

## DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO GEOMÉTRICO DEL TEATRO ARRIGA DE BILBAO

PACS: 43.55.Ka

Gómez Alfageme, Juan José; Romero Cereceda, Bascués; Loroño Parla, Borja; Blanco Martín, Elena

Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación  
Universidad Politécnica de Madrid

Nikola Tesla s/n

28031 Madrid. España

Tel: +34 913 367 775

Fax: +34 913 319 229

E-Mail: [juanjose.gomez.alfageme@upm.es](mailto:juanjose.gomez.alfageme@upm.es)

### Palabras clave

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

### ABSTRACT

The present communication aims at the design and validation of the Teatro Arriaga in Bilbao geometric model with EASE. It will be needed to validate with respect to different acoustic parameters for comparison with the impulse response measurements made in situ with DIRAC, according to Standard UNE-EN ISO 3382.

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

La presente comunicación tiene por objeto el diseño y validación de un modelo geométrico del Teatro Arriaga de Bilbao con EASE. Será necesario validarlo 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.

Para la validación, 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, y posteriormente comparando diferentes parámetros a partir de las respuestas impulsivas calculadas en EASE aplicando la teoría geométrica.

## **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.

La presente comunicación tiene por objeto el diseño y validación de un modelo geométrico del Teatro Arriaga de Bilbao 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.

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 teatro a partir de las respuestas impulsivas calculadas en EASE aplicando la teoría geométrica, utilizando como elemento de comparación la JND (Just Noticeable Difference).

Finalmente, con los resultados obtenidos de la simulación y de las medidas in-situ, se evalúa la sala y se realiza una comparativa que muestre la validez del modelo realizado y que permita sacar conclusiones acerca de la acústica del teatro individualmente y en relación con otras salas de gran nivel de todo el mundo. Se ha intentado calificar el Teatro Arriaga de acuerdo a su utilización habitual, tanto para música de cámara, música sinfónica, ópera y teatro.

## **DESCRIPCIÓN DEL TEATRO ARRIAGA DE BILBAO**

En una extraordinaria ubicación en la unión del Ensanche y del Casco Viejo, se encuentra el Teatro Arriaga inaugurado en 1890, lo que le constituye como el más antiguo de Bilbao. Fue diseñado por el arquitecto Joaquín Rucoba y lo equipó con las mayores innovaciones tecnológicas de la época. En 1914 se produjo un incendio en la ciudad que produjo daños, pero en 1919 el Teatro Arriaga reabrió sus puertas manteniendo la importancia a nivel nacional que poseía previamente (figura 1). Entre los materiales utilizados se encuentran algunos como el ladrillo y la sillería que son habituales, y otros como el hierro empleado en el entramado y en elementos que sostenían el edificio los cuales se muestran y le dan una apariencia muy original. El hierro era un material muy poco usado para este tipo de recintos, en este caso en concreto se utilizó para evitar el problema más común que tenían los teatros en esa época, los incendios. Este novedoso y exitoso teatro sólo duró 25 años ya que en 1914 se produjo un incendio que arrasó el edificio y lo convirtió en cenizas. Tras la reconstrucción a cargo del arquitecto Federico de Ugalde, el teatro se reinauguró en 1919, y a partir de este momento actuaron las compañías y actores más importantes. El Teatro Arriaga fue cambiando de manos, en 1924 la Sociedad Anónima Nuevo Teatro de Bilbao le traspasó la gestión a la familia Diestro, en 1963 a la empresa Trueba, y finalmente al Ayuntamiento. Sin embargo diez días después de que el Arriaga fuera de propiedad municipal se cerró por mal estado y alto riesgo para el público. Hasta 1980 no pudieron comenzar las reformas y la recuperación, pero cuando sólo se había realizado parte de la reparación se produjeron unas lluvias torrenciales en 1983 que inundaron la planta baja del teatro. Finalmente se reabrió el 5 de diciembre de 1986 con nuevos ornamentos como una impresionante escalera en el vestíbulo y un busto del compositor por el que el teatro recibe el nombre.

El Teatro Arriaga es un edificio de base trapezoidal cuya parte central de la fachada exterior tiene forma curvo-convexa. El aforo del teatro es de 1200 personas, y está dividido en cinco áreas: patio de butacas, platea, palco, anfiteatro y paraíso, esta distribución se muestra en el esquema de la figura 2.

Dos aspectos curiosos del Arriaga son, el acceso al patio de butacas y al escenario subiendo dos plantas y por otro lado, tiene una configuración de foso de orquesta que según se necesite permite que las dos primeras filas del patio de butacas sirvan de foso de butacas, patio de butas o prolongación de escenario.



