

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO GEOMÉTRICO DEL AUDITORIO RAFAEL FRÜHBECK DE BURGOS

Referencia PACS: 43.55.Ka

Gómez Alfageme, Juan José, Pérez Cebrecos, Carlos; Blanco Martín, Elena
Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación
Nikola Tesla s/n
28031 Madrid. España
Tel: +34 913 367 775
Fax: +34 913 319 229
E-Mail: juanjose.gomez.alfageme@upm.es

Palabras clave

Modelo geométrico, validación, JND, parámetros acústicos, tratamiento estadístico

ABSTRACT

This paper presents the design of a geometric model of the Auditorium Rafael Frühbeck (Burgos) and further validation from in-situ measurements. From the geometric model validated studies will be carried out in order to predict the acoustic behaviour of the enclosure when different sound reinforcement and acoustic variable geometry systems are configured on it. For validation, a first comparison of the reverberation time in situ measures for the application of statistical theory model at EASE has been carried out and then comparing different parameters from impulse responses calculated in EASE by applying geometric theory.

RESUMEN

En esta ponencia se presenta el diseño de un modelo geométrico del Auditorio Rafael Frühbeck (Burgos) y su posterior validación a partir de medidas realizadas in situ. A partir del modelo geométrico validado se realizarán estudios con el fin de predecir el comportamiento acústico del recinto cuando se configuren en él diferentes sistemas de refuerzo sonoro y sistemas acústicos de geometría variable.

La validación inicial del modelo se hará a partir de los valores del tiempo de reverberación obtenidos en las medidas in situ y posteriormente se estudiará el modelo con respecto de otros parámetros acústicos contemplados en la UNE-EN ISO 3382-1.

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años se ha incrementado el uso de herramientas de simulación para el estudio acústico de diferentes tipos de recintos. Estas herramientas permiten la obtención de distintos parámetros acústicos mediante la creación de modelos geométricos, que se obtienen a partir de los modelos arquitectónicos y de simplificaciones teniendo en cuenta consideraciones de relevancia acústica de los mismos.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

La presente comunicación tiene por objeto el diseño y validación de un modelo geométrico del Auditorio Rafael Frühbeck, del Complejo Fórum Evolución de Burgos, con la herramienta de simulación EASE. La validación del modelo se realizará con respecto de diferentes parámetros acústicos por comparación con las medidas de la respuesta impulsiva realizadas in situ con DIRAC, de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 3382 -1.

Se desarrollan dos estudios acústicos sobre el mismo recinto. En el primero de ellos, el recinto está configurado para la realización de eventos tales como conferencias o congresos, donde la inteligibilidad de la palabra es un factor determinante. En el segundo estudio, el recinto se configura para espectáculos musicales como conciertos de orquesta sinfónica o música de cámara. Para ambas configuraciones del recinto se ha realizado un procesado estadístico de los datos con el fin de obtener un valor único de cada parámetro acústico estudiado. De esta forma, se comparan los resultados para ambas configuraciones y se evalúan los valores obtenidos de cada uno de los parámetros acústicos con el fin de conocer si se adecuan a las necesidades acústicas exigidas por el tipo de evento desarrollado.

Además, se ha construido un modelo geométrico del recinto por ordenador, para ambas configuraciones acústicas, haciendo uso del software profesional de predicción y simulación acústica EASE. Se realiza un estudio acústico sobre el modelo geométrico mediante simulación, siguiendo las pautas llevadas a cabo durante la medición "in situ". Los resultados obtenidos por simulación se comparan con los obtenidos de las mediciones "in situ", para estudiar la validación del modelo geométrico. Para la validación del modelo geométrico, se ha realizado una primera comparación de las medidas in situ del tiempo de reverberación por la aplicación de la teoría estadística en el modelo en EASE. Posteriormente se han comparado diferentes parámetros acústicos del auditorio a partir de las respuestas impulsivas calculadas en EASE aplicando la teoría geométrica, utilizando como elemento de comparación la JND (*Just Noticeable Difference*).

Si se consigue una buena validación del modelo geométrico, este puede ser utilizado para realizar predicciones acústicas mediante simulación, cuando un sistema de refuerzo sonoro sea utilizado dentro del recinto.

DESCRIPCIÓN DEL AUDITORIO RAFAEL FRÜHBECK

El recinto sometido a ensayo acústico es el Auditorio Rafael Frühbeck, ubicado en el Complejo Fórum Evolución Burgos. Paseo Sierra de Atapuerca s/n, 09002, Burgos.



