera, nº 6- 1ºD. 41012 Sevilla, España.

E-Mail: basturk@soundimensions.eu; fpereaperez@soundimensions.eu

²Universidad de Sevilla, Dpto. Física Aplicada II, ETS Arquitectura, IUACC

Avda. Reina Mercedes 2, 41012 Sevilla, España. Tel.: + 34 954556612. Fax: +34 954557892.

E-Mail: calvarez6@us.es, teofilo@us.es

ABSTRACT

This paper presents an initial version of an interactive tool which is intended to be used in room acoustics education. The interactive tool enables a virtual workspace in which users can apply different acoustic conditioning solutions to a room and obtain both, its parametric evaluation in terms of the most significant acoustic parameters, and its sensory (visual and auditory) evaluation through virtual reality immersion. Parameters and auralizations associated to each conditioning solution can be obtained from the measured and/or simulated impulse responses.

RESUMEN

En este trabajo se presenta una versión inicial de una herramienta interactiva que se pretende utilizar en la enseñanza de Acústica de Salas. Con esta herramienta, el usuario puede aplicar diferentes posibilidades de acondicionamiento de una sala y obtener su evaluación paramétrica en términos de los parámetros acústicos más significativos, y su evaluación sensorial (visual y acústica), en la que el alumno tiene la posibilidad de inmersión en un espacio de realidad virtual. Tanto los parámetros como las auralizaciones asociados a cada solución de acondicionamiento podrán obtenerse a partir de las respuestas al impulso medidas y/o simuladas.

INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente los sistemas de enseñanza de acústica de salas se han basado exclusivamente en parámetros e indicadores numéricos obtenidos a partir del comportamiento acústico de la sala objeto de estudio, caracterizado por la respuesta al impulso (RI). Es posible correlacionar estos parámetros físicos con diversos atributos de percepción sonora como son el nivel sonoro subjetivo, la reverberación percibida, claridad, etc., tal y como se recoge en la norma UNE-EN-ISO [1].

Sin embargo, cuando se trata de magnitudes físicas como el sonido, entran en juego otros parámetros sensoriales (visuales, de confort...) que influyen de forma directa en la percepción del mismo, por ello resulta especialmente importante experimentar "in situ" dichos fenómenos ya que permite, concretamente en el ámbito de la enseñanza, que la comunidad estudiantil pueda asimilar y adquirir estos conocimientos.

Precisamente, la experimentación como técnica pedagógica posibilita establecer una relación reflexionada entre los parámetros numéricos y la percepción psicológica real del fenómeno físico. Asimismo la experimentación facilita la reconceptualización y permite insertarse en el proceso de producción de conocimientos y de investigación [2]. En las últimas décadas la tecnología ha permitido realizar grandes avances en las técnicas pedagógicas de experimentación y su aplicación en la enseñanza científica ha supuesto una mejora reconocida por numerosos estudios [3]. Concretamente en la actualidad están siendo empleadas las técnicas de realidad virtual como instrumentos pedagógicos capaces de transmitir conocimientos a través de la experimentación en campos como la ingeniería mecánica, la construcción, la arquitectura y la física entre otros [4-6].

Por ello, en el presente artículo se expone cómo aplicando las técnicas de realidad virtual en la enseñanza y el aprendizaje de Acústica de Salas, se puede obtener una herramienta interactiva que facilite al alumno una experiencia de inmersión en el ambiente objeto de estudio y le permita evaluar de forma sensorial y paramétrica los fenómenos físicos objetos de estudio.

METODOLOGÍA

Existen tres aspectos fundamentales que han motivado e intervenido en el proceso de desarrollo de la herramienta interactiva que aquí se presenta. El primero de ellos, ha sido procurar una integración entre los conceptos acústicos que se pretenden exponer, los aspectos arquitectónicos y la influencia ineludible de la percepción humana, todo ello en el contexto de la enseñanza de Acústica de Salas para alumnos de Arquitectura. El segundo aspecto, al que ya se ha hecho mención, es el uso de la experiencia como método clave para facilitar el proceso de aprendizaje de forma intuitiva y con una presentación atractiva. Por último, la accesibilidad ha sido considerada como un aspecto decisivo para el diseño de una herramienta que debe ser fácilmente distribuible.

