

PROYECTO FIN DE GRADO

TÍTULO: DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO GEOMÉTRICO PARA EL ESTUDIO ACÚSTICO DEL TEATRO PRINCIPAL DE MORA (TOLEDO)

AUTOR/A: Marcos Arreza Jiménez

TITULACIÓN: Sonido e Imagen

DIRECTOR/A: Francesca Balestra

TUTOR/A: Juan José Gómez Alfageme

DEPARTAMENTO: Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones

VºBº TUTOR/A

Miembros del Tribunal Calificador:

PRESIDENTE/A: José Luis López Presa

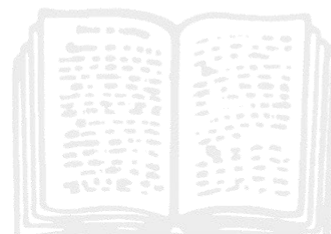
TUTOR/A: Juan José Gómez Alfageme

SECRETARIO/A: Elena Blanco Martín

Fecha de lectura:

Calificación:

El Secretario/La Secretaria,



DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO GEOMÉTRICO PARA EL ESTUDIO
ACÚSTICO DEL TEATRO PRINCIPAL DE MORA (TOLEDO)

RESUMEN

En la memoria de este proyecto, se expone en profundidad toda la información y el proceso seguido para el diseño y validación del Teatro Principal de la localidad de Mora, en la provincia de Toledo.

El proyecto se basa en la creación de un modelo virtual 3D semejante al recinto interior de este teatro (mediante el software *SketchUp*), a partir de los planos de AutoCAD de este. El modelo debe tener similares características acústicas y arquitectónicas, pero ha de ser más simple que la realidad de la sala.

Tras el diseño, se realiza la simulación acústica gracias al software EASE. Para contrastar los datos, se utilizan los datos de las medidas *in situ* siguiendo la Norma UNE-EN ISO 3382-1:2010 donde se detalla el proceso de medida. Para realizar estas medidas, se hace uso del equipamiento cedido por la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación.

El objetivo de este proyecto se centra en conseguir la validación del modelo virtual comparando los datos obtenidos *in situ* con los de la simulación. La semejanza se mide mediante la métrica JND (*Just Noticeable Difference*), que indica la percepción de desviación entre dos parámetros. Para la validación, se hace uso de las teorías acústica estadística y acústica geométrica, ya que son las dos principales fuentes de cálculo de parámetros en este proyecto. Los datos son procesados en Excel.

Este proyecto final de grado forma parte de una base de datos en la que existen proyectos similares de otros teatros por toda España con el fin de adquirir un gran valor en entornos de investigación e innovación para el futuro.

ABSTRACT

In this project report, all the information and the process followed for the design and validation of the Teatro Principal of the town of Mora, in the province of Toledo, is exposed in depth.

This project is based on the creation of a 3D virtual model similar to the interior enclosure of this theatre (using SketchUp software), from the AutoCAD plans of the theatre. The model must have similar acoustic and architectural characteristics, but it must be simpler than the reality of the theatre.

After the design, the acoustic simulation is carried out using EASE software. To contrast the data, the data from the in-situ measurements are used following the UNE-EN ISO 3382-1:2010 Standard where the measurement process is detailed. To perform these measurements, the equipment provided by the Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación is used.

The objective of this project is to validate the virtual model by comparing the data obtained in situ with the simulation data. The similarity is measured using the JND (Just Noticeable Difference) metric, which indicates the perceived deviation between two parameters. For this validation, use is made of statistical acoustics and geometric acoustics theories since they are the two main sources of parameter calculation in this project. The data are processed in Excel.

This final degree project is part of a database in which there are similar projects of other theatres throughout Spain in order to acquire a great value in research and innovation environments for the future.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	12
2.	OBJETIVOS.....	14
3.	ESPECIFICACIONES Y RESTRICCIONES DE DISEÑO	16
4.	CONTEXTO HISTÓRICO.....	18
5.	INTRODUCCIÓN TEÓRICA.....	20
5.1.	Teorías Acústicas.....	20
5.2.	Parámetros Acústicos	20
5.2.1.	Parámetros temporales.....	21
5.2.2.	Parámetros energéticos.....	22
5.2.3.	Parámetros de Espacialidad.....	23
5.2.4.	Parámetros de Inteligibilidad	23
5.3.	MÉTRICA JND.....	24
6.	OBTENCIÓN DE MEDIDAS <i>IN SITU</i>	28
6.1	Proceso de Medida según la Norma UNE-EN ISO 3382-1.....	28
6.1.1	Instrumentación	28
6.1.2	Posiciones de Medida	29
6.2	Instrumentación de Medida	29
6.3	Procedimiento de medida	32
7.	DISEÑO 3D DEL MODELO GEOMÉTRICO DEL TEATRO	36
8.	MODELO GEOMÉTRICO EN EASE	43
9.	PROCESADO DE DATOS	47
9.1	Criterios de procesamiento	47
9.2	Resultado de las medidas <i>in situ</i>	50
9.2.1	Parámetros temporales.....	52
9.2.2	Parámetros energéticos.....	57
9.2.3	Parámetros de Espacialidad.....	61
9.2.4	Parámetros de Inteligibilidad	63
10.	VALIDACIÓN DEL MODELO	65
10.1	Ajuste del Tiempo de Reverberación	65
10.2	Proceso de Cálculo de los Parámetros Acústicos	70
10.3	Presentación de Resultados	71
10.3.1	Resultados en bandas de tercios de octava.	72
10.3.2	Resultados en bandas de Octava.....	86
11.	PRESUPUESTO.....	89
12.	IMPACTO DEL PROYECTO	90
13.	CONCLUSIÓN.....	91
14.	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	93

ANEXO I. RUIDO DE FONDO	95
ANEXO II. ESTUDIO ACÚSTICO DEL TEATRO PRINCIPAL DE MORA.....	97
ANEXO III. PLANOS DEL TEATRO	109

Índice de tablas

Tabla 1. Relación entre AlCons y STI y valoración subjetiva del grado de inteligibilidad. [4]	24
Tabla 2. Escalones JND.	25
Tabla 3. Posiciones de las fuentes en el recinto.	32
Tabla 4. Posiciones de los micrófonos en el recinto.	34
Tabla 5. Condiciones de temperatura, humedad y presión al inicio y final de las medidas.	35
Tabla 6. Filtrado de datos del parámetro C50 [dB].	47
Tabla 7. Formato condicional del parámetro INR.	48
Tabla 8. Porcentaje de valores eliminados por INR.	48
Tabla 9. Criterio de Chauvenet en el parámetro EDT.	50
Tabla 10. Valores eliminados según el criterio de INR y Chauvenet en el parámetro EDT.	50
Tabla 11. EDT medido por zonas.	52
Tabla 12. T20 medido por zonas.	53
Tabla 12. T30 medido por zonas.	54
Tabla 13. RT medido por zonas.	55
Tabla 14. C50 medido por zonas.	57
Tabla 15. C80 medido por zonas.	58
Tabla 16. D50 medido por zonas.	59
Tabla 17. Ts medido por zonas.	60
Tabla 18. LF medido por zonas.	61
Tabla 19. LFC medido por zonas.	62
Tabla 20. Valores de AlCons medido in situ.	63
Tabla 21. Valores de AlCons medido in situ.	64
Tabla 23. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro EDT.	73
Tabla 24. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro RT.	74
Tabla 25. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro T20.	75
Tabla 26. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro T30.	76
Tabla 27. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro C50.	77
Tabla 28. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro C80.	78
Tabla 29. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro D50.	79
Tabla 30. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro Ts.	80
Tabla 31. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro LF.	81
Tabla 32. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro LFC.	82
Tabla 32. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro STI.	83
Tabla 34. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro AlCons.	83
Tabla 39. Presupuesto estimado para la realización del proyecto.	89
Tabla 40. Medidas del ruido de fondo.	95
Tabla 41. EDT medido por zonas en octavas y sin filtrado.	98
Tabla 42. RT medido por zonas en octavas y sin filtrado.	99
Tabla 43. T20 medido por zonas en octavas y sin filtrado.	100
Tabla 44. T30 medido por zonas en octavas y sin filtrado.	101
Tabla 45. C50 medido por zonas en octavas y sin filtrado.	102
Tabla 46. C80 medido por zonas en octavas y sin filtrado.	103
Tabla 47. D50 medido por zonas en octavas y sin filtrado.	104
Tabla 48. Ts medido por zonas en octavas y sin filtrado.	105
Tabla 49. LF medido por zonas en octavas y sin filtrado.	106
Tabla 50. LFC medido por zonas en octavas y sin filtrado.	107
Tabla 51. STI medido por zonas en octavas y sin filtrado.	108

Tabla 52. ALCONS medido por zonas en octavas y sin filtrado. 108

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Fachada del Teatro Principal.....	18
Ilustración 2. Estimadores del tiempo de reverberación [3]	22
Ilustración 3. Obtención del AICons (%) a partir del RT y L_D-L_R. [4].....	24
Ilustración 4. Fuente sonora omnidireccional AVM DO-12. [5].....	29
Ilustración 5. Micrófono omnidireccional AKG CK 92. [6].....	29
Ilustración 6. Micrófono bidireccional AKG CK 94. [7].....	30
Ilustración 7. Preamplificador de micrófono AKG SE 300B. [8].....	30
Ilustración 8. Sonómetro Brüel & Kjaer 2260. [9].....	30
Ilustración 9. Calibrador Brüel & Kjaer 4231. [10].....	31
Ilustración 10. Interfaz de Audio MOTU Ultra Lite MK3. [11].....	31
Ilustración 11. Amplificador de Potencia Crown XLS 2002 Drive Core. [12].....	31
Ilustración 12. Diagrama de bloques de la conexión entre equipos para mediciones “in situ”. ...	32
Ilustración 13. Representación gráfica de la ubicación de los micrófonos en platea y planta 1..	35
Ilustración 14. Plano de la planta del recinto.	36
Ilustración 15. Plano del alzado del recinto.	36
Ilustración 16. Modelado caja escénica y patio de butacas.....	37
Ilustración 17. Modelado planta superior y paredes de caja escénica.....	37
Ilustración 18. Modelado de sillas, butacas y detalles.	38
Ilustración 19. Vista desde caja escénica del modelado de cortinas, butacas y sillas.....	38
Ilustración 20. Etiquetas asignadas a capas.....	39
Ilustración 21. Teatro con capas asignadas.	39
Ilustración 22. Diseño SketchUp finalizado.....	40
Ilustración 23. Vista desde el escenario.	40
Ilustración 24. Vista de palcos laterales desde el escenario.....	41
Ilustración 25. Vista de asientos a doble altura en planta superior.	41
Ilustración 26. Vista desde planta superior.	42
Ilustración 27. Vista desde planta superior.	42
Ilustración 28. Vista desde planta superior.	43
Ilustración 29. Lista de materiales proporcionados por GAMMA.	44
Ilustración 30. Asignación de caras dobles a las caras de cada elemento.....	44
Ilustración 31. Mensaje de EASE informando que no hay errores.	45
Ilustración 32. Fuentes sonoras y micrófonos colocados y orientados.	45
Ilustración 33. Trazado de rayos del modelo en EASE.....	46
Ilustración 34. Formato condicional del parámetro INR.....	47
Ilustración 35. Distribución estadística de Gauss. [16].....	49
Ilustración 36. Representación gráfica de valores EDT medido.....	52
Ilustración 37. Representación gráfica de valores T20 medido.	53
Ilustración 38. Representación gráfica de valores T30 medido.	54
Ilustración 39. Representación gráfica de valores RT medido.....	55
Ilustración 40. Representación gráfica de la comparativa de los estimadores del tiempo de reverberación.....	56
Ilustración 41. Representación gráfica de valores C50 medido.	57
Ilustración 42. Representación gráfica de valores C80 medido.	58
Ilustración 43. Representación gráfica de valores D50 medido.....	59
Ilustración 44. Representación gráfica de valores Ts medido.....	60
Ilustración 45. Representación gráfica de valores LF medido.	61
Ilustración 46. Representación gráfica de valores LFC medido.	62
Ilustración 47. Representación gráfica de los valores obtenidos de AICons medido in situ.....	63
Ilustración 48. Representación gráfica de los valores obtenidos de STI medido in situ.....	64
Ilustración 49. Tiempo de reverberación calculado con el método Eyring.....	65
Ilustración 50. Ventana Optimize RT.	65

Ilustración 51. Tabla de valores de Optimize RT.....	66
Ilustración 52. Material 090 (izquierda) y material 092 (derecha).	67
Ilustración 53. Material 035 (izquierda) y material 039 (derecha).	67
Ilustración 54. Material 150 (izquierda) y material 152 (derecha).	67
Ilustración 55. Cálculo de JND para los parámetros C50, C80, T30 y RT tras primeras modificaciones.	68
Ilustración 56. Material 039 (izquierda) y material 041 (derecha).	68
Ilustración 57. Material 131 (izquierda) y material 132 (derecha).	69
Ilustración 58. Material 092 (izquierda) y material 097+s (derecha).....	69
Ilustración 59. Cálculo de JND para los parámetros C50, C80, T30 y RT tras las modificaciones.	69
Ilustración 60. Menú Mapping de la ventana Area Mapping.....	70
Ilustración 61. Ventana Standard Mapping.....	71
Ilustración 62. Ventana AURA Mapping.....	71
Ilustración 63. Ajuste de mayor resolución en la ventana AURA Mapping.....	71
Ilustración 64. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro EDT.....	73
Ilustración 65. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro RT.....	74
Ilustración 66. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro T20.	75
Ilustración 67. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro T30.	76
Ilustración 68. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro C50.....	77
Ilustración 69. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro C80.....	78
Ilustración 70. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro D50.....	79
Ilustración 71. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro Ts.....	80
Ilustración 72. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro LF.....	81
Ilustración 73. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro LFC.....	82
Ilustración 74. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro STI.....	83
Ilustración 75. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro AICons.....	83
Ilustración 76. Comparación entre datos medidos y simulados en octava. Parámetro EDT.....	74
Ilustración 77. Comparación entre datos medidos y simulados en octava. Parámetro EDT.....	74
Ilustración 78. Comparación entre datos medidos y simulados en octava. Parámetro T20.....	75
Ilustración 79. Comparación entre datos medidos y simulados en octava. Parámetro T30.....	75
Ilustración 80. Comparación entre datos medidos y simulados en octava. Parámetro C50.....	76
Ilustración 81. Comparación entre datos medidos y simulados en octava. Parámetro C80.....	76
Ilustración 82. Comparación entre datos medidos y simulados en octava. Parámetro D50.....	77
Ilustración 83. Comparación entre datos medidos y simulados en octava. Parámetro Ts.....	77
Ilustración 84. Comparación entre datos medidos y simulados en octava. Parámetro LF.....	78
Ilustración 85. Comparación entre datos medidos y simulados en octava. Parámetro LFC.....	78
Ilustración 86. Comparación entre datos medidos y simulados en octava. Parámetro STI.....	79
Ilustración 87. Comparación entre datos medidos y simulados en octava. Parámetro AICons... ..	79

1. INTRODUCCIÓN

En este documento se describe el proceso completo de la realización de un proyecto de final de grado enfocado en la acústica arquitectónica y de salas, dentro del Grado de Ingeniería de Sonido e Imagen.

Este proyecto forma parte de un programa que pretende recopilar un conjunto de modelos de edificios, especialmente teatros, de forma digital en una base de datos. En estos modelos se incluyen tanto las propiedades acústicas de los teatros reales como sus configuraciones arquitectónicas en un modelo virtual de 3 dimensiones. Este tipo de modelos, pueden ser válidos en el futuro para realizar estudios acústicos de cada recinto, sin necesidad de acudir al teatro para realizar determinadas medidas *in situ*. Esto es debido a que, en algunas ocasiones, es complicado obtener el permiso de estos recintos para llevarlas a cabo.

Con este programa de proyectos, es posible realizar cualquier configuración deseada en un recinto en particular, para llevar a cabo el acto o función que se desee y configurar la acústica y el sistema de sonido acorde a las necesidades del programa.

La acústica de cualquier recinto de espectáculos es muy importante, puesto que la calidad de escucha de los oyentes dependerá de este parámetro fundamentalmente. El recinto que se estudia en este proyecto está destinado en gran parte a representación de obras teatrales, por lo que su estudio es de vital importancia a la hora de modelar su interior, permitiendo ajustar la sala a dicha función para la que está destinada. Conocer la actividad que se lleva a cabo en un recinto es de vital importancia, puesto que la configuración acústica que necesita una iglesia no es la misma que una sala de conferencias.

En este proyecto en concreto, se ha realizado el estudio sobre el Teatro Principal de Mora, en la provincia de Toledo, el cual consta de una configuración a la italiana.

El trabajo para el desarrollo del proyecto consta de varias fases. La primera, consiste en la medición *in situ* de los diferentes parámetros acústicos del teatro. A continuación, se realiza el modelado 3D del teatro y, por último, se valida el modelo con los valores obtenidos en las medidas del teatro.

Todas estas fases se detallan en esta memoria paso a paso y de forma detallada, con el objetivo de poder seguir todo el proceso de manera sencilla. También se muestran los resultados obtenidos tras la validación del modelo y la comparativa entre los valores simulados con los reales medidos.

En esta memoria, también se recoge el resultado del diseño 3D del teatro, ajustado para que sea lo más realista posible, y posteriormente, el programa de acústica pueda trabajar con este diseño sin problemas.

2. OBJETIVOS

El principal objetivo de este proyecto es la validación de un modelo geométrico que simule el comportamiento acústico del Teatro Principal de Mora de Toledo.

Para conseguir estos objetivos, se han seguido los pasos detallados en esta memoria. Una vez concluidos todos estos pasos con éxito, se permite llegar al objetivo final del proyecto.

A continuación, se muestran de forma general los pasos y objetivos:

1. Elección del teatro, contacto con éste y obtención del permiso para realizar las correspondientes medidas. Una vez conseguido, se visita el teatro para realizar las medidas *in situ* de los parámetros acústicos del teatro. Estas medidas se realizan siguiendo la Norma UNE-EN ISO 3382-1: 2010 y utilizando el *software* DIRAC.
2. Cuando se obtengan los planos de AutoCAD, los cuales son proporcionados por el teatro, se comienza a realizar el modelo 3D, haciendo uso del *software* SketchUp. Es indispensable que el modelo tenga las proporciones reales del teatro, simplificando detalles, para poder ajustarlo al proceso seguido en el programa de simulación acústica.
3. Una vez realizado el modelo 3D, se procesan los datos obtenidos en las medidas. Estos datos, se obtienen a partir de la respuesta al impulso del teatro, de los cuales se obtienen los parámetros acústicos que caracterizan el recinto.
4. Concluido el procesado de datos, se importa el modelo 3D del teatro al *software* de simulación acústica EASE. Lo primero que se debe comprobar es que el modelo está completamente cerrado, haciendo una simulación del comportamiento acústico del teatro, utilizando como referencia los datos procesados de las medidas del teatro. La selección de los materiales del recinto se debe tener en cuenta para poder ajustar los parámetros acústicos, de forma que se parezca lo máximo posible a la realidad.
5. Los datos obtenidos en estas simulaciones se procesan y comparan con los obtenidos en la medida *in situ* del teatro, realizando posteriormente un análisis del resultado obtenido.
6. Por último, se redacta la memoria del proyecto donde aparece todo el proceso, los datos y resultados obtenidos tras la realización del modelo y la simulación acústica.

3. ESPECIFICACIONES Y RESTRICCIONES DE DISEÑO

Especificaciones:

- Los planos del recinto se diseñarán con herramientas de representación gráfica 2D.
- El modelo arquitectónico simplificado se llevará a cabo con herramientas de representación gráfica 3D.
- El modelo geométrico y el análisis acústico del diseño se obtendrá con un software específico de simulación acústica.
- Las medidas *in situ* siguen la norma UNE-EN ISO 3382: “Medición de parámetros acústicos en recintos”.
- El modelo geométrico será validado según las medidas *in situ*.

Restricciones:

- El modelo geométrico en 3D contendrá simplificaciones que corresponden a criterios acústicos, siempre pensando en la herramienta de simulación que se va a emplear, con el fin de minimizar el número de caras del modelo.
- El software de simulación acústica solo permite trabajar con bandas de frecuencia comprendidas entre 100Hz y 10kHz, por lo que no existirá información de parámetros acústicos fuera de ese rango.
- Será necesario ajustar los requisitos contenidos en la norma UNE-EN ISO 3382 a la geometría y disposición específica del teatro en el momento de la toma de medidas *in situ*.
- La validación del modelo se realizará con respecto de los valores promedio de los parámetros acústicos medidos *in situ*.

4. CONTEXTO HISTÓRICO

El teatro Principal de Mora, ubicado en la provincia de Toledo, fue construido en 1915 por iniciativa privada, año en el que las artes escénicas consiguen gran importancia en la localidad de Mora.

Este teatro ha sufrido una serie de cambios desde su primera construcción. Fue dedicado durante muchos años a sala de cine, hasta que el Ayuntamiento lo adquirió en 1985. Tras su adquisición, se procedió a la rehabilitación de este en 1992, donde se recuperaron los palcos característicos de un teatro a la italiana. Actualmente, está dedicado a teatro y sala de conciertos.

Con relación a su arquitectura, destaca la fachada neoclásica compuesta y rematada por un frontón con el escudo de la localidad.



Ilustración 1. Fachada del Teatro Principal.

La programación llevada a cabo en el Teatro Principal de Mora se divide en tres temporadas: escenarios de primavera, feria de septiembre y escenarios de otoño.

4.1. Especificaciones y dimensiones del teatro

ESPECIFICACIONES DE LA SALA:

Aforo: 535

- Fijos: 429
- Móviles: 106
- En platea: 274
- En palcos: 68
- En piso nº 1: 193

DIMENSIONES DE LA SALA:

- Ancho máximo: 1450 cm

- Fondo desde boca: 1795 cm
- Alto máximo: 910 cm
- Altura a piso nº 1: 310 cm

DIMENSIONES DEL ESCENARIO:

Ancho:

- Corbata: 775 cm
- Boca: 775 cm
- Hombro derecho: 95 cm
- Hombro izquierdo: 240 cm
- Foso escénico: 1110 cm

Fondo:

- Desde Boca: 810 cm
- Hombro derecho: 810 cm
- Hombro izquierdo: 810 cm
- Foso escénico: 845 cm

Alto:

- Boca: 615 cm
- Escenario a Peine: 1130 cm
- Máximo: 260 cm
- Mínimo: 70 cm
- Escenario a Platea: 123 cm
- Foso escénico: 225 cm

5. INTRODUCCIÓN TEÓRICA

En este apartado, se lleva a cabo la introducción teórica de la acústica arquitectónica de salas. Se definen los parámetros más relevantes para comprender el comportamiento de acústico del teatro y para la validación del modelo.

También se muestran las diferentes teorías acústicas que tienen lugar a la hora de proceder con los cálculos y cómo se aplican a este proyecto.

5.1. Teorías Acústicas

Para realizar el estudio del comportamiento acústico de una sala, existen diversas aproximaciones que cuentan con diferentes métodos para la obtención de sus características. En este proyecto, el estudio del recinto se realiza utilizando principalmente dos enfoques: la acústica estadística y la acústica geométrica.

La acústica estadística se basa en la suposición de que el campo sonoro es difuso en toda la extensión del recinto y la energía en cualquier punto del mismo se calcula como la suma energética del campo directo y reverberante. Por ejemplo, EASE, utiliza la ecuación aportada por la teoría estadística del método de *Eyring* para obtener el tiempo de reverberación de una sala.

Este enfoque supone el campo sonoro reverberante de estudio como difuso, es decir, la energía es la misma en cada punto del recinto y es equivalente a la suma de todas las energías de las ondas que llegan a este. Las reflexiones que ocurren en la sala suponen un estudio estadístico, ya que el valor de su energía se obtiene del promedio de todos los rayos que llegan al punto y las fases de las ondas que llegan a este se suponen en una distribución aleatoria. Para hacer uso de este enfoque, también es necesario utilizar una fuente sonora omnidireccional que radie en todas las direcciones.

Los resultados obtenidos con la acústica estadística sobre las cualidades acústicas de la sala son objetivos. Además, cualquier defecto en el comportamiento de la sala se detecta de forma rápida y sencilla. La acústica estadística se utiliza a la hora de obtener los parámetros acústicos, ya que su cálculo y obtención es mucho más sencillo que con la acústica geométrica. [1]

La acústica geométrica es más fiable debido a su complejidad. Este enfoque diferencia la energía de la señal directa con la de las señales reflejadas en las paredes del recinto. Considera que, al chocar con un determinado material, la señal pierde energía debido a las propiedades absorbentes de los materiales de acondicionamiento.

El campo sonoro se considera como una combinación de rayos trazados que siguen este comportamiento acústico. De estos rayos se tiene en cuenta el camino que recorren, los choques que sufren antes de llegar al oyente y las pérdidas que se producen en cada choque. Cuanto menor sea la longitud de onda del rayo respecto a las superficies de la sala más fiables serán los resultados. [2]

Este enfoque es útil para localizar y modificar aspectos negativos de las reflexiones sonoras. En este proyecto, se utiliza a la hora de escoger determinados materiales de construcción para que las superficies del recinto tengan una absorción apropiada. Como resultado, se obtiene que el tiempo de reverberación simulado se aproxime lo máximo posible al tiempo de reverberación medido.

5.2. Parámetros Acústicos

Existen cuatro tipos de parámetros acústicos existentes para el estudio y validación de un teatro: parámetros temporales, parámetros energéticos, parámetros espaciales y parámetros de inteligibilidad. A continuación, se realiza una descripción detallada de las características y utilidades de cada uno de ellos.

5.2.1. Parámetros temporales

Los parámetros temporales son aquellos que miden el tiempo que tarda una señal sonora que excita un recinto en disminuir su nivel de presión sonora un determinado valor. En este caso, el parámetro temporal con más importancia es el tiempo de reverberación. También se estudia el parámetro EDT, o tiempo de caída temprana, que determina la percepción subjetiva de la reverberación del recinto.

Se denomina **tiempo de reverberación** para una frecuencia al tiempo que transcurre desde que la fuente sonora deja de excitar la sala hasta que el nivel de presión sonora decae en 60 dB. Este parámetro indica el grado de viveza que tiene el recinto.

El tiempo de reverberación para una sala de este tipo, en condiciones óptimas de viveza no debe ser superior a 1,5 segundos de media entre las frecuencias de 500 Hz y 1kHz, las cuales son en las que se haya la inteligibilidad del habla humana. Si se supera este tiempo de reverberación, puede suponer un problema para la inteligibilidad de la representación acústica. En cambio, para tiempos de reverberación más bajos de 0,7 segundos, la sala quedaría demasiado seca y se percibiría un ambiente muy artificial. Se busca que el tiempo de reverberación sea lo más plano posible en el rango frecuencial, pero sobre todo en la zona de frecuencias medias.

Este parámetro se puede calcular de varias formas. En este caso, se utilizan las ecuaciones que resultan de la teoría estadística, ya que son más sencillas de obtener. Las ecuaciones (1) y (2) se corresponden a los dos principales métodos:

Tiempo de Reverberación por el método de Sabine:

$$RT = \frac{0,16 \cdot V}{S \cdot \bar{\alpha}} \text{ [s]} \quad (1)$$

Tiempo de Reverberación por el método de Eyring:

$$RT = \frac{0,16 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})} \text{ [s]} \quad (2)$$

Donde V es el volumen de la sala, S la superficie de la sala y $\bar{\alpha}$ el coeficiente de absorción medio.

Realizar una caída de nivel de la señal de 60 dB no siempre es posible, debido a que se necesita una gran cantidad de potencia para ello. Cuando esto ocurre, para medir el tiempo de reverberación se utilizan estimadores del tiempo de reverberación como el **T20** y **T30**.

Estos dos parámetros indican el tiempo que tarda una señal en caer 20 y 30 dB respectivamente, dejando un margen de 5 dB desde el nivel de señal estacionario. Una vez se obtiene su valor, se multiplica este por 3 para T20 o por 2 para T30, obteniendo así un valor que representa el equivalente al tiempo de reverberación del recinto.

En cuanto a parámetros temporales, se tiene en cuenta también el **EDT** o tiempo de caída temprana. Dicho parámetro, muestra una estimación del tiempo de reverberación del recinto medido en una caída de 10 dB, desde el nivel de señal estacionario. El resultado obtenido se multiplica por 6 y se obtiene un valor equivalente al tiempo de reverberación de la sala. Por su parte, muestra la percepción que tiene un oyente de la reverberación de la sala, puesto que indica la caída de nivel que ocurre en los primeros 10 ms aproximadamente. En la ilustración X se muestra cómo se obtienen estos estimadores de forma gráfica.

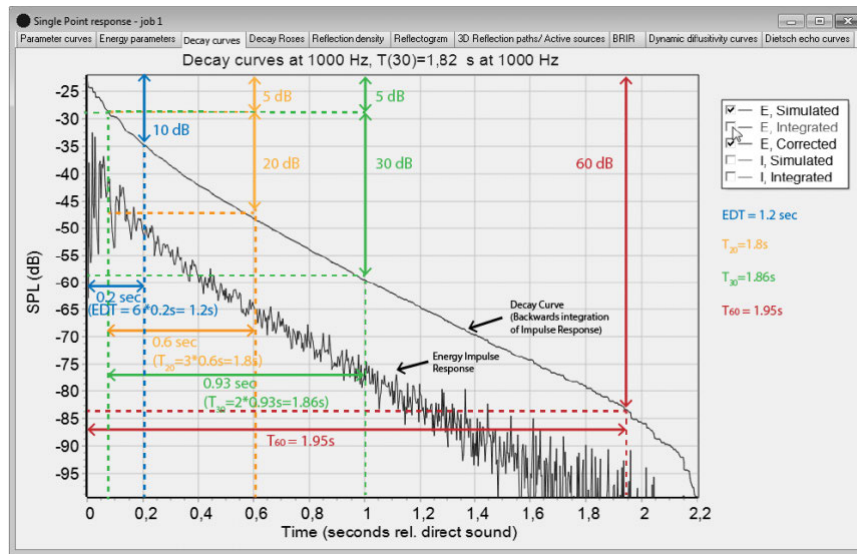


Ilustración 2. Estimadores del tiempo de reverberación [3]

5.2.2. Parámetros energéticos

Estos parámetros acústicos se relacionan con las primeras reflexiones y miden la energía sonora de la señal útil, que se corresponde con la energía que porta la señal directa más las primeras reflexiones. Cuanto mayor sea el valor de estos parámetros, mayor será la inteligibilidad y sonoridad del recinto.

La claridad de la voz o **C50** define la relación entre la energía sonora que llega a un oyente durante los primeros 50 ms tras la señal directa, y la que llega después de estos primeros 50 ms (energías precoces vs energías tardías). En la ecuación (3) se estudia cómo se obtiene este parámetro en función de la presión sonora.

$$C_{50} = 10 \log \left(\frac{\int_{0ms}^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t) dt} \right) [dB] \quad (3)$$

Para que este parámetro sea óptimo en el recinto, su valor debe ser mayor a 2 dB en cada uno de los puntos de medida. Cuanto mayor sea su valor, mayor inteligibilidad y sonoridad de la sala existirá.

Similar a C50, existe el parámetro que representa el índice de claridad musical o **C80**. Al igual que C50, relaciona la energía precoz y la energía tardía que llega en los primeros 80 ms y la que llega después de ese tiempo. Cuanto mayor sea este parámetro, mayor será la cantidad de energía que llega al oyente en las primeras reflexiones, lo cual se puede extrapolar también al C50. Cuando esto ocurre, el parámetro EDT es mucho menor al tiempo de reverberación medio de la sala. De la expresión (4) se puede obtener el valor C80 en función de la presión sonora:

$$C_{80} = 10 \log \left(\frac{\int_{0ms}^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt} \right) [dB] \quad (4)$$

El valor óptimo de este parámetro se encuentra entre -2 y 6 dB.

Por otra parte, el parámetro D50 o **Definición**, es la relación entre la energía que llega al oyente en los primeros 50 ms desde que llega el sonido directo y la energía total que se recibe. El valor de este parámetro es diferente en cada posición del oyente en la sala. Su valor óptimo aparece cuando el oyente se sitúa de frente a la fuente sonora y empeora con la rotación de este. Si el índice de definición es bajo, suele provenir de un alto tiempo de reverberación, pero si por el contrario aumenta demasiado, puede producir sensación de mala calidad acústica. Su valor

óptimo se encuentra cuando $D > 0.5$. Se muestra en la expresión (5) la fórmula para hallar su valor en función de la presión sonora.

$$D = \left(\frac{\int_{0ms}^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{0ms}^{\infty} p^2(t) dt} \right) [-] \quad (5)$$

Por último, el tiempo central o T_s es el tiempo central de la respuesta al impulso cuadrática. Es el tiempo que transcurre entre el origen y el centro de gravedad de la curva de decaimiento energético. Se utiliza para expresar la nitidez que tiene una sala y se calcula según la expresión (6).

$$T_s = 10 \log \left(\frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_{0ms}^{\infty} p^2(t) dt} \right) [ms] \quad (6)$$

Su valor óptimo se establece sobre los 130 ms.

5.2.3. Parámetros de Espacialidad

Estos parámetros se sirven del micrófono bidireccional para reaccionar a la energía acústica procedente de las direcciones laterales, para obtener así una medida de la fracción de la energía lateral que llega al oyente. Se exponen a continuación, los dos parámetros utilizados en este proyecto.

La energía lateral precoz o **LF**, es la fracción de energía que llega lateralmente en los 80 ms iniciales. Se obtiene de la respuesta al impulso captada por el micrófono bidireccional y la captada por el micrófono omnidireccional. El cero del micrófono bidireccional apunta hacia la fuente, para dejar los dos lóbulos de máximo direccionamiento hacia lo que sería cada lado de la cabeza. El valor de LF varía con el cuadrado del coseno del ángulo de incidencia de las reflexiones respecto del eje de máxima sensibilidad del micrófono. La expresión (7) muestra cómo se obtiene este parámetro a partir de presión acústica instantánea de la respuesta al impulso del recinto captada por el micrófono bidireccional (p_L) y la presión acústica instantánea de la respuesta al impulso en el punto de medida captada por el micrófono omnidireccional (p).

$$LF = \left(\frac{\int_{5ms}^{80ms} p_L^2(t) dt}{\int_{0ms}^{80ms} p^2(t) dt} \right) \quad (7)$$

Existe una aproximación a este parámetro, llamado **LFC**, el cual es una alternativa para la obtención de las fracciones de energía lateral, el cual solo varía con el coseno del ángulo y es considerado más preciso que el parámetro LF. La fracción de energía lateral se relaciona con el ancho percibido de la fuente. A continuación, se muestra la forma de obtener LFC (8).

$$LFC = \frac{\int_{5ms}^{80ms} |p_L(t) \cdot p(t)| dt}{\int_{0ms}^{80ms} p^2(t) dt} \quad (8)$$

5.2.4. Parámetros de Inteligibilidad

Este tipo de parámetros estudian el grado de inteligibilidad o comprensión de una señal de voz radiada por la fuente por parte de los oyentes, siendo un requisito indispensable en las salas de representación teatral.

La pérdida de articulación de consonantes o **AlCons**, es el primer parámetro de inteligibilidad que se estudia. Este indica el porcentaje de consonantes que se pierden en la representación y, cuanto mayor sea su valor, peor será la inteligibilidad del recinto. Este parámetro se puede obtener a partir del tiempo de reverberación y la diferencia de niveles de presión sonora entre el

campo directo y el reverberante en cada punto. Para su obtención, se utiliza la expresión (9), teniendo de referencia la ilustración 8.

$$L_D - L_R = 10 \log \left(\frac{Q \cdot R}{r^2} \right) - 17 \text{ [dB]} \quad (9)$$

Siendo Q el factor de directividad de la fuente, R la constante de la sala (m²) y r la distancia del punto a la fuente (m).

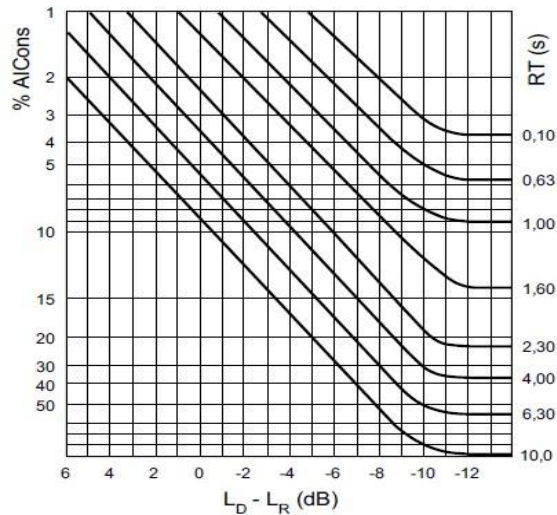


Ilustración 3. Obtención del AICons (%) a partir del RT y L_D-L_R. [4]

El valor del AICons disminuye con la proximidad receptor-fuente y con un menor tiempo de reverberación, es decir, aumenta la inteligibilidad.