Figura 1. Exterior e interior del Teatro Arriaga

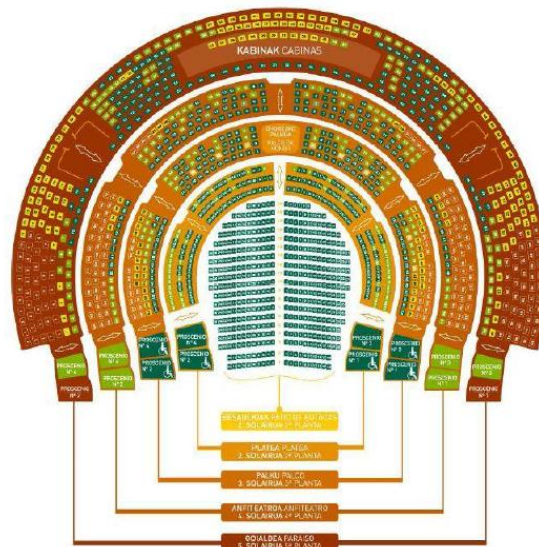


Figura 2. Disposición del aforo del Teatro Arriaga.

## 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 consisten en: Ordenador portátil; Software DIRAC de Acoustics Engineering; Micrófonos bidireccional y 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.

Las medidas se han realizado con el teatro sin ocupación, con el telón se encontraba abierto, el escenario sin mobiliario de conciertos y el foso de orquesta en modo ampliación de escenario. Las medidas de las respuestas impulsivas se han realizado empleando dos tipos de señales MLS y E-Sweep. Para el Teatro Arriaga se establecen tres posiciones de fuente para abarcar el escenario en su totalidad a 1.5 m de altura y 15 posiciones de micrófono distribuidas por las distintas zonas de audiencia de la sala a 1.2 m de altura.

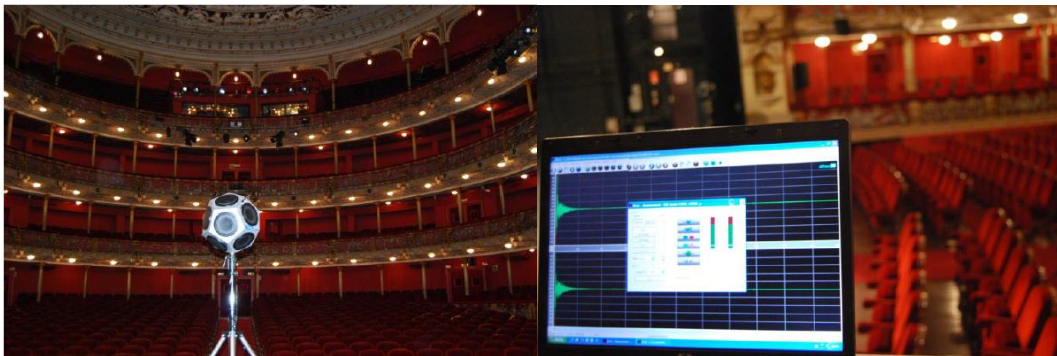


Figura 4. Disposición de altavoz y respuestas impulsivas medidas en los dos micrófonos.

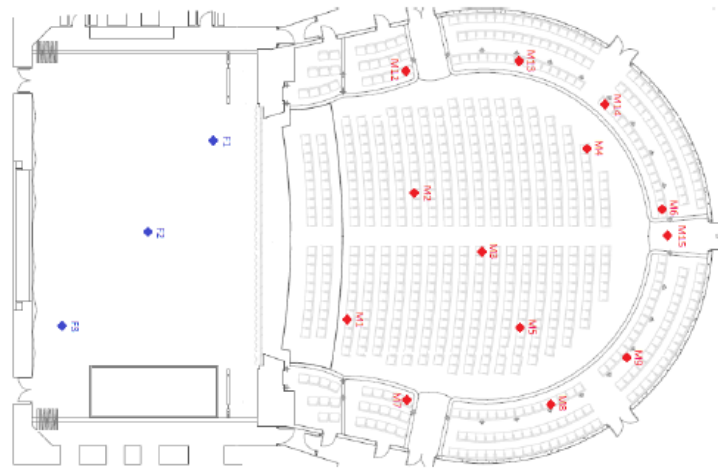


Figura 5. Disposición de altavoz y micrófonos distribuidos en la sala.