Considerando estos aspectos, se ha optado por el uso de la tecnología de realidad virtual (VR) por la capacidad que ofrece de crear sofisticados entornos interactivos diseñados para el usuario final y recrear ambientes con alto grado de realismo. Esta tecnología se está posicionando actualmente en el campo de la acústica gracias a los avances conseguidos en los métodos de auralización empleados en estudios de acústica de salas [7, 8]. Incluso resulta destacable su empleo en numerosos estudios de percepción del ruido desarrollados en las últimas décadas [9, 10].

Por otra parte, cabe indicar que la herramienta desarrollada posee la capacidad de ser aplicada a cualquier entorno, bien se trate de un espacio real o imaginario. Sin embargo, el diseño por el que se ha optado, en esta primera aplicación, responde a la posibilidad de accesibilidad de los alumnos al recinto en cuestión para ofrecer asimismo cierto grado de realismo. Por ello, se ha escogido una sala real, el auditorio de la E.T.S. de Arquitectura de la Universidad de Sevilla, que ha sido reproducida con suficiente exactitud para conseguir una recreación realista del entorno que permita al alumno, si cabe, la posibilidad de comparar la experiencia simulada con experimentos reales que pudieran llevarse a cabo.

En la Figura 1 se muestra un esquema-resumen de las fases de desarrollo de la herramienta y la descripción de cada una de ellas.

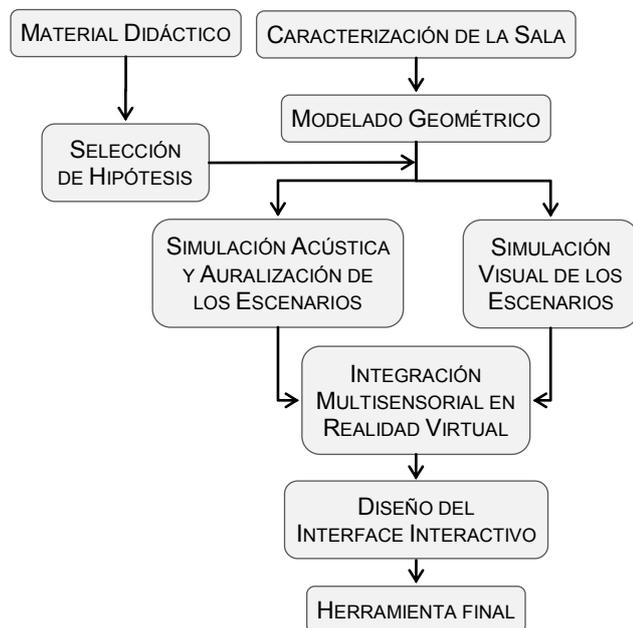


Figura 1. Esquema de la metodología empleada en el desarrollo de la herramienta.

Elaboración de las Hipótesis para el Material Didáctico

Uno de los principales puntos de partida para el diseño de la herramienta es definir qué conceptos o fenómenos físicos de la acústica de recintos se pretenden mostrar en la sala seleccionada. Atendiendo a los contenidos a impartir en la asignatura de “Acústica Aplicada a la Arquitectura y el Urbanismo” del nuevo plan de estudios de la E.T.S. de Arquitectura, se han seleccionado principalmente los conceptos de reverberación, absorción sonora, acondicionamiento acústico de salas y materiales, software de simulación acústica, auralización y audición binaural. Para explicar estos conceptos se han planteado una serie de hipótesis que, modificando las características actuales de la sala, ofrecerán al alumno la posibilidad de experimentar los distintos conceptos mencionados desde el punto de vista sensorial y paramétrico.