Otro parámetro que cuantifica el grado de inteligibilidad de la palabra es el **STI** o Índice de Transmisión de la Palabra. Oscila entre los valores 0 y 1, siendo 0 una inteligibilidad nula y 1 una inteligibilidad óptima. Este depende de la reverberación y del ruido de fondo que existe en la sala.

En la Tabla 1 se muestra la valoración subjetiva del grado de inteligibilidad de los parámetros vistos en este punto.

AICons (%)	STI	Valoración
0 – 1,4	0,88 – 1	Excelente
1,6 – 4,8	0,66 – 0,86	Buena
5,3 – 11,4	0,5 – 0,64	Aceptable
12 – 24,2	0,36 – 0,49	Pobre
27 – 46,5	0,24 – 0,34	Mala

Tabla 1. Relación entre AICons y STI y valoración subjetiva del grado de inteligibilidad. [4]

5.3. MÉTRICA JND

Para evaluar los resultados simulados respecto de los medidos “in situ”, se utiliza el índice JND (*Just Noticeable Difference* o umbral diferencial). Se define como un parámetro que indica la desviación que existe al comparar dos medidas y se utiliza para expresar la notoriedad de un cambio en una determinada magnitud. Esta desviación, se define en escalones que, en función de

cada parámetro, consistirán en un determinado valor de este. Estos escalones, se representan en diferentes colores para así diferenciar rápidamente su valoración. En la Tabla 2 se muestran los niveles de escalón JND considerados en este proyecto.

Escalones JND
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

Tabla 2. Escalones JND.

Si la diferencia existente entre los parámetros medidos y los simulados no pasa del primer escalón, la diferencia no será perceptible, y no será notable de cara a los resultados finales. Si se está entre los escalones 2-4, la diferencia será algo perceptible, pero puede justificarse con una mejora en algún parámetro concreto. En cambio, si el valor del escalón JND alcanza un valor mayor a 4, la desviación entre el valor objetivo y el simulado es tan grande que no es considerada como un resultado válido.

Para poder hallar el valor de JND, se desarrollan diferentes fórmulas matemáticas, ya que, dependiendo del parámetro acústico a analizar, estas varían.

- Parámetros temporales:

Para estos parámetros, la forma de obtener el escalón JND es la misma. Cada escalón se corresponde con un intervalo del 5% del valor medido respecto del simulado. Se puede observar en la expresión (10).

$$\%_{JND} = \frac{|Valor\ medido - Valor\ simulado|}{Valor\ medido} \cdot 100 \quad (10)$$

Dependiendo del resultado obtenido, se puede decir que, si la diferencia entre ambos valores está entre el 0% y el 5% se corresponde con el escalón 1, si está ente el 5% y el 10% con el escalón 2, y así sucesivamente. A partir de este resultado porcentual, se puede calcular el valor del escalón dividiendo el resultado entre 5 y redondeando al entero superior según la expresión (11).

$$Escalón_{JND} = \frac{\%_{JND}}{5} \quad (11)$$

- C50 y C80:

En este caso, el escalón JND se obtiene como la comparación entre los valores medidos con los simulados según la expresión (12). Su resultado, tras el redondeo al entero superior es el valor de su escalón.

$$JND = |Valor\ medido - Valor\ simulado| \quad (12)$$

Cada 1 dB se corresponde con 1 escalón, por lo que, si la diferencia entre los valores está entre 0 y 1 se corresponde al escalón 1, entre el 1 y el 2 al escalón 2, etc.

- Definición, LF y LFC:

El escalón JND en estos parámetros se corresponde con un intervalo de 0,05 unidades, estando el primer escalón entre 0 y 0,05, el segundo entre 0,05 y 0,1, etc. Su valor se obtiene a través de la expresión (13).

$$JND = \frac{|Valor\ medido - Valor\ simulado|}{0,5} \quad (13)$$

- Ts:

El escalón JND de este parámetro se corresponde con un intervalo de 10 ms en la diferencia entre los valores medido y simulado, estando el primer escalón entre 0 y 10 ms, el segundo entre 10 y 20, etc. La fórmula para su obtención se muestra en la expresión (14).

$$JND = \frac{|Valor\ medido - Valor\ simulado|}{10} \quad (14)$$

- STI:

Este parámetro presenta un escalón cada intervalo de 0,03 unidades en la diferencia entre el valor medido y simulado, estando el escalón 1 entre 0 y 0,03, el escalón 2 entre 0,03 y 0,06, etc. El índice de STI es un valor entre 0 y 1 por lo que este escalón es pequeño y se obtiene mediante la expresión (15).

$$JND = \frac{|Valor\ medido - Valor\ simulado|}{0,03} \quad (15)$$

- AICons:

El parámetro AICons presenta un escalón cada intervalo de 2 unidades porcentuales en la diferencia entre el valor medido y el simulado, estando el primer escalón entre 0 y 2, el segundo entre 2 y 4, etc. Su valor se obtiene mediante la expresión (16).

$$JND = \frac{|Valor\ medido - Valor\ simulado|}{2} \quad (16)$$

6. OBTENCIÓN DE MEDIDAS *IN SITU*

Para llevar a cabo la realización de este proyecto, se debe extraer información previa a la visita al teatro, como son los planos colgados en la web de este y en la web del MIRE. Este paso previo es fundamental, ya que la base del proyecto depende en principalmente en la recopilación de planos que representen de manera precisa el teatro real. Este trabajo, junto con la documentación obtenida en la visita presencial, repercutirá en la calidad del proyecto.

El primer paso es para la realización de este proyecto es realizar las medidas de los parámetros acústicos en el Teatro Principal de Mora para así, tener una referencia a la hora de realizar la simulación. Para realizar estas medidas se ha seguido la norma UNE-EN ISO 3382-1 [13] la cual manifiesta el material necesario que se ha de utilizar para la realización de las medidas y en qué condiciones.

En este apartado, se detalla todo el proceso de medida según la norma, la instrumentación utilizada y la elección de posiciones de micrófonos y fuentes en el anfiteatro.

6.1 Proceso de Medida según la Norma UNE-EN ISO 3382-1

Esta parte de la norma ISO 3382 se utiliza para la obtención del tiempo de reverberación de un recinto de espectáculos a partir de respuestas al impulso y ruido ininterrumpido. También describe el proceso para la obtención de otros parámetros acústicos importantes, como los que se detallan en el capítulo 4.

Describe la instrumentación a utilizar, el proceso de medida y el método de evaluación de datos, además de la presentación de resultados mediante un informe. Su fin es la aplicación de las técnicas de medición numéricas modernas y la evaluación de los parámetros acústicos de una sala a partir de las respuestas al impulso.

Antes de comenzar las mediciones, se debe medir la temperatura ambiente, la humedad relativa del recinto y la presión atmosférica.

Al hacer uso de esta norma, se asegura que las mediciones acústicas se realicen de acuerdo con los estándares reconocidos internacionalmente, lo que significa obtener resultados fiables y comparables.

6.1.1 Instrumentación

En este apartado se describen las características que deben tener los instrumentos de medida según la norma.

La fuente por utilizar debe ser lo más omnidireccional posible y producir un nivel de presión sonora suficiente para que las curvas de decaimiento de energía tengan el rango dinámico mínimo requerido sin ruido de fondo. El nivel de la fuente debe estar al menos 45 dB por encima del ruido de fondo. La desviación de directividad máxima es aceptable si en las octavas de 125 Hz, 250 Hz y 500 Hz no supera 1 dB, en la de 1 kHz no supera 3 dB, en la de 2 kHz no supera 5 dB y en la de 4 kHz no supera 6 dB, para un ángulo de 30°. La distancia entre la fuente y el micrófono debe ser como mínimo 1,5 m. Además, para considerar válida esta medición, deben existir al menos dos posiciones de fuente, obteniendo así una representación más precisa de la propagación del sonido en el espacio.

El micrófono por utilizar debe ser omnidireccional para detectar la presión acústica, pudiendo conectarlo a un amplificador con filtros y un analizador de señal o a un registro de señal. Debe tener un tamaño lo más pequeño posible, con diafragma máximo de 13 mm, ya que ofrecen una mejor respuesta en frecuencia y menor interferencia con el campo sonoro en la sala. El equipo de medida debe cumplir los requisitos de un sonómetro de tipo 1.

Además, no debe existir sobresaturación en ninguna fase del proceso de medida.

6.1.2 Posiciones de Medida

Como ya se ha comentado anteriormente, deben existir 2 posiciones de fuentes, colocadas a 1,5 m sobre el suelo y en las posiciones de las fuentes sonoras naturales que habría en el recinto.

Los micrófonos se deben colocar en posiciones donde se encuentren habitualmente los oyentes, representando la totalidad del espacio. Estas posiciones deben estar alejadas unas de otras al menos 2 metros (media longitud de onda) y 1 metro (un cuarto de longitud de onda) de las superficies reflectantes más cercanas. La altura debe ser de 1,2 m sobre el suelo de la sala, lo que se corresponde con la altura media de un oyente sentado. Se debe evitar colocar posiciones demasiado cercanas a la fuente.

6.2 Instrumentación de Medida

En este apartado se describen los instrumentos de medición que son necesarios para llevar a cabo el proceso de medida *in situ* en dicho recinto. El material que se describe a continuación ha sido cedido por la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación, bajo la supervisión del profesor de la escuela y tutor de este proyecto, Juan José Gómez Alfageme. Este equipamiento cumple con los criterios de la norma UNE-EN ISO 3382-1.

- Se utiliza como fuente sonora la fuente omnidireccional AVM DO-12. Esta fuente cuenta con una potencia máxima de entrada de 600W y una impedancia de 10 Ohm. El nivel de presión acústica que es capaz de generar es de 120 dB en bandas de octavas que comprenden el rango desde 80 Hz hasta 6,3 kHz. Está formado por 12 altavoces, cada uno en una cara del dodecaedro, generando así un campo sonoro difuso esférico.



Ilustración 4. Fuente sonora omnidireccional AVM DO-12. [5]

- Como micrófono, se utiliza un AKG CK 92. Se trata de un micrófono de condensador omnidireccional, con una sensibilidad de 13 mV/Pa y una señal a ruido de 77 dBA. Su impedancia es de 200 Ohm y su respuesta en frecuencia abarca desde 20 Hz hasta 20 kHz, es decir, el rango completo de frecuencia audible.



Ilustración 5. Micrófono omnidireccional AKG CK 92. [6]

- Complementario al primer micrófono, se utiliza también el micrófono de condensador bidireccional AKG CK 94. Su sensibilidad es de 10 mV/Pa y su señal a ruido de 72 dBA. Su impedancia, al igual que en el CK 92, es de 200 Ohm y su rango de respuesta en frecuencia es de 20 Hz a 20 kHz. La utilización de este micrófono se limita únicamente a obtener la medida de la eficiencia lateral de la sala.



Ilustración 6. Micrófono bidireccional AKG CK 94. [7]

- Acompañando a los micrófonos, se utiliza un preamplificador AKG SE 300B. Su relación señal a ruido es de 77 dBA y cuenta con un switch de atenuación y un filtro paso alto. En nuestro caso, se usa el modo respuesta plana.



Ilustración 7. Preamplificador de micrófono AKG SE 300B. [8]

- Para medir el ruido de fondo y calibrar las medidas de los micrófonos, se utiliza el sonómetro Brüel y Kjaer 2260. Es un sonómetro que cumple con los requisitos de la norma UNE-EN 61672-1 al ser de tipo 1. Está equipado con un micrófono, filtro, conversor y analizador de datos acústicos.



Ilustración 8. Sonómetro Brüel & Kjaer 2260. [9]

- Para llevar a cabo la calibración de todos los aparatos mencionados anteriormente, se hace uso del calibrador Brüel & Kjaer 4231. Según la norma UNE-EN 60942 es un calibrador de tipo 1. Se debe calibrar antes y después de realizar las medidas.



Ilustración 9. Calibrador Brüel & Kjaer 4231. [10]

También, para analizar los datos y permitir el registro de estos, se llevan los siguientes equipos.

- Ordenador portátil ASUS, utilizado para generar y analizar las señales acústicas necesarias a través del software DIRAC 6.0, desarrollado por Brüel y Kjaer. Este software genera un barrido en frecuencia exponencial para después obtener la respuesta al impulso, mediante la integración de la señal captada del micrófono y los parámetros necesarios para realizar este proyecto.
- Interfaz de audio MOTU Ultralite MK3. Este dispositivo permite el transito de la señal digitalizada al ordenador. La frecuencia de muestreo se configura a 48 kHz. Cuenta con dos preamplificadores para entradas de micro/línea y 8 salidas analógicas. Con esta tarjeta de sonido, se transmite la señal hacia el amplificador y se recoge la señal captada por los micrófonos.



Ilustración 10. Interfaz de Audio MOTU Ultra Lite MK3. [11]

- El amplificador utilizado en la salida de señal es el Crown XLS 2002 Drive Core. La señal que sale de la interfaz de audio entra en el amplificador para posteriormente enviarlo a la fuente sonora. Es utilizado para conseguir un nivel de señal suficiente en la sala. Cuenta con dos canales, con una potencia de 650W/40Ohm o un solo canal de 1300W/80Ohm si se hace uso del modo *bridge*, el cual se utiliza en este proyecto.



Ilustración 11. Amplificador de Potencia Crown XLS 2002 Drive Core. [12]

Además, son necesarios una serie de accesorios como un pie de micrófono, una pinza doble para micrófonos, trípode para la fuente omnidireccional, alargador doble XLR, alargador de red eléctrica, cinta métrica, medidor láser y medidor de temperatura y humedad.

A continuación, se muestra en detalle el conexionado de todos los elementos mencionados implicados en el proceso de medida, mediante un diagrama.

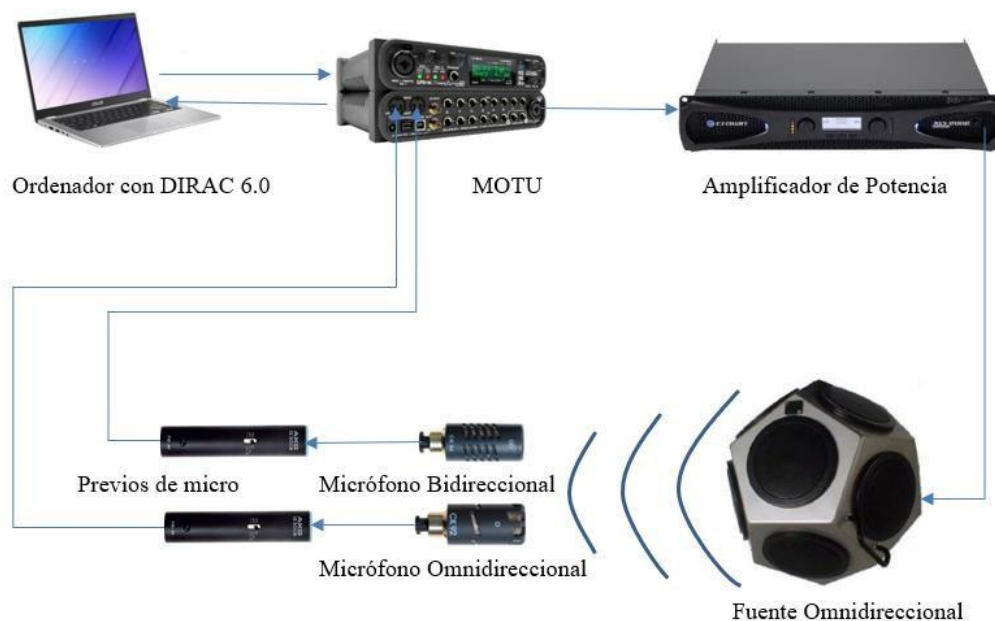


Ilustración 12. Diagrama de bloques de la conexión entre equipos para mediciones “in situ”.

6.3 Procedimiento de medida

Para llevar a cabo las medidas de este proyecto, se utiliza el método de ingeniería y precisión. De esta forma, se obtiene la respuesta impulsiva integrada de una señal emitida por la fuente sonora y recogida por el receptor. La señal emitida es un barrido en frecuencia de tonos puros, que abarca el rango de frecuencias de 20 Hz a 20 kHz. La medida será considerada válida cuando el índice impulso a ruido (INR) es mayor a 35 dB.

En primer lugar, se establecen las posiciones de la fuente y micrófonos, cubriendo estos toda la superficie del recinto, según las especificaciones de la norma UNE-EN ISO 3382-1 [13].

Para las fuentes, se utiliza la nomenclatura F01 y F02, siendo las posiciones en las que se colocan en el escenario. En la tabla 3 se muestran las posiciones en el plano.

<i>Nº FUENTE</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>
<i>F01</i>	0	-1.5	1,5
<i>F02</i>	2	-3.5	1,5

Tabla 3. Posiciones de las fuentes en el recinto.

Los micrófonos tienen nomenclaturas diferentes, dependiendo de su posición o finalidad. En este caso se distinguen 3 tipos. La tabla 4 recoge la disposición y coordenadas de las fuentes y los micrófonos. En la figura 13, se puede observar la disposición de los micrófonos sobre el plano con la correspondiente asignación de colores.

- Micrófonos normales. Son los micrófonos que se encuentran repartidos por la parte derecha de todo el teatro, visto desde el escenario, en los asientos del público. Se nombran como M01, M02, M03, etc. (en rojo en la figura 13)
- Micrófonos de control. Son los simétricos respecto del eje “Y” de algunos micrófonos normales. Se utilizan para comprobar que las medidas son aproximadamente iguales a las de su imagen, comprobando así la simetría de la sala. La nomenclatura es MC01, MC02, etc. (en verde en la figura 13)

- Micrófonos del eje. Se encuentran en el eje del teatro en diferentes posiciones. Su nomenclatura es ME01, ME02, etc. (en azul en la figura 13)

Una vez colocadas todas las posiciones de micrófono por el teatro y la fuente en el escenario, comienza el proceso de medición. Se debe tener en cuenta, que todas las puertas deben permanecer cerradas y las cortinas corridas.

En primer lugar, se realiza una medida de ruido de fondo, humedad y temperatura. También se apunta el nivel de presión atmosférica en ese instante. Seguidamente, se coloca el par de micrófonos en la primera posición, y la fuente en su primera posición. A continuación, se genera la señal de barrido sinusoidal que se genera desde el PC con el software DIRAC, el cual calcula la respuesta al impulso en esa posición de micrófonos y obtiene todos los parámetros acústicos necesarios. Cabe a destacar que, en cada posición de micrófono, la medida se realiza dos veces. Una vez realizadas, se cambia la fuente a su segunda posición, y se repite el mismo procedimiento. Este procedimiento se lleva a cabo con todas las posiciones que existen en la sala.

Para comprobar que la medida es válida, se comprueba en cada medida que en las bandas de frecuencia más relevantes (entre 125 Hz y 10 kHz) el INR es superior a 35 dB. Si el valor es menor, se debe repetir la medida.

Para finalizar, se vuelve a medir el ruido de fondo, temperatura, humedad y comprobar la presión atmosférica.

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO GEOMÉTRICO PARA EL ESTUDIO
ACÚSTICO DEL TEATRO PRINCIPAL DE MORA (TOLEDO)

PLANTA	Nº MICRO	FILA	BUTACA	PALCO	COORDENADAS		
					X	Y	Z
0	F01	-	-	-	0,00	-1,50	0,00
	F02	-	-	-	2,00	-3,50	0,00
	M01	1	9	-	3,00	2,70	-0,11
	M02	4	5	-	1,80	5,30	0,17
	M03	6	13	-	4,20	7,00	0,35
	M04	8	11	-	3,60	8,80	0,53
	M05	10	7	-	2,60	10,50	0,71
	M06	12	3	-	1,20	12,25	0,88
	M07	14	15	-	4,70	14,00	1,05
	M08	16	7	-	2,60	15,80	1,20
	M09	-	-	1	5,20	2,00	1,23
	M10	-	-	5	6,00	6,00	4,08
	M11	-	-	9	6,30	10,40	1,20
	MC03	6	14	-	-4,20	7,00	0,35
	MC06	12	4	-	-1,20	12,25	0,88
	MC07	14	16	-	-4,70	14,00	1,05
	MC09	-	-	2	-5,20	2,00	1,23
	MC11	-	-	10	-6,30	10,40	1,20
	MC01	1	10	-	-3,00	2,70	-0,11
	ME01	2	EJE	-	0,00	3,50	0,00
ME02	9	EJE	-	0,00	9,60	0,60	
ME03	16	EJE	-	0,00	16,20	1,30	
1	M12	1	9	-	3,00	15,60	5,20
	M13	3	3	-	1,10	17,40	6,22
	MC13	3	4	-	-1,10	17,40	6,22
	M14	-	5	-	1,70	13,70	4,03
	M15	-	17	-	4,80	13,00	4,06
	M16	-	31	-	7,30	13,10	4,80
	M17	-	11	-	6,50	10,00	4,58
	M18	-	35	-	5,90	8,60	4,06
	M19	-	-	P3	6,00	4,00	4,07
	MC19	-	-	P4	-6,00	4,00	4,07
	MC17	-	12	-	-6,50	10,00	4,58
	MC15	-	20	-	-4,80	13,00	4,06
	MC14	-	6	-	-1,70	13,70	4,03
	ME04	-	EJE	-	0,00	13,80	4,10
	ME05	4	EJE	-	0,00	18,00	6,70

Tabla 4. Posiciones de los micrófonos en el recinto.

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO GEOMÉTRICO PARA EL ESTUDIO ACÚSTICO DEL TEATRO PRINCIPAL DE MORA (TOLEDO)

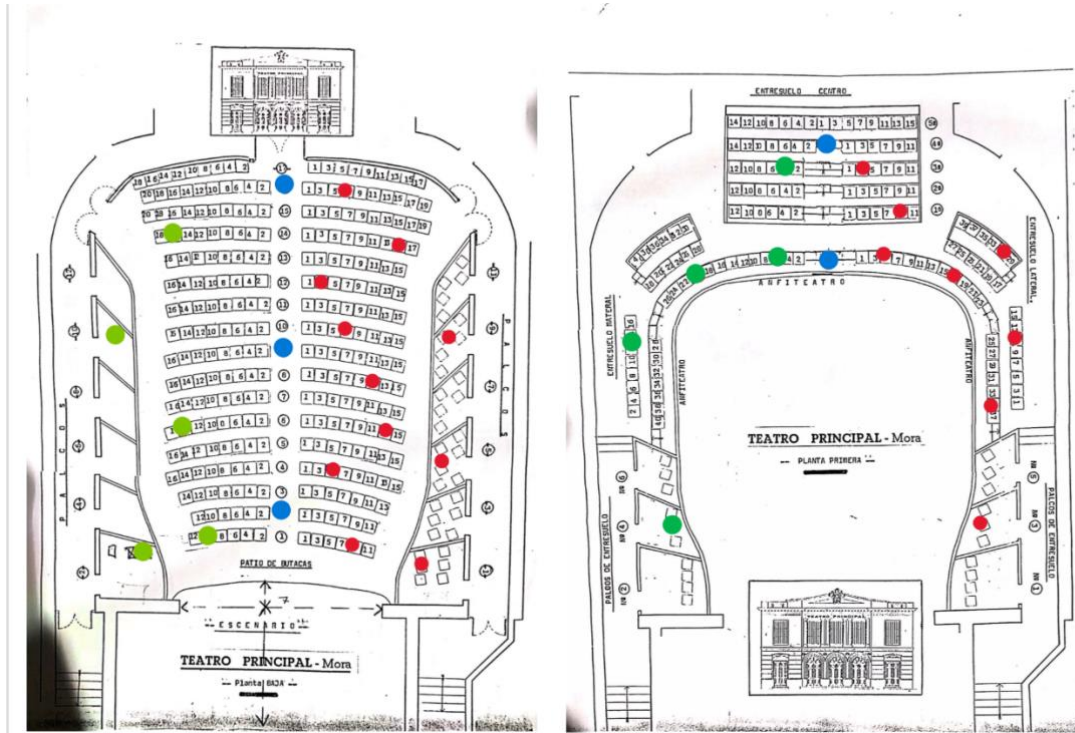


Ilustración 13. Representación gráfica de la ubicación de los micrófonos en platea y planta 1.

La medición in situ se llevó a cabo el día 9 de febrero de 2023.

HORA	TEMPERATURA	HUMEDAD	PRESION
10:30	13'6 °C	43'5%	1032 hPa
14:00	13'2 °C	43'9%	1032 hPa

Tabla 5. Condiciones de temperatura, humedad y presión al inicio y final de las medidas.

7. DISEÑO 3D DEL MODELO GEOMÉTRICO DEL TEATRO

En este apartado, se detalla el proceso de creación del modelo arquitectónico simplificado del Teatro Principal de Mora (Toledo) utilizando el software *SketchUp*. En primer lugar, se utilizan los planos del recinto en 2D, en formato AutoCAD, descargados desde la página web MIRE, cuyo fin es conseguir un modelo arquitectónico lo más parecido a la realidad. [14]

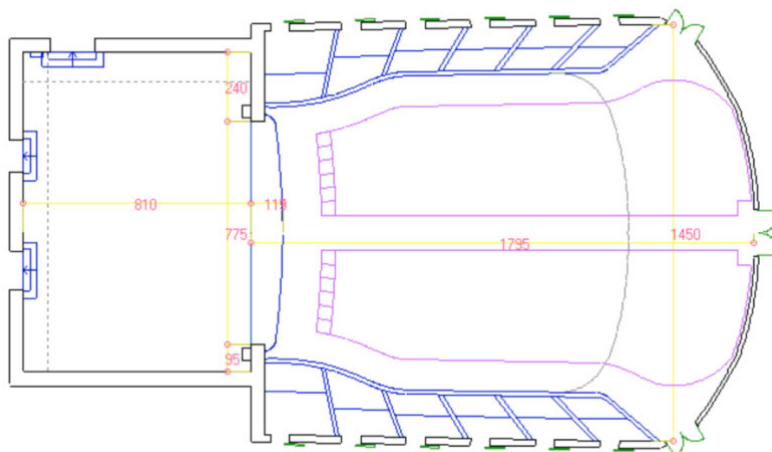


Ilustración 14. Plano de la planta del recinto.

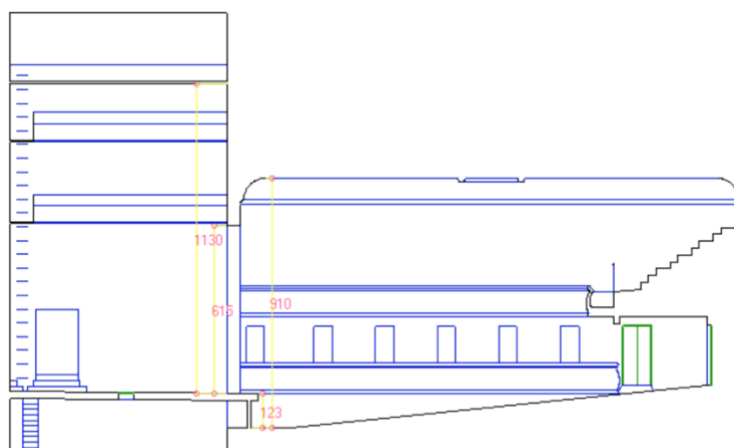


Ilustración 15. Plano del alzado del recinto.

Una vez simplificado el plano en AutoCAD, se importa a *Sketchup* con las capas necesarias y útiles para el diseño. Se utiliza el plano en planta como referencia y se ajusta posteriormente la vista lateral para construir las caras a partir de ambos planos. Las paredes límites con el exterior de la sala, se dejan sin volumen.

Se definen las caras mediante la herramienta lápiz, repasando las líneas de los planos de AutoCAD, con la ayuda de extrusiones cuando sea necesario. Al crear las caras, es necesario tener en cuenta las dimensiones reales de los elementos, con la ayuda de los planos de las secciones transversales y longitudinales.

Se recomienda ir agrupando las caras en capas, según el material de cada una, para posteriormente, facilitar la asignación de materiales y colores en EASE.

A la hora de modelar, la metodología empleada consiste en modelar únicamente la mitad del recinto y una vez terminada, se duplica respecto al eje longitudinal, ya que ambas partes son simétricas respecto del eje “Y”.

En primer lugar, se modela la caja escénica, seguido del patio de butacas.

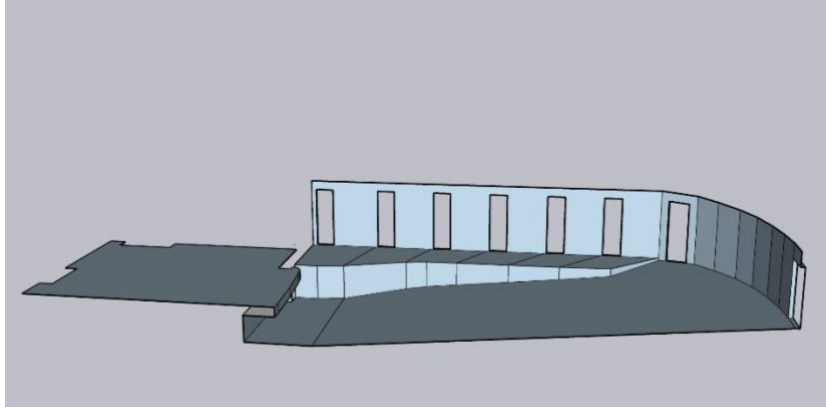


Ilustración 16. Modelado caja escénica y patio de butacas.

Las superficies con color azul se corresponden a las caras que dan al interior del teatro, mientras que las blancas son las que dan al exterior. A continuación, se modela la planta superior y las paredes de la caja escénica.

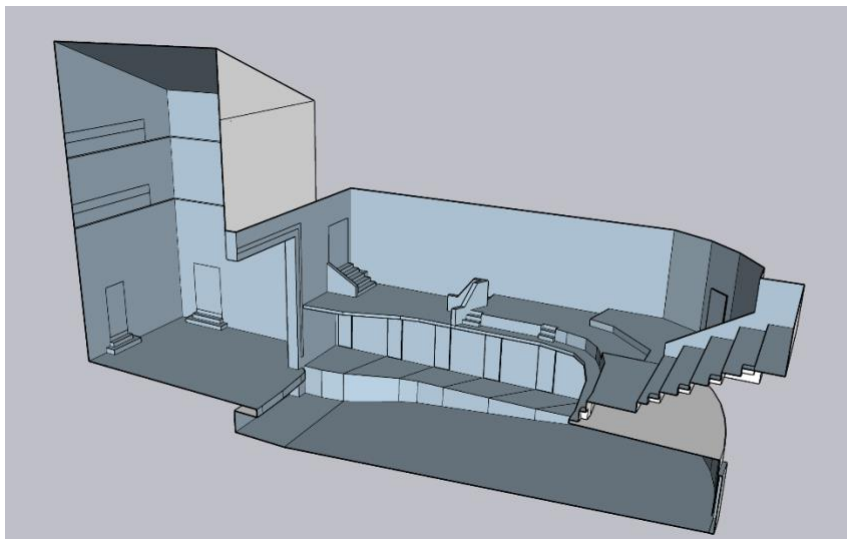


Ilustración 17. Modelado planta superior y paredes de caja escénica.

En el siguiente paso, se modelan las butacas y las sillas de los palcos, así como las cortinas presentes en la caja escénica y detalles como la lámpara, separadores y barandillas de palcos.

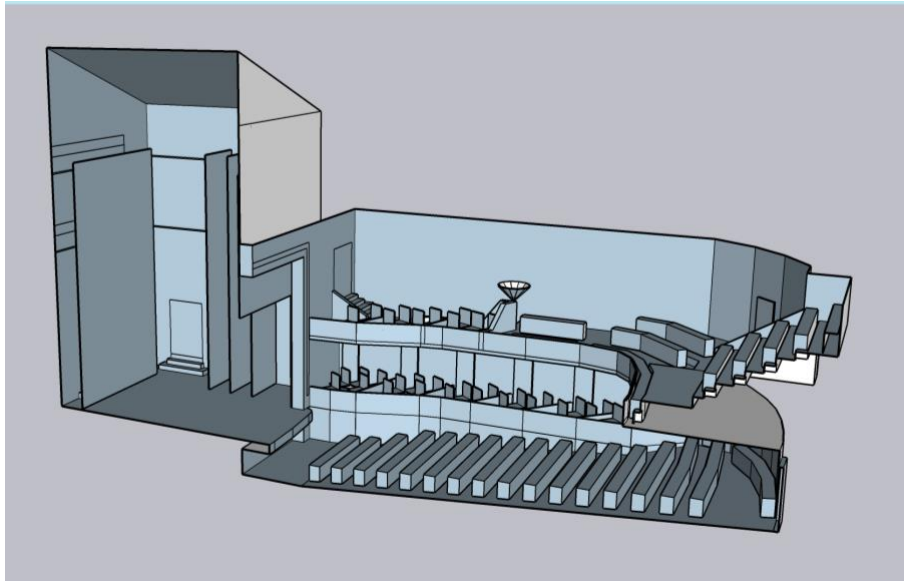


Ilustración 18. Modelado de sillas, butacas y detalles.

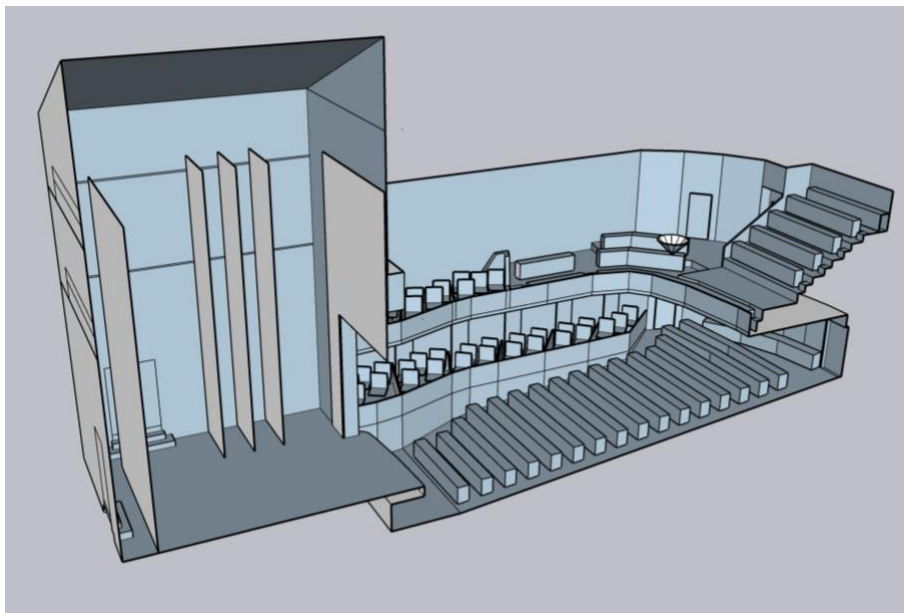


Ilustración 19. Vista desde caja escénica del modelado de cortinas, butacas y sillas.

Una vez completada la mitad de la sala, todas las caras deben tener asignadas una capa mediante etiquetas, donde la asignación dependerá de su comportamiento acústico. Este paso es importante para la asignación de materiales al importar en EASE.

Las superficies que son de doble cara, como cortinas, butacas, sillas, están separadas 5 cm de las superficies limítrofes de la sala para así evitar errores al importarlo a EASE.

Las etiquetas asociadas a las diferentes capas se muestran en la siguiente lista.

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO GEOMÉTRICO PARA EL ESTUDIO ACÚSTICO DEL TEATRO PRINCIPAL DE MORA (TOLEDO)

Nombre	Guiones
Sin etiqueta	Por defecto
Barandilla Palco 1 \$ Barandilla Palco 1	Por defecto
Barandilla Palco \$ Barandilla Palco	Por defecto
Butaca Terciopelo \$ 0,01	Por defecto
Cortina \$ Cortina	Por defecto
Escalera Escenario	Por defecto
Escayola \$ 000	Por defecto
Forjado	Por defecto
Ladrillo	Por defecto
Lampara \$ Lampara	Por defecto
Madera \$ Madera	Por defecto
Moqueta	Por defecto
Pared Escenario	Por defecto
Pared Palco	Por defecto
Pared Planta 1	Por defecto
Pared Trasera P0	Por defecto
Puerta Escenario	Por defecto
Puerta Palco	Por defecto
Puerta Planta 1	Por defecto
Silla Semitapizada \$ Silla Semitapizada	Por defecto
Suelo Butacas	Por defecto
Suelo Escenario	Por defecto
Techo acústico	Por defecto
Techo Escenario	Por defecto
Techo P0	Por defecto
Tela Algodon \$ Tela Algodon	Por defecto
Telón terciopelo \$ Telón terciopelo	Por defecto

Ilustración 20. Etiquetas asignadas a capas.