Las posiciones de micrófono de la 1 a la 5 se encuentran en la zona denominada Patio de butacas, situada en la segunda planta del teatro. Las posiciones 6 y 7 están en esta misma planta, en la zona llamada Platea. Las posiciones 8 y 14 están situadas en la zona denominada Palco, en la tercera planta. Las posiciones 9, 13 y 15 pertenecen a la cuarta planta, denominada Anfiteatro. Y por último las posiciones 10, 11 y 12 se encuentran en la planta más alta, Paraíso. Las posiciones 10 y 11 no se incluyen en la figura 5 ya que se encuentran en la quinta planta la cual es más profunda que la segunda, que es la que se representa en la ilustración. La posición 10 se sitúa en la primera fila de la última planta delante de la cabina, y la 11 se localiza en la penúltima fila, muy cerca de la pared trasera. Se han realizado un total de 180 medidas (45 posiciones micrófonos-altavoz, 2 tipos de señal y 2 respuestas por señal).

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 procesamiento estadístico según el criterio de Chauvenet con el fin de eliminar todos los registros que no sean estadísticamente representativos. Este tratamiento se ha realizado para las 180 medidas, primero para el parámetro INR y posteriormente para un total de 16 parámetros obtenidos a partir de las respuestas impulsivas (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 para los parámetros Tiempo de Reverberación (RT, Tmid), Early Decay Time (EDT), Tiempo Central (Ts), Claridad y Definición (C50, C80 y D50). Todos estos parámetros se han obtenido tanto en bandas de octava como en bandas de 1/3 de octava. Los resultados globales obtenidos como promediado espacial de todas las posiciones fuente-micrófono se observan en las siguientes tablas.

ZONA DE AUDIENCIA	RT (s)	EDT (s)	Ts (ms)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (dB)
Patio de butacas	1.15	1.15	91.55	-0.68	2.46	0.46
Platea	1.13	1.04	80.16	1.01	4.14	0.56
Palco	1.13	0.94	74.48	1.46	4.21	0.58
Anfiteatro	1.11	0.96	73.81	1.73	4.52	0.60
Paraiso	1.14	1.06	86.63	0.49	2.61	0.53
Promedio	1.13	1.03	81.33	0.80	3.59	0.55
Desviación estandar	±0.01	±0.08	±7.70	±0.95	±0.97	±0.05

ZONA DE AUDIENCIA	LFE	G (dB)	AICons (%)	RASTI
Patio de butacas	0.71	3.02	6.98	0.59
Platea	0.78	2.35	6.24	0.62
Palco	0.82	2.58	5.37	0.63
Anfiteatro	0.83	3.25	5.31	0.63
Paraiso	0.65	1.73	6.63	0.60
Promedio	0.80	2.59	6.15	0.61
Desviación estandar	±0.06	±0.60	±0.70	±0.02

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

## CREACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO GEOMÉTRICO

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

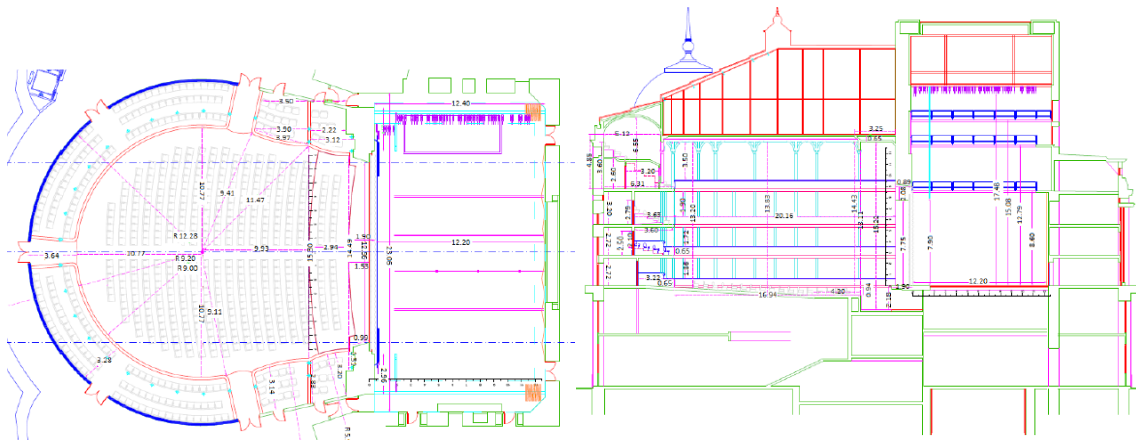


Figura 6. Planos arquitectónicos del Teatro Arriga.