Se parte, por tanto, del modelo actual de la sala (Inicial), a partir del cual se valora la presencia de la audiencia, considerando una ocupación del 100% de las butacas (Ocupado). A continuación se ha eliminado en el modelo el revestimiento actual de las paredes ofreciendo la posibilidad de evaluar la sala sin ningún tipo de tratamiento (Hip.1). Asimismo, con la idea de poder valorar otras intervenciones, se considera la posibilidad de colocar un techo acústico (Hip. 2) e incluir además material absorbente en los paramentos laterales (Hip.3 y 4). En la Tabla 1 se resumen las diferentes hipótesis consideradas y su correspondencia con los conceptos que se pretenden evidenciar.

Tabla 1. Hipótesis contempladas actualmente en el sistema de evaluación paramétrico-sensorial.

	Descripción	Conceptos acústicos	Tratamiento
Inicial	Estado actual	Simulación acústica, auralización	(*)
Ocupado	Estado actual ocupado al 100%	Absorción sonora de la audiencia	(*)
Hip. 1	Eliminación tratamiento acústico actual	Sala viva (poco absorbente), materiales reflectantes	Enlucido mortero en paramentos laterales
Hip. 2	Incorporación techo acústico	Sala intermedia, materiales absorbentes	Enlucido mortero en paramentos laterales, techo acústico KNAUF CLEANEO
Hip. 3	Incorporación material absorbente paramentos laterales	Sala absorbente, eco flotante, materiales absorbentes	Panel perforado TOPAKUSTIC (parte superior), techo acústico KNAUF CLEANEO
Hip. 4	Incorporación material absorbente paramentos laterales	Sala muy absorbente, materiales absorbentes, audición binaural	Panel perforado TOPAKUSTIC (parte inferior), techo acústico KNAUF CLEANEO

* No está sujeta a modificaciones

Descripción y Caracterización Acústica del Recinto

Tal y como se ha comentado anteriormente, el recinto seleccionado para la primera implementación de la herramienta ha sido el salón de actos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla (Figura 2), atendiendo a su accesibilidad para realizar ensayos acústicos in situ y por su geometría que facilita la representación de los modelos.

Se trata esencialmente de una sala prismática cuyas dimensiones aproximadas son 18x24x8m, posee un estrado sobre elevado de 57 cm. La zona de audiencia está ligeramente inclinada y alberga 364 butacas, medianamente tapizadas. Las paredes laterales y del fondo están terminadas con paneles de corcho oscuro de aproximadamente 3 cm de espesor y la pared anterior está cubierta por un pantalla de proyección microperforada y una cortina gruesa de terciopelo. El techo, tras la estructura ligera metálica que se observa en la Figura 2, está enlucido.



Figura 2. Vista interior del salón de actos de la ETS de Arquitectura de Sevilla. A la derecha se observan las marcas de los puntos de ubicación de los receptores.

En estudios anteriores, se realizaron diversas mediciones con el fin de obtener los parámetros acústicos que caracterizan al recinto seleccionado [11]. Cabe destacar que las medidas se llevaron a cabo siguiendo el procedimiento normalizado de la norma UNE-EN-ISO 3382-1 [1]. El recinto estaba desocupado. La fuente sonora (F en la Figura 3) se situó en una única posición, sobre el estrado, en el plano de simetría vertical longitudinal de la sala, a 1,5 m sobre el nivel del suelo. Se seleccionaron 6 puntos de recepción, ubicados en la zona de audiencia (ver Figuras 2 y 3), a 1,2 m sobre el nivel del suelo. Se monitorizaron las condiciones ambientales durante el periodo de medida. La temperatura se mantuvo entre 26,8 y 27,5 °C, y la humedad relativa varió entre 46 y 47 %. El nivel del ruido de fondo no se registró, pero las condiciones no variaron en todo el proceso de medida. Además, la disposición del recinto dentro de la escuela, hace que la sala presente bajos niveles de ruido de fondo.