Figura 1. Fotografías del Auditorio Rafael Frühbeck

El volumen del recinto es de 12000 metros cúbicos aproximadamente. Tiene un aforo de 1371 personas. Consta de una platea de 25 filas de butacas; 12 en la parte inferior y 13 en la parte superior (986 butacas). En la parte trasera de la platea se sitúan dos palcos VIP (22 personas). En las paredes laterales aparecen dos palcos con 4 butacas cada uno (8 personas). El

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

anfiteatro está formado por 7 filas de butacas. (347 butacas). Todas las paredes son de chapa de madera Fibranor/Fibrapan Ignifugo en diversos tonos. Esto las convierte en superficies bastante reflectantes. El techo se constituye con tres planchas con barriga, formando una gran concha acústica como falso techo.

Las butacas de los palcos laterales son del tipo Taburete Alicia. Las butacas del anfiteatro y de la platea son del tipo Butaca Alicia, con tapicería Pro - 621 de Kvadrat en respaldo y contra asiento.

El recinto cuenta con elementos móviles, que permiten distintas configuraciones de escenario, y por lo tanto, distintas configuraciones acústicas. Así; las tres primeras filas de butacas de la platea son plataformas de altura variable, que pueden configurarse como ampliación de escenario, o bien, como foso de orquesta. Además del foso de orquesta, dentro de la caja escénica, puede situarse un techo acústico de madera (dos modalidades: pequeña o grande), creando dentro de la misma caja escénica una cámara de conciertos. Esta versatilidad en los elementos del recinto hace que puedan generarse distintos recintos acústicos dentro del mismo recinto; todos ellos con diferentes características acústicas. Esto permite al recinto la posibilidad de acoger diferentes actos u eventos, que demanden distintas condiciones acústicas (conciertos, música de cámara, ópera, orquesta sinfónica, exposiciones, presentaciones, conferencias, etc.)

En esta ponencia se estudian únicamente dos configuraciones acústicas del recinto. La primera configuración consiste en “Caja Escénica Vacía”. Aparecen todas las butacas de la platea. La caja escénica está vacía, solo acompañada de un telón negro de fondo, y cuatro telones verticales en cada lateral. Configuración típica para congresos y exposiciones donde la inteligibilidad de la palabra es lo más importante.

La segunda configuración se denomina “Caja Escénica Con Cámara Grande”. Se prescinde de las dos primeras filas de butacas de la platea para levantar la tarima supletoria, únicamente con la primera fila; dejando la segunda fila como sitio de paso. En la caja escénica se disponen los tres paneles de madera a modo de techo acústico y se precisan una pared de fondo y laterales, creando así una cámara de conciertos grande dentro de la caja escénica. Configuración típica para conciertos de orquesta sinfónica y música de cámara. Durante las mediciones, dentro de la cámara grande, aparecía una grada para un coro de 250 personas.

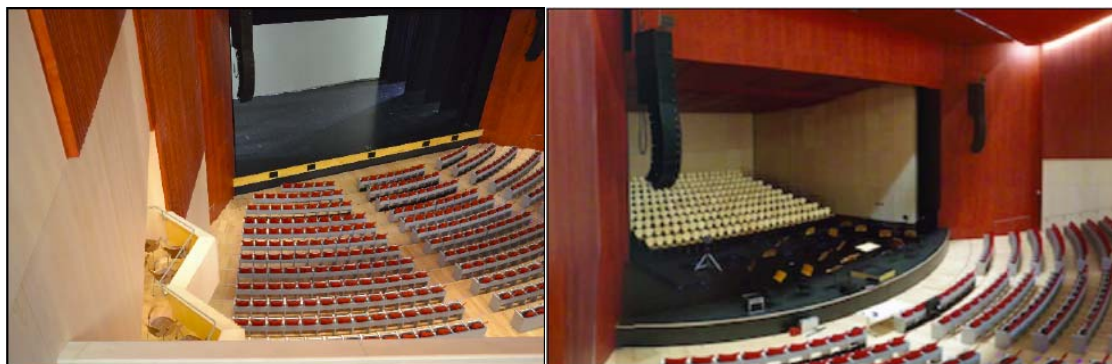


Figura 2. Configuraciones “Caja Escénica Vacía” y “Caja Escénica Con Cámara Grande”