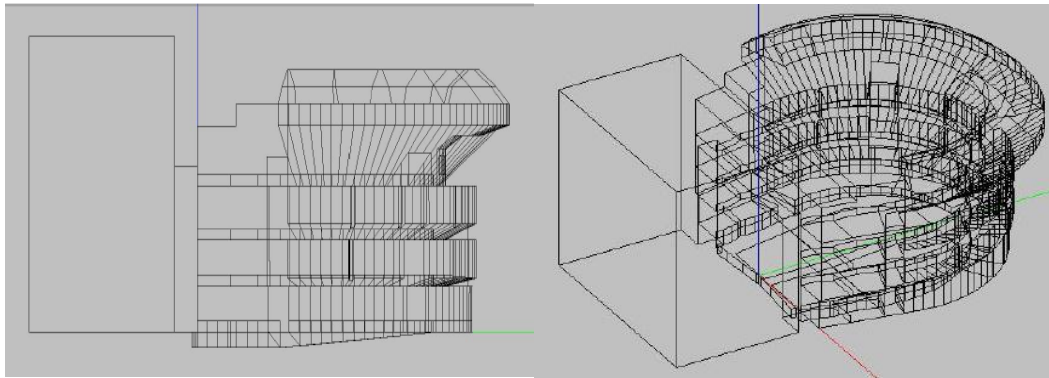


Figura 7. Modelo geométrico del Teatro Arriga.

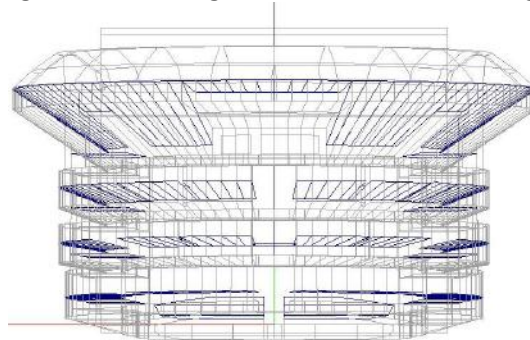


Figura 8. Zonas de Audiencia del modelo geométrico.

El modelo cuenta con 4580 vértices, 895 caras y 230 áreas de audiencia. Se han empleado 11 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.

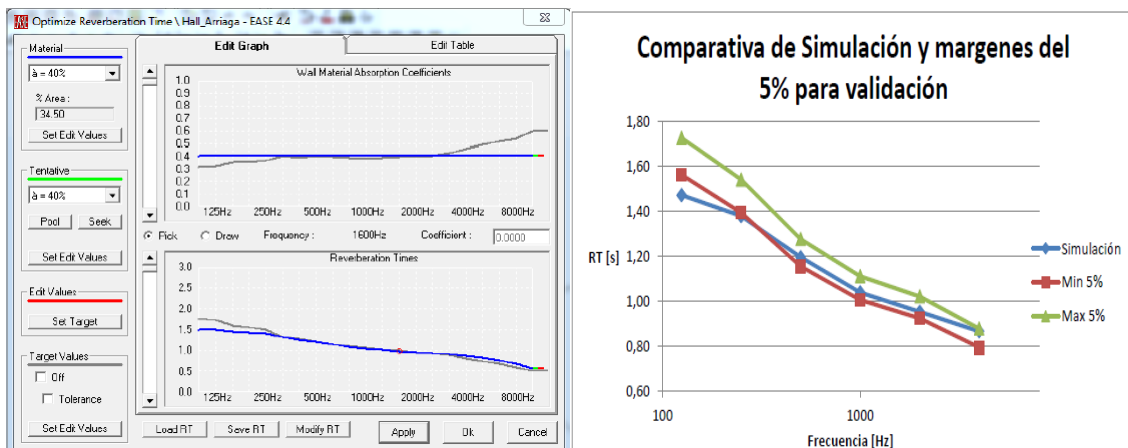


Figura 9. Herramienta OptimizeRT y variación del tiempo de reverberación aplicando teoría estadística con las medidas in situ.

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, con los siguientes parámetros de cálculo:

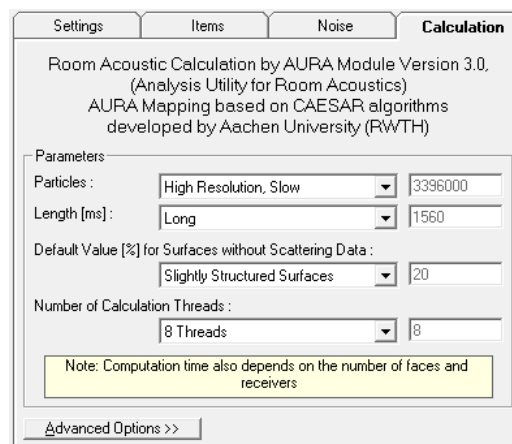


Figura 10. Parámetros de cálculo de método *AURA Response*.

