

Aplicación de técnicas virtuales al patrimonio arquitectónico teatral: reconstrucción y estudio de arquitecturas inexistentes

Arturo Barba, Alicia Giménez, Rosa Cibrián,
Salvador Cerdá, Radha Montell y Jaume Segura
Universitat Politècnica de València, Universitat de València

arturo@arturobarba.com

agimenez@fis.upv.es

radmonse@upvnet.upv.es

rosa.m.cibrian@uv.es

salcerjo@mat.upv.es

jsegura@uv.es

1. Introducción

El presente artículo propone una ‘nueva estrategia de conocimiento en humanidades’ como el propio subtítulo del Congreso ArteLope sugiere. Los firmantes somos los miembros del Grupo de Investigación en Acústica Virtual UPV-UVEG, equipo humano de formación multidisciplinar (Ingenieros, Arquitectos, Físicos, Músicos y Matemáticos) dedicados desde hace años a investigaciones acústicas bajo el auspicio de proyectos ministeriales I+D+i.¹

En este trabajo pretendemos dar a conocer en el entorno de las humanidades una nueva e innovadora herramienta científica de conocimiento de enorme actualidad, potencia y proyección internacional: la Acústica Virtual y en particular su uso para el conocimiento objetivo y para la recreación subjetiva de espacios teatrales desaparecidos.²

Las representaciones escénicas a lo largo de la historia siempre han estado asociadas a entornos arquitectónicos determinados. Basta pensar en los teatros clásicos de la antigüedad greco-romana, en los corrales y casas de comedias españoles del siglo XVII, en los teatros

¹ Proyectos cuyas referencias son: BIA2003-09306-C04-01, BIA2008-05485 y BIA2012-36896.

² En concreto este artículo propone una sistematización de un procedimiento de estudio acústico teatral que hemos publicado recientemente de modo parcial (Barba y Giménez, 2011a).

renacentistas italianos o en la configuración de planta curva denominada teatro a la italiana que surge en paralelo al nacimiento de la ópera.

Las características de cada uno de estos recintos no surgen de forma casual, sino que dependen directamente de los usos y necesidades que el diseño de cada edificio debía resolver. En cualquier caso, a grandes rasgos podemos decir que las representaciones escénicas requieren tres características principales a los edificios que las albergan: **CAPACIDAD** para el aforo, **VISIÓN** del escenario y **ACÚSTICA** adecuada para la comprensión del mensaje oral y/o musical.

Esta última característica de los recintos escénicos constituye nuestro objeto de estudio: la acústica teatral en general y la acústica de recintos teatrales inexistentes en particular, a la que podemos acercarnos mediante las nuevas técnicas virtuales desarrolladas.

2. Protocolo de Investigación Acústica Virtual

El protocolo de investigación para el conocimiento acústico de entornos escénicos desaparecidos que proponemos en este artículo consta de las siguientes fases:

- 1.- Descripción del edificio objeto de estudio
- 2.- Análisis acústico actual (caso de existir restos del recinto, o el propio recinto objeto de estudio con adiciones posteriores)
- 3.- Estudio histórico y documental del edificio
- 4.- Simulación acústica actual: creación y ajuste de un modelo geométrico del edificio con el estado que muestra hoy día
- 5.- Creación de modelos geométricos pasados del edificio (inexistentes). Simulación acústica y auralización, proceso que permite, haciendo uso de potentes medios tecnológicos de realidad virtual visual y sonora, percibir y experimentar la respuesta sonora de un espacio inexistente que hemos recreado fielmente con medios informáticos.
- 6.- Estudio comparativo y percepción de las variaciones acústicas en el recinto teatral a lo largo de la historia: parámetros acústicos, simulaciones, auralizaciones

Para explicar las fases del protocolo propuesto y mostrar sus potencialidades, recurriremos a un caso práctico que hemos llevado a cabo recientemente: el estudio de la evolución acústica histórica del Teatro Principal de Valencia. Desde nuestra profunda convicción de que la acústica es ciencia pero también es patrimonio (Zamarreño, 2011), haremos una exposición llana, evitando en lo posible el exceso de terminología técnica alejada del mundo de las humanidades

en el que se enmarca este artículo. Buscamos con ello la máxima divulgación y comprensión de la herramienta que presentamos para tender puentes entre disciplinas a priori alejadas entre sí y para potenciar cuantas iniciativas interdisciplinares de investigación acústica teatral puedan surgir en el futuro con estas nuevas perspectivas.

3. Un caso práctico: el Teatro Principal de Valencia. Estudio acústico de morfologías anteriores

3.1.1. Descripción del edificio objeto de estudio

Declarado Monumento Histórico-Artístico Nacional en el año 1983, el Teatro Principal de Valencia es un edificio exento situado en pleno centro de la ciudad de Valencia destinado a todo tipo de representaciones escénicas y musicales (ópera, teatro, danza, conciertos, festivales, etc.) incluyendo producciones propias.³ Fue proyectado por el arquitecto italiano Felipe Fontana en el año 1774. Su diseño inicial sufrió numerosas modificaciones por razones presupuestarias y tras sucesivas interrupciones de las obras el teatro se inauguró en 1832, lo cual lo convierte en uno de los edificios teatrales en activo más antiguos de España. El Teatro Principal asume los postulados formales del teatro a la italiana. Presenta planta en herradura⁴ y actualmente alberga un aforo variable con un máximo de 1226 butacas distribuidas en platea (patio y palcos laterales) y cuatro niveles en altura, de los cuales los dos últimos disponen de una galería posterior (460 + 226 + 156 + 232 + 152).

Los datos geométricos del teatro se muestran en la Tabla 1. Los actuales materiales de acabado de la sala teatral son similares a los que tuvo en el siglo XIX, con elevada presencia de tapizados y otros elementos absorbentes en las butacas del patio, elementos divisorios y cortinajes gruesos en los palcos, telón fijo textil para ocultar el telón cortafuegos, etc. El suelo del patio está formado por tarima flotante sobre cámara de aire, con acabado exterior de tablero de madera. Los frentes de los palcos, arco de proscenio y el techo de la sala presentan un acabado

³ Tres son las publicaciones existentes hasta la fecha sobre el Teatro Principal valenciano: (Lamarca, 1840; Sirera, 1986; Barba y Giménez, 2011a).

⁴ La forma en herradura fue la más extendida en los diseños teatrales decimonónicos. Sin embargo, en el caso del teatro valenciano resulta curiosa su presencia, dado que el arquitecto que lo proyectó, F. Fontana, era discípulo del arquitecto italiano A. Galli-Bibiena, partidario acérrimo de la forma acampanada. A ello hay que añadir que los diseños teatrales de los arquitectos valencianos de su época se decantaban mayoritariamente hacia la forma elíptica, como podemos deducir a la vista de los planos teatrales decimonónicos conservados en la Real Academia de Bellas Artes de San Carlos de Valencia (Bérchez y Corell, 1981).

tipo enlucido con amplia decoración a base de relieves de escayola de inspiración naturalista y geométrica (Figuras 1 y 2).