MEDIDAS IN SITU

Las medidas in situ realizadas en la sala se han llevado a cabo de acuerdo a lo recogido en la norma UNE EN ISO 3382 – Parte 1, utilizando el sistema de DIRAC de Acoustics Engineering que permite calcular las respuestas impulsivas de las medidas. El equipamiento utilizado para estas medidas consiste en: Ordenador portátil; Software DIRAC; Micrófonos bidireccional y

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18- 24 al 26 de octubre

omnidireccional AKG CK 92 y AKG CK 94 junto con sus dos previos AKG SE 300B; Tarjeta de sonido ZE 0948 de Brüel & Kjaer; Preamplificador/mezclador MixPre de Sound Devices; Amplificador de potencia M700 de Inter-M; Sonómetro 2260 de Brüel&Kjaer; Fuente DO12 de Alava Ingenieros.

Se escogieron 15 posiciones de micrófono para ambas configuraciones, con el fin de obtener una buena cobertura espacial del recinto. Se distribuyeron 9 en platea (M1-M9), 3 en anfiteatro (M10-M12), 2 en palcos laterales (M13 y M15) y 1 en palco VIP (M14). Todas ellas se sitúan a una altura de 1,20 metros sobre el suelo. Se utilizaron dos posiciones de fuente sobre el escenario. Las posiciones de la fuente variaron según la configuración de recinto estudiado, manteniendo su altura en 1,50 m.

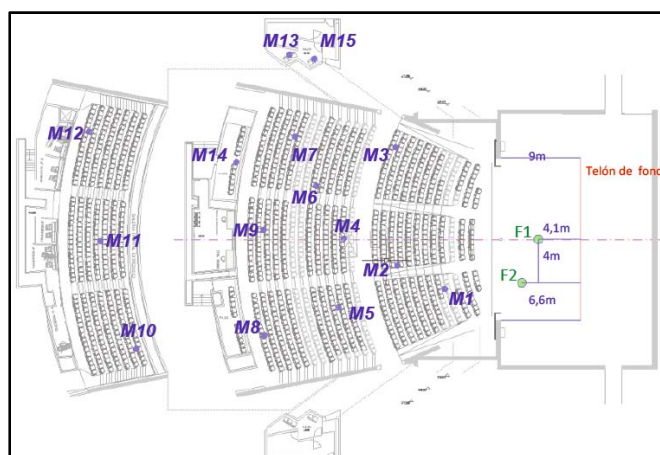


Figura 3. Posiciones de micrófono y fuente para la configuración Caja Escénica Vacía.

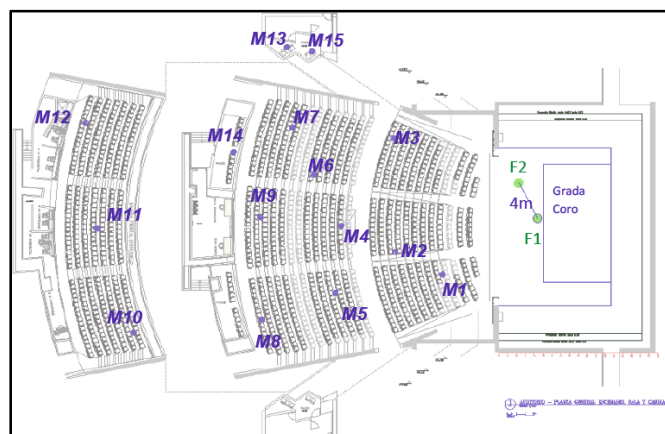


Figura 4. Posiciones de micrófono y fuente para la configuración Caja Escénica con Cámara Grande.

Las posiciones de micrófono de la 1 a la 3 se encuentran en la zona baja del patio de butacas, Las posiciones 4 a 9 están en la zona alta del patio de butacas. Las posiciones 10 a 12 están en el entresuelo. Las posiciones 13 y 15 pertenecen a los palcos laterales. Y por último la posición 14 se encuentra en el palco VIP. Se han realizado un total de 240 medidas (30 posiciones micrófonos-altavoz, 2 tipos de señal, 2 respuestas por señal y dos configuraciones de sala).