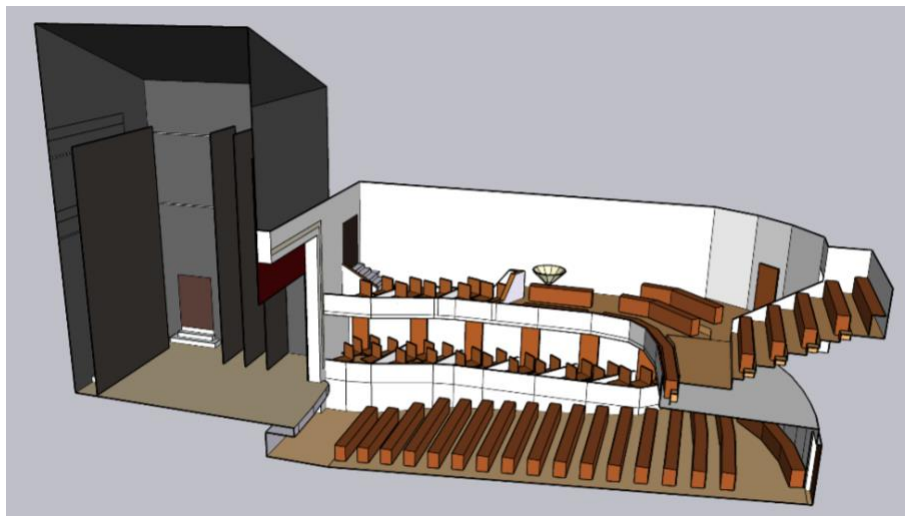


Ilustración 21. Teatro con capas asignadas.

Tras asignar capas y colores, el resultado es el siguiente.

Completados los pasos anteriores, solo queda duplicar el teatro y cerrar los posibles agujeros que surjan, utilizando plugins específicos de SketchUp como *Solid Inspector*.

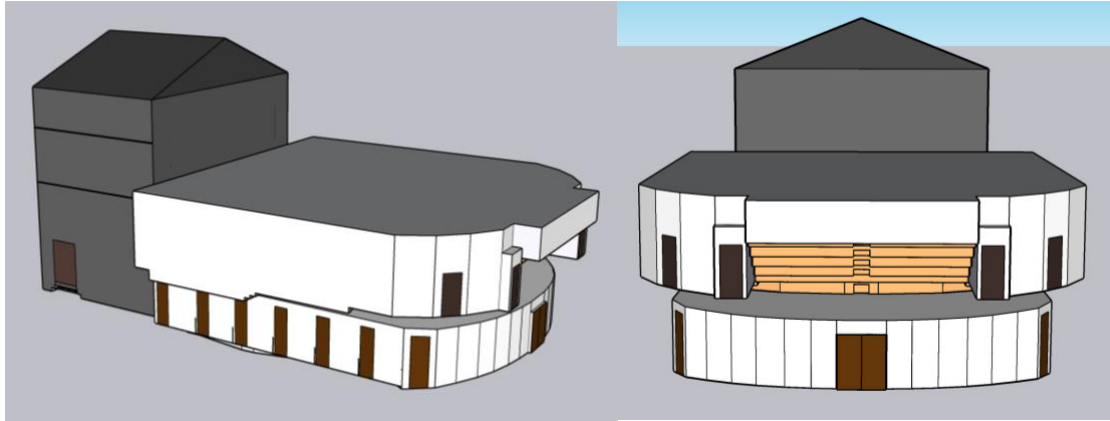


Ilustración 22. Diseño SketchUp finalizado.

Finalmente, se muestran las siguientes imágenes reales junto con sus correspondientes en el modelo, comprobando así su similitud.

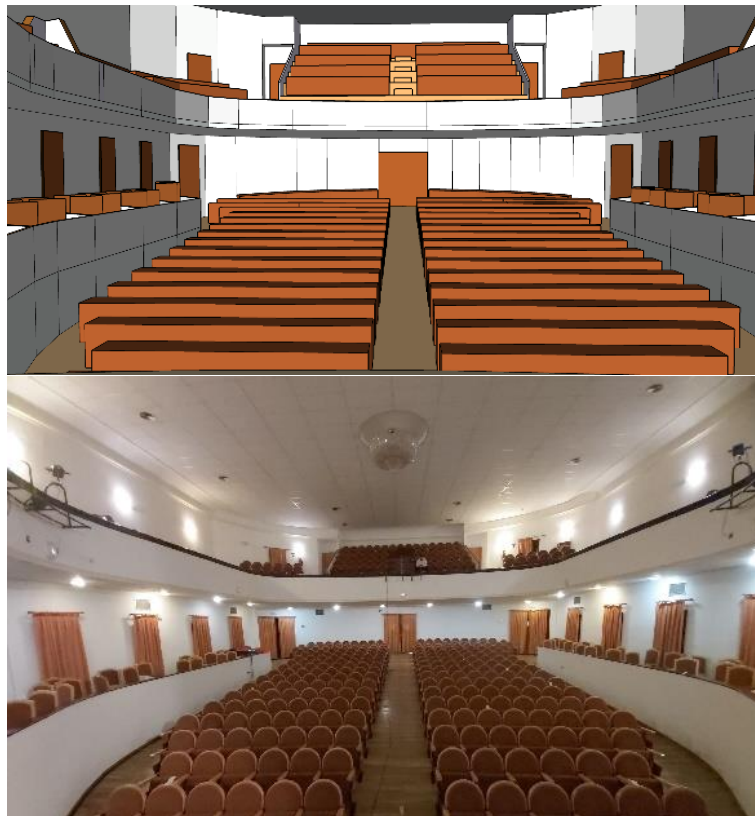


Ilustración 23. Vista desde el escenario.



Ilustración 24. Vista de palcos laterales desde el escenario.



Ilustración 25. Vista de asientos a doble altura en planta superior.

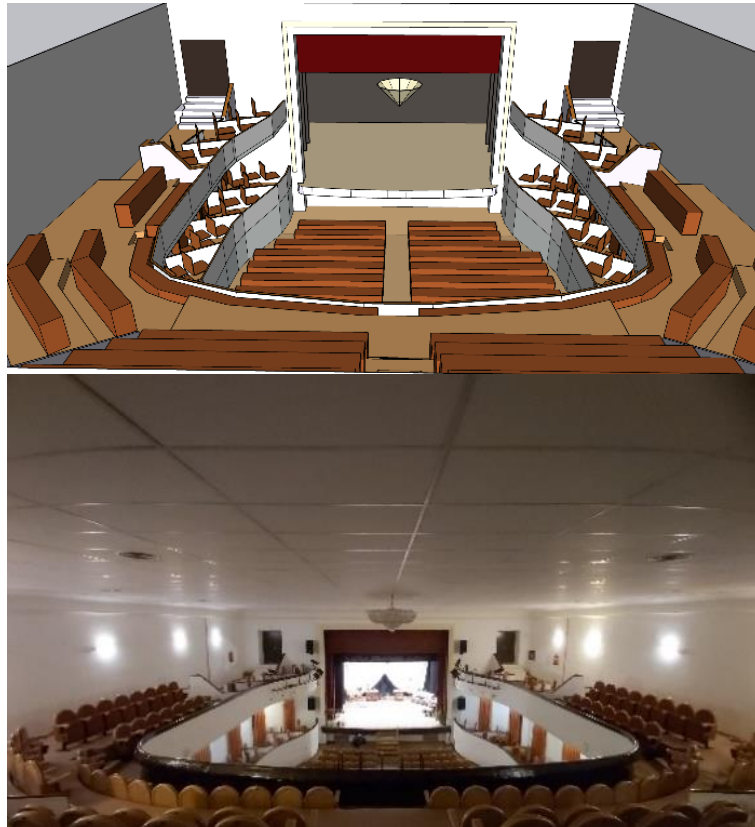


Ilustración 26. Vista desde planta superior.



Ilustración 27. Vista desde planta superior.

8. MODELO GEOMÉTRICO EN EASE

Una vez que el modelo en SketchUp esté completo, se puede comenzar a utilizar el software EASE. En esta etapa del proyecto es donde se realizan simulaciones acústicas para validar el modelo.

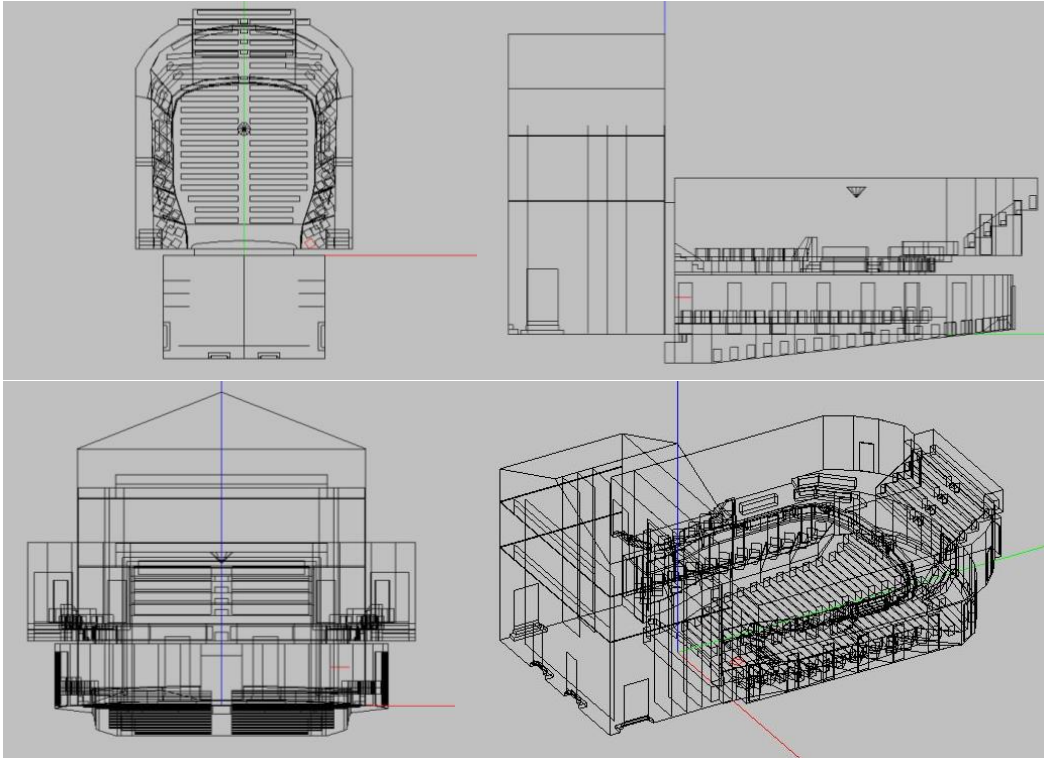


Ilustración 28. Vista desde planta superior.

El primer paso por realizar es crear un nuevo proyecto en EASE. Cuando se abra el programa, se importa el proyecto de SketchUp en la versión 7.

Una vez que se complete la importación, aparece una ventana en la que se muestran las distintas capas asignadas previamente a su modelo de SketchUp, a las cuales es necesario asignarle los materiales correspondientes en cada caso.

Los materiales se asignan a cada capa utilizando la información disponible y recopilada, así como fotos, notas, etc. Estos son extraídos de un archivo proporcionado por el grupo de investigación GAMMA, en el que se encuentran diversos materiales para llevar a cabo esta asignación. Como es difícil encontrar el mismo material o con el mismo comportamiento acústico que tiene el teatro, a veces es necesario modificarlos para aproximar su comportamiento acústico a la realidad.

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO GEOMÉTRICO PARA EL ESTUDIO ACÚSTICO DEL TEATRO PRINCIPAL DE MORA (TOLEDO)

Wall Material	Used	Description
063 Revoque de cemento	Yes	Revoque de cemento
061 Concrete or Cinder Block, Painted, Generic	Yes	Concrete Block or Cinder block Painted1 Octave Data: 125Hz-4KHzData From Sound System Engineering, ...
140 Terrazo	Yes	CONCRETE OR TERRAZZO
060 Concrete or Cinder Block Smooth Face, Generic	No	Cinder or Concrete blocks, smooth surface, unpainted1 Octave Data: 125Hz-4KHzData Unattributed
068 variación 061	Yes	905 variación 21 Concreteamiento de la absorción a alta frecuencia y disminuye en baja frecuencia Mod SPR
120 moqueta CARPT CDMM, Full	Yes	COMMERCIAL GRADE CARPET
330 Door, Hollow Core, Wood, Generic	Yes	Door, Hollow Core, Wood1 Octave Data: 125Hz-4KHzData Unattributed
331 Puertas Acero	Yes	Puertas de Acero. Puertas anti-fuego
180 Revestimiento de madera 1	Yes	Revestimiento de madera 1 Muy baja absorción
210 Wood Grid, 90mm x 15mm, on 40cm of Air, Generic	Yes	Wooden grid 90/15mm on 40cm air only1 Octave Data: 125Hz-4KHzData Unattributed
360 ventana cristal doble Glass, Window, Double Strength, Generic	Yes	Double strength window glass1 Octave Data: 125Hz-4KHzData Unattributed
004 a = 40%	No	40% Sound Absorbing
062 Concrete, Smooth Finish, Generic	Yes	Concrete wall or floor, smooth finish1 Octave Data: 125Hz-4KHzData Unattributed
274+1 Placa de Yeso	Yes	Placa de Yeso
000 a = 0%	Yes	perfect reflector
271 placa escayola sobre ladrillo	Yes	placa escayola sobre ladrillo Plaster on Tile or Brick Substrate, Generic1 Octave Data: 125Hz-4KHzData Un...
151 Cortina Algodon Medio Plegado 50%	Yes	Tejido Algodón Medio 500g/m2 Fruncido 50%
271+1 placa escayola sobre ladrillo	Yes	placa escayola sobre ladrillo Plaster on Tile or Brick Substrate, Generic1 Octave Data: 125Hz-4KHzData Un...
156 Cortina terciopelo Pesada	Yes	Heavyweight Drapery, 18 oz per sq/yd, draped to half area (2 ft of drapery to 1 ft of wall) Octave Data: 125H...
150 Cortina Algodon Medio	No	Tejido Algodón Medio 500g/m2 Sin fruncir
195 Plataforma de madera	Yes	Plataforma de madera con cámara de aire
090 butaca MTSEAT FAB, Full	No	FAB.WELL.UPOPLST. SEATS UNOCCUP
001 a = 10%	Yes	10% Sound Absorbing
100 Silla semitapizada	Yes	Silla semitapizada
063+1 Revoque de cemento	Yes	Revoque de cemento circle scattering a1
131 suelo madera latima	No	Hardwood Flooring mounted on beams1 Octave Data: 125Hz-4KHzFrom Niosh Book"Absorption Coefficient...
035 250HZ PANEL Resonator suave	No	250 Hz Helmholtz Resonator w/ modificacion del 032 suavizando la resonancia a 250Hz
002 a = 20%	No	20% Sound Absorbing
003 a = 30%	No	30% Sound Absorbing
005 a = 50%	No	50% Sound Absorbing
006 a = 60%	No	60% Sound Absorbing
007 a = 70%	No	70% Sound Absorbing

Ilustración 29. Lista de materiales proporcionados por GAMMA.

Una vez asignados los materiales, se establecen las caras dobles mediante la herramienta “Show Face Table”. Para determinar que un elemento sea de doble cara, se debe seleccionar *Yes* en la opción *2-Fold*. De esta manera, *Face Material* será el material en una cara y *Rear Material* en la otra cara.

#	G	Item	Image	Vis	Img	Face Material	Color	2-Fold	Rear Material	Rear Ctr.	Face Tex
318		F318	-	Yes	Yes	271 placa escayol...	16711678	Yes	271 placa escayol...	16711678	
319		F319	-	Yes	Yes	271 placa escayol...	16711678	Yes	271 placa escayol...	16711678	
320		F320	-	Yes	Yes	271 placa escayol...	16711678	Yes	271 placa escayol...	16711678	
321		F321	-	Yes	Yes	271 placa escayol...	16711678	Yes	271 placa escayol...	16711678	
322		F322	-	Yes	Yes	120 moqueta CAR...	6660569	No		14079702	
323		F323	-	Yes	Yes	271 placa escayol...	16711678	Yes	271 placa escayol...	16711678	
324		F324	-	Yes	Yes	120 moqueta CAR...	6660569	No		14079702	
325		F325	-	Yes	Yes	271 placa escayol...	16711678	Yes	271 placa escayol...	16711678	
326		F326	-	Yes	Yes	180 Revestimient...	2581148	Yes	180 Revestimient...	2581148	
327		F327	-	Yes	Yes	271 placa escayol...	16711678	Yes	271 placa escayol...	16711678	
328		F328	-	Yes	Yes	271 placa escayol...	16711678	Yes	271 placa escayol...	16711678	
329		F329	-	Yes	Yes	271 placa escayol...	16711678	Yes	271 placa escayol...	16711678	
330		F330	-	Yes	Yes	180 Revestimient...	2581148	Yes	180 Revestimient...	2581148	
331		F331	-	Yes	Yes	120 moqueta CAR...	6660569	No		14079702	WALL
332		F332	-	Yes	Yes	271 placa escayol...	16711678	Yes	271 placa escayol...	16711678	
333		F333	-	Yes	Yes	180 Revestimient...	2581148	Yes	180 Revestimient...	2581148	
334		F334	-	Yes	Yes	120 moqueta CAR...	6660569	No		14079702	WALL
335		F335	-	Yes	Yes	180 Revestimient...	2581148	Yes	180 Revestimient...	2581148	
336		F336	-	Yes	Yes	271 placa escayol...	16711678	Yes	271 placa escayol...	16711678	
337		F337	-	Yes	Yes	180 Revestimient...	2581148	Yes	180 Revestimient...	2581148	
338		F338	-	Yes	Yes	180 Revestimient...	2581148	Yes	180 Revestimient...	2581148	
339		F339	-	Yes	Yes	271 placa escayol...	16711678	Yes	271 placa escayol...	16711678	
340		F340	-	Yes	Yes	271 placa escayol...	16711678	Yes	271 placa escayol...	16711678	
341		F341	-	Yes	Yes	120 moqueta CAR...	6660569	No		14079702	
342		F342	-	Yes	Yes	180 Revestimient...	2581148	Yes	180 Revestimient...	2581148	
343		F343	-	Yes	Yes	180 Revestimient...	2581148	Yes	180 Revestimient...	2581148	
344		F344	-	Yes	Yes	271 placa escayol...	16711678	Yes	271 placa escayol...	16711678	
345		F345	-	Yes	Yes	180 Revestimient...	2581148	Yes	180 Revestimient...	2581148	
346		F346	-	Yes	Yes	180 Revestimient...	2581148	Yes	180 Revestimient...	2581148	
347		F347	-	Yes	Yes	180 Revestimient...	2581148	Yes	180 Revestimient...	2581148	
348		F348	-	Yes	Yes	271 placa escayol...	16711678	Yes	271 placa escayol...	16711678	

Ilustración 30. Asignación de caras dobles a las caras de cada elemento.

Se debe comprobar si existen agujeros en el recinto, ya que la presencia de estos afectaría a la precisión de la simulación acústica, permitiendo que el sonido se escape de la sala. Para detectarlo, se debe verificar que la opción “Room Open” esté desactivada, esto implica que la

sala se considera como un espacio cerrado. Mediante la opción “*Check Holes*” se reconoce el tipo de error en caso de que lo hubiera y lo localiza en el recinto.

Cuando no existan errores ni agujeros, EASE mostrará un mensaje como el que aparece en la siguiente Ilustración. Se muestran también los datos de volumen y superficie de absorción que proporciona EASE.

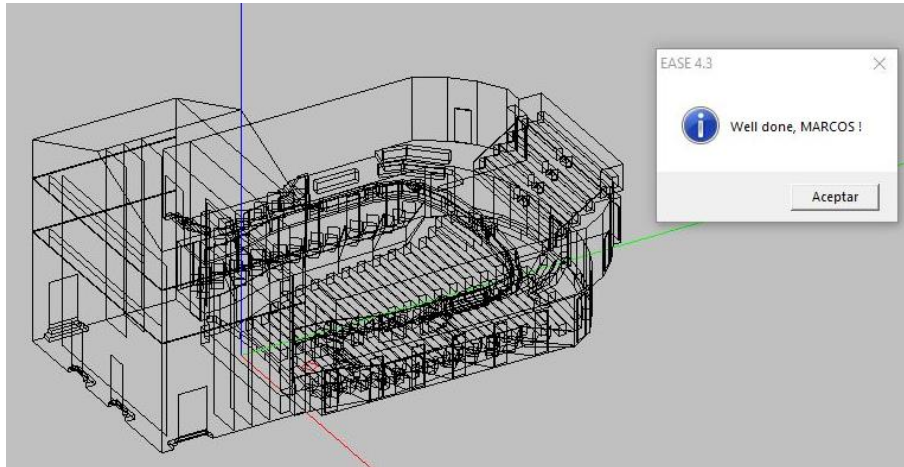


Ilustración 31. Mensaje de EASE informando que no hay errores.

Geometry		Absorption	
Room Surface :	3589.02 m ²	Avg. Abs. Area :	764.3 m ²
Volume :	3269.06 m ³	Avg. Abs. Coeff. :	0.21

Ilustración 32. Datos de volumen y superficie de absorción EASE.

Una vez configurado correctamente el modelo en EASE, se colocan los micrófonos mediante “*Listener seats*” y las dos fuentes de sonido mediante “*Loudspeaker*”. Los micrófonos además de tener la posición que se corresponde con la realidad según las coordenadas, se orientan hacia la fuente.

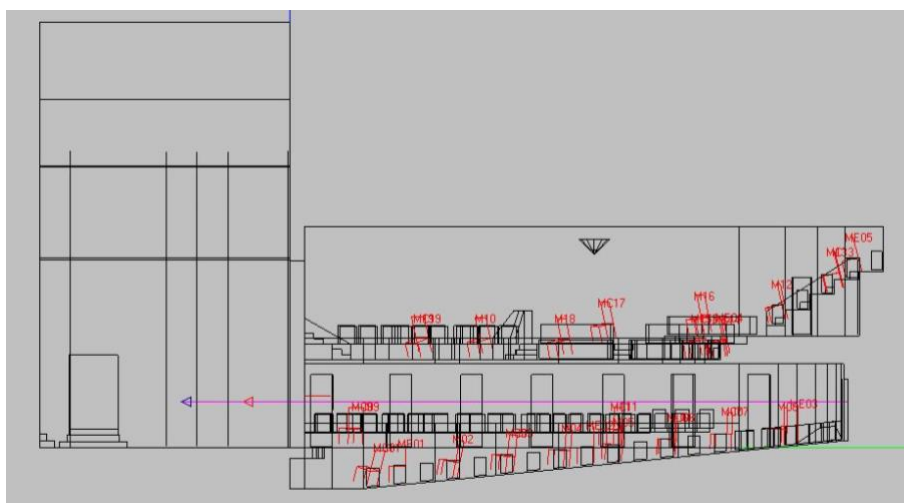


Ilustración 33. Fuentes sonoras y micrófonos colocados y orientados.

Por último, la función “*Ray Tracing*” genera un trazado de rayos desde las fuentes del escenario, para así observar la trayectoria que siguen las ondas acústicas en el interior del teatro. También se comprueba que los rayos no se salen de la sala, lo cual nos confirma que no existen agujeros.

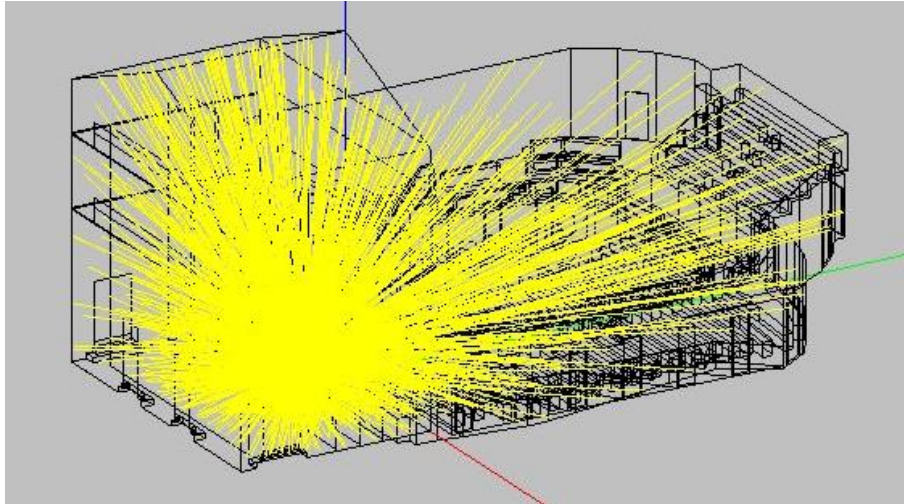


Ilustración 34. Trazado de rayos del modelo en EASE.

9. PROCESADO DE DATOS

A partir de la respuesta al impulso medida en cada posición de micrófono y mediante el software DIRAC, se genera un fichero de texto que contiene todos los datos necesarios que serán posteriormente trasladados a un fichero de Excel. En este fichero, se filtran los datos según parámetros acústicos, posición de fuente, posición de micrófono, banda de frecuencia, zona, canal, etc. Cada parámetro se analiza en una nueva hoja y se procesa de manera individual en una tabla como la siguiente. Se muestra el filtrado por el parámetro C50[dB] y por la fuente 1 (F01).

Medida	Fuente	Micró	Frecuenci	Canal	Punto	Distancia f	Zona	Directorio	31.5	63	125
C50 [dB]	F01	M01	Octavas	1	F01M01		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01M01-1.wav	-1,35	2,49	1,3
C50 [dB]	F01	M01	Octavas	1	F01M01		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01M01-2.wav	-1,42	2,59	1,4
C50 [dB]	F01	M02	Octavas	1	F01M02		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01M02-1.wav	-1,35	2,07	0,6
C50 [dB]	F01	M02	Octavas	1	F01M02		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01M02-2.wav	-1,53	2,09	0,7
C50 [dB]	F01	M03	Octavas	1	F01M03		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01M03-1.wav	-4,15	5,57	-0,1
C50 [dB]	F01	M03	Octavas	1	F01M03		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01M03-2.wav	-3,71	5,62	-0,4
C50 [dB]	F01	M04	Octavas	1	F01M04		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01M04-1.wav	-3,31	6,3	-2,8
C50 [dB]	F01	M04	Octavas	1	F01M04		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01M04-2.wav	-3,81	6,28	-3,0
C50 [dB]	F01	M05	Octavas	1	F01M05		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01M05-1.wav	-2,02	-1,01	-0,1
C50 [dB]	F01	M05	Octavas	1	F01M05		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01M05-2.wav	-1,21	-1,06	-0,1
C50 [dB]	F01	M06	Octavas	1	F01M06		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01M06-1.wav	-5,01	0,16	1,7
C50 [dB]	F01	M06	Octavas	1	F01M06		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01M06-2.wav	-5,1	0,11	1,7
C50 [dB]	F01	M07	Octavas	1	F01M07		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01M07-1.wav	-4,14	2,9	-0,4
C50 [dB]	F01	M07	Octavas	1	F01M07		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01M07-2.wav	-4,17	3,01	-0,5
C50 [dB]	F01	M08	Octavas	1	F01M08		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01M08-1.wav	-5,03	5,23	2,4
C50 [dB]	F01	M08	Octavas	1	F01M08		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01M08-2.wav	-4,85	5,24	2,4
C50 [dB]	F01	M09	Octavas	1	F01M09		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01M09-1.wav	-3,06	0,13	1,1
C50 [dB]	F01	M09	Octavas	1	F01M09		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01M09-2.wav	-2,62	-0,01	1,7
C50 [dB]	F01	M10	Octavas	1	F01M10		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01M10-1.wav	-0,99	1,62	0,0
C50 [dB]	F01	M10	Octavas	1	F01M10		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01M10-2.wav	-1,04	1,72	0,0
C50 [dB]	F01	M11	Octavas	1	F01M11		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01M11-1.wav	-3,68	3,79	-5,1
C50 [dB]	F01	M11	Octavas	1	F01M11		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01M11-2.wav	-3,64	3,57	-5
C50 [dB]	F01	MC01	Octavas	1	F01MC01		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01MC01-1.wav	-1,13	-0,28	2,1
C50 [dB]	F01	MC01	Octavas	1	F01MC01		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01MC01-2.wav	-0,24	0,52	2,5
C50 [dB]	F01	MC03	Octavas	1	F01MC03		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01MC03-1.wav	-2,1	3,73	-2,1
C50 [dB]	F01	MC03	Octavas	1	F01MC03		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01MC03-2.wav	-2,14	3,74	-2,1
C50 [dB]	F01	MC06	Octavas	1	F01MC06		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01MC06-1.wav	-5,44	-1,32	1,6
C50 [dB]	F01	MC06	Octavas	1	F01MC06		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01MC06-2.wav	-5,74	-1,4	1,5
C50 [dB]	F01	MC07	Octavas	1	F01MC07		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01MC07-1.wav	-0,8	2,07	-0,5
C50 [dB]	F01	MC07	Octavas	1	F01MC07		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01MC07-2.wav	-0,98	2,15	-0,5
C50 [dB]	F01	MC09	Octavas	1	F01MC09		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01MC09-1.wav	-1,83	0,12	3,4
C50 [dB]	F01	MC09	Octavas	1	F01MC09		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01MC09-2.wav	-1,36	0,08	3,6
C50 [dB]	F01	MC11	Octavas	1	F01MC11		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01MC11-1.wav	-4,89	2,54	-2,8
C50 [dB]	F01	MC11	Octavas	1	F01MC11		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01MC11-2.wav	-4,87	2,5	-2,8
C50 [dB]	F01	ME01	Octavas	1	F01ME01		Planta 0	C:\Users\AA-01\Desktop\PPG MARCOS ARREZA\09-02-2023\PLATEA\F01ME01-1.wav	1,59	2	1,2

Tabla 6. Filtrado de datos del parámetro C50 [dB].

Los datos son procesados en bandas de 1/1 octava y de 1/3 de octava. En este apartado, se presentan los datos en bandas de 1/3 de octava, puesto que son los que se utilizan para realizar la validación del Modelo en EASE. Los datos procesados en bandas de 1/1 octava se utilizarán para elaboración del informe acústico que se entregará a la propiedad del teatro y que se encuentran en el Anexo 3.

9.1 Criterios de procesamiento

El parámetro que se va a utilizar para realizar un primer análisis de las medidas *in situ* es el INR (*Impulse to Noise Ratio*). Este parámetro indica la calidad del nivel de presión obtenido en cada punto de medida respecto del ruido de fondo que hay en la sala.

El INR se utiliza como filtro o máscara, debido a que la fuente sonora utilizada no radia un nivel de presión sonora suficiente por debajo de 80 Hz y por encima de 12500 Hz. Por tanto, se admiten únicamente los valores cuyo valor está por encima de 35 dB, siendo los inferiores a este valor descartados utilizando un formato incondicional en Excel. Este formato colorea las celdas de valor inferior a 35 dB de color rojo.

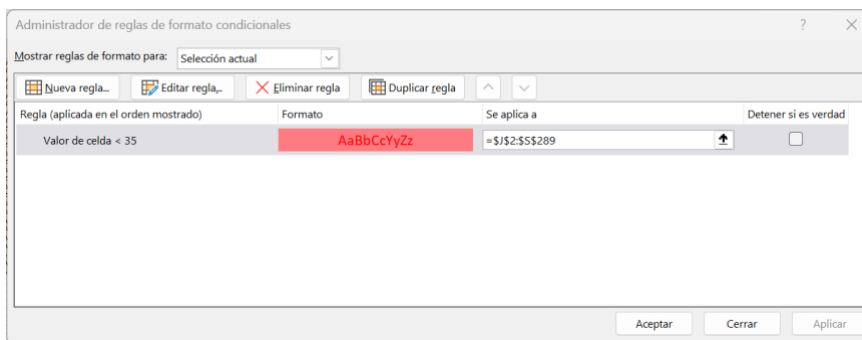


Ilustración 35. Formato condicional del parámetro INR.

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO GEOMÉTRICO PARA EL ESTUDIO ACÚSTICO DEL TEATRO PRINCIPAL DE MORA (TOLEDO)

A continuación, se muestra el filtro condicional aplicado al parámetro INR en las bandas de frecuencia de 25 Hz a 20 kHz.

	25	31,5	40	50	63	80
H1M1-1.usa	36	36	40	38	43	53
H1M1-2.usa	36	36		41	45	55
H1M2-1.usa	37			37	47	57
H1M2-2.usa	35		37	46	43	53
H1M3-1.usa				33	58	53
H1M3-2.usa				33	45	53
H1M4-1.usa	38			46	43	53
H1M4-2.usa				42	38	43
H1M5-1.usa	38			35	41	54
H1M5-2.usa	41				45	53
H1M6-1.usa	35	48	33	46	47	56
H1M6-2.usa	38	44	41	58	51	53
H1M7-1.usa			35	46	58	57
H1M7-2.usa	36			43	54	68
H1M8-1.usa				43	52	68
H1M8-2.usa				43	51	58
H1M9-1.usa					37	56
H1M9-2.usa		36		37	48	53
H1M10-1.usa	38	48		37	37	58
H1M10-2.usa		36		33	36	43
H1M11-1.usa			35	37	35	43
H1M11-2.usa	36		35	35	37	45
H1M14-1.usa		48	42	48	58	43
H1M14-2.usa		48	44	48	44	58
H1M15-1.usa				38	43	56
H1M15-2.usa	36			38	48	54
H1M16-1.usa	44	38	41	52	53	53
H1M16-2.usa		35	36	44	45	43
H1M17-1.usa			36	38	33	58
H1M17-2.usa			36	36	45	53
H1M18-1.usa			35	42	52	61
H1M18-2.usa				35	46	53
H1M19-1.usa	37	33	33	33	41	57
H1M19-2.usa	35	33	48	42	44	54
H1M21-1.usa	37	37	38	45	43	61
H1M21-2.usa	41	33	43	33	38	61
H1M22-1.usa		37	44	48	51	62
H1M22-2.usa	42	44	44	47	51	63
H1M23-1.usa				38	47	52
H1M23-2.usa				35	48	46
H2M1-1.usa		36	35	41	44	52
H2M1-2.usa	36	37	33	45	58	55
H2M2-1.usa	36			37	43	43
H2M2-2.usa					48	47
H2M3-1.usa				41	46	51
H2M3-2.usa				42	58	54
H2M4-1.usa	36		36	45	51	55

Tabla 7. Formato condicional del parámetro INR.

El porcentaje de valores eliminados son los siguientes.

Nº valores	Nº valores eliminados	Porcentaje de valores eliminados
4320	454	10,51 %

Tabla 8. Porcentaje de valores eliminados por INR.

Una vez obtenida la máscara, se aplica por igual a todos los parámetros, eliminando así los datos que se encuentran en las celdas coloreadas al no cumplir con la norma 3382-1. [13].

Seguidamente se toma un recuento de los valores restantes en cada frecuencia, calculando su promedio y desviación.

A continuación, se realiza un nuevo procesado de datos utilizando el criterio de *Chauvenet* [15]. Está basado en un análisis estadístico que permite eliminar del procesado aquellos datos que no son representativos estadísticamente y que se consideran atípicos. Al realizar la medición de los parámetros, el resultado de las mediciones sigue una distribución normal en forma de campana de Gauss, donde μ es la media y σ la desviación estándar.

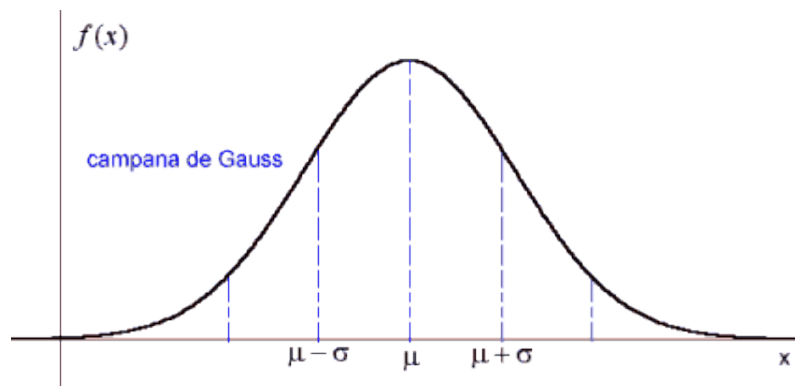


Ilustración 36. Distribución estadística de Gauss. [16]

Se calcula la media y desviación estándar de cada tercio de octava para aplicar el criterio de *Chauvenet*, y se compara el valor de una medida con el valor promedio y una constante que depende del número de medidas válidas y que se multiplica por la desviación estándar. La constante tiene siempre un valor mayor o igual a uno. Se representa matemáticamente en la siguiente ecuación.

$$|\bar{x} - x_i| > k_n \cdot \sigma \quad (17)$$

$$k_n = 0,3704 \cdot \ln(n) + 1,0693 \quad (18)$$

Donde \bar{x} es el promedio de los valores de una banda de frecuencias; k_n es el factor de corrección que depende de las iteraciones realizadas y del número de muestras; y σ la desviación estándar de una banda de frecuencias. Se realizan iteraciones de manera sucesiva, hasta tres veces con cada parámetro, eliminando así valores poco representativos. Se muestra en la siguiente tabla, de color azul, los valores eliminados tras aplicar el criterio de *Chauvenet* en tres ocasiones para el parámetro EDT.