Tabla 1. Datos Geométricos del Teatro Principal de Valencia

ZONA DEL TEATRO	DATOS GEOMÉTRICOS	
Escenario	<i>Anchura libre máxima</i>	24.65 m
	<i>Profundidad</i>	17.55 m
	<i>Ancho de boca escénica (embocadura)</i>	12.23 m
	<i>Altura libre</i>	19.00 m
	<i>Volumen</i>	7350 m ³
	<i>Pendiente</i>	3.3 %
Zona de público	<i>Longitud (fondo desde boca)</i>	21.80 m
	<i>Anchura máxima</i>	20.12 m
	<i>Altura máxima</i>	16.00 m
	<i>Volumen</i>	6450 m ³
	<i>Altura Piso 1*</i>	3.72 m
	<i>Altura Piso 2*</i>	6.60 m
	<i>Altura Piso 3*</i>	9.60 m
Foso orquestal	<i>Superficie (variable)</i>	de 70 m ² a 100 m ²
	<i>Profundidad respecto a la platea</i>	1.70 m
Aforo	1226 espectadores (460 + 226 + 156 + 232 + 152)	
* de cota inferior de la platea, a cara superior del forjado		



Figura 1. Teatro Principal de Valencia: sala completa vista desde el palco de autoridades (Fotografía Vicente A. Jiménez)



Figura 2. Teatro Principal de Valencia: sala completa vista desde el escenario (Fotografía Vicente A. Jiménez)

Bajo el foso orquestal y probablemente con objeto de reforzar el sonido de la orquesta, se realizó en el siglo XIX una cámara de aire en la cual se ubicaron en torno a un centenar de vasijas

cerámicas invertidas perforadas en su base de aproximadamente 40 centímetros de altura que fueron colocadas para ejercer una función no determinada con exactitud. Hemos difundido investigaciones realizadas a este respecto en publicaciones anteriores (Barba *et al.*, 2008a; Barba *et al.*, 2008b; Barba y Giménez, 2011b) y próximamente abordaremos su estudio en profundidad.

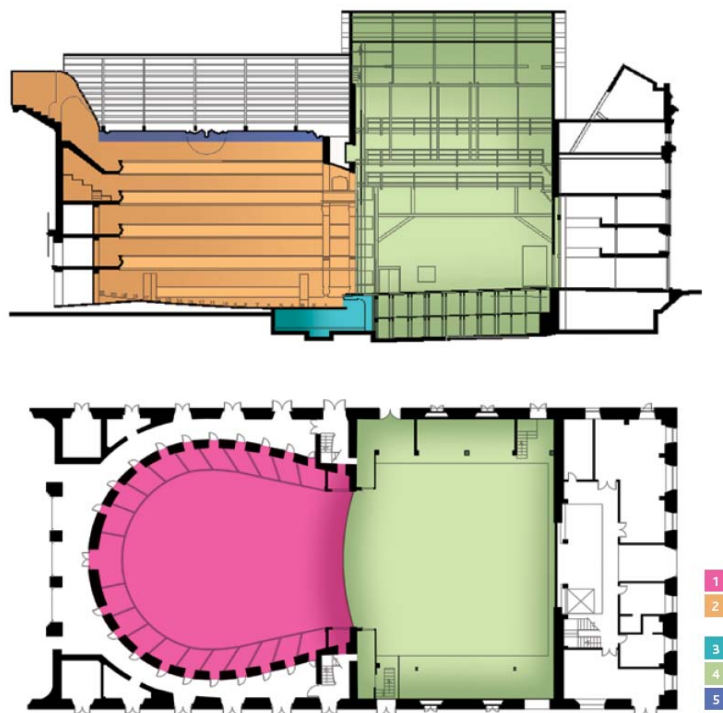
3.1.2. Conocimiento de la tipología teatral a la Italiana

El Teatro Principal de Valencia es un ejemplo paradigmático de la llamada tipología teatral a la Italiana, ya que reúne todas y cada una de las características formales que la definen (Barba y Giménez, 2011a).⁵ Dichas características son las siguientes (Figuras 3 y 4):

- **FORMA CURVA EN PLANTA.** Los diseños geométricos más empleados fueron la herradura, las formas circulares o semicirculares, la forma en “U”, la elipse truncada, la forma de campana y el diseño oval.
- **EXISTENCIA DE VARIOS PISOS CON PALCOS.** La superposición de palcos en altura permitió grandes aforos en los teatros de la época. Los grandes coliseos operísticos llegaron a alcanzar hasta seis niveles superpuestos verticalmente.
- **PRESENCIA DE FOSO ORQUESTAL.** La orquesta se ubica en una posición más baja que el escenario ocupando una situación intermedia entre el público y la escena. A la vista de todos queda el director, que coordina el conjunto sonoro poniendo en contacto a cantantes y orquesta.
- **CAJA ESCÉNICA ITALIANA.** Presencia de un escenario de mucha mayor altura, anchura (hombros) y profundidad que el de las anteriores tipologías teatrales renacentistas. Esta caja escénica permitió incrementar la flexibilidad escenográfica de las representaciones teatrales y operísticas, adaptándose a las cada vez más complejas demandas escénicas. Al mismo tiempo, la rotundidad volumétrica de este escenario y el uso de la ventana de proscenio como único nexo de unión entre caja escénica y sala teatral permitieron llevar al extremo la estructura formal bipartita heredada de los modelos grecorromanos.
- **TECHO PLANO.** Como ya apuntó el tratadista inglés George Saunders en su tratado del año 1790, los teatros de ópera deben presentar el techo de la zona de audiencia plano o con una curvatura muy ligera para evitar focalizaciones de sonido no deseadas. A pesar de

⁵ Debemos citar como bibliografía imprescindible de referencia para profundizar en el conocimiento de esta tipología arquitectónica las publicaciones: Forsyth, 1985; Izenour, 1996; Hidaka y Beranek, 2000.

esto, en el desarrollo de la arquitectura teatral no han faltado coliseos con techos provistos de pronunciadas curvaturas, ni defensores teóricos de las cualidades acústicas de las cúpulas.⁶



Figuras 3 y 4 - Rasgos morfológicos de la tipología teatral a la italiana señalados en la planimetría del Teatro Principal de Valencia (Barba y Giménez, 2011a, pp. 36-37)

3.2. Análisis acústico actual

En este caso, el edificio teatral objeto de estudio histórico-acústico existe en la actualidad. Por ello, nuestro primer paso será realizar un estudio acústico en profundidad para obtener todo

6 El arquitecto francés decimonónico E. L. Boullée adoptó las geometrías circulares y las formas esféricas como leitmotiv de su arquitectura y las defendió enérgicamente por su “indiscutible” perfección. Escribe Boullée sobre la cúpula de su diseño ideal de teatro de ópera: “la forma semicircular” (...) “me ofrecía el medio de coronar mi sala con una bóveda esférica” (...) “que además tiene la ventaja de ser la más favorable en cuanto a la repercusión de los sonidos.” (Boullée, 1985, pp. 86-96).

tipo de información sobre su funcionamiento sonoro.⁷ Dicho estudio se ha hecho a su vez en varias fases:

3.2.1. Acústica geométrica

Expondremos en primer lugar una aproximación analítica a la respuesta acústica del teatro empleando la llamada acústica geométrica, herramienta gráfica basada en la observación del comportamiento de las reflexiones sonoras en los paramentos interiores de una sala, admitiendo la simplificación que supone considerar que el sonido, al encontrarse con un obstáculo, experimenta una reflexión de acuerdo a las leyes geométricas de la óptica especular y una pérdida de energía variable en función del material del obstáculo en el que ha incidido.⁸ La acústica geométrica conlleva una simplificación elemental del comportamiento real del sonido, pero tiene la virtud de aportar una visión altamente intuitiva del funcionamiento acústico de un recinto. Los estudios geométricos nos permiten un acercamiento a las cualidades acústicas de un espacio mediante el análisis de su morfología, sin entrar en cuantificaciones energéticas, y de forma previa a la obtención de resultados numéricos de los parámetros acústicos normalizados.⁹

La Figura 5 muestra las reflexiones sonoras de primer orden que se producen en la planta del teatro. La geometría circular de la mitad posterior de la sala genera un comportamiento de las reflexiones similar al de las llamadas “galerías de susurros”, produciendo una clara focalización en la zona posterior de la platea que se traduce en un incremento sonoro en esas localidades. Este efecto de los teatros a la italiana ya ha sido puesto de manifiesto en publicaciones recientes (Iannace y Ianniello, 2007).

Todos los espectadores situados cerca del eje de simetría del teatro (incluyendo las galerías posteriores de los pisos tercero y cuarto) reciben el sonido directo emitido desde el escenario gracias al adecuado diseño de la sección longitudinal, como se observa en la Figura 6. Sin

⁷ Sobre este edificio hemos publicado estudios acústicos exhaustivos elaborados a partir de mediciones objetivas in situ, análisis geométricos y simulaciones virtuales (Barba y Giménez, 2009a; Barba y Giménez, 2011a).