Los datos se han procesado en primer lugar teniendo en cuenta eliminar todos los registros con una INR > 35 dB. Posteriormente, a los datos restantes se les ha realizado un procesado estadístico según el criterio de Chauvenet con el fin de eliminar todos los registros que no sean

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

estadísticamente representativos. Este tratamiento se ha realizado para las 240 medidas, primero para el parámetro INR y posteriormente para un total de 16 parámetros obtenidos a partir de las respuestas impulsivas, para cada configuración (y para los dos tipos de señal). Dada la gran extensión de los resultados obtenidos, se van a presentar los resultados para la señal tipo MLS, que presentaba menor número de descartes del parámetro INR y una menor desviación estándar, y para los parámetros Tiempo de Reverberación (RT, Tmid), Early Decay Time (EDT), Claridad, Definición (C50, C80 y D50) y Fracción de Energía Lateral (LF). Todos estos parámetros se han obtenido tanto en bandas de octava como en bandas de 1/3 de octava. El resultado global obtenido como promediado espacial de todas las posiciones fuente-micrófono se observan en las siguientes tablas.

Caja Escénica Vacía	RTmid (s)	EDT (s)	D50 (-)	C50 (dB)	C80 (dB)	STI (-)	AICons (%)	LF (-)
Valor	1.62	1.61	0.52	1.23	2.24	0.59	8.46	0.55
Desv. Est.	0.08	0.27	0.14	0.62	1.3	0.04	2.57	0.26
Rango típico	13	13	0.30.7	> 2	-4 0	>0.60	<10%	0.050.35
Válido?	SI	SI	SI	NO	SI	NO	SI	NO

Caja Cámara Grande	RTmid (s)	EDT (s)	D50 (-)	C50 (dB)	C80 (dB)	STI (-)	AICons (%)	LF (-)
Valor	1.91	2.10	0.34	-2.38	-1.19	0.49	14.04	0.56
Desv. Est.	0.06	0.27	0.12	1.4	1.1	0.03	2.50	0.26
Rango típico	13	13	0.30.7	> 2	-4 0	>0.60	<10%	0.050.35
Válido?	SI	SI	SI	NO	SI	NO	NO	NO

Tablas 1 y 2. Valores promedio de diferentes parámetros acústicos medidos en la sala en las dos configuraciones.

CREACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO GEOMÉTRICO

El modelo geométrico se ha realizado a partir de los planos facilitados por el Director Técnico del Auditorio, medidas in situ de las dimensiones del auditorio y simplificaciones de los elementos constructivos que se consideran que no tienen relevancia acústica.

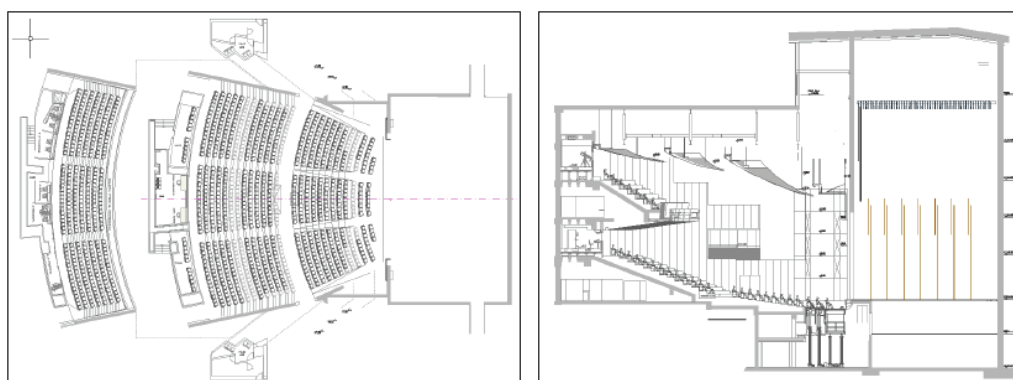


Figura 5. Planos arquitectónicos Auditorio Rafael Frühbeck

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

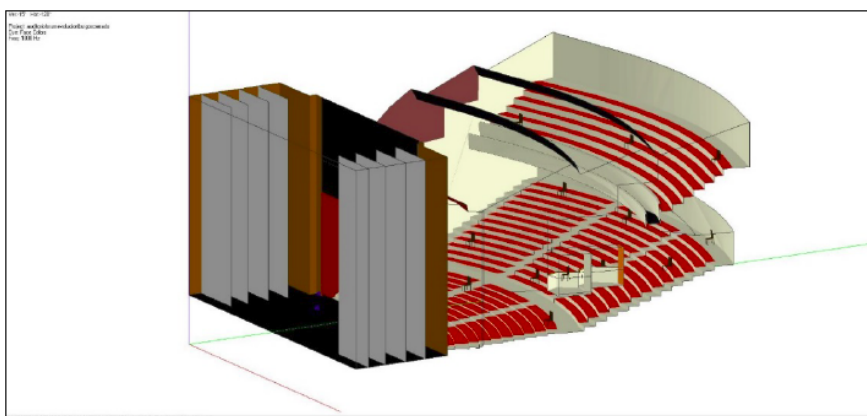


Figura 6. Modelo geométrico de la configuración Caja Escénica Vacía.