También se representa el valor del escalón JND, para así poder comparar la dispersión de estos datos con los obtenidos en las simulaciones en EASE.

A continuación, se muestran los distintos parámetros.

9.2.1 Parámetros temporales

- Parámetro EDT:

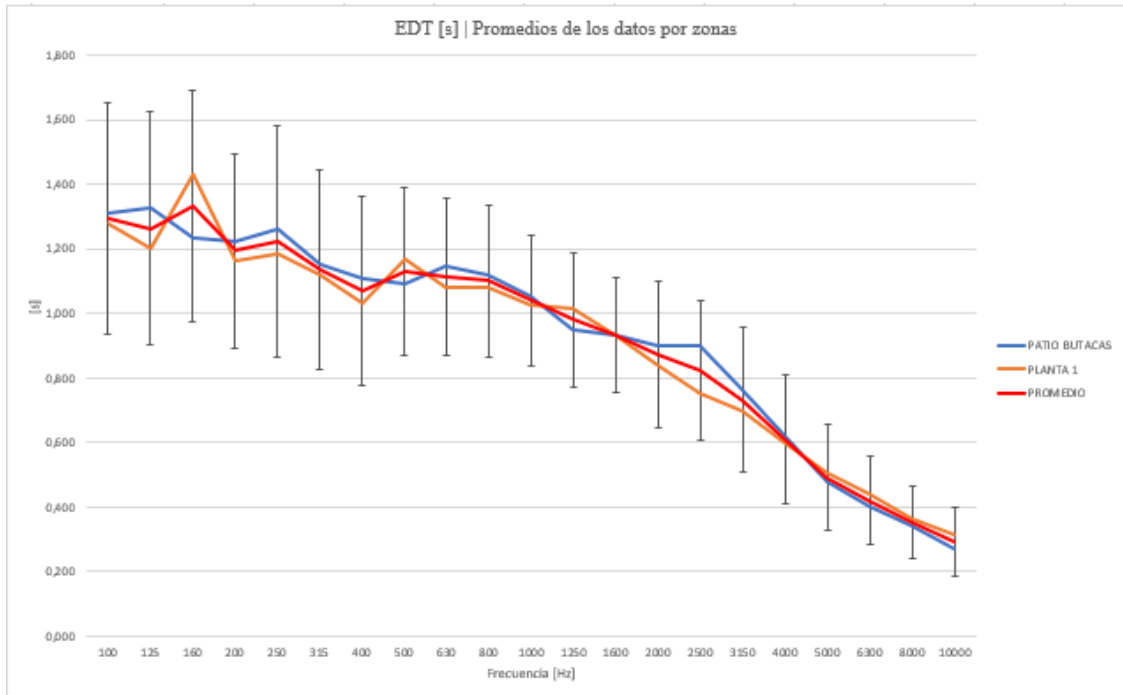


Ilustración 37. Representación gráfica de valores EDT medido.

EDT(s) Promedio de los datos por zonas				EDT(s) Desviación de los datos por zonas			
F (Hz)	PATIO BUTACAS	PLANTA 1	PROMEDIO	F (Hz)	PATIO BUTACAS	PLANTA 1	PROMEDIO
100	1,310	1,275	1,29	100	0,34	0,38	0,36
125	1,326	1,201	1,26	125	0,34	0,39	0,36
160	1,236	1,429	1,33	160	0,33	0,38	0,36
200	1,225	1,162	1,19	200	0,32	0,28	0,30
250	1,260	1,183	1,22	250	0,32	0,40	0,36
315	1,154	1,120	1,14	315	0,32	0,30	0,31
400	1,107	1,034	1,07	400	0,30	0,29	0,29
500	1,034	1,166	1,13	500	0,26	0,26	0,26
630	1,144	1,080	1,11	630	0,24	0,25	0,24
800	1,119	1,082	1,10	800	0,25	0,22	0,24
1000	1,056	1,025	1,04	1000	0,23	0,18	0,20
1250	0,947	1,015	0,98	1250	0,23	0,19	0,21
1600	0,932	0,933	0,93	1600	0,16	0,20	0,18
2000	0,902	0,843	0,87	2000	0,22	0,23	0,22
2500	0,897	0,754	0,83	2500	0,21	0,22	0,22
3150	0,765	0,697	0,73	3150	0,23	0,22	0,22
4000	0,621	0,601	0,61	4000	0,21	0,19	0,20
5000	0,477	0,508	0,49	5000	0,21	0,13	0,17
6300	0,401	0,441	0,42	6300	0,17	0,11	0,14
8000	0,342	0,363	0,35	8000	0,13	0,09	0,11
10000	0,270	0,313	0,29	10000	0,10	0,12	0,11

Tabla 11. EDT medido por zonas.

- Parámetro T20:

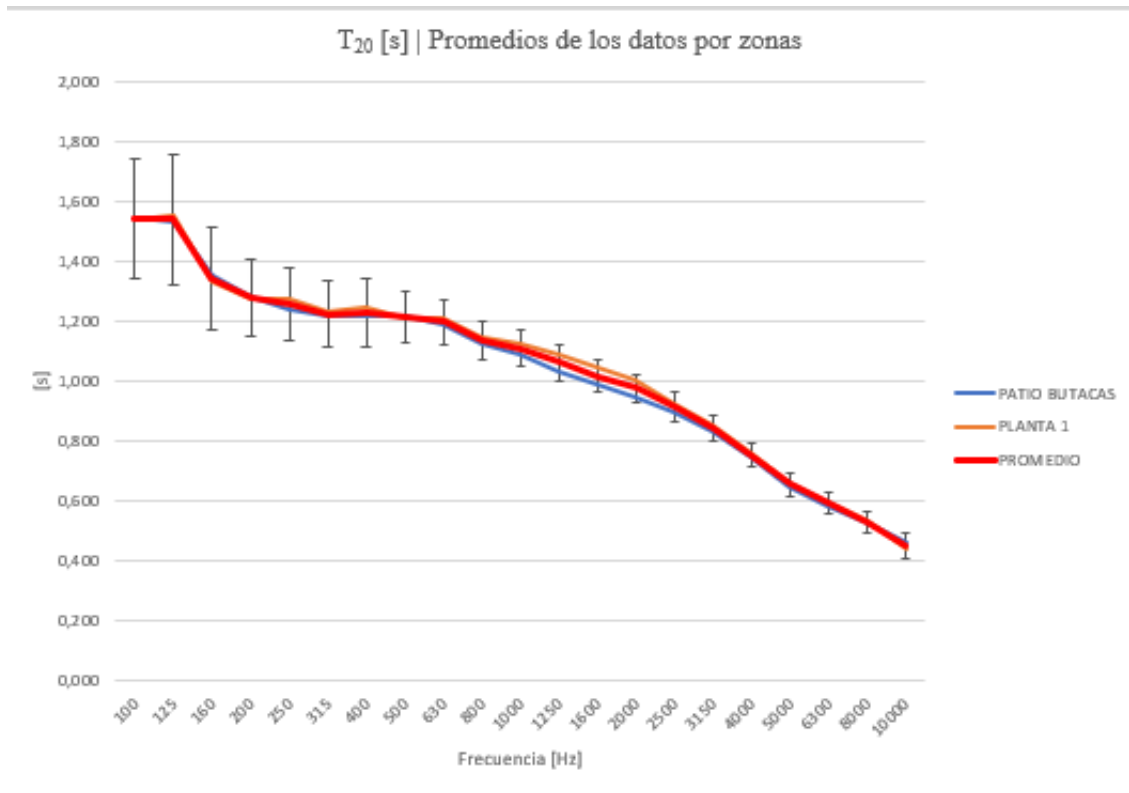


Ilustración 38. Representación gráfica de valores T_{20} medido.

T20(s) Promedio de los datos por zonas				T20(s) Desviación de los datos por zonas			
F (Hz)	PATIO BUTACAS	PLANTA 1	PROMEDIO	F (Hz)	PATIO BUTACAS	PLANTA 1	PROMEDIO
100	1,54	1,54	1,54	100	0,24	0,16	0,20
125	1,53	1,55	1,54	125	0,22	0,21	0,22
160	1,35	1,33	1,34	160	0,17	0,17	0,17
200	1,28	1,27	1,28	200	0,14	0,11	0,13
250	1,24	1,28	1,26	250	0,11	0,13	0,12
315	1,22	1,23	1,22	315	0,11	0,11	0,11
400	1,21	1,24	1,23	400	0,13	0,10	0,11
500	1,21	1,21	1,21	500	0,10	0,08	0,09
630	1,19	1,21	1,20	630	0,07	0,08	0,08
800	1,12	1,15	1,14	800	0,06	0,07	0,07
1000	1,09	1,13	1,11	1000	0,06	0,05	0,06
1250	1,03	1,09	1,06	1250	0,06	0,06	0,06
1600	0,99	1,04	1,02	1600	0,05	0,06	0,05
2000	0,95	1,00	0,97	2000	0,04	0,06	0,05
2500	0,90	0,93	0,91	2500	0,05	0,05	0,05
3150	0,83	0,85	0,84	3150	0,04	0,04	0,04
4000	0,74	0,76	0,75	4000	0,04	0,04	0,04
5000	0,65	0,66	0,65	5000	0,04	0,04	0,04
6300	0,58	0,60	0,59	6300	0,04	0,03	0,03
8000	0,53	0,53	0,53	8000	0,04	0,03	0,03
10000	0,46	0,44	0,45	10000	0,05	0,04	0,05

Tabla 122. T_{20} medido por zonas.

- Parámetro T30:

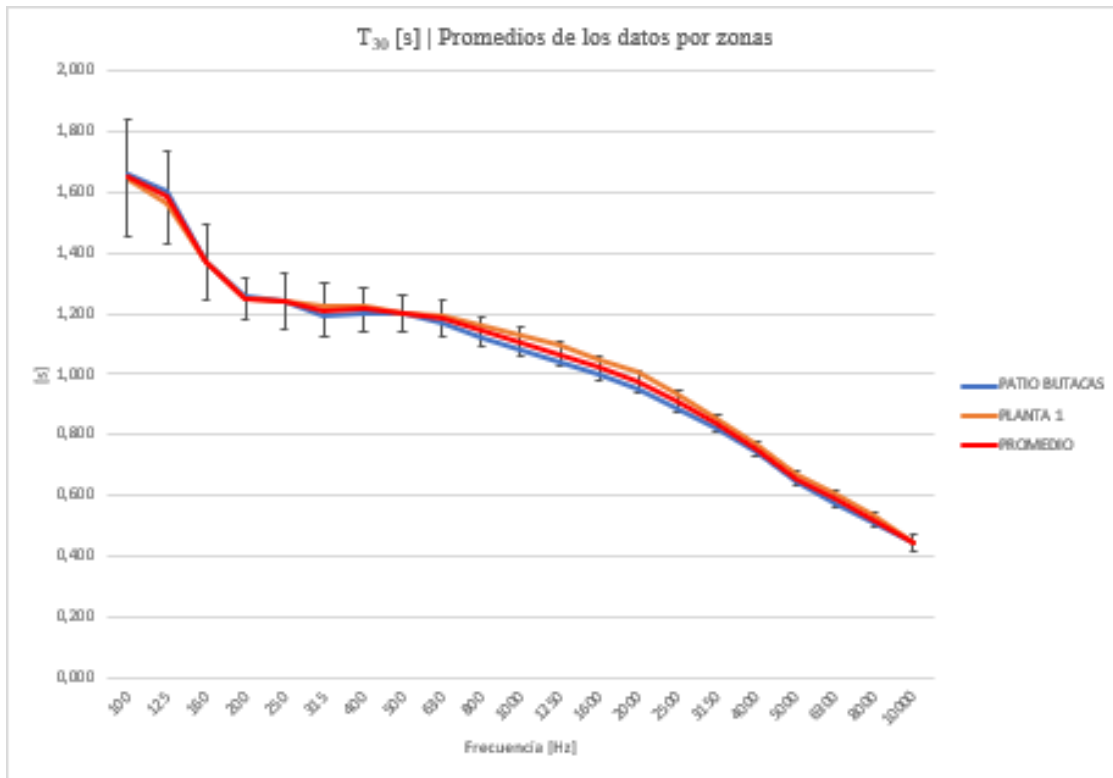


Ilustración 39. Representación gráfica de valores T30 medido.

T30[s] Promedio de los datos por zonas				T30[s] Desviación de los datos por zonas			
F (Hz)	PATIO BUTACAS	PLANTA 1	PROMEDIO	F (Hz)	PATIO BUTACAS	PLANTA 1	PROMEDIO
100	1,66	1,64	1,65	100	0,20	0,19	0,20
125	1,60	1,57	1,58	125	0,20	0,11	0,15
160	1,37	1,37	1,37	160	0,11	0,14	0,13
200	1,25	1,25	1,25	200	0,08	0,06	0,07
250	1,24	1,24	1,24	250	0,09	0,10	0,09
315	1,20	1,23	1,21	315	0,10	0,08	0,09
400	1,20	1,23	1,21	400	0,08	0,06	0,07
500	1,20	1,20	1,20	500	0,06	0,06	0,06
630	1,17	1,19	1,18	630	0,06	0,06	0,06
800	1,12	1,16	1,14	800	0,05	0,05	0,05
1000	1,08	1,13	1,11	1000	0,05	0,04	0,05
1250	1,04	1,10	1,07	1250	0,04	0,04	0,04
1600	1,00	1,05	1,02	1600	0,04	0,04	0,04
2000	0,95	1,00	0,98	2000	0,03	0,04	0,03
2500	0,89	0,94	0,91	2500	0,03	0,04	0,03
3150	0,82	0,86	0,84	3150	0,03	0,03	0,03
4000	0,74	0,77	0,75	4000	0,02	0,03	0,02
5000	0,64	0,67	0,66	5000	0,02	0,02	0,02
6300	0,57	0,61	0,59	6300	0,03	0,02	0,03
8000	0,51	0,53	0,52	8000	0,03	0,02	0,02
10000	0,44	0,44	0,44	10000	0,03	0,03	0,03

Tabla 132. T30 medido por zonas.

- Parámetro RT:

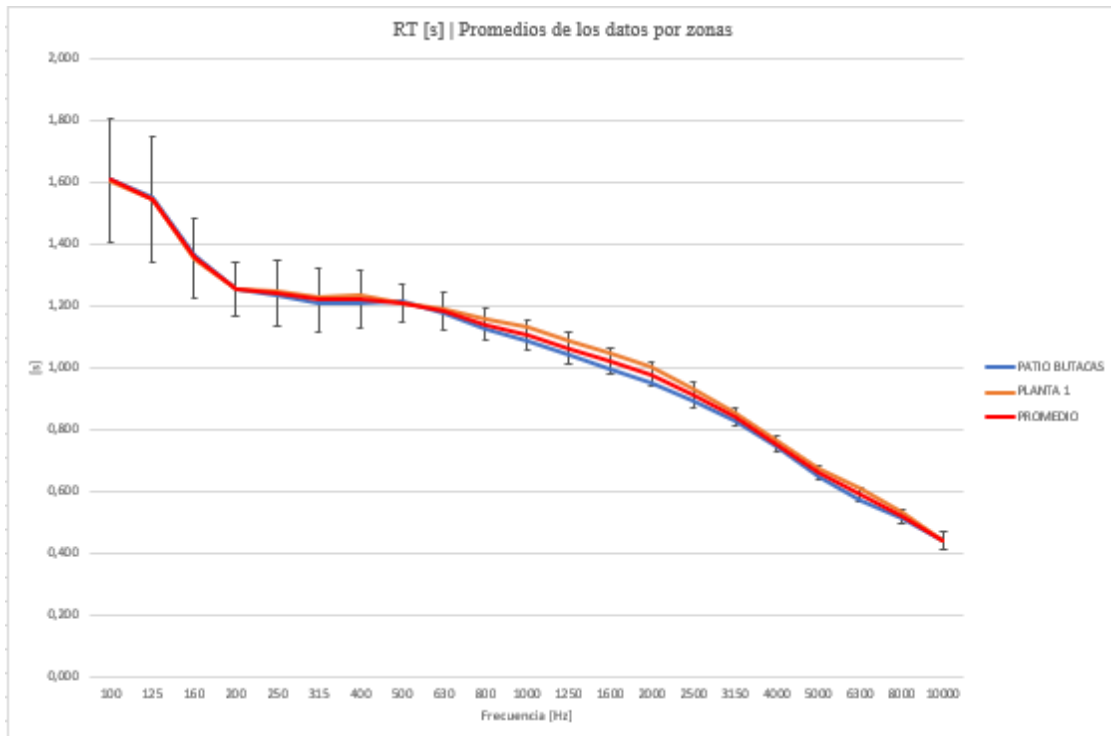


Ilustración 40. Representación gráfica de valores RT medido.

RT(s) Promedio de los datos por zonas				RT(s) Desviación de los datos por zonas			
F (Hz)	PATIO BUTACAS	PLANTA 1	PROMEDIO	F (Hz)	PATIO BUTACAS	PLANTA 1	PROMEDIO
100	1,61	1,60	1,60	100	0,24	0,16	0,20
125	1,55	1,54	1,54	125	0,24	0,16	0,20
160	1,36	1,35	1,36	160	0,12	0,14	0,13
200	1,26	1,25	1,25	200	0,09	0,09	0,09
250	1,23	1,25	1,24	250	0,10	0,11	0,11
315	1,21	1,23	1,22	315	0,11	0,10	0,10
400	1,21	1,23	1,22	400	0,10	0,09	0,09
500	1,21	1,21	1,21	500	0,06	0,06	0,06
630	1,18	1,19	1,18	630	0,06	0,06	0,06
800	1,12	1,16	1,14	800	0,05	0,05	0,05
1000	1,09	1,13	1,11	1000	0,05	0,04	0,05
1250	1,04	1,09	1,06	1250	0,05	0,06	0,05
1600	1,00	1,05	1,02	1600	0,04	0,04	0,04
2000	0,95	1,00	0,98	2000	0,03	0,04	0,04
2500	0,89	0,93	0,91	2500	0,04	0,05	0,04
3150	0,83	0,85	0,84	3150	0,03	0,03	0,03
4000	0,74	0,77	0,75	4000	0,02	0,02	0,02
5000	0,64	0,67	0,66	5000	0,02	0,02	0,02
6300	0,57	0,61	0,59	6300	0,03	0,02	0,02
8000	0,51	0,53	0,52	8000	0,03	0,02	0,02
10000	0,44	0,44	0,44	10000	0,03	0,03	0,03

Tabla 143. RT medido por zonas.

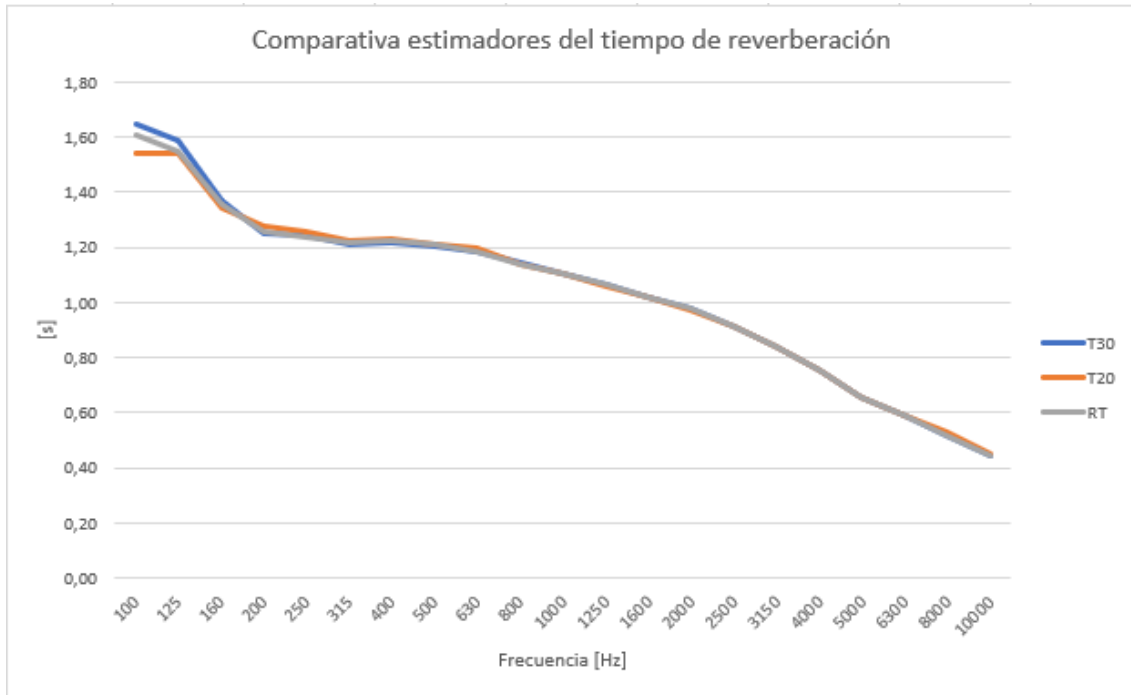


Ilustración 41. Representación gráfica de la comparativa de los estimadores del tiempo de reverberación.

9.2.2 Parámetros energéticos

- Parámetro C50:

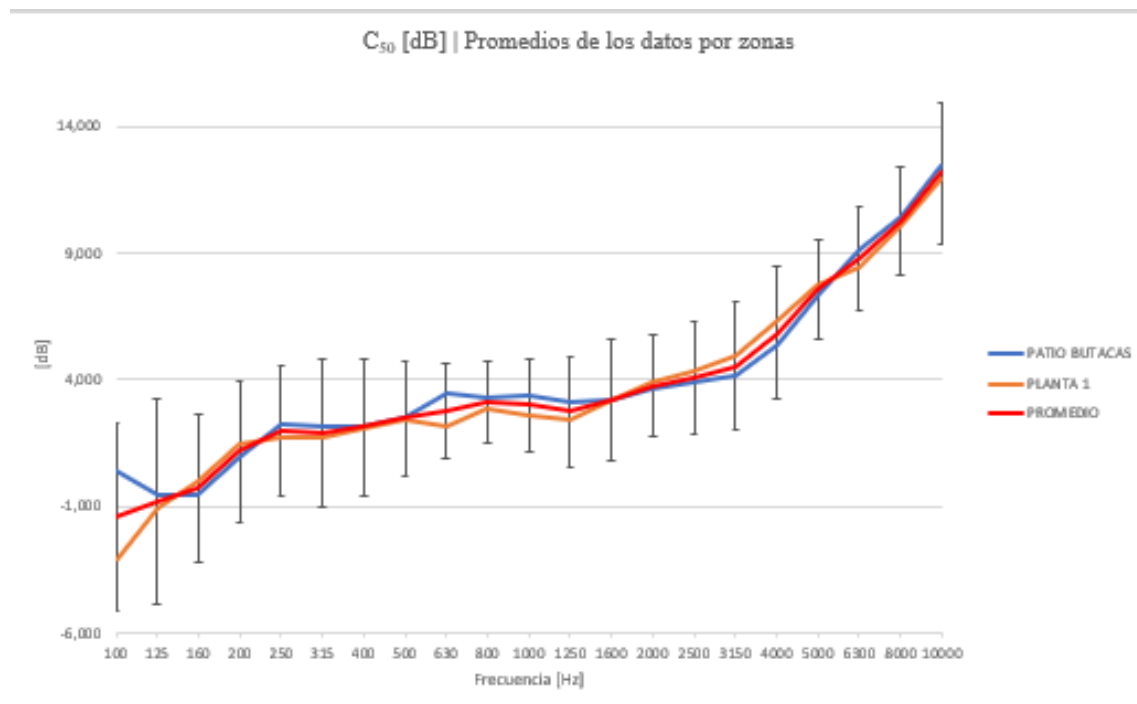


Ilustración 42. Representación gráfica de valores C50 medido.

C50[dB] Promedio de los datos por zonas				C50[dB] Desviación de los datos por zonas			
F (Hz)	PATIOBUTACAS	PLANTA1	PROMEDIO	F (Hz)	PATIOBUTACAS	PLANTA1	PROMEDIO
100	0,36	-3,19	-1,41	100	2,99	4,41	3,70
125	-0,53	-1,11	-0,82	125	3,49	4,55	4,02
160	-0,52	-0,01	-0,27	160	2,52	3,32	2,92
200	0,90	1,44	1,17	200	3,02	2,54	2,78
250	2,25	1,71	1,98	250	2,43	2,65	2,54
315	2,12	1,70	1,91	315	2,94	2,93	2,94
400	2,15	2,05	2,10	400	2,20	3,13	2,67
500	2,52	2,41	2,47	500	2,41	2,16	2,29
630	3,42	2,15	2,78	630	1,87	1,85	1,86
800	3,29	2,88	3,09	800	1,67	1,53	1,60
1000	3,40	2,54	2,97	1000	1,90	1,80	1,85
1250	3,08	2,37	2,72	1250	2,44	1,98	2,21
1600	3,18	3,22	3,20	1600	2,24	2,51	2,37
2000	3,61	3,88	3,74	2000	2,13	1,84	1,98
2500	3,85	4,36	4,10	2500	2,20	2,25	2,22
3150	4,12	4,96	4,54	3150	2,70	2,31	2,50
4000	5,36	6,33	5,84	4000	2,70	2,51	2,60
5000	7,31	7,75	7,53	5000	2,32	1,58	1,95
6300	9,13	8,45	8,79	6300	2,08	2,04	2,06
8000	10,44	10,04	10,24	8000	2,01	2,23	2,12
10000	12,41	11,87	12,14	10000	2,53	3,05	2,79

Tabla 154. C50 medido por zonas.

- Parámetro C80:

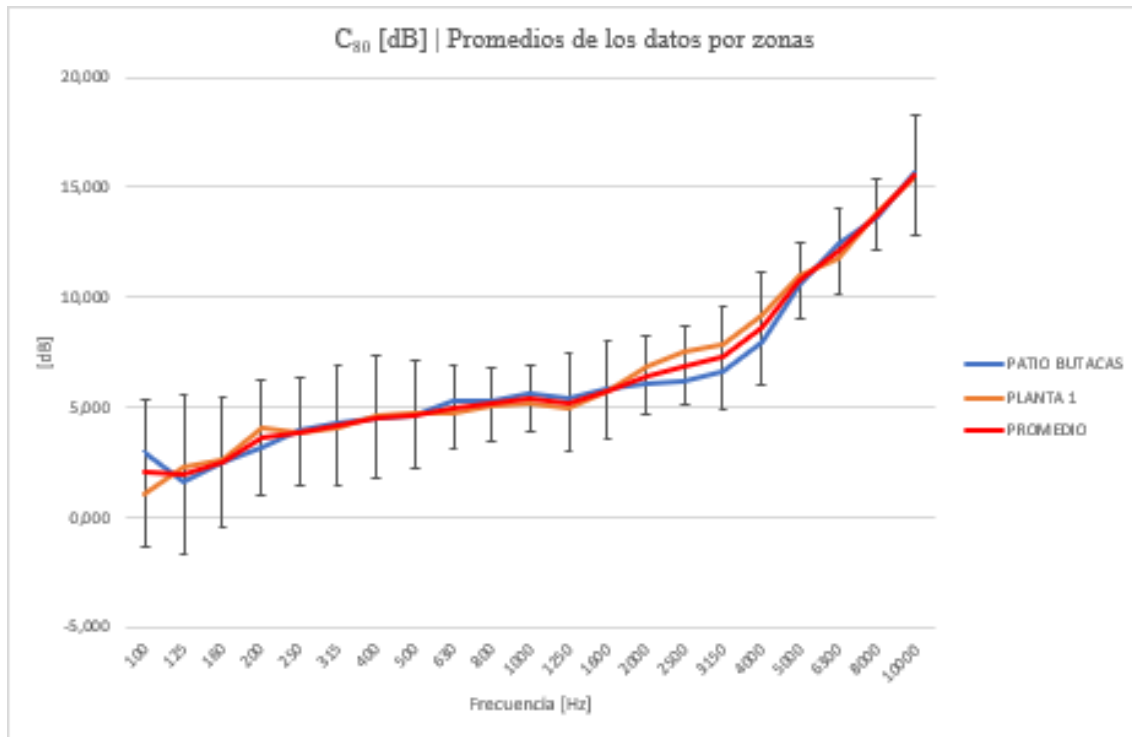


Ilustración 43. Representación gráfica de valores C80 medido.

C80[dB] Promedio de los datos por zonas				C80[dB] Desviación de los datos por zonas			
F (Hz)	PATIO BUTACAS	PLANTA 1	PROMEDIO	F (Hz)	PATIO BUTACAS	PLANTA 1	PROMEDIO
100	2,98	1,06	2,02	100	2,80	3,92	3,36
125	1,62	2,22	1,92	125	3,27	4,00	3,64
160	2,44	2,57	2,51	160	2,77	3,14	2,95
200	3,20	4,04	3,62	200	3,04	2,20	2,62
250	3,91	3,84	3,88	250	2,39	2,50	2,45
315	4,27	4,07	4,17	315	2,72	2,82	2,77
400	4,48	4,63	4,56	400	2,53	2,97	2,75
500	4,58	4,73	4,66	500	2,47	2,38	2,43
630	5,26	4,74	5,00	630	1,93	1,88	1,91
800	5,26	5,03	5,15	800	1,67	1,64	1,65
1000	5,63	5,17	5,40	1000	1,61	1,36	1,49
1250	5,44	4,94	5,19	1250	2,24	2,20	2,22
1600	5,81	5,76	5,79	1600	2,18	2,22	2,20
2000	6,04	6,82	6,43	2000	1,95	1,65	1,80
2500	6,20	7,56	6,88	2500	1,82	1,77	1,79
3150	6,63	7,86	7,24	3150	2,44	2,30	2,37
4000	7,95	9,22	8,58	4000	2,58	2,46	2,52
5000	10,58	10,98	10,78	5000	1,81	1,59	1,70
6300	12,39	11,76	12,08	6300	1,98	1,98	1,98
8000	13,67	13,88	13,78	8000	1,53	1,76	1,64
10000	15,72	15,44	15,58	10000	2,18	3,32	2,75

Tabla 165. C80 medido por zonas.

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO GEOMÉTRICO PARA EL ESTUDIO ACÚSTICO DEL TEATRO PRINCIPAL DE MORA (TOLEDO)

- Parámetro D50 (Definición):

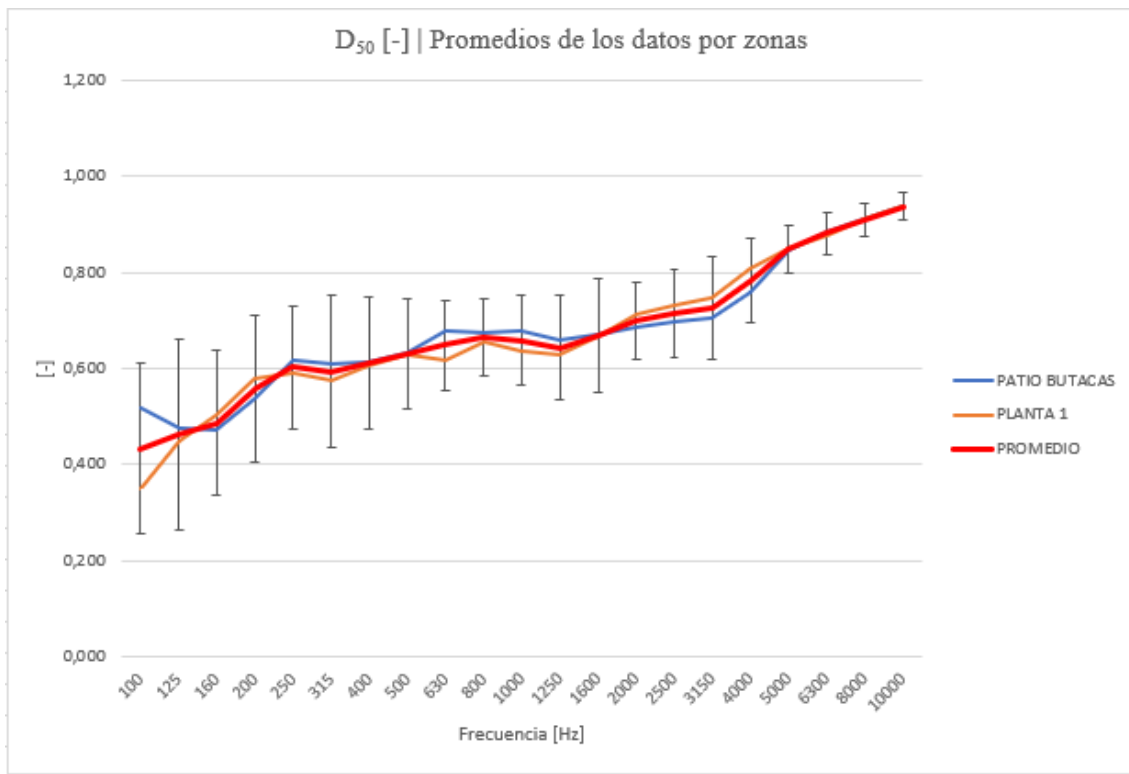


Ilustración 44. Representación gráfica de valores D50 medido.

D50[-] Promedio de los datos por zonas				D50[-] Desviación de los datos por zonas			
F (Hz)	PATIOBUTACAS	PLANTA 1	PROMEDIO	F (Hz)	PATIOBUTACAS	PLANTA 1	PROMEDIO
100	0,52	0,35	0,43	100	0,16	0,20	0,18
125	0,47	0,45	0,46	125	0,18	0,22	0,20
160	0,47	0,50	0,49	160	0,13	0,17	0,15
200	0,54	0,58	0,56	200	0,17	0,14	0,15
250	0,62	0,59	0,60	250	0,12	0,13	0,13
315	0,61	0,57	0,59	315	0,15	0,17	0,16
400	0,61	0,61	0,61	400	0,11	0,16	0,14
500	0,63	0,63	0,63	500	0,12	0,11	0,12
630	0,68	0,62	0,65	630	0,09	0,10	0,09
800	0,68	0,66	0,67	800	0,08	0,08	0,08
1000	0,68	0,64	0,66	1000	0,09	0,10	0,09
1250	0,66	0,63	0,64	1250	0,11	0,10	0,11
1600	0,67	0,67	0,67	1600	0,11	0,13	0,12
2000	0,69	0,71	0,70	2000	0,09	0,07	0,08
2500	0,70	0,73	0,72	2500	0,10	0,09	0,09
3150	0,70	0,75	0,73	3150	0,11	0,10	0,11
4000	0,76	0,81	0,78	4000	0,10	0,08	0,09
5000	0,85	0,85	0,85	5000	0,05	0,05	0,05
6300	0,89	0,88	0,88	6300	0,04	0,04	0,04
8000	0,91	0,91	0,91	8000	0,03	0,04	0,03
10000	0,94	0,94	0,94	10000	0,03	0,03	0,03

Tabla 176. D50 medido por zonas.

- Parámetro Ts:

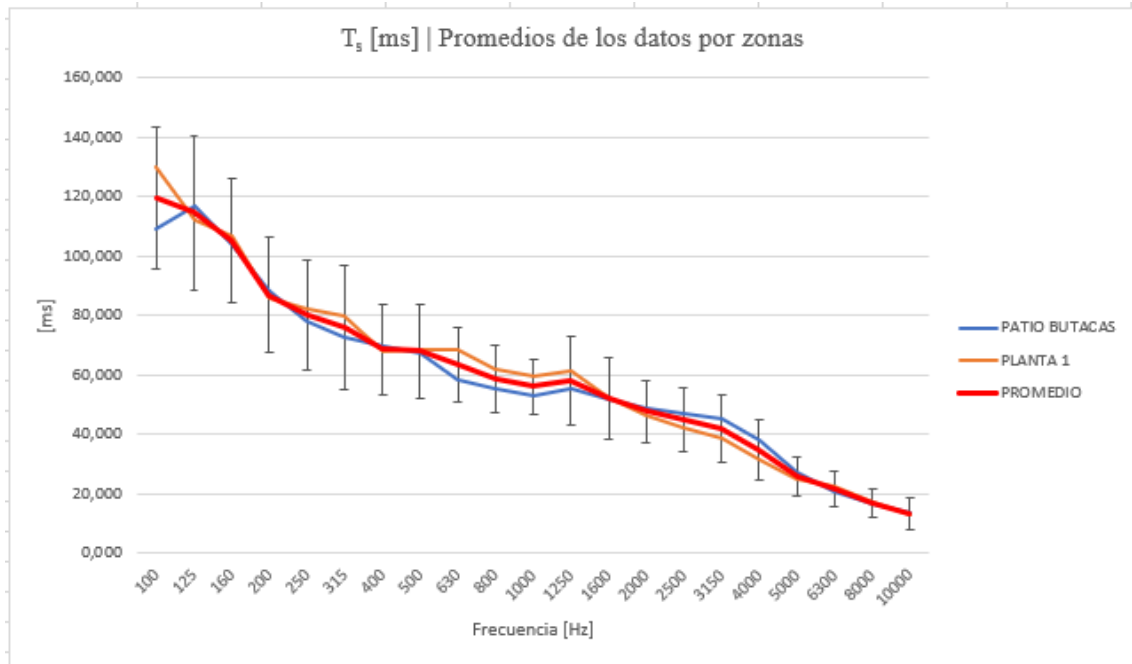


Ilustración 45. Representación gráfica de valores Ts medido.