⁸ Hemos publicado estudios aplicando métodos geométricos para analizar diferentes modelos formales de teatro a la italiana (Barba et al., 2009b; Barba et al., 2009c; Barba, 2012a).

⁹ El conocimiento empírico y teórico de los fenómenos de reflexión sonora se remonta, cuanto menos, al siglo XVII con la figura del erudito alemán Athanasius Kircher (1601/02-1680), sacerdote jesuita que estudió gráficamente las reflexiones sonoras y diseñó ingeniosos mecanismos acústicos basados en la relación directa entre sonido y geometría, todos ellos publicados en *Musurgia Universalis* (Kircher, 1650) y *Phonurgia Nova* (Kircher, 1673).

embargo, toda sala a la italiana presenta una limitación a este respecto: los espectadores ubicados en la parte lateral de los palcos tienen visión reducida del escenario, tanto más reducida cuanto más hacia los extremos se sitúe la localidad, y cuanto mayor sea la altura de la misma (Figura 7). Esto compromete en gran medida la acústica en esas localidades y la hace muy dependiente de las reflexiones que reciban. En este sentido, el último piso resulta más favorecido que los pisos inferiores debido al ángulo de entrada de las reflexiones de primer orden procedentes del techo de la sala como se muestra en la sección transversal de las Figuras 8 y 9. Debido a ello, las localidades laterales del cuarto piso presentan una inteligibilidad del discurso hablado aceptable, pese a no recibir sonido directo del escenario. La zona lateral de los pisos tercero y segundo tendrá condiciones acústicas inferiores al carecer de sonido directo y contar con un ángulo de entrada de reflexiones directas del techo muy limitado.

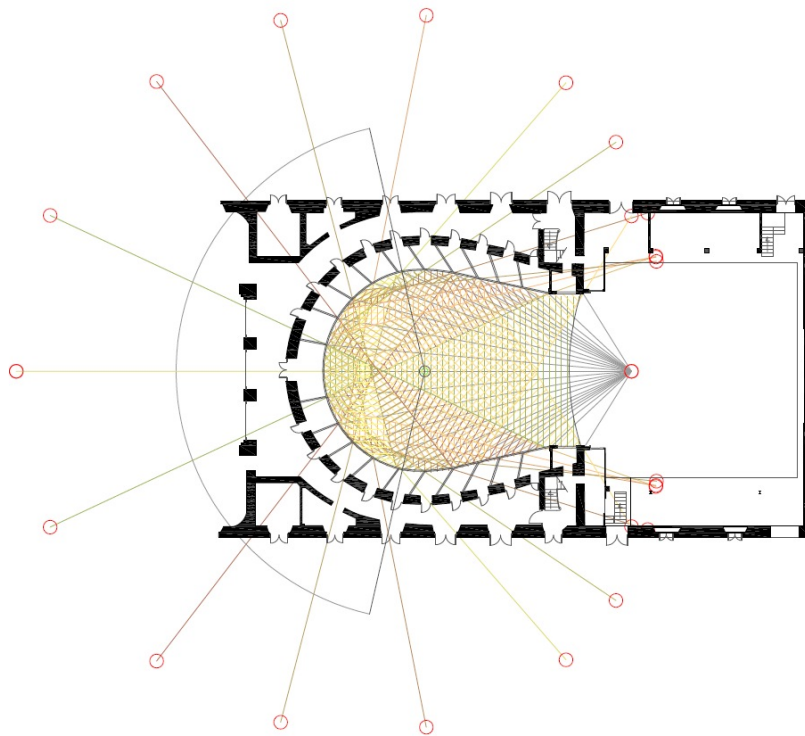


Figura 5. Planta Primera del Teatro Principal. Reflexiones de primer orden

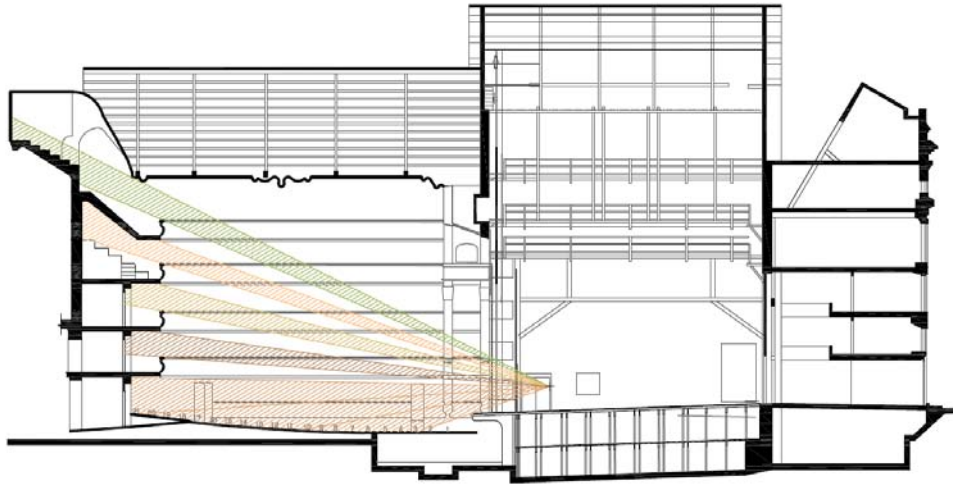


Figura 6. Sección longitudinal central del Teatro Principal. Llegada del sonido directo a todas las localidades

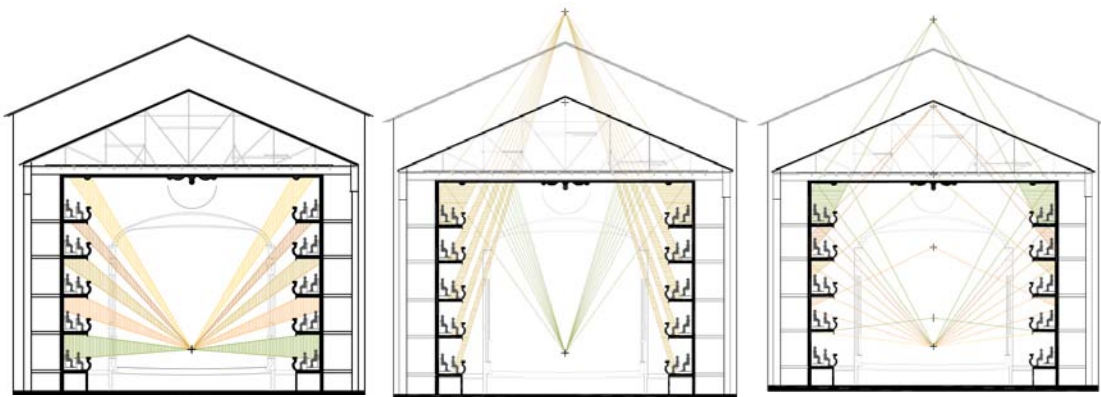


Figura 7 (Izq.)- Sección transversal. Llegada del sonido directo. **Figura 8** (Centro)- Sección transversal. Reflexiones de primer orden procedentes del cielorraso superior. **Figura 9** (Der.)- Sección transversal. Reflexiones de primer orden de los techos de los palcos

El techo de la zona de audiencia es la mayor superficie libre del teatro, superficie que presenta además un acabado reflectante (enlucido con decoración en escayola), lo cual dota a las reflexiones procedentes del techo de una importancia especial. Su decoración en relieve genera difusión sonora en altas frecuencias. La Figura 10 muestra una sección longitudinal con el trazado de las fuentes secundarias del techo central y del arco de proscenio del teatro y el trazado de las reflexiones de primer orden procedentes de dichas superficies. Se observa una focalización clara en la mitad posterior de la platea incluyendo las localidades más retrasadas inicialmente desfavorecidas por hallarse encerradas bajo los palcos. La mitad delantera de la platea no recibe

primeras reflexiones procedentes del techo. La zona central de palcos (la que se ve en la sección longitudinal) resulta igualmente muy favorecida por las reflexiones del techo plano de la sala.