Tiempo de Reverberación T30 (s)	FRECUENCIAS CENTRALES (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Medido in situ	1.65	1.47	1.22	1.06	0.97	0.84
Calculado (T. Estadística)	1.47	1.38	1.20	1.04	0.95	0.87
Variación (%)	11	6.1	1.7	1.9	2.1	3.6
JND	2	2	1	1	1	1
Simulado (T. Geométrica)	1.62	1.42	1.27	1.14	1.12	1.01
Variación (%)	10	3.4	4.1	7.5	13	20
JND	2	1	1	2	3	4

Tabla 3. Comparación del tiempo de reverberación medido in situ, calculado y simulado, con los JND correspondientes.

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.

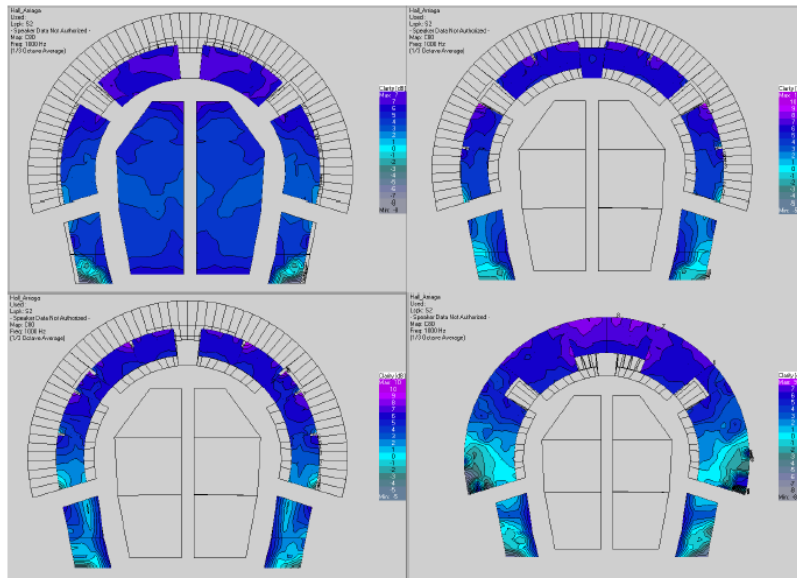


Figura 11. C80 calculado con *Aura Mapping*.

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)	Ts (ms)	C50 (dB)	C80 (dB)	D50 (dB)
In situ	1.14	1.05	74.63	0.53	3.50	0.51
Simulado	1.23	1.15	70.60	1.67	3.32	0.55
Variación	0.09	0.10	4.03	1.12	0.18	0.04
JND	3	2	1	2	1	1

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



## CONCLUSIONES

La creación y validación de un modelo geométrico del Teatro Arriaga de Bilbao no es proceso sencillo. En primer lugar en la creación del modelo ha supuesto una gran cantidad de tiempo dedicado a extrapolar los planos proporcionados por la dirección técnica del teatro y especialmente por discretizar la zona de los palcos y anfiteatros con superficies de 1 metro de longitud. Otro elemento de especial complejidad es la asignación de los materiales acústicos a las diferentes superficies del modelo. Por parte de la dirección técnica del teatro no se proporcionó la memoria de calidades y ha habido que realizar una tarea costosa de investigación de los materiales existentes en el teatro y buscar en bases de datos de materiales las características acústicas de materiales lo más similares posible a los existentes en la realidad.

El proceso de validación, empleando la teoría estadística como punto de partida, permite realizar una primera validación del modelo de forma más o menos rápida, pero que no siempre lleva a resultados satisfactorios. El parámetro que se emplea en esta primera validación es el tiempo de reverberación y posiblemente no sea este el mejor parámetro para completar el proceso de validación. Es necesaria una segunda etapa de validación del modelo empleando la teoría geométrica. Este segundo paso es muy costoso a nivel computacional y no siempre se obtienen unos resultados óptimos. Algunos aspectos a tener en cuenta son las características de difusión de los materiales que se han asignados a las diferentes superficies, especialmente en los parapetos de los palcos, que en el caso del Teatro Arriaga con de hierro fundido con na densidad superficial relativamente baja debido a los relieves huecos que presentan.

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] Loroño Parla, B., Romero Cereceda B., "Estudio Acústico del Teatro Arriaga de Bilbao", Proyecto Fin de Grado, 2016, 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.