Ts[ms] Promedio de los datos por zonas				Ts[ms] Desviación de los datos por zonas			
F (Hz)	PATIO BUTACAS	PLANTA 1	PROMEDIO	F (Hz)	PATIO BUTACAS	PLANTA 1	PROMEDIO
100	109,23	129,76	119,50	100	21,77	25,90	23,83
125	116,90	112,13	114,52	125	25,10	26,97	26,04
160	103,68	106,98	105,33	160	18,29	23,19	20,74
200	88,00	85,95	86,98	200	21,32	17,55	19,44
250	78,32	82,29	80,31	250	20,04	17,15	18,59
315	72,70	79,60	76,15	315	20,30	21,34	20,82
400	69,64	67,75	68,69	400	13,35	17,12	15,24
500	67,21	68,74	67,97	500	16,17	15,78	15,98
630	58,13	68,83	63,48	630	12,75	12,03	12,39
800	55,32	61,74	58,53	800	11,63	10,80	11,21
1000	52,86	59,58	56,22	1000	9,76	8,82	9,29
1250	55,20	61,19	58,19	1250	14,85	14,86	14,86
1600	51,89	52,19	52,04	1600	13,37	13,66	13,51
2000	48,62	46,70	47,66	2000	11,99	9,26	10,62
2500	47,35	42,58	44,96	2500	13,13	8,63	10,88
3150	45,20	38,73	41,96	3150	13,57	8,65	11,11
4000	38,23	31,59	34,91	4000	11,75	8,58	10,16
5000	27,19	24,73	25,96	5000	8,82	4,64	6,73
6300	20,79	22,30	21,54	6300	6,51	5,42	5,96
8000	16,62	17,33	16,98	8000	5,28	4,24	4,76
10000	13,89	13,02	13,45	10000	4,54	6,08	5,31

Tabla 187. Ts medido por zonas.

9.2.3 Parámetros de Espacialidad

- Parámetro LF:

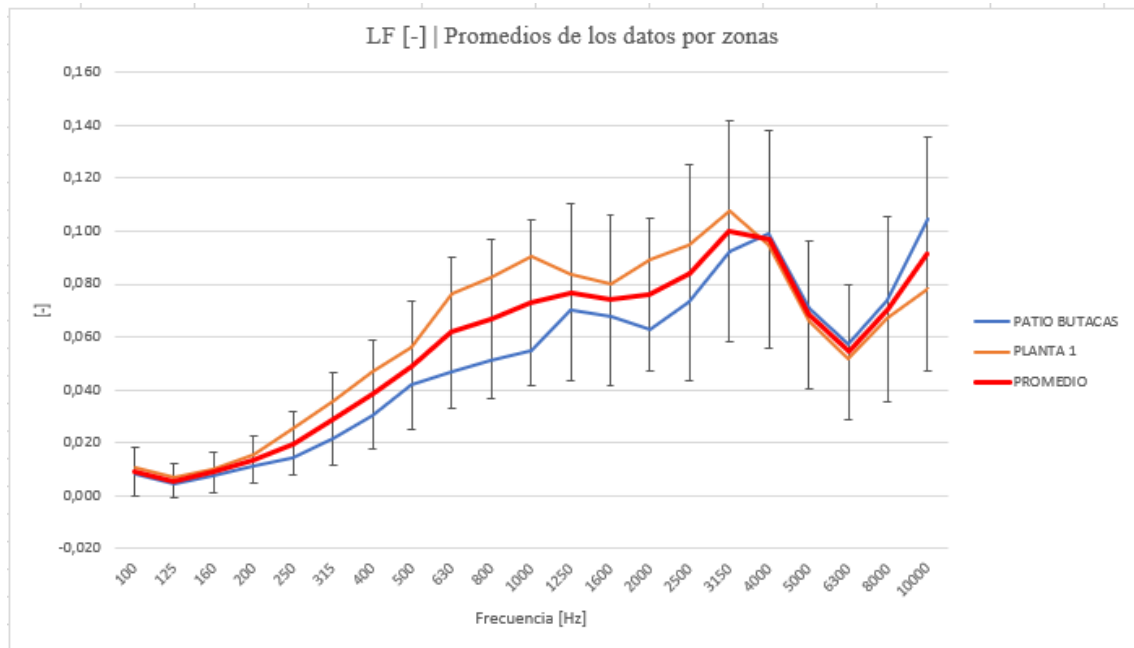


Ilustración 46. Representación gráfica de valores LF medido.

LF[-] Promedio de los datos por zonas				LF[-] Desviación de los datos por zonas			
F (Hz)	PATIO BUTACAS	PLANTA 1	PROMEDIO	F (Hz)	PATIO BUTACAS	PLANTA 1	PROMEDIO
100	0,01	0,01	0,01	100	0,01	0,01	0,01
125	0,00	0,01	0,01	125	0,01	0,01	0,01
160	0,01	0,01	0,01	160	0,01	0,01	0,01
200	0,01	0,02	0,01	200	0,01	0,01	0,01
250	0,01	0,03	0,02	250	0,01	0,01	0,01
315	0,02	0,04	0,03	315	0,02	0,02	0,02
400	0,03	0,05	0,04	400	0,02	0,02	0,02
500	0,04	0,06	0,05	500	0,03	0,02	0,02
630	0,05	0,08	0,06	630	0,03	0,03	0,03
800	0,05	0,08	0,07	800	0,03	0,03	0,03
1000	0,06	0,09	0,07	1000	0,03	0,03	0,03
1250	0,07	0,08	0,08	1250	0,03	0,03	0,03
1600	0,07	0,08	0,07	1600	0,03	0,03	0,03
2000	0,06	0,09	0,08	2000	0,02	0,03	0,03
2500	0,07	0,09	0,08	2500	0,04	0,05	0,04
3150	0,09	0,11	0,10	3150	0,04	0,04	0,04
4000	0,10	0,10	0,10	4000	0,05	0,04	0,04
5000	0,07	0,07	0,07	5000	0,03	0,02	0,03
6300	0,06	0,05	0,05	6300	0,03	0,02	0,03
8000	0,07	0,07	0,07	8000	0,04	0,03	0,04
10000	0,10	0,08	0,09	10000	0,06	0,03	0,04

Tabla 198. LF medido por zonas.

- Parámetro LFC:

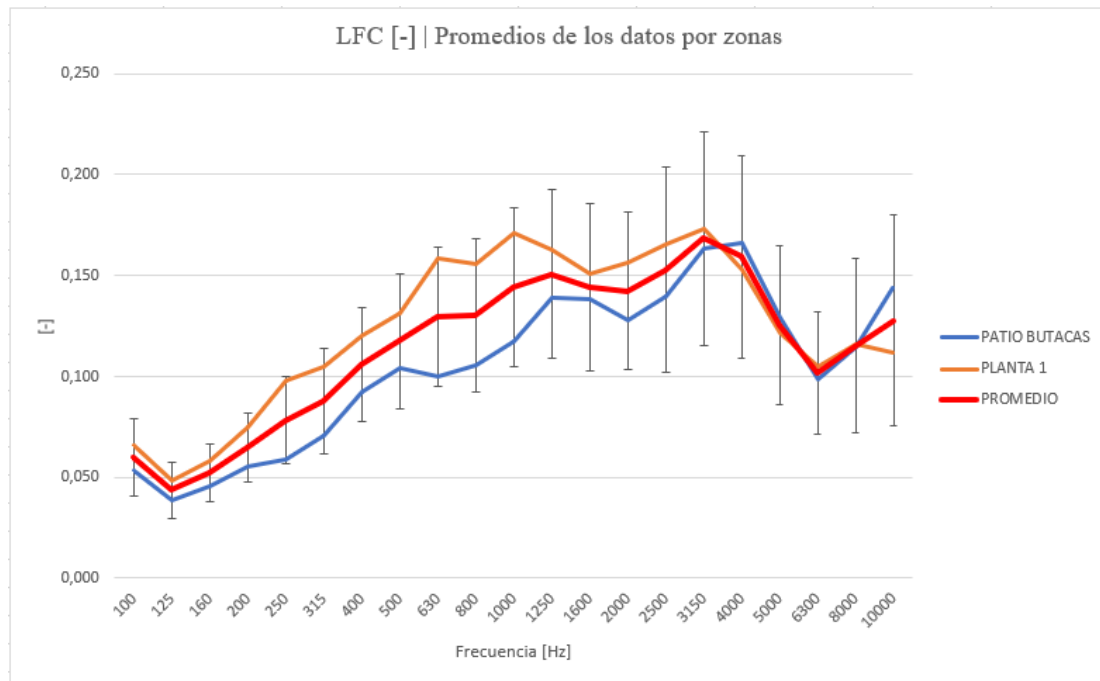


Ilustración 47. Representación gráfica de valores LFC medido.

LFC[-] Promedio de los datos por zonas				LFC[-] Desviación de los datos por zonas			
F (Hz)	PATIO BUTACAS	PLANTA 1	PROMEDIO	F (Hz)	PATIO BUTACAS	PLANTA 1	PROMEDIO
100	0,05	0,07	0,06	100	0,03	0,01	0,02
125	0,04	0,05	0,04	125	0,02	0,01	0,01
160	0,05	0,06	0,05	160	0,02	0,01	0,01
200	0,06	0,07	0,06	200	0,02	0,01	0,02
250	0,06	0,10	0,08	250	0,03	0,01	0,02
315	0,07	0,10	0,09	315	0,03	0,02	0,03
400	0,09	0,12	0,11	400	0,03	0,02	0,03
500	0,10	0,13	0,12	500	0,04	0,02	0,03
630	0,10	0,16	0,13	630	0,04	0,03	0,03
800	0,11	0,16	0,13	800	0,04	0,03	0,04
1000	0,12	0,17	0,14	1000	0,04	0,03	0,04
1250	0,14	0,16	0,15	1250	0,05	0,03	0,04
1600	0,14	0,15	0,14	1600	0,05	0,03	0,04
2000	0,13	0,16	0,14	2000	0,04	0,03	0,04
2500	0,14	0,17	0,15	2500	0,06	0,05	0,05
3150	0,16	0,17	0,17	3150	0,06	0,04	0,05
4000	0,17	0,15	0,16	4000	0,06	0,04	0,05
5000	0,13	0,12	0,13	5000	0,06	0,02	0,04
6300	0,10	0,10	0,10	6300	0,04	0,02	0,03
8000	0,11	0,12	0,12	8000	0,06	0,03	0,04
10000	0,14	0,11	0,13	10000	0,07	0,03	0,05

Tabla 209. LFC medido por zonas.

9.2.4 Parámetros de Inteligibilidad

Se muestran los resultados correspondientes a los parámetros AlCons y STI. Al no depender de la frecuencia, se muestra solo el promedio, desviación y JND de las medidas.

- Parámetro Alcons:

	ALC STI female [%]	ALC STI male [%]	ALC RASTI [%]
Promedio	4,18	4,37	1,97
Desviación	1,16	1,18	0,23
ESC JND	1	1	1

Tabla 21. Valores de AlCons medido in situ.

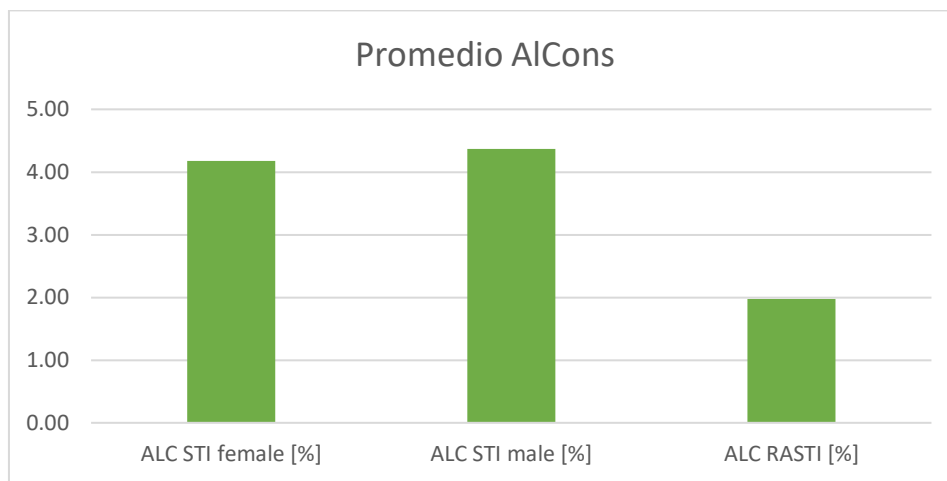


Ilustración 48. Representación gráfica de los valores obtenidos de AlCons medido in situ.

- Parámetro STI:

	STI female	STI male
Promedio	0,69	0,68
Desviación	0,04	0,04
ESC JND	1	1

Tabla 221. Valores de AlCons medido in situ.

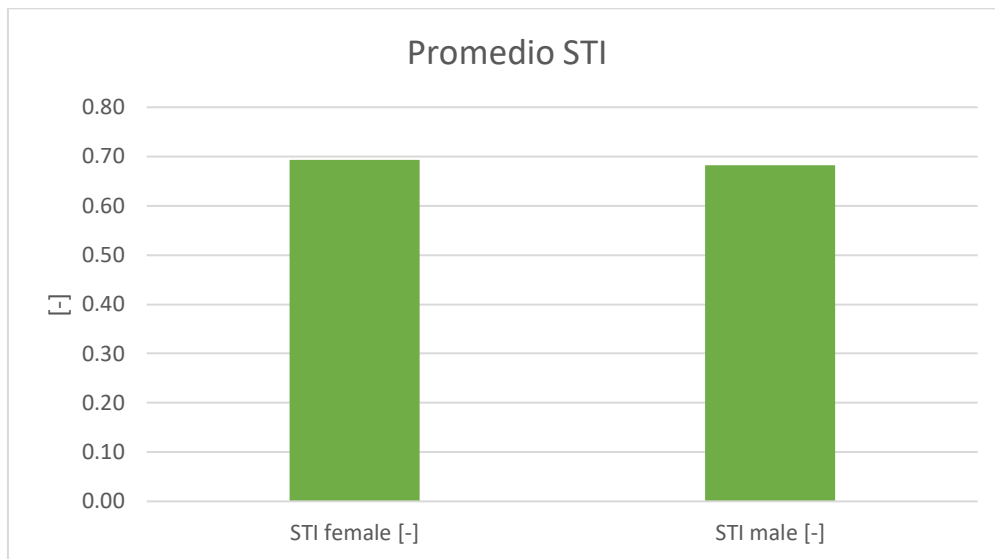


Ilustración 49. Representación gráfica de los valores obtenidos de STI medido in situ.

10. VALIDACIÓN DEL MODELO

En este apartado, se comienza con la validación del modelo geométrico. La validación se lleva a cabo en diferentes fases, cuyo fin es, comparar los parámetros medidos *in situ* y los simulados mediante el *software* EASE. Para ello, se realizarán los ajustes necesarios hasta que el recinto sea lo más parecido a la realidad.

10.1 Ajuste del Tiempo de Reverberación

El tiempo de reverberación se calcula en EASE mediante la fórmula de Eyring, utilizando la acústica estadística. Como ya se ha visto en el apartado 5.2.1 en la fórmula (2), se utiliza la superficie y volumen de la sala y el coeficiente de absorción de los materiales que conforman la sala. El volumen y superficie no se pueden modificar, por lo que el ajuste se debe realizar mediante la variación del coeficiente de absorción de los materiales.

Tras la asignación de los materiales vista en el capítulo 8, EASE calcula el tiempo de reverberación mediante la herramienta *Optimize RT*.

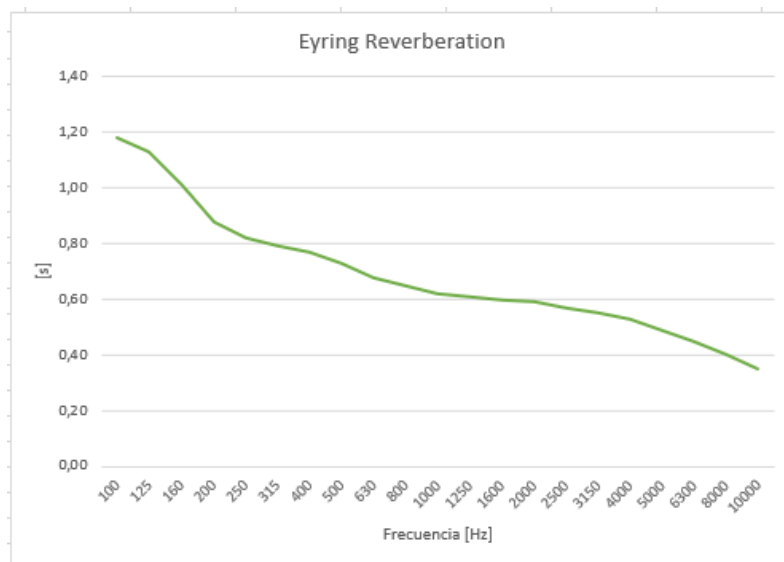


Ilustración 50. Tiempo de reverberación calculado con el método Eyring.

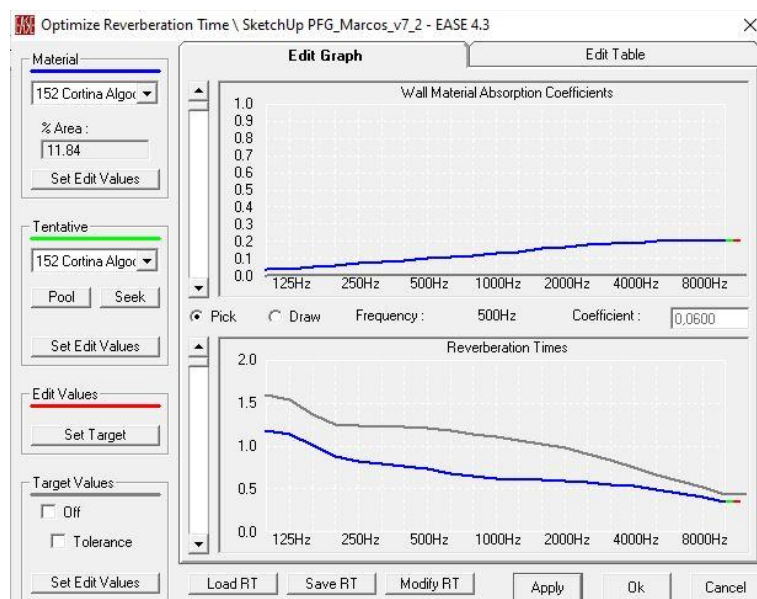


Ilustración 51. Ventana Optimize RT.

En la ilustración superior, en la gráfica de *Reverberation Times*, se presentan dos curvas, una azul que se corresponde con la reverberación obtenida en la simulación con los materiales actuales, y una gris, que se corresponde el tiempo de reverberación medido en la sala.

En el desplegable de *Tentative*, se selecciona el material por el cual se quiere reemplazar, apareciendo una nueva curva de color verde, que nos indica su coeficiente de absorción y el cambio que sufrirá el tiempo de reverberación con dicho material. En ocasiones, resulta complicado encontrar el mismo material que existe en el teatro, por lo que existe una opción en la que se puede editar manualmente el coeficiente de absorción de un material que tenga propiedades de absorción similares.

A continuación, se muestra la tabla con los distintos valores del tiempo de reverberación, donde *Room Value* indica el valor del tiempo de reverberación calculado por EASE, *Target Value* se corresponde con los valores obtenidos tras procesar los datos de la medición *in situ* del tiempo de reverberación y *Tentative Value*, muestra una previsualización del tiempo de reverberación en caso de cambiar un material. Por otra parte, *Edit Value* muestra la previsualización del tiempo de reverberación en caso de modificar a mano un material. El coeficiente de absorción se representa con *Alpha*.

The screenshot shows a software window titled 'Optimize Reverberation Time \ SketchUp PFG_Marcos_v7_2 - EASE 4.3'. It features several control panels on the left and a central table. The control panels include 'Material' (set to '152 Cortina Algor'), '% Area' (11.84), 'Tentative' (set to '152 Cortina Algor'), 'Edit Values', and 'Target Values'. The central table, titled 'Edit Table', displays the following data:

	Edit Value :		Tentative Value :		Room Value :		Target Value :	
	Alpha	RT	Alpha	RT	Alpha	RT	Alpha	RT
100Hz	0.0400	1.18	0.0400	1.18	0.0400	1.18	0.0000	1.60
125Hz	0.0400	1.13	0.0400	1.13	0.0400	1.13	0.0000	1.54
160Hz	0.0500	1.01	0.0500	1.01	0.0500	1.01	0.0000	1.36
200Hz	0.0600	0.88	0.0600	0.88	0.0600	0.88	0.0000	1.25
250Hz	0.0700	0.82	0.0700	0.82	0.0700	0.82	0.0000	1.24
315Hz	0.0800	0.79	0.0800	0.79	0.0800	0.79	0.0000	1.22
400Hz	0.0900	0.77	0.0900	0.77	0.0900	0.77	0.0000	1.22
500Hz	0.1000	0.73	0.1000	0.73	0.1000	0.73	0.0000	1.21
630Hz	0.1100	0.68	0.1100	0.68	0.1100	0.68	0.0000	1.18
800Hz	0.1200	0.65	0.1200	0.65	0.1200	0.65	0.0000	1.14
1000Hz	0.1300	0.62	0.1300	0.62	0.1300	0.62	0.0000	1.11
1250Hz	0.1400	0.61	0.1400	0.61	0.1400	0.61	0.0000	1.06
1600Hz	0.1600	0.60	0.1600	0.60	0.1600	0.60	0.0000	1.02
2000Hz	0.1700	0.59	0.1700	0.59	0.1700	0.59	0.0000	0.98
2500Hz	0.1800	0.57	0.1800	0.57	0.1800	0.57	0.0000	0.91
3150Hz	0.1900	0.55	0.1900	0.55	0.1900	0.55	0.0000	0.84
4000Hz	0.1900	0.53	0.1900	0.53	0.1900	0.53	0.0000	0.75
5000Hz	0.2000	0.49	0.2000	0.49	0.2000	0.49	0.0000	0.66
6300Hz	0.2000	0.45	0.2000	0.45	0.2000	0.45	0.0000	0.59
8000Hz	0.2000	0.40	0.2000	0.40	0.2000	0.40	0.0000	0.52
10000Hz	0.2000	0.35	0.2000	0.35	0.2000	0.35	0.0000	0.44

Ilustración 52. Tabla de valores de Optimize RT.

Como ya se ha comentado, el objetivo es aproximar la curva azul lo máximo posible a la gris. Para ello, se debe valorar el cambio de materiales. Este cambio suele hacerse notable en materiales que ocupen mayor superficie en la sala. Para ello, se puede consultar en el campo *% Area*.

Los cambios realizados en los materiales se describen a continuación.

En primer lugar, se ha cambiado el material correspondiente a las butacas, por otro más absorbente. Este cambio se ha realizado partiendo del material 090 y se ha modificado, creando así el material 092. Se muestra en la siguiente ilustración ambos materiales.

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO GEOMÉTRICO PARA EL ESTUDIO ACÚSTICO DEL TEATRO PRINCIPAL DE MORA (TOLEDO)

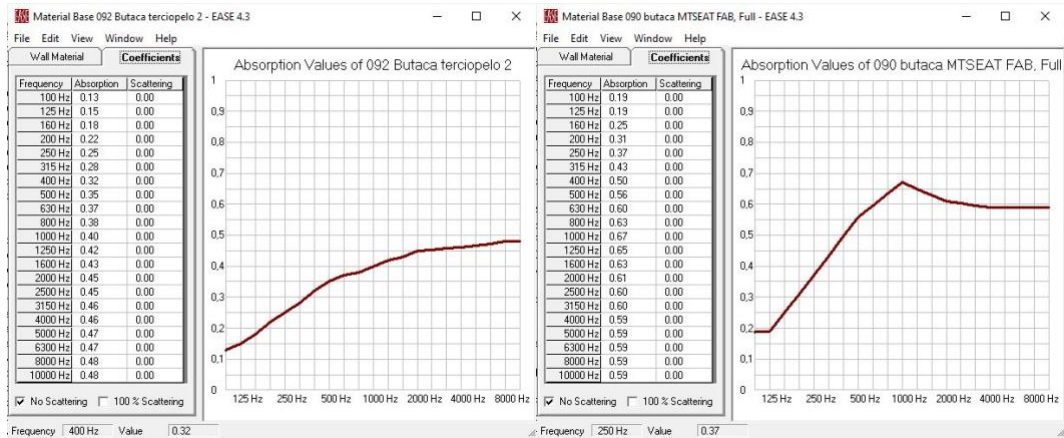


Ilustración 53. Material 090 (izquierda) y material 092 (derecha).

El siguiente cambio llevado a cabo es el del resonador del techo acústico. El material 035 es un resonador de 250 Hz, siendo modificado por un resonador a 200 Hz, de manera que el pico de absorción se encuentre en esta frecuencia. Para ello se crea el material 039, mostrado a continuación junto al material inicial para comparar absorciones.

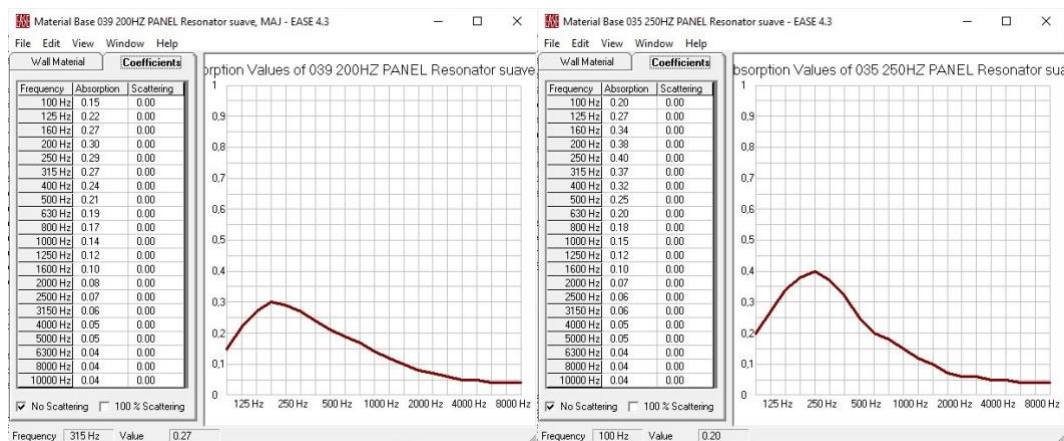


Ilustración 54. Material 035 (izquierda) y material 039 (derecha).

Por otro lado, se decide cambiar el material 150, que se corresponde con las telas de algodón presentes en el escenario, ya que ocupan un gran porcentaje de superficie de la sala, por otra menos absorbente 152.

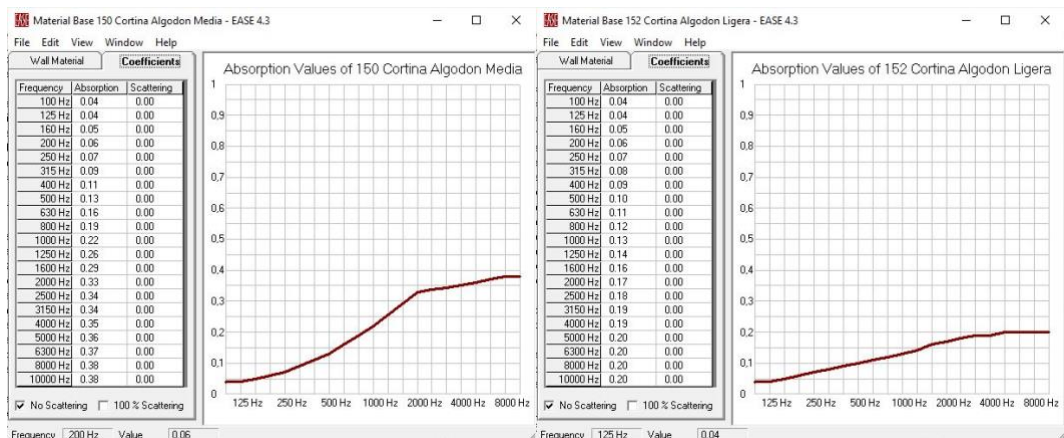


Ilustración 55. Material 150 (izquierda) y material 152 (derecha).

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO GEOMÉTRICO PARA EL ESTUDIO ACÚSTICO DEL TEATRO PRINCIPAL DE MORA (TOLEDO)

Tras esta primera serie de modificaciones, se muestran los resultados obtenidos en los parámetros energéticos C50 y C80, así como los parámetros temporales T30 y RT. Los parámetros energéticos son mejorables en media y alta frecuencia, mientras que en los temporales se debe buscar un equilibrio entre ambos, mediante la aproximación estadística para RT y la aproximación geométrica para T30, con el fin de obtener un valor cercano a la unidad en la escala JND. Los resultados se representan para todas las frecuencias utilizando la métrica JND.

Frecuencias [Hz]	C50 Standard	C50 Aura	C80 Standard	C80 Aura	T30 Aura	RT Standard
100 Hz	1	2	2	4	5	2
125 Hz	2	3	2	4	5	1
160 Hz	1	3	1	3	7	2
200 Hz	2	3	1	4	6	3
250 Hz	2	4	1	3	5	5
315 Hz	2	3	1	3	5	5
400 Hz	2	4	1	4	4	6
500 Hz	2	4	1	4	4	6
630 Hz	2	4	1	4	4	7
800 Hz	2	4	1	3	3	7
1000 Hz	1	3	1	3	5	7
1250 Hz	1	3	1	3	4	7
1600 Hz	1	3	1	4	4	7
2000 Hz	2	4	1	4	7	6
2500 Hz	2	4	1	4	6	6
3150 Hz	2	4	1	4	7	5
4000 Hz	3	4	2	4	6	4
5000 Hz	4	5	3	5	6	4
6300 Hz	5	5	4	5	5	3
8000 Hz	5	5	4	5	4	3
10000 Hz	6	5	4	5	3	3

Ilustración 56. Cálculo de JND para los parámetros C50, C80, T30 y RT tras primeras modificaciones.

Como se puede comprobar en la Ilustración 55, se pueden mejorar estos valores de JND realizando más modificaciones en los materiales de la sala.

El siguiente cambio que se realiza, es nuevamente el resonador 039, por otro más absorbente creando así el material 041.

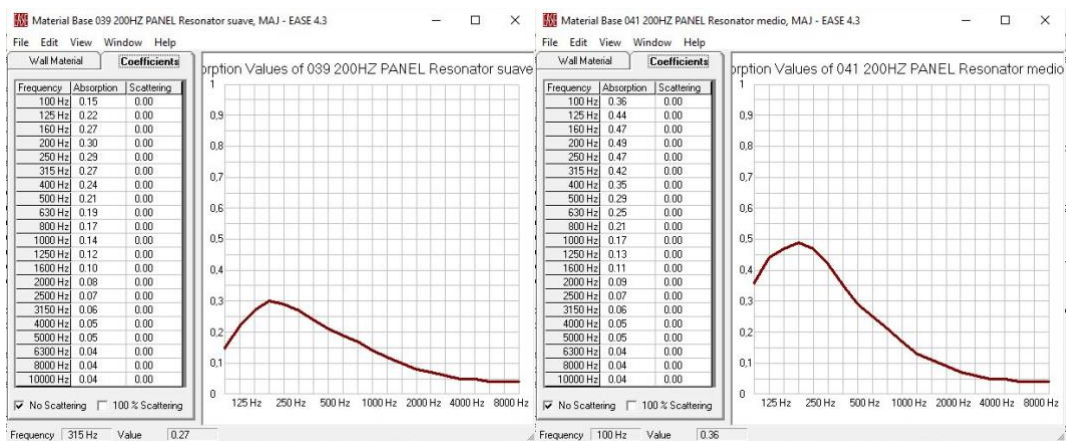


Ilustración 57. Material 039 (izquierda) y material 041 (derecha).

Otro de los cambios realizados, es el del material 131, correspondiente al suelo de madera, por otro con más absorción. El nuevo suelo se corresponde con el material 132.

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO GEOMÉTRICO PARA EL ESTUDIO ACÚSTICO DEL TEATRO PRINCIPAL DE MORA (TOLEDO)

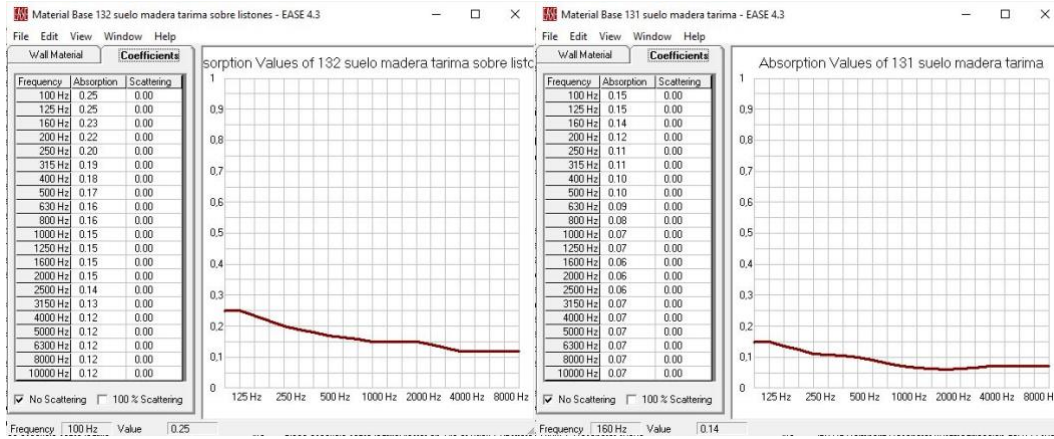


Ilustración 58. Material 131 (izquierda) y material 132 (derecha).

Por último, se realiza de nuevo un cambio de butacas, cambiando el material 092 por 097+s, siendo este un material creado a partir del 097 pero añadiendo *scattering* y mayor absorción en la zona de media y alta frecuencia. El *scattering* simula superficies rugosas o irregulares cuyo fin es crear reflexiones no especulares.

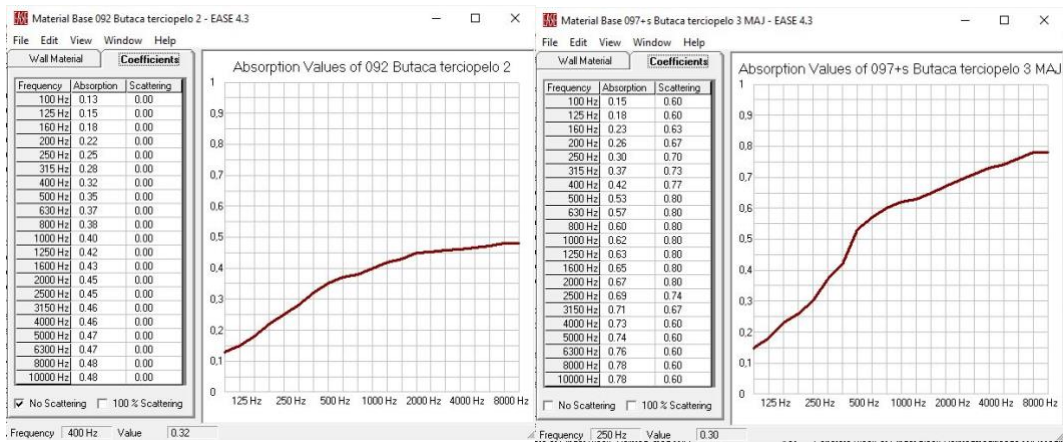


Ilustración 59. Material 092 (izquierda) y material 097+s (derecha).

Una vez realizados los cambios, se vuelven a calcular los parámetros y se comprueba el efecto de estas modificaciones. Como el total de muestras entre los escalones JND se encuentran mayoritariamente entre los valores 1 y 3, se concluye el ajuste de materiales.