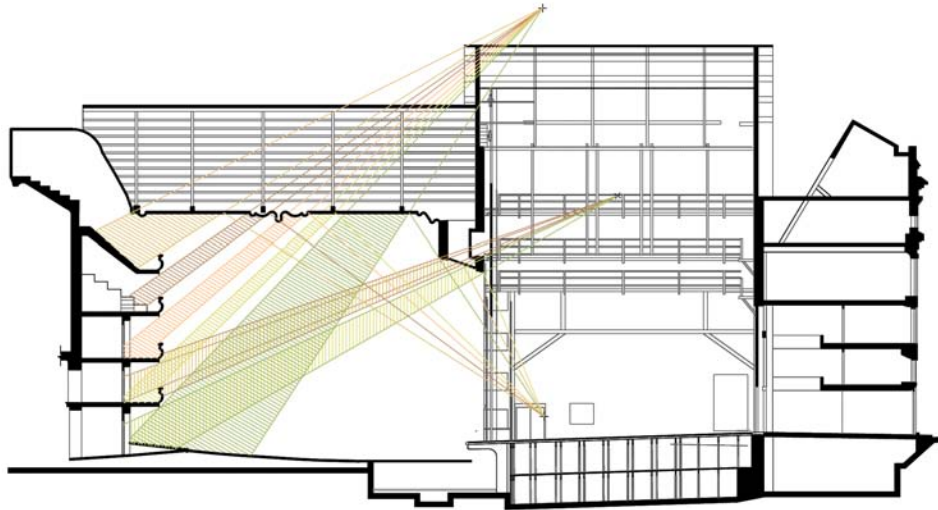


Figura 10. Sección longitudinal del Teatro Principal. Reflexiones de primer orden procedentes del techo central de la sala y del arco de proscenio

En cuanto a las reflexiones de segundo orden que genera el techo de la sala, en la Figura 11 observamos que tras impactar con el techo, numerosos rayos sonoros golpean los frentes de los palcos enviando sus reflexiones a la platea. Dado que los frentes de los palcos del teatro actúan en gran medida de difusores sonoros a medias y altas frecuencias debido a la geometría compleja en sección (curva-contracurva Figura 12) y a su ornamentación en relieve, podemos afirmar que la totalidad de la platea recibe una reflexión relativamente difusa de segundo orden procedente de los frentes de los palcos que contribuye sin duda a proporcionar a las localidades del patio de butacas del teatro una adecuada impresión de espacialidad, de sonido envolvente, sin que se pueda identificar la procedencia de las reflexiones recibidas.

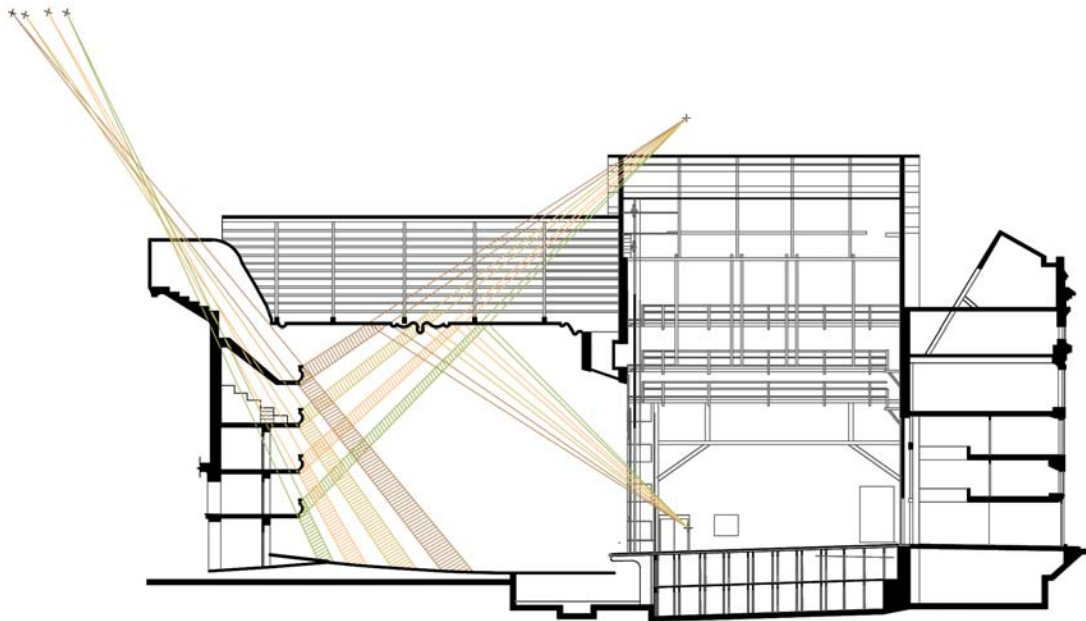


Figura 11. Sección longitudinal del Teatro Principal. Reflexiones de segundo orden (1º impacto: cielorraso central; 2º impacto: frente de palcos)

La dimensión del antepecho de los palcos cercano a 1 metro de altura causará difusión a los sonidos cuya longitud de onda sea de ese orden o inferior, es decir, sonidos de frecuencias superiores a 330 Hz aproximadamente.¹⁰ El resultado será algo similar a un frente de ondas difuso en sentido inverso recorriendo todo el volumen de la zona de audiencia (Figura 13).

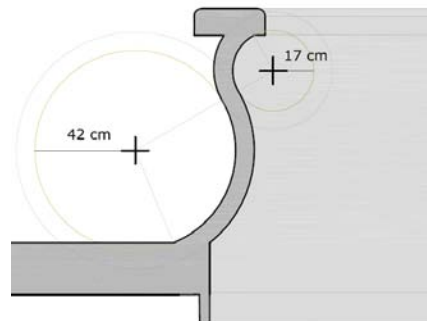


Figura 12. Sección tipo del frente de un palco. Esquema del trazado curva-contracurva

¹⁰ De modo aproximado estas frecuencias se corresponden con notas musicales superiores al Mi3 (Mi inferior de la clave de Sol), es decir, registro medio y agudo.

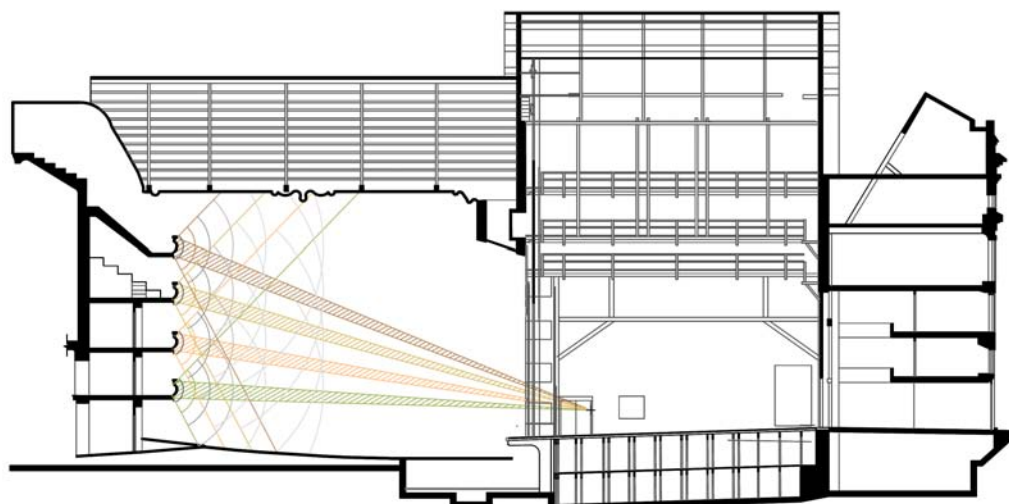


Figura 13. Sección longitudinal del Teatro Principal.
Reflexión difusa de primer orden del frente de los palcos

3.2.2. Medición acústica in situ: equipamiento y parámetros

La técnica empleada para la obtención de medidas acústicas in situ en la sala teatral ha sido el método *Impulse-response* (respuesta al impulso) siempre de acuerdo con la norma ISO 3382, que establece la metodología normalizada para la realización de mediciones acústicas en recintos.