Como señales de excitación se utilizaron señales sinusoidales de barrido exponencial en frecuencia. El rango de barrido se ajustó para cubrir las bandas de octava comprendidas entre 63 y 8000 Hz. Se consiguieron relaciones señal-ruido impulsiva (INR) superiores a 45 dB para todas las bandas de octava de interés. Los valores del índice STI medido se ha obtenido a partir de las respuestas al impulso sin contabilizar el efecto del ruido de fondo ya que éste era despreciable como ya se ha citado.

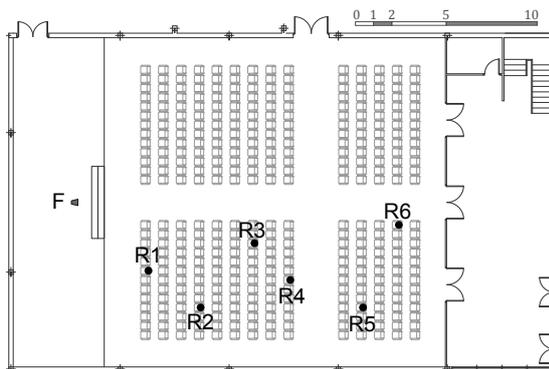


Figura 3. Planta del recinto, en la que se muestran las posiciones de la fuente (F) y de los receptores (R1 a R6).

Diseño de la Herramienta

Simulación acústica y auralización de las hipótesis

Se ha creado un modelo geométrico simplificado del salón (Figura 4), empleando un programa informático de modelado 3D. Dicho modelo está compuesto por 48 planos y tiene un volumen aproximado de 3127 m³. Posteriormente, se efectuó la exportación del modelo al programa de simulación acústico CATT-Acoustic [12] para simular su comportamiento acústico. Para ello, es necesario incorporar al modelo los coeficientes de absorción de los materiales existentes y ajustar, a través de un proceso iterativo, los coeficientes de absorción de aquellos materiales menos conocidos hasta conseguir “afinar” el modelo. El objetivo de este proceso es que el tiempo de reverberación simulado promediado espacialmente no difiera en más de 1 JND (just noticeable difference), 5% para T [1], del correspondiente valor experimental.

Una vez conseguido el modelo “afinado”, se simulan cada una de las hipótesis planteadas para obtener los parámetros acústicos que caracterizan la sala (ver Tabla 3) y las auralizaciones asociadas a cada una de ellas.

Tabla 2. Coeficientes de absorción acústica asociados a los materiales utilizados en la simulación.

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Linoleum	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
Hormigón	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05
Corcho	0.05	0.10	0.20	0.55	0.60	0.55
Panel perforado TOPAKUSTIC	0.38	0.86	0.98	0.95	0.73	0.54
Cortina gruesa de terciopelo	0.30	0.45	0.65	0.56	0.59	0.71
Techo acústico Knauf Cleaneo	0.55	0.65	0.60	0.65	0.60	0.65
Butacas medianamente tapizadas vacías	0.36	0.47	0.57	0.62	0.62	0.60
Butacas medianamente tapizadas ocupadas	0.51	0.64	0.75	0.80	0.82	0.83
Puertas de madera tapizadas de espuma*	0.10	0.14	0.20	0.30	0.40	0.50
Pantalla de proyección microperforada*	0.64	0.56	0.41	0.28	0.13	0.06
Vidrio	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04

* Coeficientes de absorción estimados mediante el proceso iterativo de calibración del modelo.

Tabla 3. Valores promedio espectral obtenidos para los puntos receptores R2 y R6.