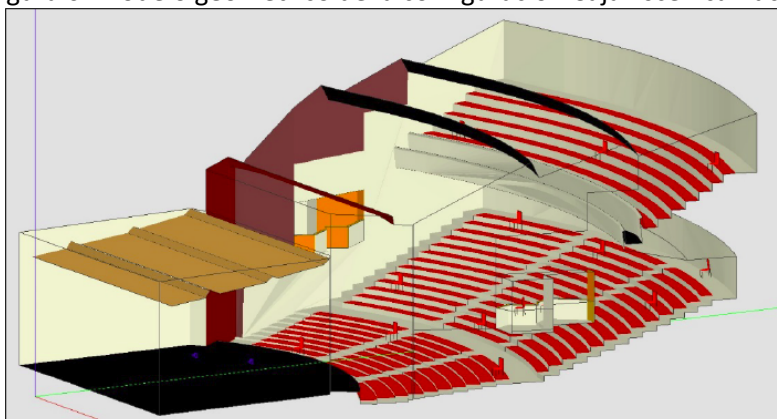


Figura 7. Modelo geométrico de la configuración Caja Cámara Grande.

El modelo cuenta con 3250 vértices, 316 caras y 30 áreas de audiencia. Se han empleado 9 materiales distintos en la realización del modelo.

El proceso de validación del modelo geométrico es muy importante, ya que pretende garantizar un comportamiento acústico similar entre el modelo geométrico y la sala.

El parámetro que se utiliza para validar el modelo es el tiempo de reverberación calculado según la teoría estadística, en nuestro caso calculado mediante la fórmula de Eyring. Con el uso de la herramienta *Optimize RT*, podemos ajustar el tiempo de reverberación calculado al tiempo de reverberación medido en la sala. El ajuste debe hacerse de tal manera que cumpla criterio definido en la norma UNE-EN ISO 3382 Parte 1. Para ello se utiliza una unidad llamada JND (*Just Noticeable Difference*). Una vez introducido el tiempo de reverberación a alcanzar con el modelo, se pasa a asignar materiales a las diferentes caras, para posteriormente comparar el tiempo de reverberación obtenido según la teoría estadística en el modelo con el introducido como objetivo. Tras asignar todos los materiales, se vuelve a la herramienta *Optimize RT*, y se comprueba si se ajusta el tiempo de reverberación al deseado. Como se puede ver en la Figura xx el tiempo de reverberación obtenido en el modelo (color azul) se aproxima al tiempo de reverberación objetivo (color gris). Según la norma UNE-EN ISO 3382 Parte 1, el umbral de variación es un 5% respecto del valor original, que equivale a 1 JND. La norma especifica que para validar el modelo, la diferencia entre los valores simulados y los valores medidos in-situ para las bandas de 500 Hz y 1000 Hz deben ser como mucho 1 JND.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

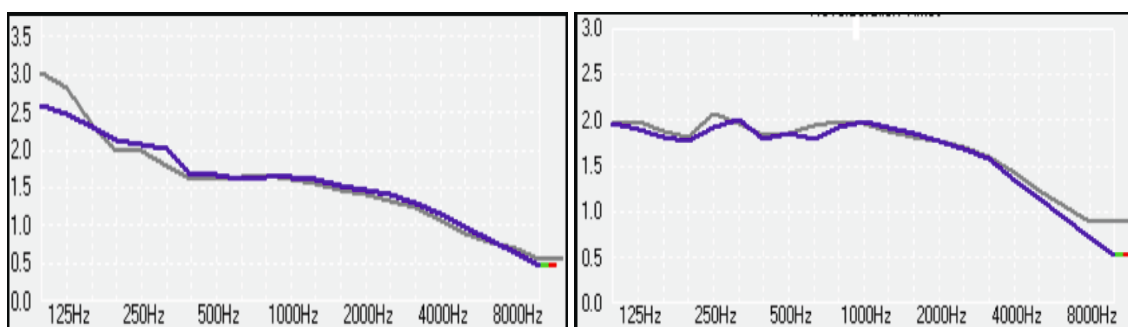


Figura 8. Herramienta *OptimizeRT* en las configuraciones Caja Escénica Vacía y Caja Cámara Grande.