La toma de datos fue realizada en condiciones de sala vacía, utilizando como señal un barrido sinusoidal, seno cuya frecuencia es una función del tiempo (de 20 Hz a 20 kHz). La sala es excitada mediante un sistema de emisión formado por un PC, una tarjeta de sonido profesional, un amplificador y una fuente sonora dodecaédrica que se aproxima razonablemente a una fuente idealmente omnidireccional.

La señal emitida ha sido recogida mediante un sistema de adquisición formado por un PC, la tarjeta de sonido ya citada, micrófonos GRAS y sus correspondientes fuentes de alimentación y preamplificadores. Para la determinación de los parámetros de espacialidad hemos utilizado el micrófono multipatrón con patrones de direccionalidad cardioide, omnidireccional y figura en 8, y la correspondiente fuente de alimentación Phantom. Finalmente las medidas binaurales se han llevado a cabo mediante una cabeza artificial normalizada.¹¹ El software WinMLS con el que

¹¹ Omitimos deliberadamente ahondar en los aspectos técnicos de los equipos de medida utilizados. Todas las especificaciones técnicas correspondientes a los equipos que empleamos se pueden encontrar en publicaciones recientes ya referidas (Barba, 2009a; Barba y Giménez, 2011a).

hemos registrado y grabado la señal posibilita obtener los parámetros acústicos según la ISO 3382 así como otros parámetros no incluidos en la norma, utilizando el sonido directo como referencia. El elevado número de puntos de medida registrados (94, muy por encima del número exigido por la ISO 3382) nos ha permitido llevar a cabo un ajuste exhaustivo de la simulación virtual elaborada ignorando incluso la simetría geométrica de la sala hasta haber comprobado con las medidas que existía la correspondiente simetría acústica.

De este modo, los parámetros acústicos calculados a partir de las medidas in situ llevadas a cabo en el Teatro Principal de Valencia han sido Parámetros temporales (RT, BR, Br), Parámetros energéticos (G, C80, D50, C50), Parámetros espaciales (IACC, LF y LFC) y Parámetros de Inteligibilidad (RASTI, STI). Para su estudio se han adoptado las formulaciones propuestas en investigaciones mayoritariamente utilizadas por la comunidad científica (Barron, 1981; Barron, 1988; Beranek, 1996; Kürer, 1969; Marshall, 1994; Giménez, 2001; Lacatis *et al.*, 2008).

3.2.3. Funcionamiento acústico

A modo de resumen podemos afirmar que la respuesta acústica del Teatro Principal de Valencia se debe fundamentalmente a su geometría en herradura, a su volumen, al comportamiento de sus materiales y a la distribución del aforo en platea y palcos perimetrales en altura; es decir, a los elementos esenciales propios de la tipología teatral italiana antes descrita.

Las butacas tapizadas, los cortinajes y los revestimientos textiles crean un entorno absorbente que sitúa la reverberación del recinto en torno a 1,45 segundos en condiciones de sala vacía. La curva tonal (RT/frecuencia) resulta muy adecuada para la audición musical y para el discurso hablado, con buenos valores de calidez (BR = 1.07 -presencia de sonidos graves) y brillo (Br = 0.88 -presencia de altas frecuencias). De esta forma, la acústica es apropiada para representaciones teatrales y operísticas cumpliendo así con los objetivos propios de la tipología teatral italiana. La disminución de la reverberación que se produce cuando la sala está llena de público da como resultado una audición levemente seca para conciertos camerísticos o de orquesta barroca o clásica, y sin duda una acústica carente de la reverberación necesaria para la interpretación de conciertos sinfónicos con repertorio romántico propio del siglo XIX, ajeno a un modelo formal como el teatro italiano nacido en el siglo XVII.

La geometría en herradura genera focalizaciones del sonido en el tercio posterior de la platea mostrando valores óptimos de amplificación sonora (efecto descrito en Iannace y Ianniello, 2007; Iannace y Ianniello, 2008; Barba, 2009-b, 2009-c). Además, la curvatura potencia la sensación de espacialidad por concentración de reflexiones tempranas en las zonas laterales del

tercio posterior de cada piso, ligeramente por detrás del punto en que la sala alcanza su máxima anchura.

Omitimos deliberadamente adentrarnos con mayor profundidad en la exposición de los resultados numéricos acústicos por no considerarlo necesario para el fin perseguido en este artículo, que no es otro que el de proponer y divulgar un protocolo de actuación para el estudio acústico de edificios desaparecidos o con morfologías pasadas diferentes a las actuales. Dichos resultados se encuentran publicados con detalle (Barba y Giménez, 2011a).

3.3. Estudio histórico y documental del edificio

En paralelo a las actividades anteriores, hemos llevado a cabo una labor de consulta, recopilación y análisis de documentos que ha hecho posible la recuperación de la historia del recinto teatral que nos ocupa, desdibujada en gran medida por el paso del tiempo. La documentación y planimetría de archivo del Teatro Principal de Valencia atestigua cada uno de los sucesos que ha vivido, y su localización y estudio ha sacado a la luz numerosos datos olvidados de gran interés histórico (Barba, 2011d).

Hemos realizado un completo barrido de las fuentes primarias (documentación de archivo y análisis de la sala teatral in situ) y hemos manejado las fuentes bibliográficas secundarias. Se han consultado, citado y publicado documentos históricos inéditos del Teatro Principal de los archivos de la ciudad que contenían información al respecto.¹² A ello hay que sumar un importante vaciado de prensa llevado a cabo en la Hemeroteca Municipal del Ayuntamiento de Valencia y una amplísima búsqueda de bibliografía histórica valenciana y teatral a través de las principales bibliotecas del municipio.¹³

De acuerdo con los resultados obtenidos de la referida investigación documental, presentamos a continuación un resumen de los principales cambios formales que ha experimentado la sala teatral durante sus 180 años de existencia en activo. Hemos seleccionado

¹² Archivo de la Real Academia de Bellas Artes de San Carlos de Valencia; Arxiu General i Fotogràfic de la Diputació de València, que recoge los fondos del antiguo Archivo del Hospital de la ciudad; Archivo Histórico Municipal del Ayuntamiento de Valencia; Archivo del Área de Arquitectura de la Diputación Provincial de Valencia; Archivo del Museo de Bellas Artes San Pío V; Museo de la Ciudad.

¹³ Destacamos por la importancia del material bibliográfico consultado la Biblioteca Valenciana, la Biblioteca de la Universitat Politècnica de València, la Biblioteca de la Universitat de València con especial atención a su sección de Biblioteca Histórica, y la Biblioteca del Centro de Documentación de Teatres de la Generalitat Valenciana.

cinco momentos históricos que consideramos representativos para trazar, a partir de su estudio, la historia completa de la evolución acústica del valenciano Teatro Principal. El criterio de selección ha sido la búsqueda de situaciones históricas en las cuales la acumulación de cambios formales interiores haya configurado un estadio arquitectónico susceptible de hacer patente variaciones en sus condiciones acústicas, con respecto a las morfologías precedentes del teatro.

Los cuadros que mostramos a continuación recogen algunas de los principales rasgos formales de la sala teatral en cada una de las cinco morfologías del Teatro Principal objeto de estudio en este trabajo:

1832. Inauguración

- Sala teatral con un piso menos que hoy en día.
- Altura de la caja escénica 6 metros inferior a la actual.
- Palcos de platea formando una herradura completa.
- Ausencia total de ornamentación en la sala (relieves, pintura decorativa, molduras, revestimientos textiles, etc.).
- Superficie del foso orquestal menor a la actual (37 m²).
- Lámpara central con una pequeña claraboya de ventilación superior.
- Condiciones de aforo decimonónicas, con mayor número de asistentes por metro cuadrado y presencia de espectadores de pie.