Frecuencias [Hz]	C50 Standard	C50 Aura	C80 Standard	C80 Aura	T30 Aura	RT Standard
100 Hz	1	1	1	3	6	6
125 Hz	1	2	1	2	5	6
160 Hz	1	1	1	2	5	6
200 Hz	1	2	1	2	4	6
250 Hz	1	2	1	2	3	7
315 Hz	1	2	1	2	3	8
400 Hz	1	2	1	3	2	8
500 Hz	1	3	1	3	2	8
630 Hz	1	3	2	3	1	9
800 Hz	1	3	2	3	1	9
1000 Hz	1	3	2	2	1	9
1250 Hz	1	2	3	2	1	9
1600 Hz	1	3	2	3	1	9
2000 Hz	1	3	2	3	1	8
2500 Hz	1	3	2	3	1	8
3150 Hz	1	3	2	3	1	7
4000 Hz	2	4	1	4	2	6
5000 Hz	3	4	2	5	3	6
6300 Hz	4	5	2	5	3	5
8000 Hz	4	4	3	4	4	5
10000 Hz	5	5	3	4	4	5

Ilustración 60. Cálculo de JND para los parámetros C50, C80, T30 y RT tras las modificaciones.

10.2 Proceso de Cálculo de los Parámetros Acústicos

Los parámetros acústicos del modelo virtual se calculan mediante las dos teorías ya comentadas en el capítulo 5: la acústica estadística con el cálculo estándar de mapas acústicos y la acústica geométrica mediante el método AURA. Para los parámetros representados en las ilustraciones 55 y 59, se realizaron simulaciones con baja resolución en AURA, en cambio, en este apartado las simulaciones se llevarán a cabo con alta resolución.

Los parámetros acústicos que se pueden calcular por el método “*Standard Mapping*” viene limitado por EASE, ya que solo se puede calcular C50 y C80. En cambio, con el método “*AURA Mapping*” no existe ninguna limitación para calcular los parámetros.

Para crear dichos mapas, se debe entrar en la ventana *Area Mapping* y seguido desde el desplegable *Mapping* se selecciona el tipo de mapa a calcular.

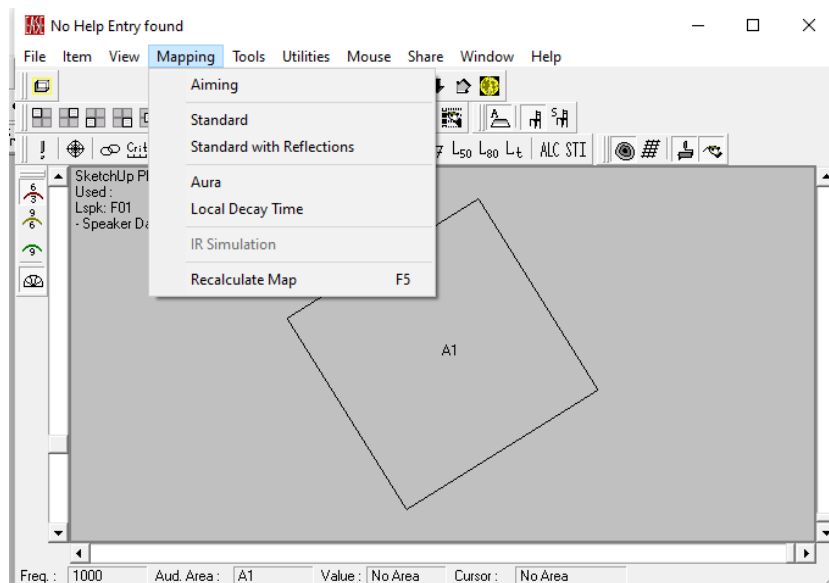


Ilustración 61. Menú Mapping de la ventana Area Mapping.

En primer lugar, se crea un mapa de tipo *Standard*. Aparece la siguiente ventana donde en la pestaña *Settings* se indica en primer lugar las fuentes sonoras que se utilizan, F01 y o F02. En la siguiente pestaña, *Items*, se seleccionan los asientos previamente introducidos en el capítulo 8, donde se quiere crear este mapa. También se introduce el ruido de fondo y como se deben calcular los parámetros con el mapeo estándar.

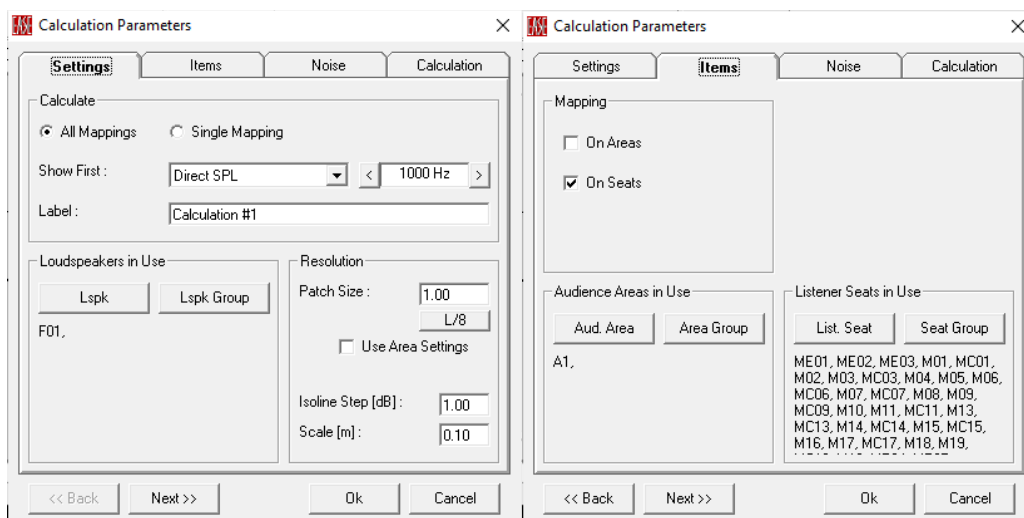


Ilustración 62. Ventana Standard Mapping

En segundo lugar, si se crea un mapa de tipo *AURA*, aparece una ventana idéntica a la del mapa *Standard* con la única diferencia que en la pestaña *Calculation* se seleccionan otros parámetros como la resolución (*Particles*), cuyo valor debe ser mínimo hasta que se obtiene un resultado válido y se aumenta la resolución. Esta forma de proceder se debe a que a mayor resolución mayor necesidad de cómputo y por tanto mayor tiempo en realizar el mapa *AURA*. Se muestra en la Ilustración 63 la ventana *Calculation* para *Standard Mapping* en la parte izquierda y para *AURA Mapping* en la parte derecha.

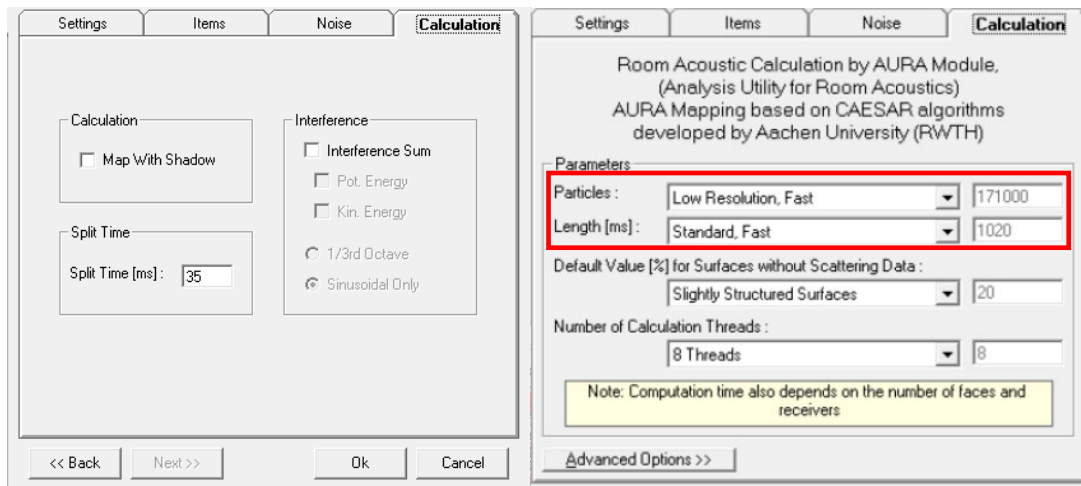


Ilustración 63. Ventana Calculation para Standard Mapping y AURA Mapping.

10.3 Presentación de Resultados

Llegados a este punto, se puede decir que el modelo ya está preparado para trabajar con él, por lo que, las simulaciones realizadas por *Standard Mapping* y *AURA Mapping* se realizan con mayor resolución. Para ello, se debe aumentar el número de partículas y la longitud de la ventana como se muestra en la siguiente ilustración para el caso de *AURA Mapping*.

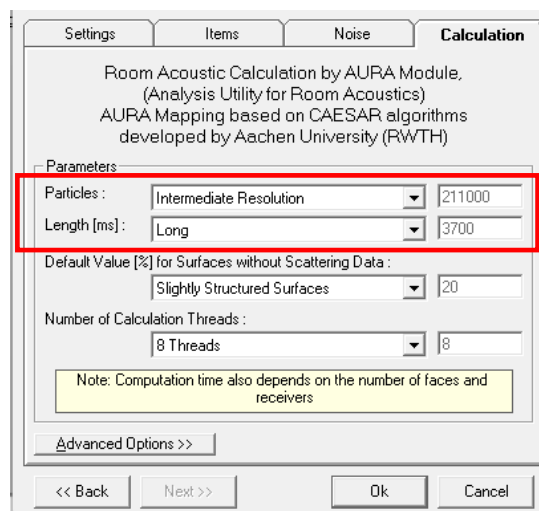


Ilustración 64. Ajuste de mayor resolución en la ventana AURA Mapping.

Una vez obtenidos los mapas, se procesan los datos según el criterio de *Chauvenet*, siguiendo el mismo procedimiento que en el procesado de datos de las medidas *in situ*, pero sin aplicar la máscara INR.

Para realizar la comparación, se presentan los datos medidos y los datos simulados junto con los escalones JND, el cual nos indica cuánto de similares son las medidas simuladas a las reales. El rango de frecuencias en el que se comparan comprende desde 100 Hz hasta 10 kHz, ya que es el rango con el que trabaja EASE.

10.3.1 Resultados en bandas de tercios de octava.

A continuación, se presentan los resultados de los parámetros.

- **Parámetros temporales.**

EDT [s] AURA			
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO
100	1,29	0,36	2,00
125	1,26	0,36	1,96
160	1,33	0,36	1,69
200	1,19	0,30	1,46
250	1,22	0,36	1,34
315	1,14	0,31	1,32
400	1,07	0,29	1,31
500	1,13	0,26	1,31
630	1,11	0,24	1,25
800	1,10	0,24	1,22
1000	1,04	0,20	1,16
1250	0,98	0,21	1,15
1600	0,93	0,18	1,14
2000	0,87	0,22	1,11
2500	0,83	0,22	1,06
3150	0,73	0,22	0,99
4000	0,61	0,20	0,89
5000	0,49	0,17	0,75
6300	0,42	0,14	0,64
8000	0,35	0,11	0,52
10000	0,29	0,11	0,40

Tabla 23. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro EDT.

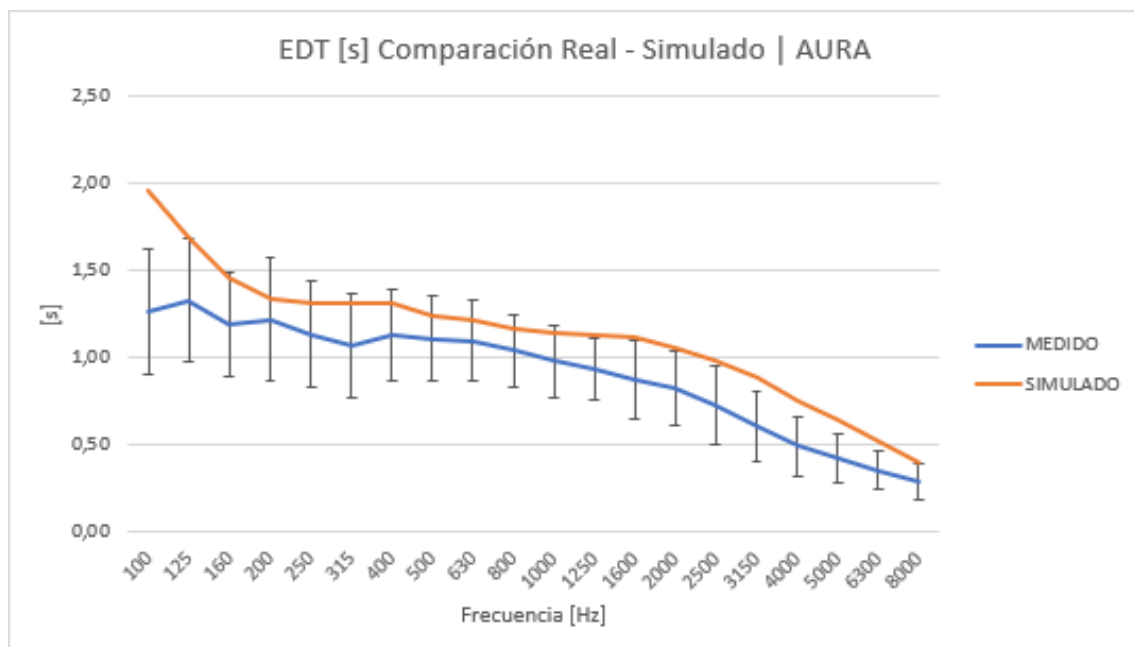


Ilustración 65. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro EDT.

RT [s] STD			
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO
100	1,60	0,20	1,18
125	1,54	0,20	1,13
160	1,36	0,13	1,01
200	1,25	0,09	0,88
250	1,24	0,11	0,82
315	1,22	0,10	0,79
400	1,22	0,09	0,77
500	1,21	0,06	0,73
630	1,18	0,06	0,68
800	1,14	0,05	0,65
1000	1,11	0,05	0,62
1250	1,06	0,05	0,61
1600	1,02	0,04	0,60
2000	0,98	0,04	0,59
2500	0,91	0,04	0,57
3150	0,84	0,03	0,55
4000	0,75	0,02	0,53
5000	0,66	0,02	0,49
6300	0,59	0,02	0,45
8000	0,52	0,02	0,40
10000	0,44	0,03	0,35

Tabla 24. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro RT.

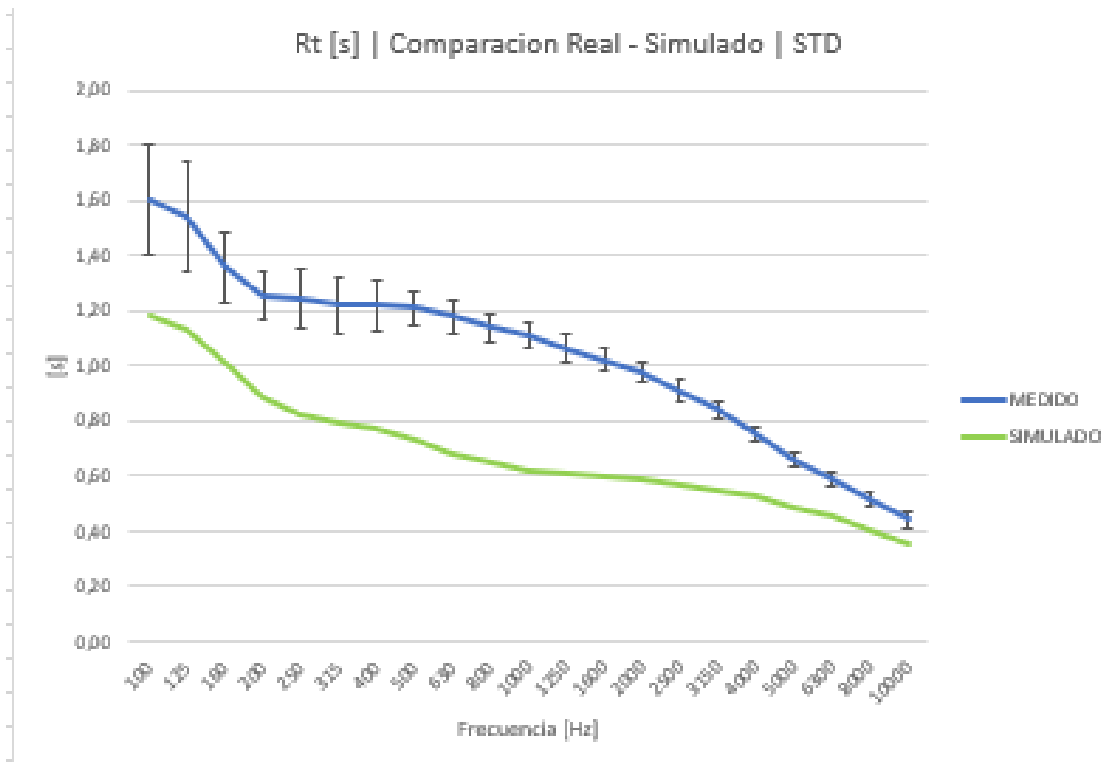


Ilustración 66. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro RT.

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO GEOMÉTRICO PARA EL ESTUDIO ACÚSTICO DEL TEATRO PRINCIPAL DE MORA (TOLEDO)

T20 [s] Eyring			
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO
100	1,54	0,20	1,98
125	1,54	0,22	1,91
160	1,34	0,17	1,65
200	1,28	0,13	1,43
250	1,26	0,12	1,34
315	1,22	0,11	1,33
400	1,23	0,11	1,32
500	1,21	0,09	1,32
630	1,20	0,08	1,27
800	1,14	0,07	1,23
1000	1,11	0,06	1,19
1250	1,06	0,06	1,19
1600	1,02	0,05	1,17
2000	0,97	0,05	1,14
2500	0,91	0,05	1,10
3150	0,84	0,04	1,02
4000	0,75	0,04	0,93
5000	0,65	0,04	0,82
6300	0,59	0,03	0,70
8000	0,53	0,03	0,59
10000	0,45	0,05	0,48

Tabla 25. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro T20.

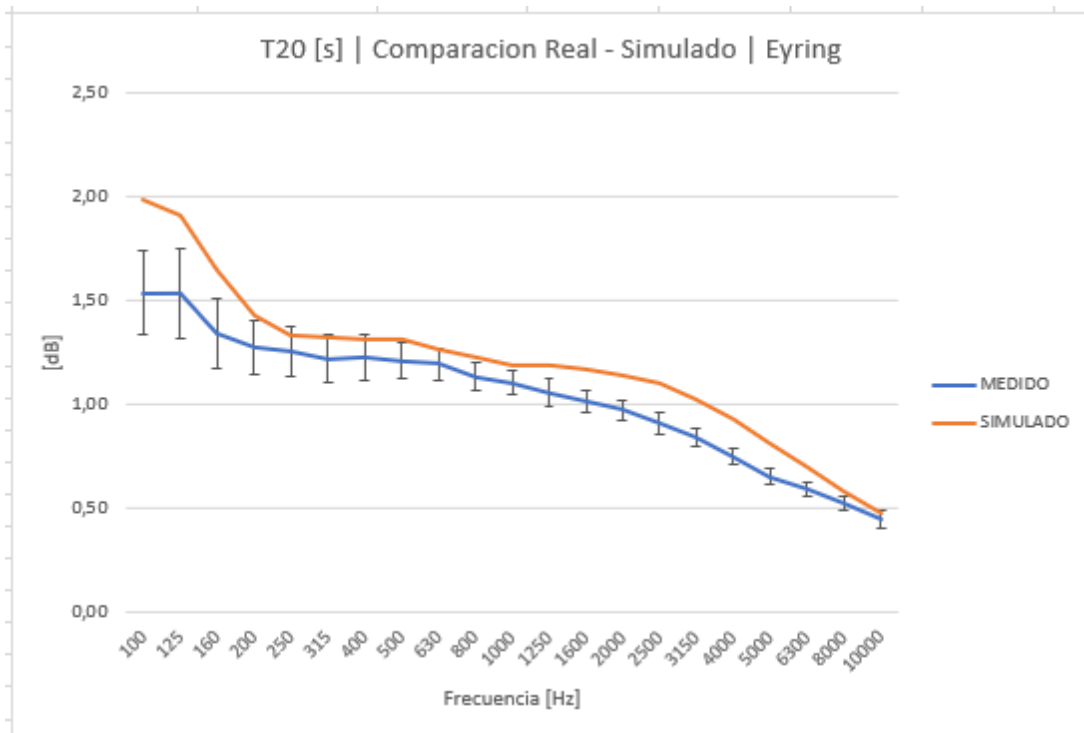


Ilustración 67. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro T20.

Frecuencias [Hz]	T30 [s] Eyring		
	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO
100	1,65	0,20	1,97
125	1,58	0,15	1,88
160	1,37	0,13	1,66
200	1,25	0,07	1,42
250	1,24	0,09	1,34
315	1,21	0,09	1,34
400	1,21	0,07	1,33
500	1,20	0,06	1,33
630	1,18	0,06	1,29
800	1,14	0,05	1,24
1000	1,11	0,05	1,22
1250	1,07	0,04	1,24
1600	1,02	0,04	1,19
2000	0,98	0,03	1,17
2500	0,91	0,03	1,12
3150	0,84	0,03	1,04
4000	0,75	0,02	0,94
5000	0,66	0,02	0,82
6300	0,59	0,03	0,70
8000	0,52	0,02	0,59
10000	0,44	0,03	0,48

Tabla 26. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro T30.

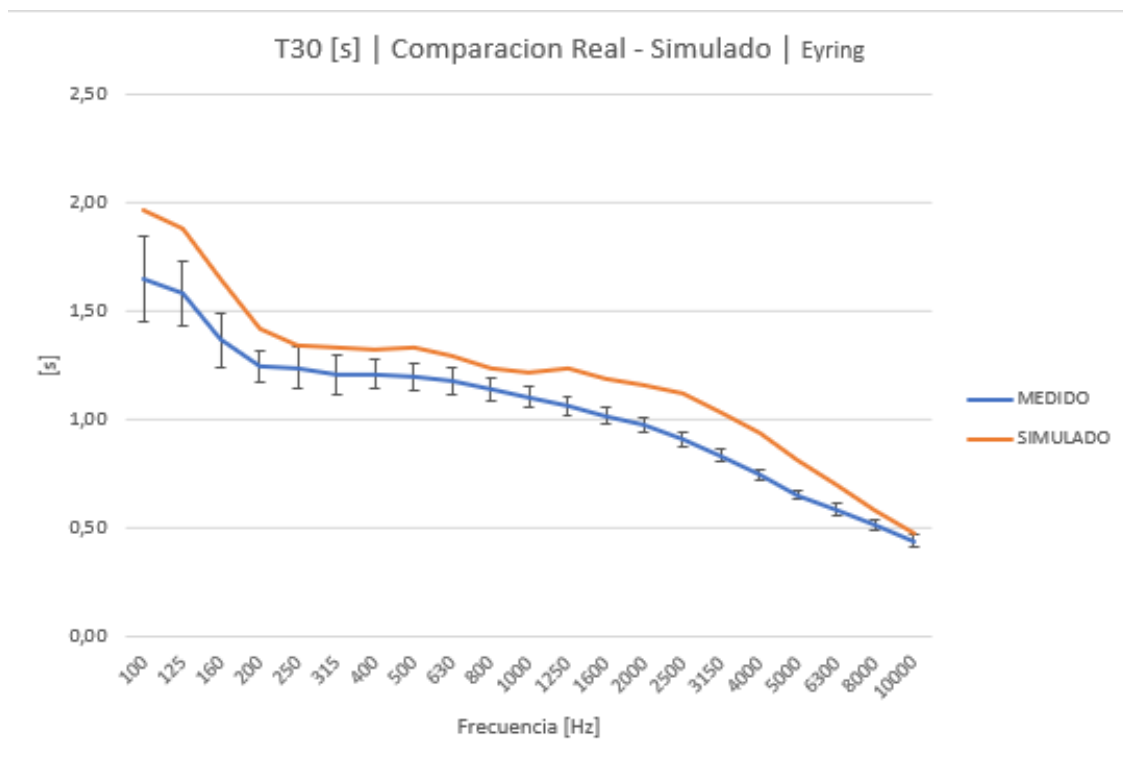


Ilustración 68. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro T30.

- **Parámetros energéticos.**

Frecuencias [Hz]	C50 [dB] STD			C50 [dB] AURA	
	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO STD	DESVIACIÓN	SIMULADO AURA
100	-1,41	3,70	-1,03	3,70	-1,90
125	-0,82	4,02	-0,82	4,02	-1,77
160	-0,27	2,92	-0,10	2,92	-1,08
200	1,17	2,78	0,69	2,78	-0,21
250	1,98	2,54	1,16	2,54	0,17
315	1,91	2,94	1,42	2,94	0,25
400	2,10	2,67	1,58	2,67	0,31
500	2,47	2,29	1,92	2,29	0,34
630	2,78	1,86	2,40	1,86	0,58
800	3,09	1,60	2,80	1,60	0,86
1000	2,97	1,85	3,14	1,85	1,10
1250	2,72	2,21	3,21	2,21	1,18
1600	3,20	2,37	3,32	2,37	1,26
2000	3,74	1,98	3,46	1,98	1,49
2500	4,10	2,22	3,67	2,22	1,79
3150	4,54	2,50	3,93	2,50	2,27
4000	5,84	2,60	4,25	2,60	2,84
5000	7,53	1,95	4,79	1,95	3,84
6300	8,79	2,06	5,41	2,06	4,97
8000	10,24	2,12	6,31	2,12	6,39
10000	12,14	2,79	7,44	2,79	8,25

Tabla 27. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro C50.

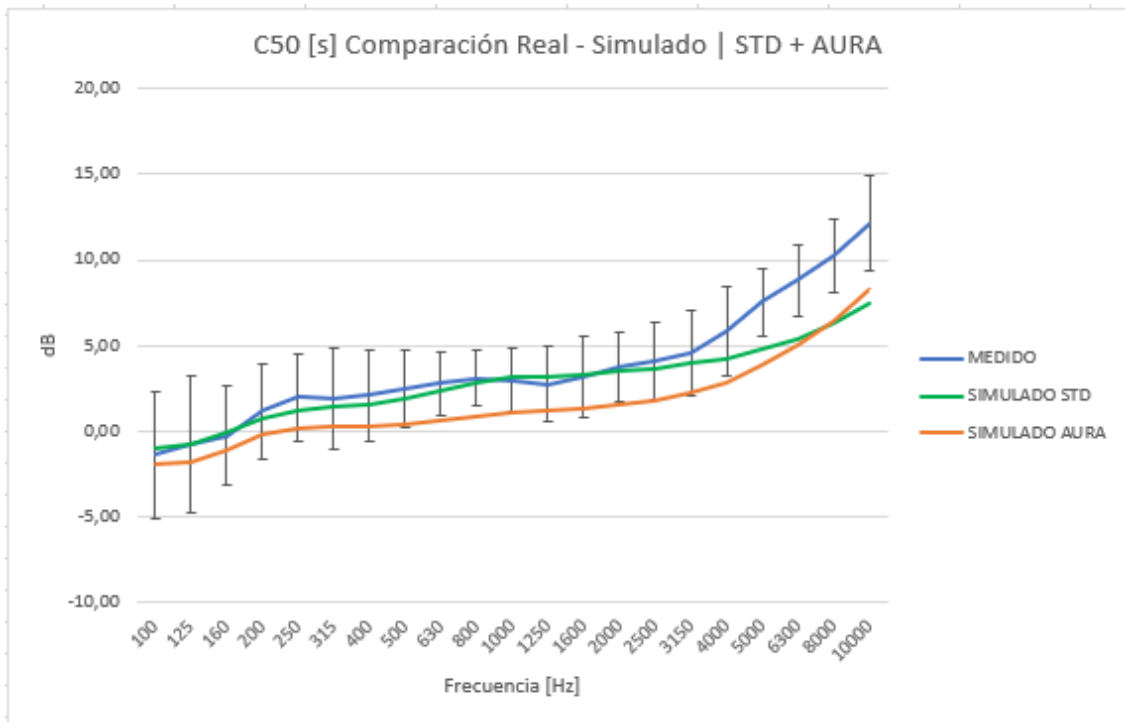


Ilustración 69. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro C50.

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO GEOMÉTRICO PARA EL ESTUDIO ACÚSTICO DEL TEATRO PRINCIPAL DE MORA (TOLEDO)

Frecuencias [Hz]	C80 [dB] STD			C80 [dB] AURA	
	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO STD	DESVIACIÓN	SIMULADO AURA
100	2,02	3,36	1,88	3,36	0,11
125	1,92	3,64	2,13	3,64	0,24
160	2,51	2,95	2,98	2,95	1,05
200	3,62	2,62	3,93	2,62	2,01
250	3,88	2,45	4,49	2,45	2,54
315	4,17	2,77	4,82	2,77	2,61
400	4,56	2,75	5,02	2,75	2,65
500	4,66	2,43	5,44	2,43	2,59
630	5,00	1,91	6,04	1,91	2,98
800	5,15	1,65	6,55	1,65	3,26
1000	5,40	1,49	6,98	1,49	3,58
1250	5,19	2,22	7,08	2,22	3,63
1600	5,79	2,20	7,23	2,20	3,82
2000	6,43	1,80	7,41	1,80	3,92
2500	6,88	1,79	7,69	1,79	4,29
3150	7,24	2,37	8,04	2,37	4,84
4000	8,58	2,52	8,48	2,52	5,59
5000	10,78	1,70	9,23	1,70	6,72
6300	12,08	1,98	10,11	1,98	8,17
8000	13,78	1,64	11,41	1,64	10,11
10000	15,58	2,75	13,06	2,75	12,49

Tabla 28. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro C80.

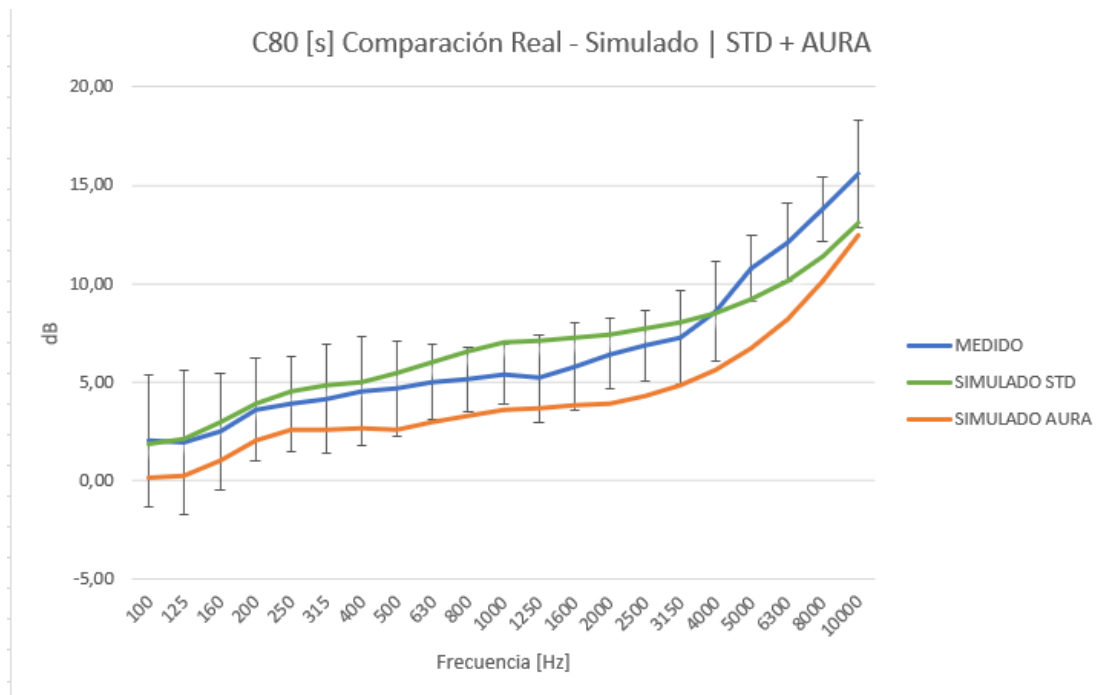


Ilustración 70. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro C80.

D50 [-] AURA	
Frecuencias [Hz]	MEDIDO DESVIACIÓN SIMULADO
100	0,43 0,18 0,39
125	0,46 0,20 0,40
160	0,49 0,15 0,44
200	0,56 0,15 0,48
250	0,60 0,13 0,51
315	0,59 0,16 0,51
400	0,61 0,14 0,52
500	0,63 0,12 0,52
630	0,65 0,09 0,53
800	0,67 0,08 0,55
1000	0,66 0,09 0,56
1250	0,64 0,11 0,57
1600	0,67 0,12 0,57
2000	0,70 0,08 0,58
2500	0,72 0,09 0,60
3150	0,73 0,11 0,63
4000	0,78 0,09 0,66
5000	0,85 0,05 0,70
6300	0,88 0,04 0,76
8000	0,91 0,03 0,81
10000	0,94 0,03 0,87

Tabla 29. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro D50.

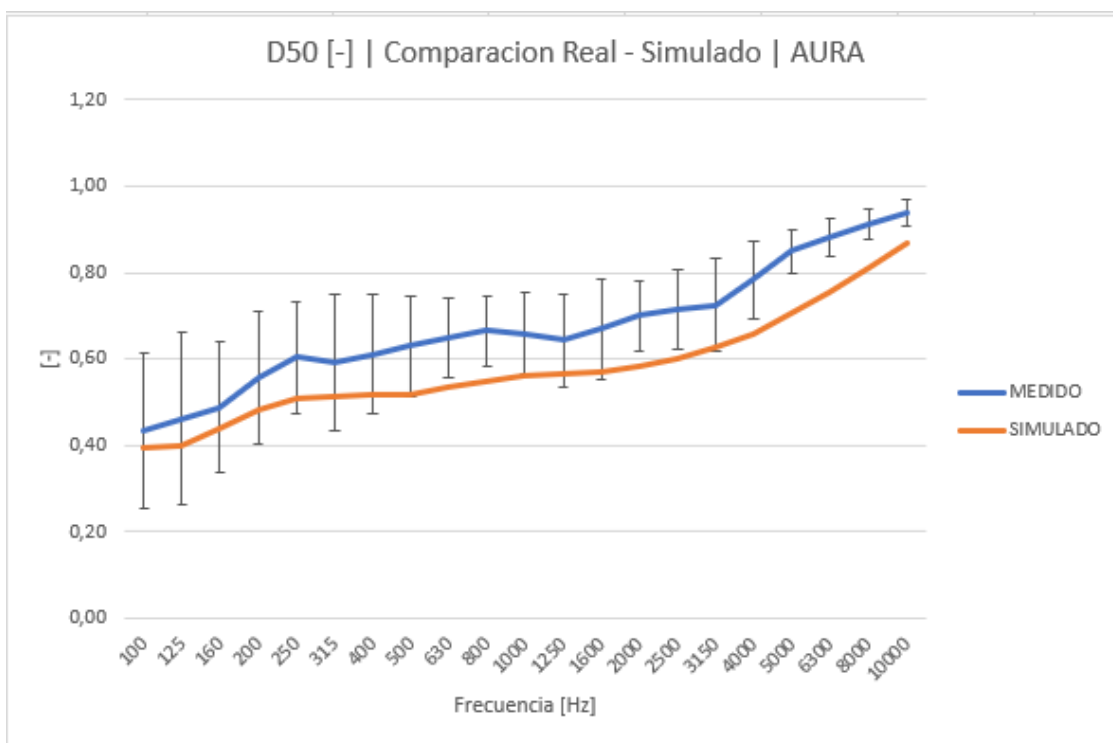


Ilustración 71. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro D50.

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO GEOMÉTRICO PARA EL ESTUDIO ACÚSTICO DEL TEATRO PRINCIPAL DE MORA (TOLEDO)

Ts [ms] AURA			
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO
100	119,50	23,83	126,05
125	114,52	26,04	122,30
160	105,33	20,74	104,81
200	86,98	19,44	88,46
250	80,31	18,59	80,87
315	76,15	20,82	80,16
400	68,69	15,24	79,25
500	67,97	15,98	79,47
630	63,48	12,39	75,23
800	58,53	11,21	72,26
1000	56,22	9,29	68,73
1250	58,19	14,86	68,10
1600	52,04	13,51	66,74
2000	47,66	10,62	65,08
2500	44,96	10,88	61,27
3150	41,96	11,11	56,32
4000	34,91	10,16	50,80
5000	25,96	6,73	43,22
6300	21,54	5,96	35,79
8000	16,98	4,76	28,92
10000	13,45	5,31	22,54

Tabla 30. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro Ts.