A continuación pasamos a simular el tiempo de reverberación del modelo haciendo uso de la teoría geométrica, donde se tiene en cuenta la disposición local de los materiales y no solamente la absorción proporcionada por los materiales asignados a las caras del modelo. En nuestro caso se ha empleado el algoritmo de cálculo AURA, calculando la respuesta impulsiva con *AURA Response* en las mismas posiciones relativas de altavoces y micrófonos que las medidas in situ. En intento de no ser repetitivo, en adelante solo se van a presentar los resultados de la configuración de Caja Escénica Vacía.

Tiempo de Reverberación T30 (s)	FRECUENCIAS CENTRALES (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Medido in situ	2.83	1.99	1.61	1.62	1.42	1.08
Calculado (T. Estadística)	2.44	1.96	1.57	1.56	1.42	1.11
Variación (%)	13.7	0.2	0.6	0.4	0.0	0.3
JND	3	1	1	1	1	1
Simulado (T. Geométrica)	2.75	2.02	1.76	1.77	1.49	1.16
Variación (%)	0.3	0.2	9.3	9.3	4.9	1.0
JND	1	1	2	2	1	4

Tabla 3. Comparación del tiempo de reverberación medido in situ, calculado y simulado, con los JND correspondientes (caso de caja escénica vacía).

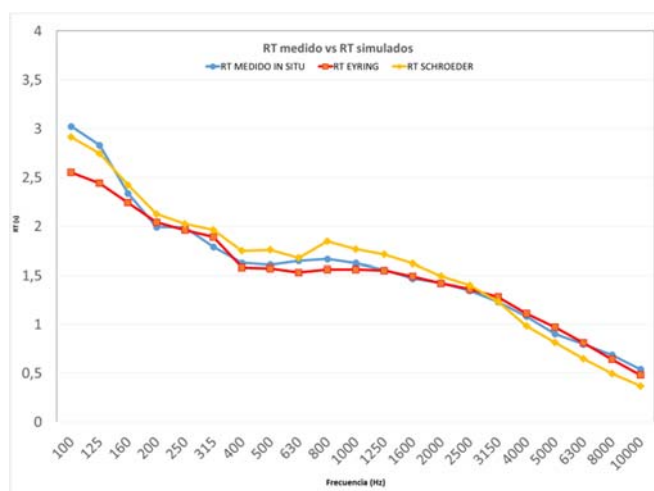


Figura 9. Comparación del tiempo de reverberación.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18- 24 al 26 de octubre

Una vez comprobado que el tiempo de reverberación está dentro de unos valores de JND aceptables, consideraríamos que el modelo geométrico está validado y podríamos proceder a simular los diferentes parámetros acústicos. En las siguientes figuras se pueden observar los resultados de algunos parámetros simulados con *AURA Mapping* en las diferentes zonas de audiencia del modelo.

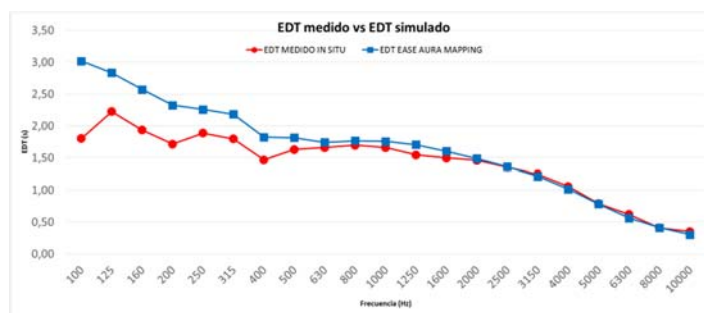


Figura 10. Comparación de EDT

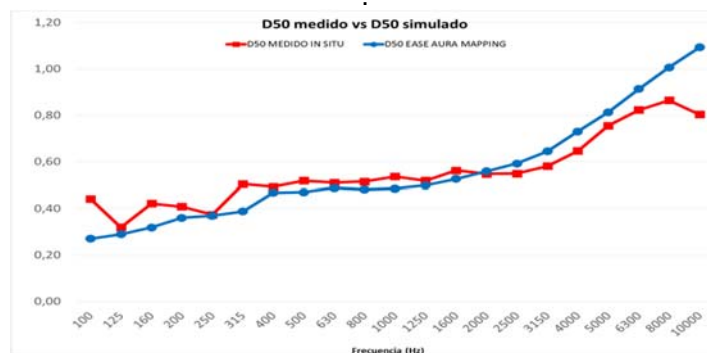


Figura 11. Comparación de D50.