1859. Reinauguración

- Construcción del nivel superior (cuarto piso), que nace incompleto en su parte central.
- Incremento notable del aforo: 1870 espectadores (Lamarca, 1840), pudiendo acoger un público superior a 2000 personas, según datos de la época.
- Instalación de la gran araña central de la sala y eliminación de la claraboya.
- Ornamentación general de la sala: embocadura, cornisas, relieves, capiteles, papel pintado en palcos, mascarones y adornos en los frentes de los palcos, telón de boca de tejido adamascado bordado en oro, pasamanos de terciopelo en los antepechos, etc.

1928. Planimetría conservada de V. Rodríguez

- Sustitución de las lunetas de platea (asientos de madera) por butacas con un tapizado ligero (únicamente en la zona del asiento).
- Supresión de las particiones de los palcos de los pisos segundo (parcialmente) y tercero, en favor de bancadas o filas de butacas.
- Elevación de la cubierta del escenario (6 metros).
- Sustitución del entarimado, empapelado de palcos, renovación de pasamanos de los palcos, realización de trabajos de estuco, renovación de las butacas e instalación definitiva del telón metálico cortafuegos.
- Ensanchamiento de pasillos central y perimetrales de platea.

- Construcción de la general superior de gran aforo (segundo anfiteatro) y ampliación longitudinal de la general del tercer piso.
- Presencia de una estructura ornamental de madera enmarcando la embocadura y del telón de Alós.
- Corbata escénica adelantada en 85 centímetros respecto a su posición original.
- Ausencia de lámpara central.

1968. Tras las intervenciones de L. Albert

- Eliminación de los seis palcos centrales posteriores de la platea para incrementar el aforo.
- Instalación de nuevas butacas en platea, con un tapizado mucho mayor que las precedentes. Colocación de moqueta en platea (hasta entonces había madera).
- Construcción de camerinos (planta baja y tres alturas) en los hombros laterales del escenario. Disminución de su volumen y superficie útil.
- Cierre de la segunda general.

2012. Situación actual, tras las reformas de G. Stuyck y A. Peñín

- Supresión de los camerinos de los laterales del escenario recuperando el volumen anterior de la caja escénica. Mayor volumen escénico.
- Intervención en el cuarto piso completando su morfología en herradura. La segunda general se adelantó hasta la nueva línea de antepecho quedando reducida a cinco filas de butacas.
- Supresión parcial de la general del tercer nivel.
- Aforo actual inferior al de épocas pasadas: 836-1226.
- Reducción de la pendiente del escenario del 5 al 3 % al rebajar 35 centímetros la cota del fondo del entarimado.
- Recuperación de la primitiva corbata del escenario (retrasada 85 cm).
- Ampliación del foso orquestal (70 m² ampliables a 100 m²).
- Reposición de la gran lámpara del cielorraso central.

3.4. Simulación acústica actual. Creación y ajuste del modelo geométrico

Una vez conocidos los valores de los parámetros de calidad sonora descritos anteriormente, utilizamos un sistema de simulación acústica para alcanzar un conocimiento más profundo de su comportamiento acústico actual y para poder conocer su pasado acústico.

Para ello, tras completar y digitalizar la información planimétrica bidimensional existente del teatro, elaboramos un modelo geométrico tridimensional del mismo con el programa AutoCAD formado por 1470 superficies (Planells, 2011; Cervera, 2012) y lo exportamos a un potente software de simulación acústica (CATT, 2002), programa que trabaja con algoritmos

híbridos que combinan métodos de “trazado de rayos” y métodos de “fuente-imagen” (Figura 14).

Una vez importado el modelo (Figuras 15 y 16), asignamos (a partir de la identificación in situ de los materiales constructivos de acabado de la sala) a cada superficie sus correspondientes coeficientes de absorción y difusión en bandas de octava. Dada la imposibilidad de determinar en laboratorio dichos coeficientes, el ajuste de la simulación se ha realizado del siguiente modo: en primer lugar asignamos a cada material coeficientes de absorción suministrados por el propio programa de simulación acústica. A continuación, aplicamos a estos coeficientes desviaciones mínimas razonables de modo iterativo hasta conseguir que los tiempos de reverberación simulados (para cada frecuencia) no difieran más de un 10 % de los valores medidos in situ en el teatro, procedimiento de ajuste que se ha demostrado altamente satisfactorio en publicaciones anteriores (Galindo, Zamarreño y Girón, 2002).

□

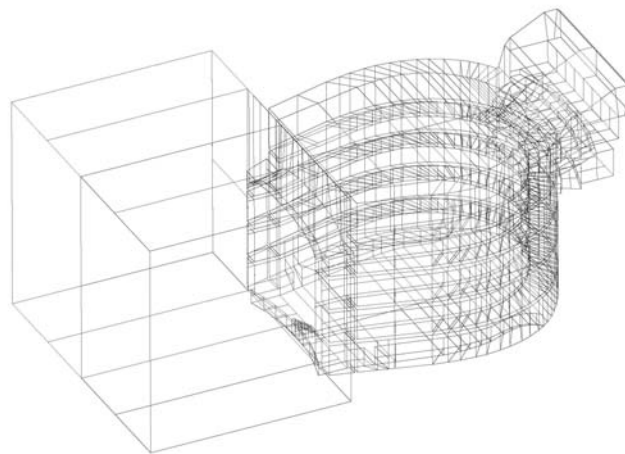
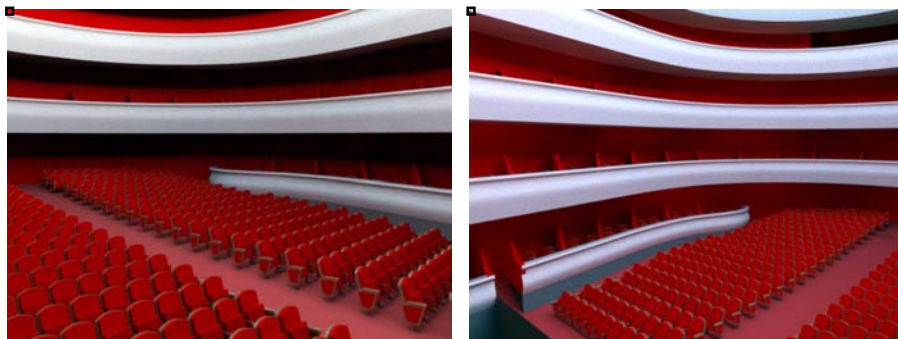


Figura 14. Modelo geométrico tridimensional del Teatro Principal (AutoCAD)



Figuras 15 y 16. Modelo geométrico tridimensional del Teatro Principal. Texturas iniciales. Vistas interiores

Una vez ajustada la curva RT (tiempo de reverberación) de la sala, comparamos los resultados de los parámetros G, C80, RASTI y EDT obtenidos en nuestra simulación en tres puntos representativos del teatro con los valores de los mismos obtenidos en las medidas in situ. Adoptamos para ello valores por frecuencias en bandas de octava, no valores medios. A partir de estas comparaciones, modificamos los coeficientes de ciertos materiales (sobre todo los presentes en el revestimiento interior de los palcos) hasta lograr una correlación excelente entre nuestro modelo virtual y la realidad arquitectónica.

3.5. Creación de modelos geométricos pasados del edificio (inexistentes). Simulación acústica y auralización

Ya con el modelo acústico virtual ajustado, el siguiente paso es la creación a partir de él de los cuatro modelos geométricos virtuales de épocas pasadas. Para ello hemos aplicado un delicado proceso de reversión geométrica de cada una de las reformas de la sala que conocemos en profundidad una vez estudiada su historia. La fiabilidad de los resultados obtenidos se basa en el fino ajuste del modelo actual antes comentado y en el conocimiento exhaustivo de las reformas efectuadas en cada época. No sólo aplicamos cambios geométricos en cada modelo, sino también variaciones de los coeficientes de absorción y difusión de los materiales de acabado del teatro, siempre avalados por los datos históricos disponibles y con el criterio unificado del grupo de acústicos que componemos el Grupo de Investigación en Acústica Virtual UPV-UVEG.

A continuación mostramos imágenes en sección de los modelos históricos desarrollados, en las que se pueden apreciar algunos de los cambios formales introducidos (Figuras 17-21).