	Inicial		Ocupado		Hip.1		Hip.2		Hip.3		Hip.4	
	R2	R6	R2	R6	R2	R6	R2	R6	R2	R6	R2	R6
T30m [s]	1,13	1,09	1,00	0,97	2,30	2,17	2,06	1,80	1,93	1,29	0,56	0,61
C80m [s]	3,35	4,03	4,41	5,38	-0,6	0,45	5,84	5,33	9,38	7,13	10,0	10,7
STI	0,60	0,62	0,62	0,65	0,50	0,52	0,70	0,71	0,76	0,78	0,77	0,79

En lo que concierne a las auralizaciones, cabe destacar que se han tomado como referencia los puntos receptores R2 y R6 por la posición que presentan respecto al escenario donde se sitúa la fuente emisora. Los sonidos anecoicos utilizados corresponden a una voz humana femenina y una pieza musical interpretada por un chelo.

Las auralizaciones han sido obtenidas considerando que la audiencia se encuentra de frente observando la fuente. No obstante, con el fin de introducir los conceptos de audición binaural y HRTF en la herramienta educativa, se han incluido en la hipótesis 4, a modo de ejemplo, dos auralizaciones más para cada sonido anecoico. Ello permitirá al usuario virtual poder percibir el efecto de la orientación de la cabeza con respecto a la fuente: se han implementado giros de 45 y 90 grados.

Simulación visual e integración multisensorial

Al igual que en el paso anterior, es necesario partir del modelo geométrico simplificado para crear un modelo visual de la sala mediante el uso del software Sketchup 3D [14]. Sin embargo, en este caso se ha de conseguir el grado de realismo deseado y para ello se deben añadir detalles visualmente significativos del recinto. Se incluyen, por tanto, los elementos del techo, las puertas, ventanas, los dispositivos electroacústicos y los lumínicos, de manera que el modelo de la sala se mejore adquiriendo profundidad visual y ajustándose, en la medida de lo posible, a la realidad. A continuación se introducen en el modelo las texturas con el fin de obtener el resultado visual definitivo. Para ello es necesario realizar un post-procesado de las fotografías tomadas in situ en el recinto. En este punto ya es posible adquirir detalles tan ínfimos que no podrían ser modelados geoméricamente. Finalmente se simula la iluminación del recinto, tomando como referencia las lámparas existentes en el mismo.

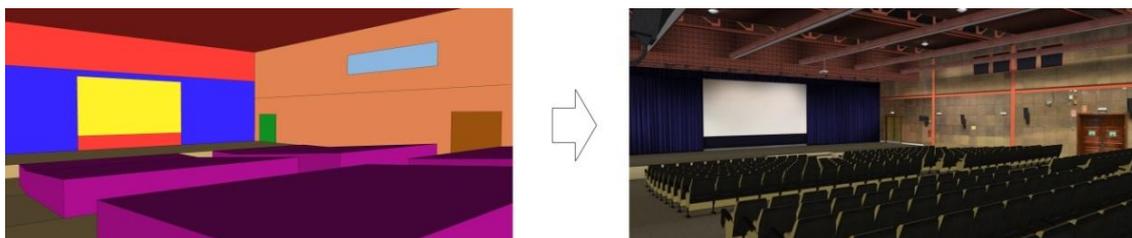


Figura 4. Modelo geométrico simplificado (izquierda) y modelo visual detallado (derecha).

Una vez obtenido el modelo visual de la situación actual, se modificará para crear otros modelos que representen los escenarios de cada una de las hipótesis consideradas (Figura 5). Para cada escenario se deben preparar las imágenes e incluir las texturas de los materiales incluidos en cada hipótesis.

Posteriormente, los modelos visuales y las auralizaciones obtenidas del modelo acústico, se importan en el software de realidad virtual Worldviz Vizard [15] a fin de poder crear la aplicación virtual. En este proceso de diseño, es necesario definir cómo integrar adecuadamente los elementos importados, enlazando en el entorno virtual cada escenario visual con sus correspondientes condiciones acústicas y con las posiciones de audio auralizadas.