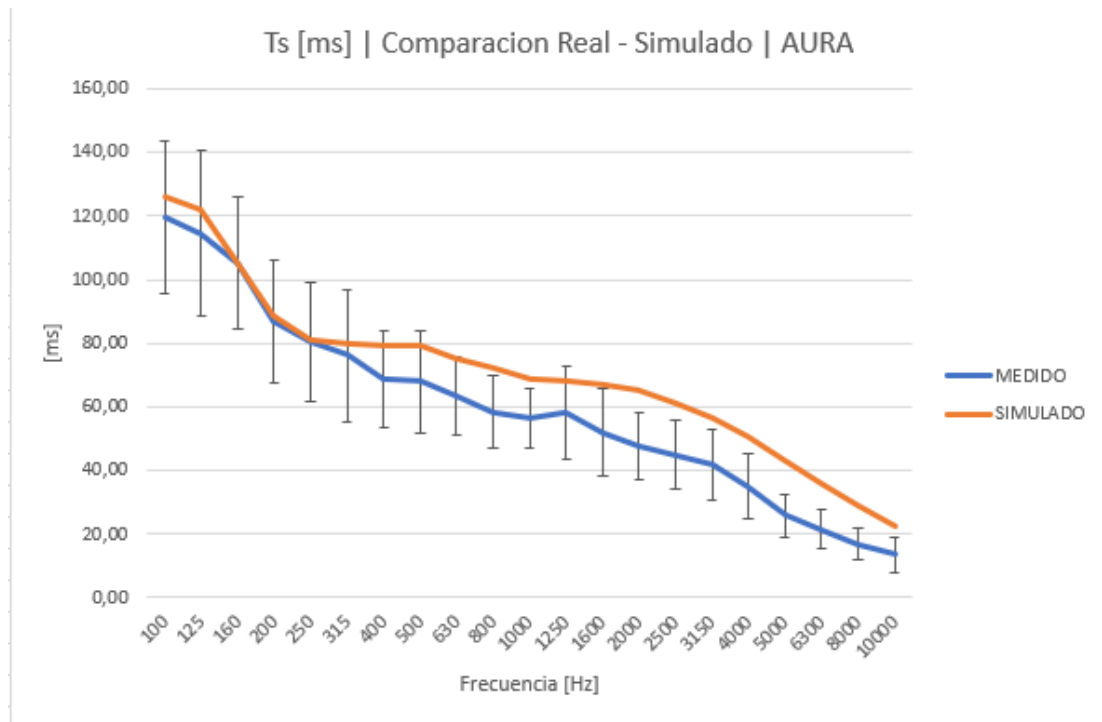


Ilustración 72. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro Ts.

- **Parámetros espaciales.**

LF [-] AURA			
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO
100	0,01	0,01	0,22
125	0,01	0,01	0,23
160	0,01	0,01	0,23
200	0,02	0,01	0,23
250	0,03	0,01	0,23
315	0,04	0,02	0,23
400	0,05	0,02	0,22
500	0,07	0,02	0,22
630	0,08	0,03	0,22
800	0,09	0,03	0,22
1000	0,10	0,03	0,21
1250	0,10	0,03	0,21
1600	0,10	0,03	0,21
2000	0,10	0,03	0,21
2500	0,11	0,04	0,21
3150	0,10	0,04	0,20
4000	0,13	0,04	0,20
5000	0,09	0,03	0,19
6300	0,07	0,03	0,18
8000	0,10	0,04	0,17
10000	0,12	0,04	0,16

Tabla 31. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro LF.

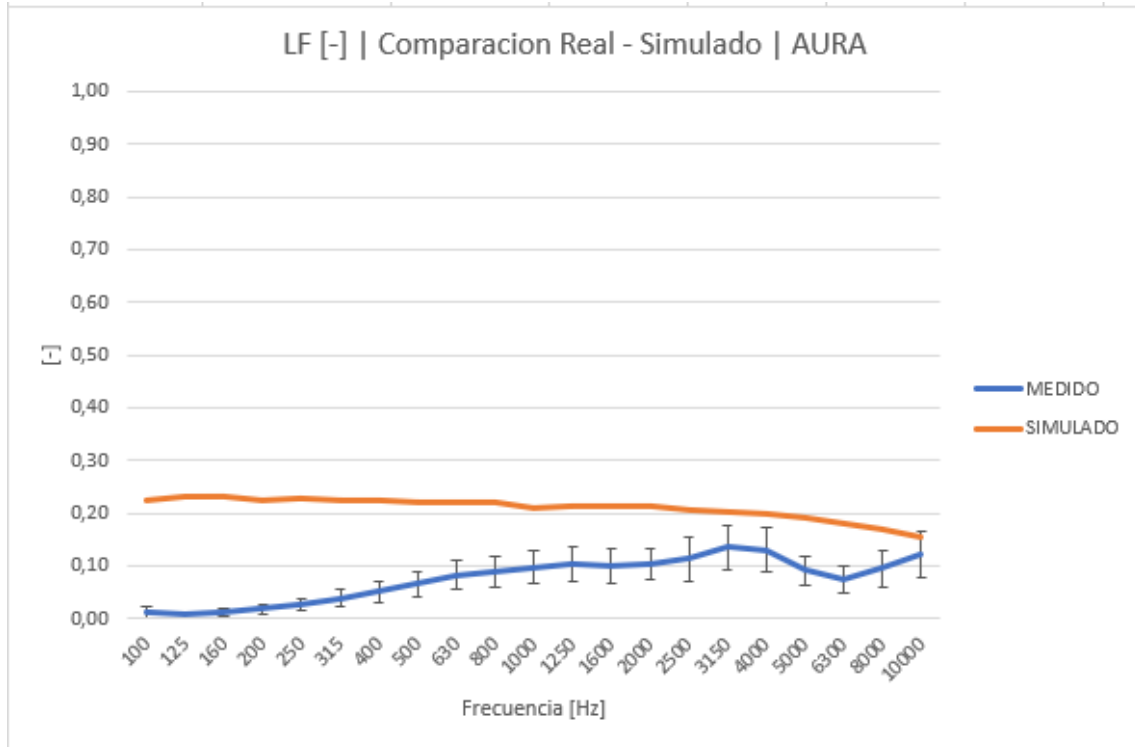


Ilustración 73. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro LF.

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO GEOMÉTRICO PARA EL ESTUDIO ACÚSTICO DEL TEATRO PRINCIPAL DE MORA (TOLEDO)

LFC [-] AURA			
Frecuencias [Hz]	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO
100	0,08	0,02	0,35
125	0,06	0,01	0,36
160	0,07	0,01	0,35
200	0,09	0,02	0,35
250	0,11	0,02	0,35
315	0,12	0,03	0,35
400	0,14	0,03	0,35
500	0,16	0,03	0,34
630	0,17	0,03	0,34
800	0,18	0,04	0,34
1000	0,19	0,04	0,33
1250	0,20	0,04	0,33
1600	0,19	0,04	0,33
2000	0,19	0,04	0,33
2500	0,21	0,05	0,32
3150	0,23	0,05	0,32
4000	0,22	0,05	0,32
5000	0,17	0,04	0,30
6300	0,14	0,03	0,29
8000	0,16	0,04	0,27
10000	0,17	0,05	0,25

Tabla 32. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro LFC.

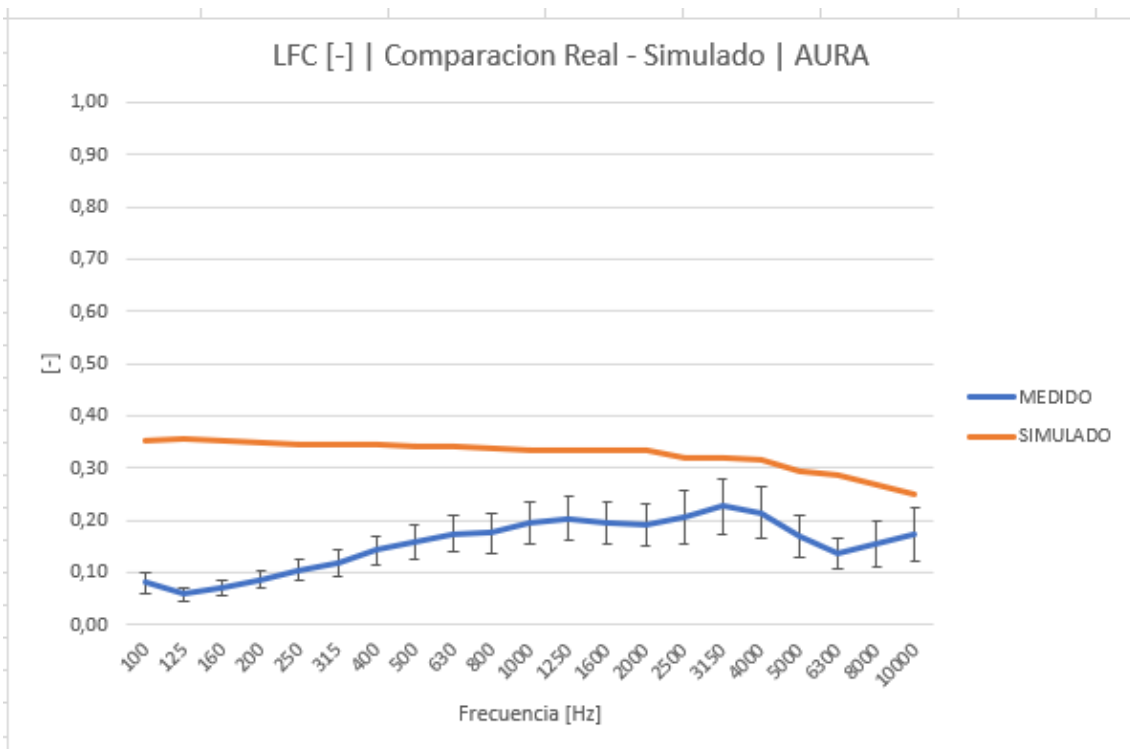


Ilustración 74. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro LFC.

- **Parámetros de inteligibilidad.**

STI [-] STD			STI [-] AURA		
MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO STD	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO AURA
0,69	0,04	0,72	0,69	0,04	0,61

Tabla 332. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro STI.

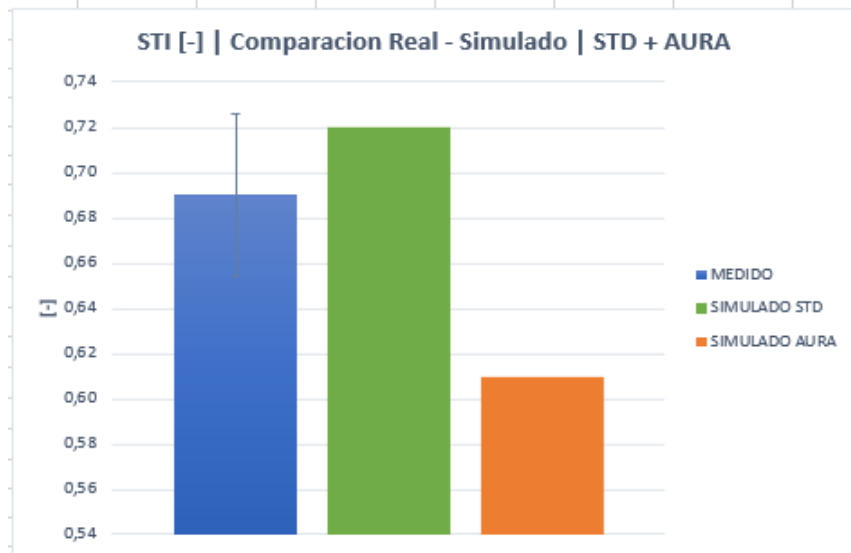


Ilustración 75. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro STI.

ALCONS [%] STD			ALCONS [%] AURA		
MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO STD	MEDIDO	DESVIACIÓN	SIMULADO AURA
4,18	1,16	3,54	4,18	1,16	6,36

Tabla 34. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro AlCons.

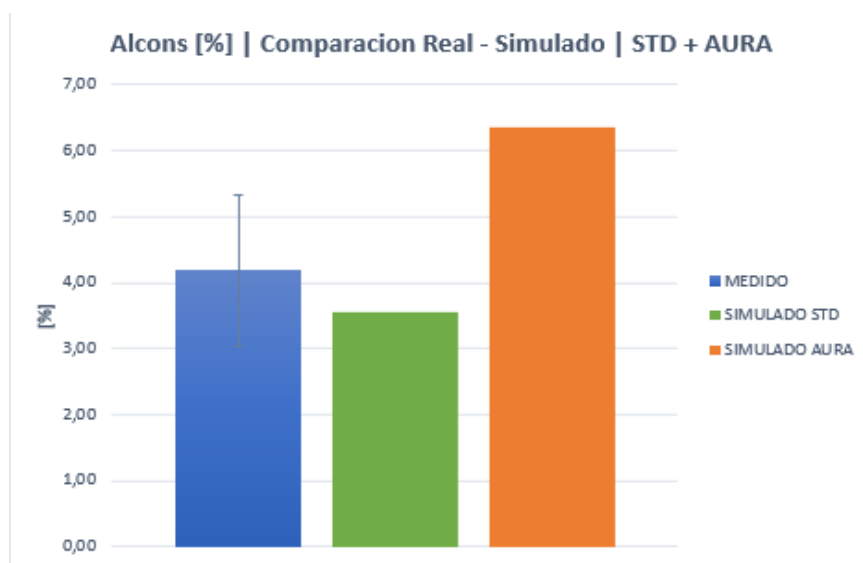


Ilustración 76. Comparación entre datos medidos y simulados en tercios de octava. Parámetro AlCons.

En la tabla 35, se estima la distancia entre los parámetros medidos y los simulados, expresada en métrica JND, según se indica en el apartado 5.3.

Tras presentar los resultados en la tabla 35, se comprueba que a excepción de los parámetros LF, LFC y RT que se ha conseguido una adaptación notable a los datos obtenidos de las medidas *in situ*. Esto quiere decir que el modelo virtual se parece a la realidad.

El porcentaje correspondiente a cada escalón se representa en la tabla 36.

Se observa que el 77% de los valores está entre los 3 primeros escalones, lo cual indica que se considera aceptable para la validación del modelo, según el procedimiento desarrollado por el grupo de investigación GAMMA. La validación es adecuada, ya que el 60% de los datos se encuentran por debajo del segundo escalón y por ello no habrá una apreciación de diferencia respecto a las medidas *in situ*.

Frecuencia [Hz]	EDT AURA	T20 AURA	T30 AURA	RT STD	C50 STD	C50 AURA	C80 STD	C80 AURA	D50 AURA	Ts AURA	LF AURA	LFC AURA	STIM STD	STIM AURA	AlCons M STD	AlCons M AURA
100 Hz	6	5	5	5	1	1	1	2	1	1	5	6				
125 Hz	6	4	4	5	1	1	1	2	1	1	5	6				
160 Hz	3	4	4	4	1	1	1	2	1	1	5	6				
200 Hz	3	2	2	4	1	2	1	2	1	1	5	6				
250 Hz	1	1	1	5	1	2	1	2	1	1	5	5				
315 Hz	2	2	2	5	2	2	1	2	1	1	4	5				
400 Hz	3	1	1	5	1	2	1	2	1	2	4	5				
500 Hz	2	2	2	5	1	3	1	3	2	2	4	4				
630 Hz	2	1	1	5	1	3	2	3	2	2	3	4				
800 Hz	2	1	1	5	1	3	2	2	2	2	3	4				
1000 Hz	2	1	1	5	1	2	2	2	1	2	3	4				
1250 Hz	2	2	2	5	1	2	2	2	1	2	3	3	1	3		2
1600 Hz	3	2	2	5	1	2	2	2	1	1	3	3				
2000 Hz	3	2	2	4	1	3	1	3	2	2	3	3				
2500 Hz	3	2	2	4	1	3	1	3	2	2	2	3				
3150 Hz	4	2	2	3	1	3	1	3	1	2	3	2				
4000 Hz	5	2	2	3	2	4	1	3	2	2	2	3				
5000 Hz	6	2	2	2	3	4	2	5	2	2	2	3				
6300 Hz	6	2	2	2	4	4	2	4	2	2	3	3				
8000 Hz	5	1	1	2	4	4	3	4	1	2	2	3				
10000 Hz	4	1	1	1	5	4	3	4	1	1	1	2				

Tabla 35. Distancia estimada en métrica JND de los parámetros obtenidos en tercios de octava

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cantidad por escalón	71	85	41	26	25	8	0	0	0	0
% sobre Total	28%	33%	16%	10%	10%	3%	0%	0%	0%	0%
% acumulado		61%	77%	87%	97%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabla 36. Porcentaje de valores en métrica JND en tercios de octava

10.3.2 Resultados en bandas de Octava

Se lleva a cabo el mismo análisis en bandas de octava, el cual, se encuentra en un Excel bajo custodia de mi tutor. A modo resumen se presentan las tablas 37 y 38, donde se representa la estimación de la distancia entre los parámetros en métrica JND y el porcentaje de valores en métrica JND en octavas respectivamente.

Frecuencia [Hz]	EDT AURA	T20 AURA	T30 AURA	RT STD	C50 STD	C50 AURA	C80 STD	C80 AURA	D50 AURA	Ts AURA	LF AURA	LFC AURA	STI M STD	STI M AURA	AICons M STD	AICons M AURA
125 Hz	5	4	3	3	3	2	1	3	2	3	5	7				
250 Hz	2	1	2	5	3	2	1	2	2	2	5	6				
500 Hz	2	1	1	5	3	3	1	3	2	2	4	5				
1000 Hz	2	2	2	5	4	2	2	2	2	2	3	4	1	3	1	2
2000 Hz	3	2	2	4	4	3	2	3	2	2	3	4				
4000 Hz	4	2	2	3	3	3	1	3	2	2	3	4				
8000 Hz	4	1	2	2	3	3	2	3	1	1	3	4				

Tabla 37. Distancia estimada en métrica JND de los parámetros obtenidos en octavas.

Cantidad por escalón	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
% sobre Total	58	78	32	33	21	5	1	0	0	0
% acumulado	24%	32%	13%	14%	9%	2%	0%	0%	0%	0%
	24%	56%	69%	82%	91%	93%	93%	93%	93%	93%

Tabla 38. Porcentaje de valores en métrica JND en octavas.

11. PRESUPUESTO

La realización del proyecto se ha desarrollado gracias a herramientas específicas para ello y personal de trabajo, lo cual supone un gasto para tener en cuenta.

Como este proyecto forma parte de un proyecto fin de grado universitario de Ingeniería de Sonido e Imagen de la Universidad Politécnica de Madrid, las cifras del presupuesto son orientativas, simulando el coste en caso de un proyecto similar fuera del entorno académico.

Fase	Actividad	Horas	Presupuesto parcial	Presupuesto total
Documentación	Estudio de la documentación y normativa necesaria para el desarrollo del proyecto	15h	-	-
Medidas	Alquiler de equipos	-	600€/día	600 €
	Visita al recinto, montaje de equipos, elección de posiciones de medida, toma de medidas y recogida de material	15h	10€/h /ingeniero	600 €
	Licencia software DIRAC 6.0	-	300 €	300 €
Diseño	Diseño del modelo virtual 3D	120h	15€/h	1.800 €
Procesado	Procesado de medidas <i>in situ</i>	60h	15€/h	900 €
Validación	Licencia software EASE 4.4	-	300 €	300 €
	Validación de los datos simulados comparándolos con los obtenidos en las medidas <i>in situ</i>	60h	15€/h	900 €
Memoria	Redacción de la memoria	70 h	15€/h	1.050 €
TOTAL		340h		6.450 €

Tabla 35. Presupuesto estimado para la realización del proyecto.

12. IMPACTO DEL PROYECTO

En este apartado, se explica como la ingeniería desempeña un papel fundamental en la promoción del desarrollo sostenible al proporcionar soluciones innovadoras para los desafíos ambientales, sociales, tecnológicos y económicos que enfrenta el mundo, así como la relación que mantiene con los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible).

La relación entre la acústica arquitectónica y los ODS se encuentra principalmente en la contribución que la primera puede hacer para alcanzar varios de los ODS relacionados con la calidad de vida, la salud, el medio ambiente y la sostenibilidad. La acústica arquitectónica se enfoca en el diseño de espacios construidos para optimizar la calidad del sonido dentro de ellos, lo que puede tener un impacto directo en varios ODS.

En cuanto a salud y bienestar se refiere, ODS 3, los espacios arquitectónicos con una buena acústica pueden favorecer la salud y el bienestar al proporcionar entornos menos estresantes y más cómodos para las personas que los ocupan. Esto incluye la reducción del ruido ambiental, la mejora de la inteligibilidad del habla y la prevención de la fatiga auditiva, lo que contribuye a la salud auditiva y mental de los ocupantes.

El ODS 11 está relacionado con las ciudades y comunidades sostenibles, donde la acústica arquitectónica juega un papel crucial para el diseño de ciudades y comunidades sostenibles ya que ayuda a mitigar la contaminación acústica urbana. La planificación y construcción de edificios con materiales y técnicas que absorben o bloquean el ruido externo pueden contribuir a la creación de entornos urbanos más habitables y saludables, mejorando así la calidad de vida.

De forma inversa, se puede contribuir a la protección de los ecosistemas terrestres al minimizar el impacto del ruido humano en áreas naturales y sensibles. El diseño de barreras acústicas en edificios cercanos a reservas naturales o áreas de conservación puede ayudar a preservar la biodiversidad y el hábitat de la vida silvestre, siendo una de las metas del ODS 15.

En resumen, la acústica arquitectónica desempeña un papel importante en la consecución de varios ODS al promover entornos construidos más saludables, sostenibles y habitables, al tiempo que contribuye a la protección del medio ambiente y la mejora de la calidad de vida de las personas.

13. CONCLUSIÓN

Llegado a este punto, se puede dar por finalizada la validación del modelo geométrico del Teatro Principal de Mora y por consiguiente el objetivo de este proyecto.

A continuación, se desglosan las conclusiones obtenidas en cada uno de los procesos del proyecto, así como una conclusión general de los resultados obtenidos.

En lo que a las medidas *in situ* se refiere, se puede decir que es una de las partes más complejas del proyecto, ya que contactar con el personal encargado del recinto y obtener los permisos necesarios no resulta sencillo. En este caso, las medidas se realizaron sin problema, aplicando los conocimientos teóricos obtenidos durante el grado y la norma de medida, dando especial importancia a la colocación de los micrófonos en el recinto. Es relevante señalar la novedad sobre el software de medida DIRAC, el cual no se ha utilizado previamente durante el grado.

El siguiente paso era modelar el diseño en 3D del teatro mediante el *software* SketchUp, siendo uno de los puntos que mayor tiempo requiere, ya que el trabajo posterior depende del buen desarrollo de este. Este tipo de *software* supone un mayor esfuerzo de aprendizaje, ya que nunca se ha trabajado con el anteriormente, siendo necesarias muchas horas de dedicación.

Seguidamente, se trabaja con el *software* EASE que, a diferencia con SketchUp, si se ha trabajado con él durante el grado. Debido a la experiencia adquirida con EASE previamente y durante el proyecto, se puede asegurar que se han ampliado y asentado los conocimientos sobre este *software* de simulación acústica.

La validación de los resultados ha sido favorable según se esperaba, gracias a la correcta elección de los materiales. El modelo validado se asemeja a la realidad, debido a la similitud entre valores medidos y simulados. Es por ello por lo que, la estimación de la distancia en métrica JND, a excepción de dos parámetros, son correctos, ya que el 77% se encuentra entre los 3 primeros intervalos. Estos dos parámetros son LF y LFC, siendo los más complicados de predecir debido a su carácter aleatorio. Por tanto, se cumple con las características del recinto real, siendo las diferencias poco perceptibles por el oyente.

Algunas de las diferencias pueden ser causadas porque los materiales simulados no presentan el mismo coeficiente de absorción que en la realidad. También cabe destacar que, en los programas de simulación acústica existen márgenes de error, así como la tolerancia en los aparatos de medida.

La realización de este proyecto puede resultar de gran utilidad para futuras circunstancias. Al contar con un modelo geométrico del Teatro Principal de Mora, cuyas características se asemejan a la realidad, permite realizar cualquier modificación acústica en vista a futuras reformas o mejoras que se quieran realizar sin necesidad de desplazarse al recinto. Por ello, formará parte del grupo de investigación GAMMA.

En definitiva, un proyecto de este alcance supone un esfuerzo y dedicación constante. Se puede asegurar, que el aprendizaje adquirido durante la realización de este ha sido realmente grande.

14. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] J. Sánchez, “Teoría Estadística”, Apuntes de la asignatura Acústica Arquitectónica,
] Departamento de Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones, Universidad Politécnica de
Madrid, 2020.
- [2] J. Sánchez, “Teoría Geométrica”, Apuntes de la asignatura Acústica Arquitectónica,
] Departamento de Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones, Universidad Politécnica de
Madrid, 2020.
- [3] Odeon, “Room Acoustics”, 2023, [on-line], disponible:
] <https://odeon.dk/learn/articles/room-acoustics>
- [4] A. Carrión, “Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos”, 1998.
]
- [5] Álava Ingenieros, “DO12 Fuente de ruido omnidireccional”, 2023, [on-line], disponible:
] <http://www.mra.pt/repositorio/54c1/pdf/1377/2/fuente-omnidireccional-avm-do-12-especificaciones-tecnicas.pdf?d=1>
- [6] MadridHifi, “AKG CK 922”, 2023, [on-line], disponible:
] <https://www.madridhifi.com/p/akg-capsula-ck-92/>
- [7] Vintage King, “AKG CK94 Condenser Microphone Capsule”, 2023, [on-line], disponible:
] <https://vintageking.com/akg-ck94-instrument-microphone#product.attributes>
- [8] Amazon, “AKG se-300b Fuente de alimentación preamplificador para cápsulas de línea azul
] micrófono”, 2023, [on-line], disponible:
<https://www.amazon.com/-/es/se-300b-alimentaci%C3%B3n-preamplificador-c%C3%A1psulas-micr%C3%B3fono/dp/B006VSMQKC>
- [9] Brüel & Kjaer, “Sonómetro 2260 Brüel & Kjaer», 2023, [on-line], disponible:
] <https://www.bksv.com/es/knowledge/blog/sound/sound-level-meter-history>
- [1] Brüel & Kjaer, “Calibrador Sonoro Modelo 4231”, 2023, [on-line], disponible:
0] <https://www.bksv.com/es/transducers/acoustic/calibrators/sound-calibrator-4231>
- [1] Cinema Sound, “MOTU Ultralite MK-3 Hybrid”, 2023, [on-line], disponible:
1] <https://www.cinemasound.com/review-motu-ultralite-mk-3-hybrid/>
- [1] MadridHifi, “Crown XLS 2002”, 2023, [on-line], disponible:
2] <https://www.madridhifi.com/p/crown-xls-2002/>
- [1] AENOR, “UNE-EN ISO 3382-1: Medición de parámetros acústicos en recintos, Parte 1:
3] Salas de espectáculos”, España, febrero de 2010.
- [1] Fundación SGAE, “MIRE. Teatro Principañ de Mora”, mayo 2005, [on-line], disponible:
4] <https://www.proyectomire.org/web/datosrecinto.php?id=882>
- [1] J. R. Taylor, “Introducción al Análisis de Errores” 2ª edición., Sausolito, California:
5] University Science Books, 1997, pp. 166-8.
- [1] Matemáticas Online, “Distribución Normal”, 2005, [on-line], disponible:
6] https://www.matematicasonline.es/BachilleratoCCSS/segundo/archivos/distribucion_normal/DISTRIBUCION%20NORMAL.htm

ANEXO I. RUIDO DE FONDO

En este apartado se muestra el ruido de fondo medido una vez que se completó el proceso de medidas. Es importante tener en cuenta el nivel del ruido de fondo ya que afecta en el resultado de todos los parámetros.

El ruido de fondo siempre está presente en menor o mayor nivel, causado por diferentes excitaciones en el recinto como máquinas, aire acondicionado etc. Gracias a la medición del tiempo de reverberación, se ayuda a mantener la integridad de las mediciones, evitando posibles interferencias o contaminaciones en los resultados.

Se muestra en la tabla 39 el promedio y la desviación de las ocho medidas realizadas en el recinto. Se representan los valores en la ilustración 76.

SPL [dB] Ruido de fondo										
Freq [Hz]	1	2	3	4	5	6	7	8	PROMEDIO	DESV.
12,5	34,2	38,8	41,1	37,5	47,0	31,8	34,6	34,6	37,5	4,86
16	35,2	36,5	40,7	33,0	43,2	35,6	36,5	36,7	37,2	3,24
20	34,8	31,1	37,0	28,0	38,8	35,6	35,9	40,0	35,2	3,94
25	40,6	23,2	41,5	33,6	45,6	37,2	32,6	45,1	37,4	7,49
31,5	31,4	26,2	37,5	33,5	48,4	24,6	35,2	40,7	34,7	7,73
40	37,1	36,1	39,8	31,6	47,6	30,1	40,6	37,4	37,5	5,46
50	36,4	35,7	43,6	39,5	46,1	28,5	37,2	32,1	37,4	5,73
63	28,1	40,3	41,7	30,1	45,2	26,4	32,1	31,2	34,4	6,99
80	24,9	29,0	34,0	28,6	34,0	24,2	28,1	25,6	28,6	3,79
100	24,5	28,5	39,8	24,1	30,9	18,4	25,6	26,4	27,3	6,23
125	18,5	27,1	35,0	18,8	28,5	19,1	21,5	24,0	24,1	5,84
160	21,3	24,2	26,4	18,0	22,6	18,4	17,6	18,5	20,9	3,28
200	20,5	25,6	23,1	21,6	20,7	16,4	15,1	20,6	20,5	3,38
250	15,2	19,5	20,2	16,7	21,2	12,7	13,2	15,2	16,7	3,23
315	17,6	17,4	21,7	21,5	18,4	16,0	12,6	14,7	17,5	3,13
400	12,5	15,4	18,6	14,6	15,6	12,7	12,3	12,0	14,2	2,28
500	13,3	17,1	21,8	16,2	13,6	14,1	12,1	11,4	15,0	3,36
630	11,1	12,7	24,1	14,2	16,3	12,9	13,5	11,3	14,5	4,21
800	13,2	10,2	25,0	13,0	16,7	11,0	16,2	11,4	14,6	4,81
1000	11,2	9,5	19,9	14,5	13,1	12,1	15,1	11,4	13,4	3,21
1250	11,5	7,6	22,0	15,5	11,0	12,6	18,2	12,7	13,9	4,53
1600	12,3	6,9	19,0	13,7	12,4	13,0	17,1	13,1	13,4	3,58
2000	8,4	6,8	18,7	13,0	13,0	11,1	12,3	11,2	11,8	3,55
2500	8,0	6,5	17,4	13,0	12,5	11,3	11,7	9,0	11,2	3,40
3150	7,8	6,7	14,7	11,4	10,5	11,4	10,1	9,9	10,3	2,43
4000	8,0	7,3	13,0	11,7	10,6	10,5	9,4	10,2	10,1	1,86
5000	8,1	7,5	12,7	11,0	10,1	9,2	10,0	14,2	10,4	2,25
6300	8,9	8,0	12,0	11,1	9,7	10,5	10,5	13,3	10,5	1,69
8000	9,4	8,2	14,3	12,3	8,5	10,2	12,2	11,1	10,8	2,10
10000	8,6	8,3	10,5	9,7	8,7	9,4	9,1	11,5	9,5	1,08
12500	8,5	8,5	9,7	9,9	8,8	9,0	9,0	9,8	9,2	0,57
16000	9,0	8,6	9,7	9,2	9,0	9,2	9,2	9,6	9,2	0,35
20000	9,9	9,5	10,9	9,8	9,0	10,0	10,4	10,0	9,9	0,57

Tabla 36. Medidas del ruido de fondo.

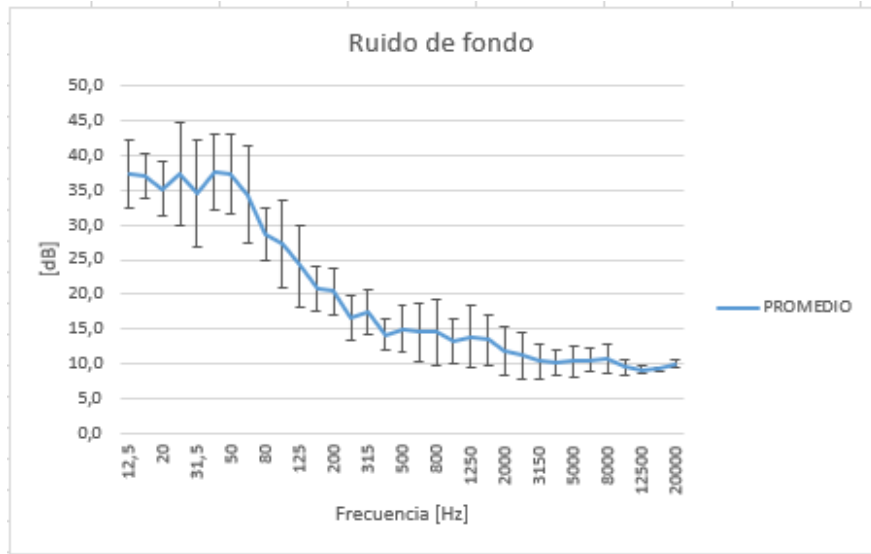


Ilustración 77. Promedio y desviación del ruido de fondo.

ANEXO II. ESTUDIO ACÚSTICO DEL TEATRO PRINCIPAL DE MORA

En este anexo, se presentan los datos de las frecuencias medidas en el Teatro Principal, en bandas de octava. Estos datos se incluyen en el informe destinado a los propietarios del recinto, con el fin de brindarles información relevante tanto en su ámbito personal como profesional.

Se representan los promedios de los parámetros acústicos en todas las posiciones de medida, junto con su desviación estándar. Para estos valores no se han aplicado criterios de filtrado como en el caso de tercios de octava.

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO GEOMÉTRICO PARA EL ESTUDIO ACÚSTICO DEL TEATRO PRINCIPAL DE MORA (TOLEDO)

- Parámetros temporales:

F [Hz]	EDT Promedio de los datos por zonas			EDT Desviación de los datos por zonas		
	PLATEA	PLANTA 1	PROMEDIO	PLATEA	PLANTA 1	PROMEDIO
31,5	2,41	2,50	2,45	0,55	0,52	0,53
63	1,37	1,54	1,45	0,31	0,30	0,30
125	1,25	1,30	1,27	0,27	0,27	0,27
250	1,19	1,10	1,14	0,22	0,22	0,22
500	1,11	1,08	1,09	0,22	0,20	0,21
1000	1,03	1,02	1,03	0,19	0,17	0,18
2000	0,90	0,84	0,87	0,21	0,21	0,21
4000	0,67	0,63	0,65	0,23	0,20	0,22
8000	0,41	0,43	0,42	0,20	0,10	0,15
16000	0,31	0,30	0,30	0,14	0,08	0,11

Tabla 37. EDT medido por zonas en octavas y sin filtrado.

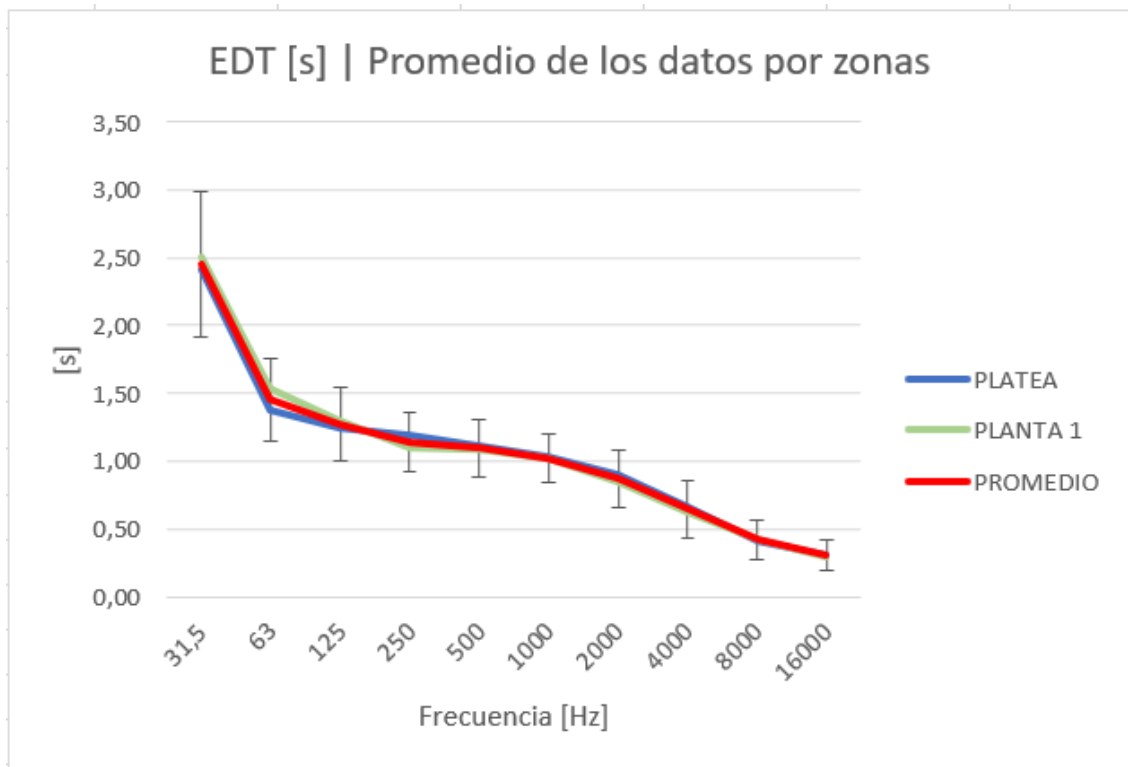


Ilustración 78. EDT medido por zonas en octavas y sin filtrado.