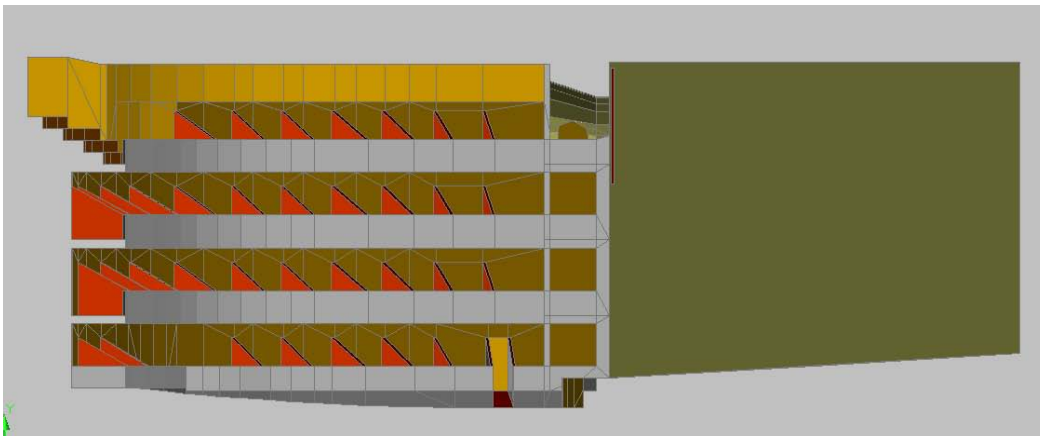


Figura 17. Modelo geométrico del Teatro Principal de Valencia en 1832

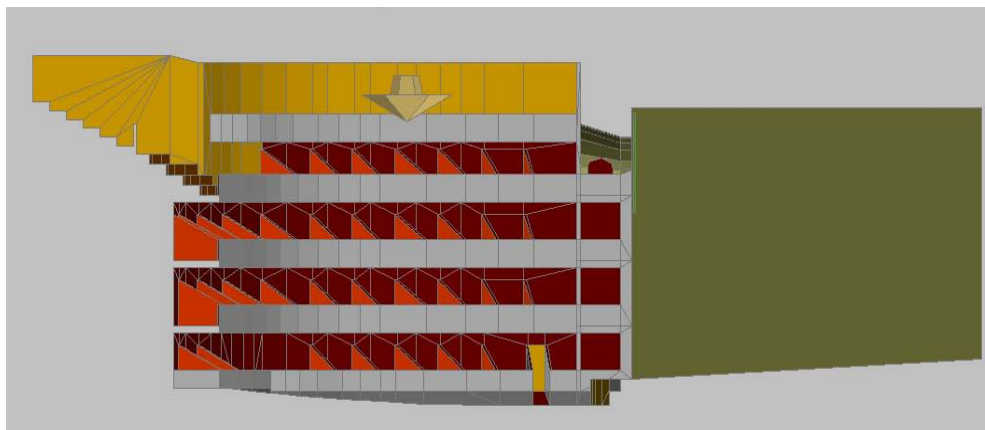


Figura 18. Modelo geométrico del Teatro Principal de Valencia en 1859

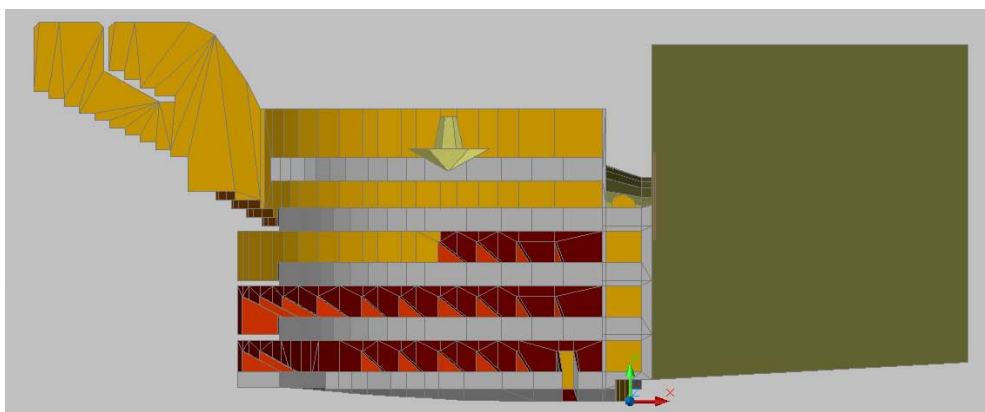


Figura 19. Modelo geométrico del Teatro Principal de Valencia en 1928

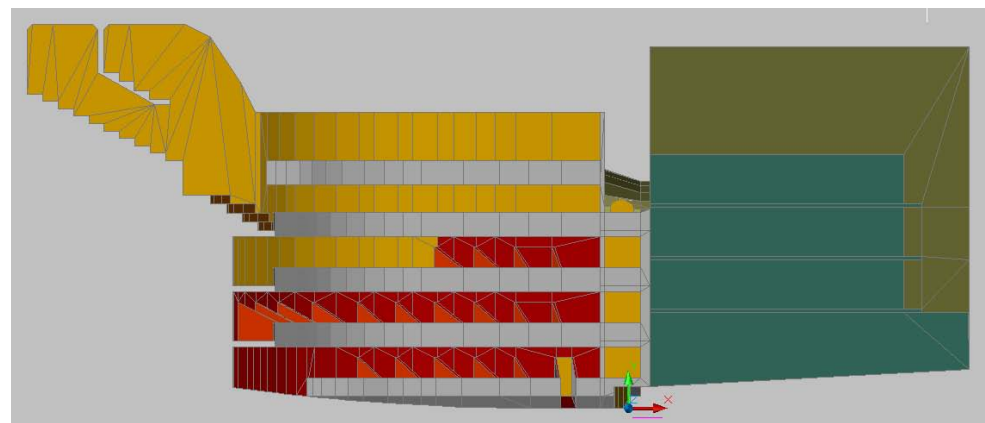


Figura 20. Modelo geométrico del Teatro Principal de Valencia en 1968



Figura 21. Modelo geométrico actual del Teatro Principal de Valencia (2012)

3.6. Estudio comparativo y percepción de las variaciones acústicas en el recinto teatral a lo largo de la historia: parámetros acústicos, simulaciones, auralizaciones

Una vez elaborados los modelos virtuales (geométricos y acústicos, no lo olvidemos) ya tenemos todos los ingredientes para poder sacarle partido al trabajo realizado. Abordaremos dos tipos de estudios:

Estudios OBJETIVOS, en los que calcularemos la variación de los parámetros de calidad acústica en el Teatro Principal a lo largo de la historia en cada una de las zonas de aforo de la sala teatral. Con ellos podemos saber con certeza cómo afectó cada intervención arquitectónica a las condiciones acústicas del teatro; cómo disminuyó su tiempo de reverberación y su fuerza acústica con los grandes aforos del siglo XIX, cómo afectó a la claridad musical la ausencia de ornamentación en la sala durante sus primeros años, cómo cambió su inteligibilidad frente al discurso hablado con las diferentes variaciones de volumen de la caja escénica, etc. Todo ello se puede cuantificar numéricamente y compararlo con los valores recomendados de los parámetros acústicos para los actuales usos teatrales, pudiendo desarrollar innumerables estudios sobre los usos acústicos teatrales a lo largo de la historia.



Figura 22. Auralizaciones de un auditorio llevadas a cabo en las instalaciones UPV-UVEG

Estudios SUBJETIVOS, mediante auralizaciones virtuales. La auralización trasciende el ámbito del cálculo analítico y virtual propio de las simulaciones para adentrarse en el de las sensaciones, la percepción y la experiencia real. Así, auralizar consiste en simular la experiencia sonora en una determinada posición del espacio modelado, haciendo audible el comportamiento sonoro de un recinto mediante un proceso de modelización física o matemática del campo sonoro de una fuente concreta en dicho espacio. La auralización nos permite la percepción acústica de estos modelos ya inexistentes del pasado en potentes entornos actuales de realidad virtual (visual y acústica): Cave y PowerWall, ambos disponibles en la UPV (Figura 22). Con ello se abre un enorme abanico de novedosas posibilidades de investigación relacionadas con la dramatización de textos para escucharlos con su acústica original, con entornos que recrean además la imagen pasada de los recintos teatrales.