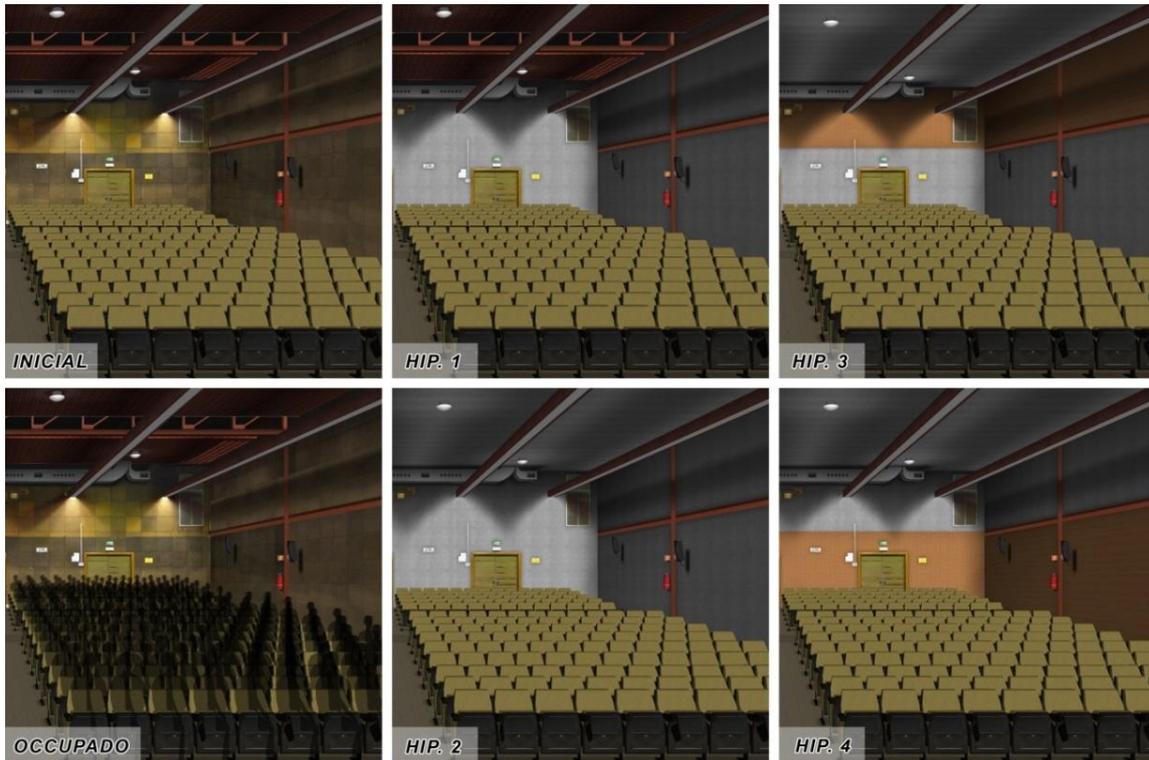


Figura 5. Escenarios visuales correspondientes a las hipótesis definidas.

Interfaz de la herramienta e interactividad del usuario

Dado que se trata de una herramienta diseñada para que pueda ser fácilmente distribuible y accesible a los alumnos, la aplicación virtual puede trabajar en modo no inmersivo, simplemente con el uso de un ordenador con elementos básicos de entrada y salida, como son la pantalla, los altavoces, el teclado y el ratón.

La herramienta se visualiza a pantalla completa y dispone de un interfaz que incluye 4 elementos gráficos accesibles al usuario (Figura 6):

1. El campo de visión del usuario virtual situado en el interior de la sala.
2. Un menú desplegable ubicado en la parte superior de la pantalla que permitirá al usuario escoger los escenarios y las condiciones acústicas auralizadas.
3. Un botón de información localizado en la parte superior derecha de la pantalla. Al presionarlo, se accede a una ventana adicional en la que se ofrece información acerca de los aspectos acústicos y materiales empleados en el escenario activo.
4. Una pequeña ventana de información situada en la parte inferior del botón de información que aparecerá cuando el usuario escuche las auralizaciones. En ella se mostrará el valor del tiempo de reverberación promediado espectralmente.