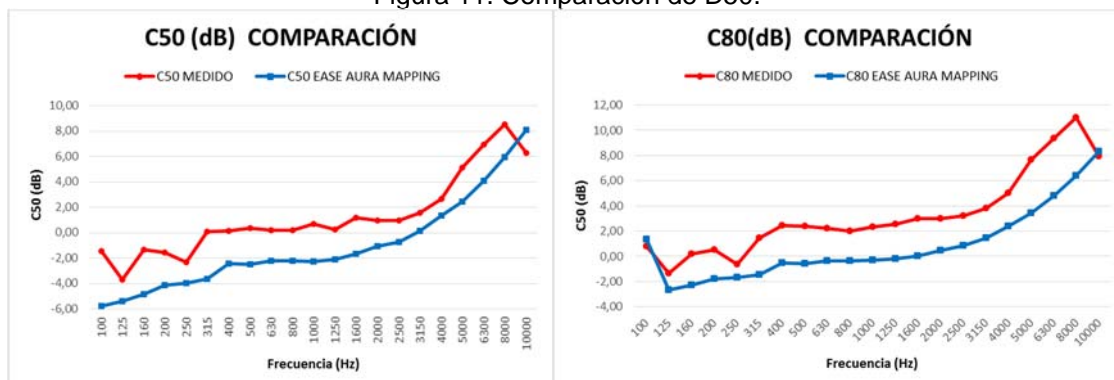


Figura 12. Comparación de C50 y C80.

Los parámetros que se han simulado por el método *AURA Mapping*, basado en la teoría geométrica, se presentan con los valores medios obtenidos en la sala y se comparan con los obtenidos a partir de las medidas in situ.

Parámetro	T30(s)	EDT (s)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (dB)
In situ	1.62	1.61	1.23	2.31	0.52
Simulado	1.75	1.77	1.67	-0.49	0.48
Variación	0.08	0.10	0.44	2.80	0.08
JND	2	2	1	3	2

Tabla 4. Resultados de JND para diferentes parámetros simulados con *AURA Mapping*.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

CONCLUSIONES

La construcción del modelo geométrico se ha desarrollado sin problema desde el inicio gracias a que se disponía de los planos del Auditorio. Se realizó una exportación de la planta del auditorio desde AutoCAD a EASE, para continuar en este último el desarrollo del modelo. A pesar de todo, el desarrollo desde EASE ha sido costoso dado la construcción punto a punto del resto del recinto.

La obtención de un modelo geométrico que reproduzca fielmente el comportamiento acústico tal y como sucede en el recinto real, es tarea difícil. Como hemos comprobado en el presente proyecto una buena validación a través de los tiempos de reverberación de Eyring o de Sabine, no aseguran una completa validación del modelo, ya que, a la hora de calcular parámetros acústicos a través de respuestas impulsivas en diferentes puntos de la sala, los resultados se alejan. Por otro lado, RT es el único parámetro que tenemos para poder validar el modelo con EASE. Por ello, debe considerarse como una muy buena aproximación pero no definitiva. Se puede ajustar el modelo por Eyring o Sabine en un primer momento, teniendo en cuenta que, a posteriori, es muy probable que haya que modificarlo en cuanto a distribución de materiales principalmente. Aunque el procedimiento de validación no ha sido sencillo, los resultados obtenidos de los parámetros que se han comparado ofrecen un grado relativamente alto de similitud, lo que puede confirmar la bondad del modelo creado.

REFERENCIAS

- [1] Pérez Cebrecos, C., "Estudio Acústico del Auditorio Rafael Frühbeck (Burgos)", Proyecto Fin de Grado, 2014, ETSIST – UPM.
- [2] UNE-EN ISO 3382-1 Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. 2010.
- [3] Segura, J., Cerdá, R., Cibrian, A., Gimenez, J., "Análisis de la respuesta subjetiva en auralizaciones de salas con diferentes valores de calidad acústica", Tecniacústica 2013, Valladolid, ISBN: 978-84-87985-23-2.