4. Conclusiones. Nuevas perspectivas de investigación teatral

En este artículo hemos explicado un nuevo protocolo de investigación para ahondar en el conocimiento de la acústica de recintos teatrales en épocas pasadas mediante la aplicación de técnicas virtuales. La herramienta que presentamos abre numerosos campos de investigación en acústica teatral de recintos desaparecidos, ya que para su aplicación no es preceptivo partir de un edificio existente como en el caso explicado en este artículo. Este protocolo se puede aplicar en caso de recintos inexistentes de los que conservemos datos históricos suficientes (planimetría, contratos de construcción, datos del aforo, descripciones de sus materiales, reproducciones gráficas históricas, etc.) que nos permitan la elaboración de modelos virtuales sin adoptar excesivas hipótesis de partida que le resten fiabilidad a los resultados.

Entre los objetivos para la próxima aplicación del protocolo de investigación descrito, podemos citar la recuperación de la acústica original del Teatro Romano de Sagunto (s. I d.C.), la percepción de textos clásicos en recreaciones acústicas y estéticas del Corral de la Olivera de Valencia (s. XVI-XVIII) o la recreación virtual de la valenciana Botiga de la Balda (s. XVIII-XIX), que materializó la transición teatral entre la Olivera y el Teatro Principal en la ciudad de Valencia. Desde el Grupo de Investigación en Acústica Virtual UPV-UVEG hemos iniciado ya el desarrollo de todas estas nuevas vías de investigación con los estudios históricos que necesariamente se han de realizar de forma previa a las modelizaciones geométricas y acústicas.

Pretendemos tender puentes de conexión entre disciplinas a priori alejadas entre sí y potenciar cuantas iniciativas interdisciplinares de investigación acústica teatral puedan surgir en el futuro con estas nuevas perspectivas.

5. Referencias bibliográficas

- BARBA, Arturo, et al., Acoustics vases in ancient theatres: disposition, analysis from the ancient tetrachordal musical system, International Congress Acoustics-08, Paris, 2008a.
- BARBA, Arturo, et al., Resonant cavities and acoustics vases in Italian Opera Houses; the "Teatro Principal" of Valencia and eighteenth century treatises about theatres, International Congress Acoustics-08, Paris, 2008b.
- BARBA, Arturo y Alicia Giménez, Análisis acústico de la tipología teatral a la italiana a través del estudio del Teatro Principal de Valencia, Revista de Acústica, Vol. 40 (3-4), pp. 9-26, 2009a.
- BARBA, Arturo, et al., ¿Cómo "suena" un teatro a la italiana? El Teatro Principal de Valencia, 40º Congreso Nacional de Acústica "Tecniacústica 2009", Cádiz, 2009b.
- BARBA, Arturo, et al., Caracterización del comportamiento acústico de los teatros a la italiana a partir del estudio de su geometría, 40º Congreso Nacional de Acústica "Tecniacústica 2009", Cádiz, 2009c.
- BARBA, Arturo y Alicia Giménez, El Teatro Principal de Valencia. Acústica y Arquitectura Escénica, Ed. Teatres de la Generalitat y Universitat Politècnica de València, Valencia, 2011a.
- BARBA, Arturo y Alicia Giménez, El Teatro Principal de Valencia: vasijas acústicas y cámaras de resonancia, 42º Congreso Nacional de Acústica "Tecniacústica 2011", Cáceres, 2011b.
- BARBA, Arturo et al., Historia del edificio teatral. Evolución formal y acústica, 42º Congreso Nacional de Acústica "Tecniacústica 2011", Cáceres, 2011c.

- BARBA, Arturo, Los arquitectos del Teatro Principal de Valencia (1774-1859), Archivo de Arte Valenciano, XCII, pp. 161-175, 2011d.
- BARRON, Mike, Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: the derivation of a physical measure, *Journal of Sound and Vibration* n° 77 (2), Elsevier, 1981, pp. 211-232.
- BARRON, Mike et al., Energy relations in concert auditoriums I, *J Acoust Soc Am* 1988; 84 (2).
- BÉRCHEZ, Joaquín y Vicente Corell, Catálogo de Diseños de Arquitectura de la Real Academia de BB. AA. de San Carlos de Valencia 1768-1846, Colegio Oficial de Arquitectos de Valencia y Murcia-Xarait, Valencia, 1981.
- BERANEK, Leo Leroy, Concert halls and opera houses, Acoustical Society of America, New York, 1996.
- BOULLÉE, Etienne Louis, Arquitectura. Ensayo sobre el arte, Gustavo Gili, Barcelona, (reedición) 1985.
- CATT-Acoustic v 8.0b. User's manual: Room Acoustics prediction and desktop auralization, CATT, Gothenburg, 2002.
- CERVERA, Oreto, et al., Técnicas de modelado tridimensional y su aplicación en la auralización de espacios, VIII Congreso Iberoamericano de Acústica, Evora, 2012.
- FORSYTH, Michael, Buildings for music, Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
- GALINDO, Miguel Teófilo Zamarreño y Sara Girón, Measured acoustic parameters versus predicted ones in two Gothic-Mudejar churches, *Forum Acusticum*, Sevilla, 2002.
- GIMÉNEZ et al., Estudio de la evolución de parámetros acústicos que miden la calidad de salas de conciertos, 32º Congreso Nacional de Acústica "Tecnacústica 2001", La Rioja, 2001.
- HIDAKA, Takayuki y Leo Leroy Beranek, Objective and subjective evaluations of twenty-three opera houses in Europe, Japan, and the Americas, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 107 (1), pp. 368-383, 2000.
- IANNACE, Gino y Carmine Ianniello, Sound-focusing effects in the plan of horse-shoe shaped opera theatres, 19th International Congress on Acoustics, Madrid, 2007.
- IANNACE, Gino y IANNIELLO, Carmine, Changes in Subjective Sound-focusing effects in the plan of horse-shoe shaped opera theatres, International Congress Acoustics08, Paris, 2008.
- ISO 3382: Acoustics-Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters, International Organisation for Standardisation, Geneva, Switzerland, 1997 (actualizaciones UNE-EN ISO 3382 2008, 2009, 2010).

- IZENOUR, George, Theater Design, Yale University Press, 1996.
- KIRCHER, Athanasius, Musurgia Universalis, Roma, 1650.
- KIRCHER, Athanasius, Phonurgia nova, sive conjugium mechanico-physicum artis et naturæ paranympa phonosophia concinnatum, Rudolphum Dreherr, Kempten, 1673.
- KÜRER, R., Zur Gewinnung von Eizahlkriterien bei Impulsmessungen in der Raumakustik, Acustica nº 21, 1969, p.370.
- LACATIS, Radu George et al., Historical and chronological evolution of the concert hall acoustics parameters, International Congress Acoustics-08, Paris, 2008.
- LAMARCA, Luis, El Teatro de Valencia desde su origen hasta nuestros días, Valencia, 1840 (Copia-facsímil librerías “París-Valencia” 1999).
- MARSHALL, Harold, An acoustics measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio, New York, J.A.S.A., 1994, pp.2251-2261.
- PLANELLS, Ana et al., Elaboración de modelos para el estudio acústico en entornos virtuales, International Seminar on Virtual Acoustics, Valencia, pp. 194-199, 2011.
- SAUNDERS, George, Treatise on theatres, London, 1790.
- SIRERA, Josep Lluís, El Teatre Principal de València, Institució Alfons el Magnànim, Valencia, 1986.
- ZAMARREÑO, Teófilo, Acústica y Patrimonio, 42º Congreso Nacional de Acústica “Tecniacústica 2011”, Cáceres, 2011.