El desplazamiento del usuario en el entorno virtual es uno de los principales aspectos del diseño interactivo. En este caso, el usuario tiene la capacidad de navegar libremente por el entorno virtual mediante el uso de los botones del teclado habilitados para ello. Igualmente es posible rotar la vista con el ratón (6 degrees of freedom). Además, se ofrece la posibilidad al usuario de situarse directamente en las posiciones predefinidas de escucha (R2 y R6) eligiendo esta opción en el menú desplegable.

Por último, y para dar cumplimiento al último requisito establecido en el diseño de la herramienta, ésta debe ser fácilmente distribuible y accesible a los alumnos.

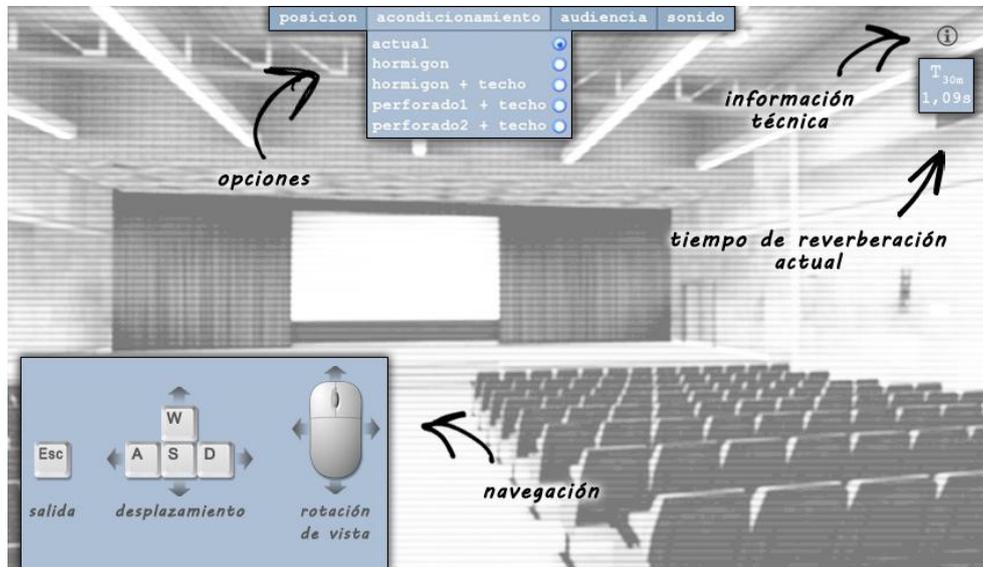


Figura 6. Captura de pantalla de la herramienta en la que se señalan los elementos de interacción.

El software de realidad virtual Worldvizard permite exportar la herramienta desarrollada como un archivo ejecutable (.EXE package). En él se incluyen todos los scripts y archivos pertenecientes a las auralizaciones y al modelo visual, de modo que la herramienta puede ejecutarse en cualquier ordenador sin necesidad de disponer de ningún software específico para ello. Así pues, la herramienta diseñada puede publicarse en la página web de la asignatura a la que tengan acceso los alumnos. Asimismo, se pondrá a disposición pública una versión limitada de la herramienta en internet¹.

RESULTADOS

La herramienta interactiva obtenida ha sido diseñada para facilitar el aprendizaje de la acústica de salas. Su elaboración ha sido posible gracias al empleo de técnicas de realidad virtual que permiten reproducir entornos de forma realista. En consecuencia, la aplicación permite experimentar diferentes soluciones de acondicionamiento acústico y evaluarlas desde el punto de vista sensorial (visual y auditivo) y paramétrico. La herramienta se empleará durante el curso académico 2013/2014 en las asignaturas de acústica de la ETS de Arquitectura de la Universidad de Sevilla y estará disponible online para que los alumnos puedan practicar con ella desde su propio ordenador.

DISCUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

Puesto que la herramienta interactiva será accesible a los alumnos durante el curso académico 2013/2014, los estudios futuros irán destinados a analizar el posible impacto que supondrá en el aprendizaje de la materia y la opinión que ésta merece a los alumnos. Igualmente, atendiendo a los resultados obtenidos durante su aplicación, será posible una mejora de la misma, incluyendo nuevos materiales y mayor información. Por último, se planteará su uso empleando la estación de realidad virtual inmersiva del Dpto. Física Aplicada II de Universidad de Sevilla, lo que permitirá futuras investigaciones sobre la percepción auditiva.

¹ <http://sounddimensions.eu/virtualesalon>

REFERENCIAS

- [1] Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, “UNE-EN-ISO 3382-1: Acústica, Medición de parámetros acústicos en recintos, parte 1: salas de espectáculos,” 2010.
- [2] Raúl Ancízar Munévar Molina and Josefina Quintero Corzo, “Investigación pedagógica y formación del profesorado,” *OEI-Revista Iberoamericana de Educación*, 2000. [Online]. Disponible: <http://www.rioei.org/deloslectores/054Ancizar.PDF>. [Visitada: 29-Aug-2013].
- [3] C. Dede, “Planning for neomillennial learning styles,” *Educause Quarterly*, vol. 28, no. 1, pp. 7–12, 2005.
- [4] A. G. Abulrub, A. N. Attridge, and M. A. Williams, “Virtual reality in engineering education: The future of creative learning,” *Global Engineering Education Conference (EDUCON), 2011 IEEE*, 2011, pp. 751–757.
- [5] A. Z. Sampaio, P. G. Henriques, and O. P. Martins, “Virtual Reality Technology Used in Civil Engineering Education,” *Open Virtual Reality Journal*, vol. 2, pp. 18–25, 2010.
- [6] C. J. Chen, “The design, development and evaluation of a virtual reality based learning environment,” *Australasian Journal of Educational Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 39–63, 2006.
- [7] D. Schröder, F. Wefers, S. Pelzer, D. Rausch, M. Vorländer, and T. Kuhlen, “Virtual Reality System at RWTH Aachen University,” *International Symposium on Room Acoustics, ISRA 2010*, Melbourne, Australia, 2010.
- [8] R. Montell, J. Segura, A. Planells, A. Barba, S. Cerdá, R. Cibrián, R. Lacatis, and A. Giménez, “Simulación Acústica de Auditorios y Edificios Patrimoniales. Integración con Entornos de Realidad Virtual,” *International Seminar on Virtual Acoustics – ISVA 2011*, Valencia, Spain, 2011, pp. 185–193.
- [9] L. Maffei, M. Masullo, and S. Basturk, “Potentialities of the Immersive Virtual Reality in Environmental Noise Annoyance Studies,” *42nd Spanish National Congress on Acoustics - TecniAcústica 2011*, Cáceres, Spain, 2011.
- [10] S. Basturk, R. Carafa, and L. Maffei, “The Validation of Architectural and Acoustic Projects to Transform Ecclesiastical Architecture in Auditoria for Concert Music,” *1st European Congress on Sound and Vibration - EAA EuroRegio 2010*, Ljubljana, Slovenia, 2010.
- [11] L. Álvarez, M. Galindo, T. Zamarreño, and S. Girón, “Análisis comparativo de tres sistemas para la medida de respuestas impulsivas,” *Acústica 2012*, Évora, Portugal, 2012.
- [12] B.-I. Dalenbäck, *CATT-Acoustic v9.0 User's Manual*. Gothenburg, Sweden, 2011.
- [13] M. Vorländer, *Auralization: fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality*. Springer, 2008.
- [14] Trimble, “SketchUp User's Guide.” [Online]. Disponible: <http://help.sketchup.com/en/article/116174>. [Visitada: 23-Aug-2013].
- [15] Worldviz LLC, “Vizard 4.0 User's Manual.” [Online]. Disponible: <http://docs.worldviz.com/vizard/>. [Visitada: 23-Aug-2013].