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO GEOMÉTRICO PARA EL ESTUDIO ACÚSTICO DEL TEATRO PRINCIPAL DE MORA (TOLEDO)

F [Hz]	RT Promedio de los datos por zonas			RT Desviación de los datos por zonas		
	PLATEA	PLANTA 1	PROMEDIO	PLATEA	PLANTA 1	PROMEDIO
31,5	2,59	2,58	2,58	0,54	0,55	0,55
63	1,85	1,99	1,92	0,37	0,28	0,32
125	1,42	1,39	1,41	0,14	0,11	0,12
250	1,24	1,25	1,24	0,07	0,06	0,06
500	1,19	1,20	1,20	0,06	0,06	0,06
1000	1,08	1,12	1,10	0,04	0,03	0,04
2000	0,95	1,00	0,97	0,03	0,04	0,04
4000	0,79	0,83	0,81	0,04	0,03	0,04
8000	0,56	0,60	0,58	0,03	0,02	0,03
16000	0,47	0,47	0,47	0,05	0,06	0,05

Tabla 38. RT medido por zonas en octavas y sin filtrado.

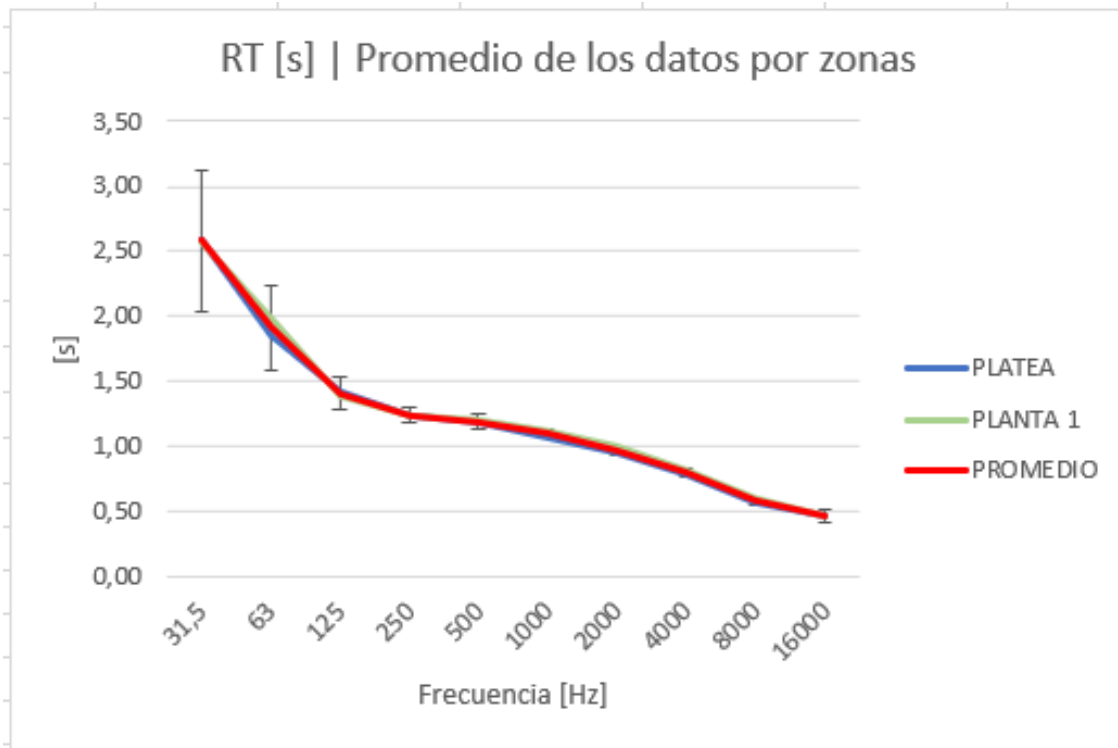


Ilustración 79. RT medido por zonas en octavas y sin filtrado.

F [Hz]	T20 Promedio de los datos por zonas			T20 Desviacion de los datos por zonas		
	PLATEA	PLANTA 1	PROMEDIO	PLATEA	PLANTA 1	PROMEDIO
31,5	2,59	2,68	2,64	0,55	0,50	0,53
63	1,86	1,98	1,92	0,22	0,30	0,26
125	1,39	1,38	1,38	0,13	0,12	0,13
250	1,23	1,25	1,24	0,08	0,07	0,07
500	1,19	1,21	1,20	0,07	0,06	0,07
1000	1,07	1,11	1,09	0,04	0,04	0,04
2000	0,94	0,99	0,97	0,04	0,05	0,05
4000	0,78	0,81	0,80	0,05	0,04	0,04
8000	0,58	0,59	0,58	0,06	0,03	0,04
16000	0,47	0,44	0,46	0,08	0,09	0,08

Tabla 39. T20 medido por zonas en octavas y sin filtrado.

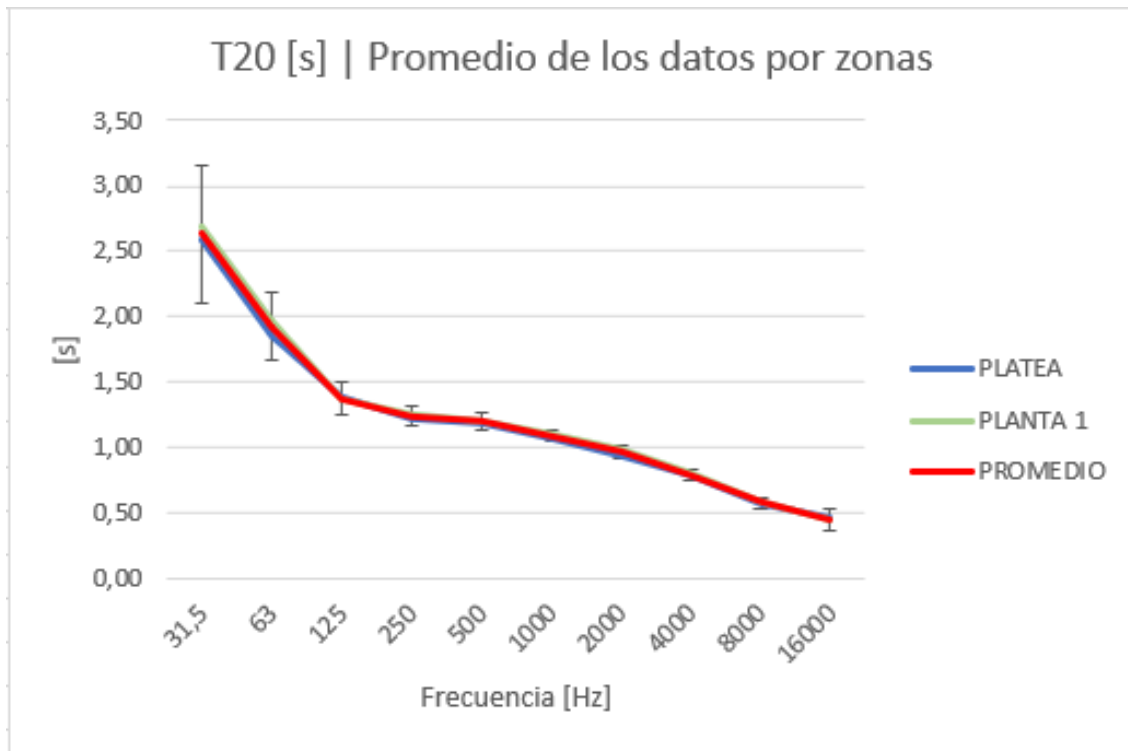


Ilustración 80. T20 medido por zonas en octavas y sin filtrado.

F [Hz]	T30 Promedio de los datos por zonas			T30 Desviación de los datos por zonas		
	PLATEA	PLANTA 1	PROMEDIO	PLATEA	PLANTA 1	PROMEDIO
31,5	2,54	2,59	2,56	0,69	0,63	0,66
63	2,02	2,11	2,07	0,27	0,27	0,27
125	1,44	1,42	1,43	0,12	0,10	0,11
250	1,24	1,24	1,24	0,06	0,06	0,06
500	1,19	1,21	1,20	0,05	0,04	0,05
1000	1,08	1,13	1,10	0,04	0,03	0,03
2000	0,95	1,00	0,98	0,03	0,03	0,03
4000	0,79	0,83	0,81	0,03	0,03	0,03
8000	0,57	0,60	0,58	0,03	0,02	0,02
16000	0,48	0,47	0,47	0,04	0,02	0,03

Tabla 40. T30 medido por zonas en octavas y sin filtrado.

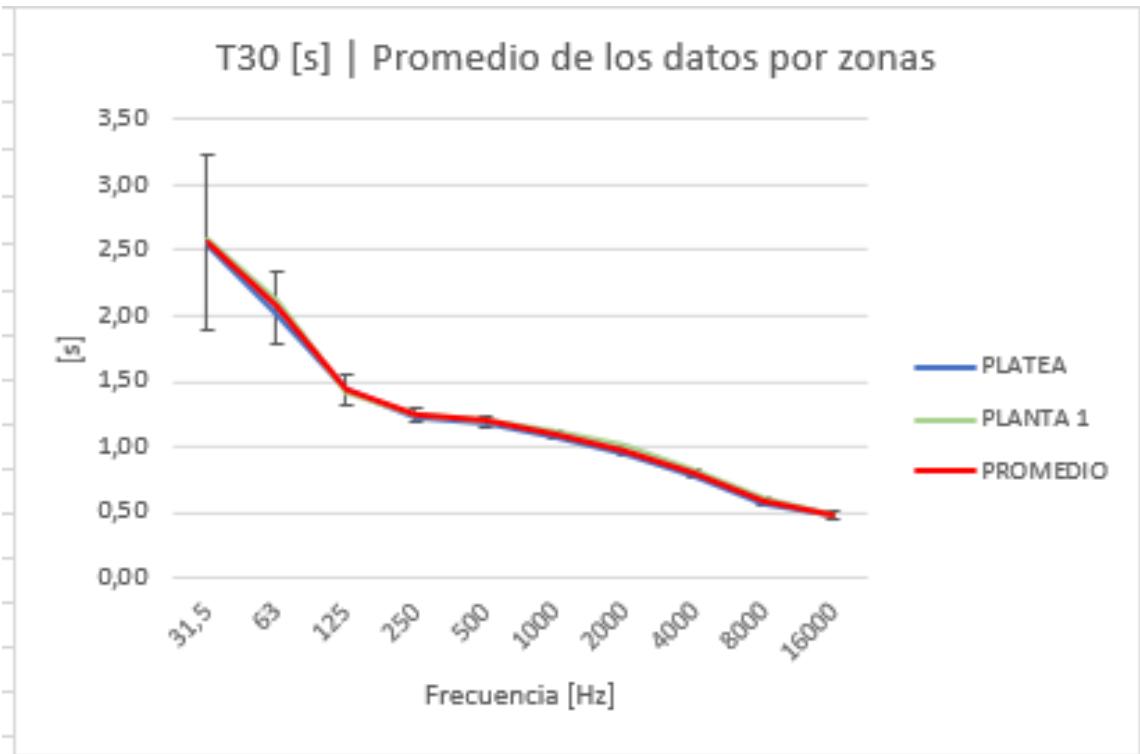


Ilustración 81. T30 medido por zonas en octavas y sin filtrado.

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO GEOMÉTRICO PARA EL ESTUDIO ACÚSTICO DEL TEATRO PRINCIPAL DE MORA (TOLEDO)

- Parámetros energéticos:

F [Hz]	C50 Promedio de los datos por zonas			C50 Desviación de los datos por zonas		
	PLATEA	PLANTA 1	PROMEDIO	PLATEA	PLANTA 1	PROMEDIO
31,5	-3,17	-3,75	-3,46	2,86	2,86	2,86
63	0,62	-4,34	-1,86	2,53	3,46	3,00
125	-0,14	-0,08	-0,11	2,20	2,63	2,41
250	1,88	1,91	1,89	2,09	2,01	2,05
500	2,65	2,27	2,46	1,73	2,07	1,90
1000	3,33	2,56	2,94	1,84	1,70	1,77
2000	3,65	3,77	3,71	2,10	2,06	2,08
4000	5,38	5,81	5,60	2,43	2,13	2,28
8000	9,33	8,81	9,07	2,38	1,97	2,17
16000	11,03	9,69	10,36	2,79	2,19	2,49

Tabla 41. C50 medido por zonas en octavas y sin filtrado.

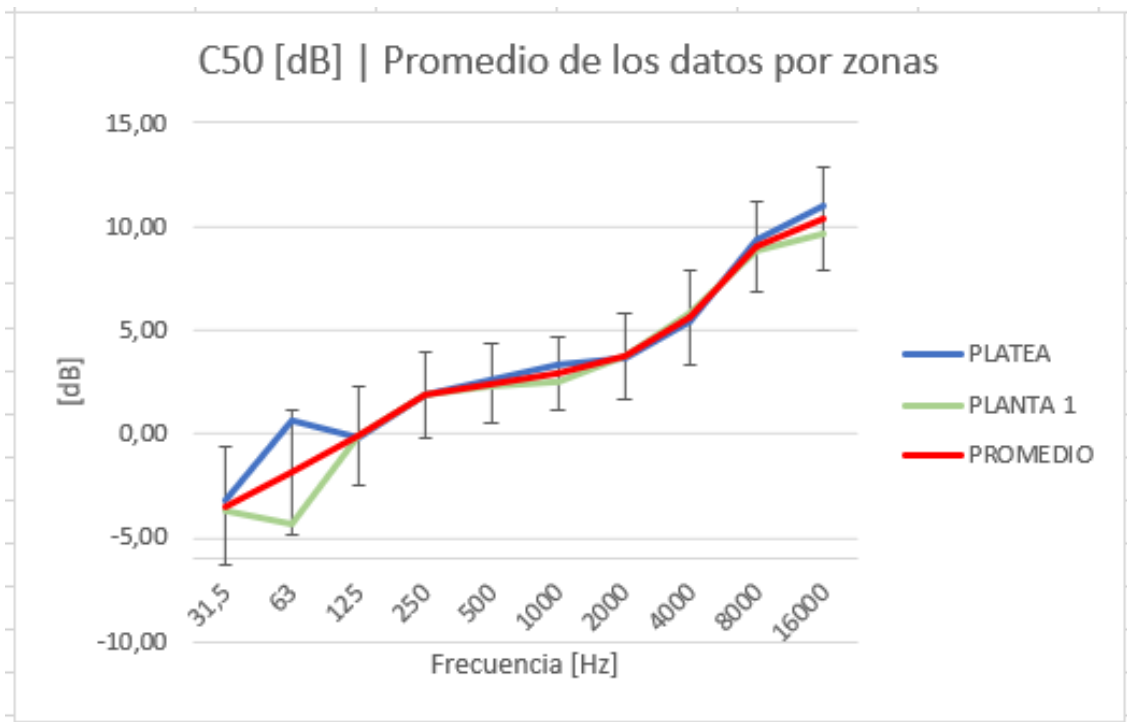
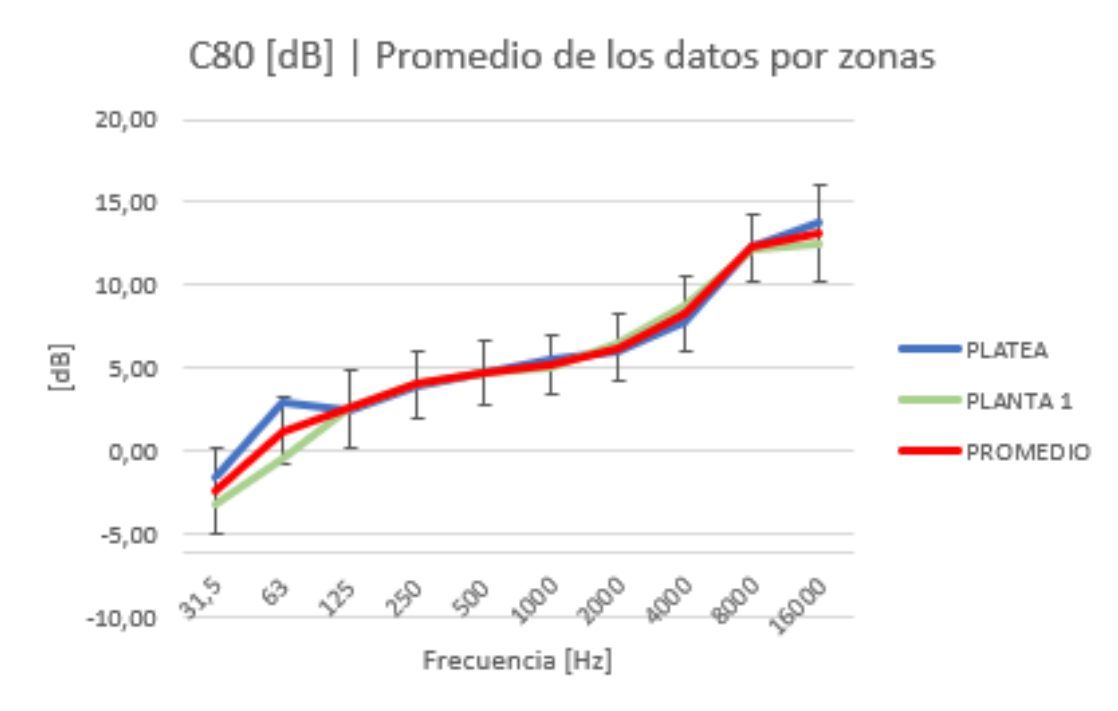


Ilustración 82. C50 medido por zonas en octavas y sin filtrado.

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO GEOMÉTRICO PARA EL ESTUDIO ACÚSTICO DEL TEATRO PRINCIPAL DE MORA (TOLEDO)

F [Hz]	C80 Promedio de los datos por zonas			C80 Desviación de los datos por zonas		
	PLATEA	PLANTA 1	PROMEDIO	PLATEA	PLANTA 1	PROMEDIO
31,5	-1,57	-3,20	-2,39	2,50	2,59	2,55
63	2,93	-0,42	1,26	2,10	1,93	2,01
125	2,45	2,68	2,56	2,22	2,57	2,40
250	3,96	4,14	4,05	1,95	2,00	1,97
500	4,82	4,72	4,77	1,78	2,13	1,95
1000	5,48	5,04	5,26	1,66	1,80	1,73
2000	6,02	6,51	6,26	1,88	2,07	1,97
4000	7,88	8,74	8,31	2,25	2,16	2,20
8000	12,36	12,15	12,26	2,16	1,96	2,06
16000	13,79	12,50	13,14	2,65	3,15	2,90

Tabla 42. C80 medido por zonas en octavas y sin filtrado.



F [Hz]	D50 Promedio de los datos por zonas			D50 Desviacion de los datos por zonas		
	PLATEA	PLANTA 1	PROMEDIO	PLATEA	PLANTA 1	PROMEDIO
31,5	0,34	0,32	0,33	0,13	0,12	0,12
63	0,53	0,29	0,41	0,13	0,15	0,14
125	0,49	0,50	0,49	0,12	0,14	0,13
250	0,60	0,60	0,60	0,11	0,11	0,11
500	0,64	0,62	0,63	0,09	0,11	0,10
1000	0,68	0,64	0,66	0,09	0,09	0,09
2000	0,69	0,70	0,69	0,09	0,10	0,10
4000	0,76	0,78	0,77	0,09	0,09	0,09
8000	0,89	0,88	0,88	0,06	0,05	0,06
16000	0,91	0,89	0,90	0,05	0,05	0,05

Tabla 43. D50 medido por zonas en octavas y sin filtrado.

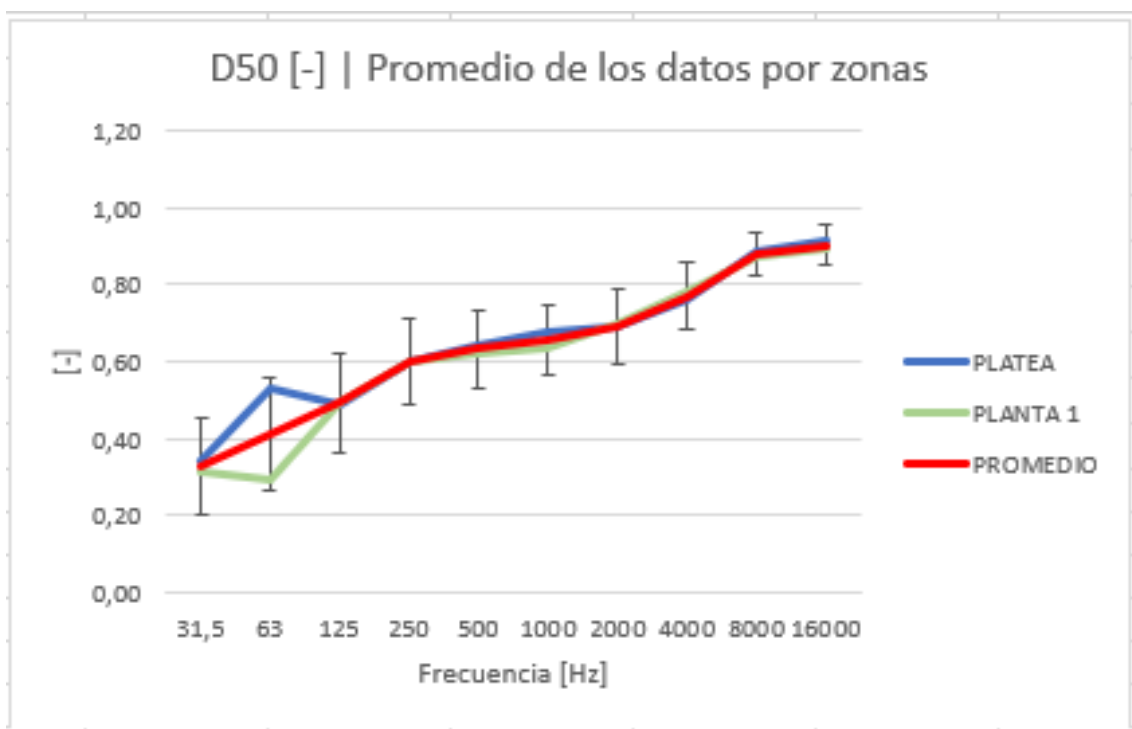


Ilustración 83. D50 medido por zonas en octavas y sin filtrado.

F [Hz]	Ts Promedio de los datos por zonas			Ts Desviación de los datos por zonas		
	PLATEA	PLANTA 1	PROMEDIO	PLATEA	PLANTA 1	PROMEDIO
31,5	197,68	224,92	211,30	36,44	36,95	36,69
63	97,08	137,11	117,10	20,18	19,97	20,07
125	90,42	91,41	90,92	16,78	18,78	17,78
250	69,22	70,25	69,74	17,26	14,68	15,97
500	59,99	64,16	62,07	12,02	14,87	13,45
1000	51,88	58,78	55,33	11,59	12,60	12,10
2000	47,89	47,52	47,70	11,90	13,55	12,72
4000	37,14	34,57	35,86	10,96	10,68	10,82
8000	20,17	21,48	20,83	7,65	7,14	7,39
16000	14,50	15,12	14,81	6,30	6,50	6,40

Tabla 44. Ts medido por zonas en octavas y sin filtrado.

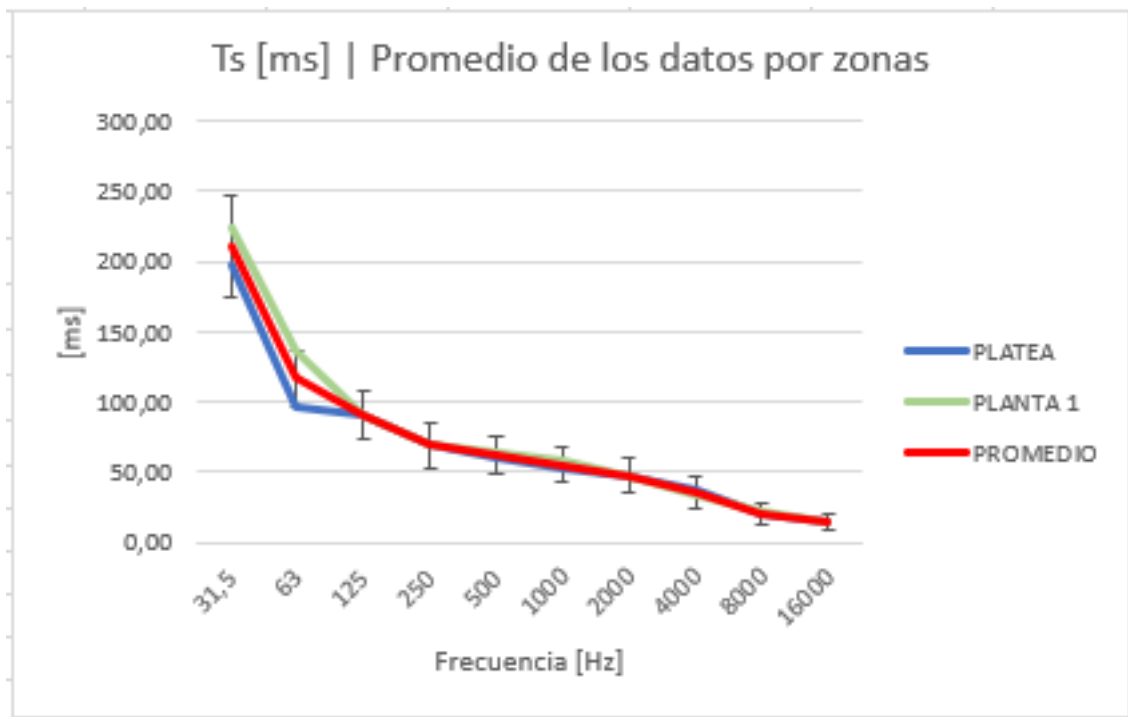


Ilustración 84. Ts medido por zonas en octavas y sin filtrado.

F [Hz]	LF Promedio de los datos por zonas			LF Desviación de los datos por zonas		
	PLATEA	PLANTA 1	PROMEDIO	PLATEA	PLANTA 1	PROMEDIO
31,5	0,10	0,17	0,14	0,07	0,18	0,13
63	0,03	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
125	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
250	0,02	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01
500	0,04	0,06	0,05	0,02	0,02	0,02
1000	0,06	0,08	0,07	0,02	0,03	0,02
2000	0,07	0,09	0,08	0,03	0,03	0,03
4000	0,09	0,09	0,09	0,04	0,04	0,04
8000	0,06	0,06	0,06	0,03	0,02	0,03
16000	0,08	0,07	0,07	0,04	0,03	0,04

Tabla 45. LF medido por zonas en octavas y sin filtrado.

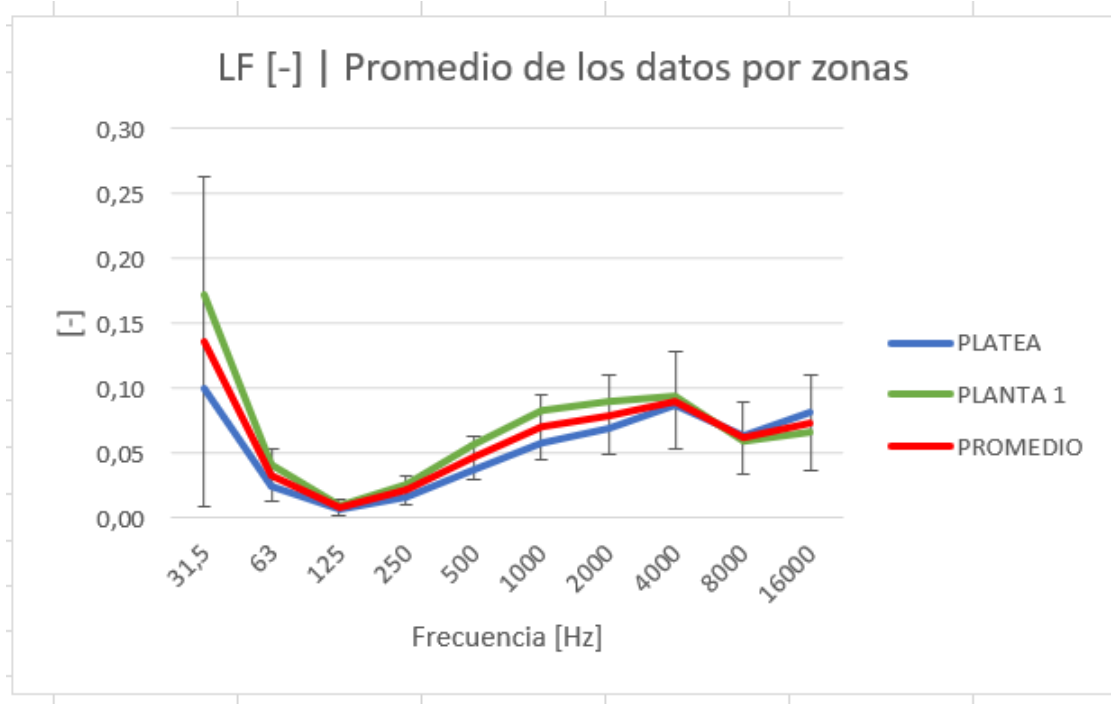


Ilustración 85. LF medido por zonas en octavas y sin filtrado.

DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO GEOMÉTRICO PARA EL ESTUDIO ACÚSTICO DEL TEATRO PRINCIPAL DE MORA (TOLEDO)

F [Hz]	LFC Promedio de los datos por zonas			LFC Desviación de los datos por zonas		
	PLATEA	PLANTA 1	PROMEDIO	PLATEA	PLANTA 1	PROMEDIO
31,5	0,23	0,42	0,32	0,12	0,39	0,26
63	0,09	0,15	0,12	0,03	0,04	0,04
125	0,05	0,06	0,05	0,02	0,02	0,02
250	0,06	0,09	0,08	0,03	0,02	0,03
500	0,10	0,13	0,11	0,03	0,03	0,03
1000	0,12	0,16	0,14	0,04	0,04	0,04
2000	0,13	0,16	0,14	0,05	0,04	0,04
4000	0,15	0,15	0,15	0,06	0,04	0,05
8000	0,11	0,11	0,11	0,05	0,03	0,04
16000	0,12	0,11	0,12	0,06	0,03	0,04

Tabla 46. LFC medido por zonas en octavas y sin filtrado.

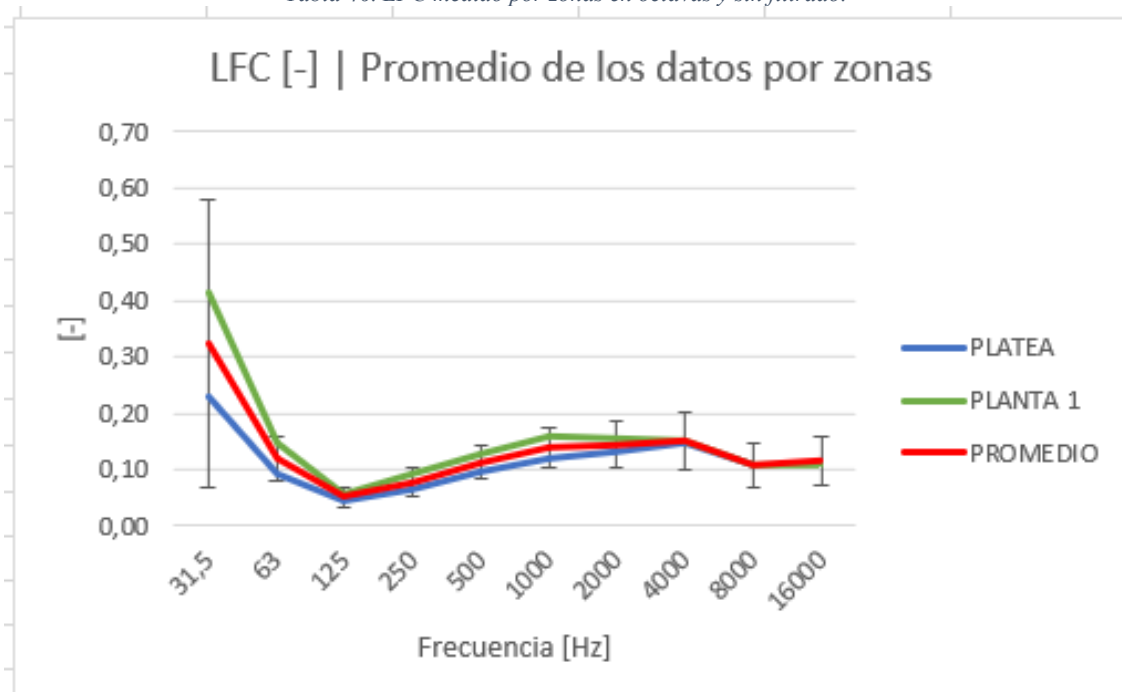


Ilustración 86. LFC medido por zonas en octavas y sin filtrado.

- Parámetros de inteligibilidad:

F [Hz]	STI Promedio de los datos por zonas			STI Desviación de los datos por zonas		
	PLATEA	PLANTA 1	TOTAL	PLATEA	PLANTA 1	TOTAL
-	0,69	0,68	0,68	0,05	0,04	0,04

Tabla 47. STI medido por zonas en octavas y sin filtrado.

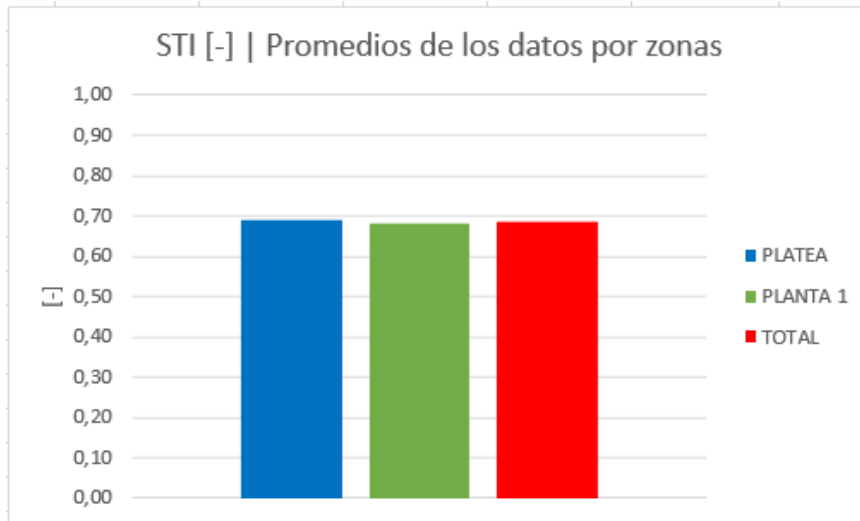


Ilustración 87. STI medido por zonas en octavas y sin filtrado.

F [Hz]	ALCONS Promedio de los datos por zonas			ALCONS Desviación de los datos por zonas		
	PLATEA	PLANTA 1	TOTAL	PLATEA	PLANTA 1	TOTAL
-	4,15	4,33	4,24	1,11	1,17	1,14

Tabla 48. ALCONS medido por zonas en octavas y sin filtrado.

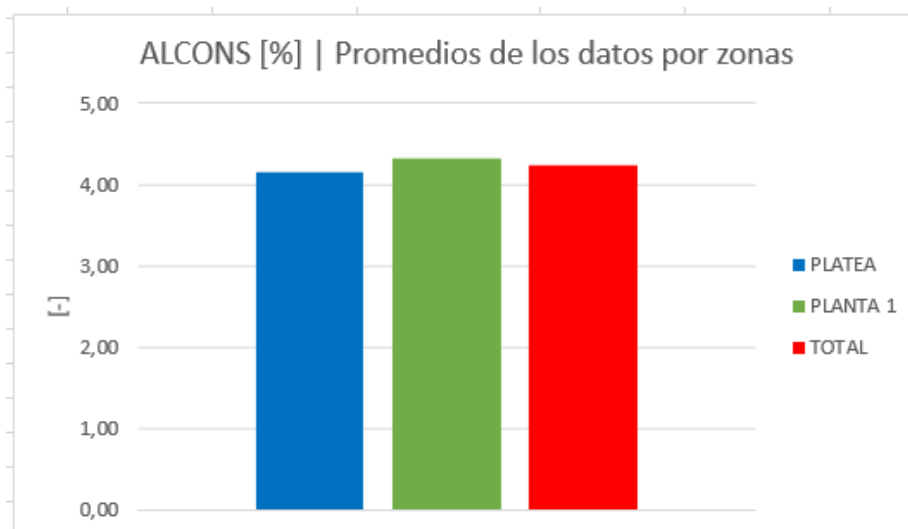


Ilustración 88. ALCONS medido por zonas en octavas y sin filtrado.

ANEXO III. PLANOS DEL TEATRO

Se muestran a continuación los planos originales del Teatro Principal aportados por el personal de contacto de este.

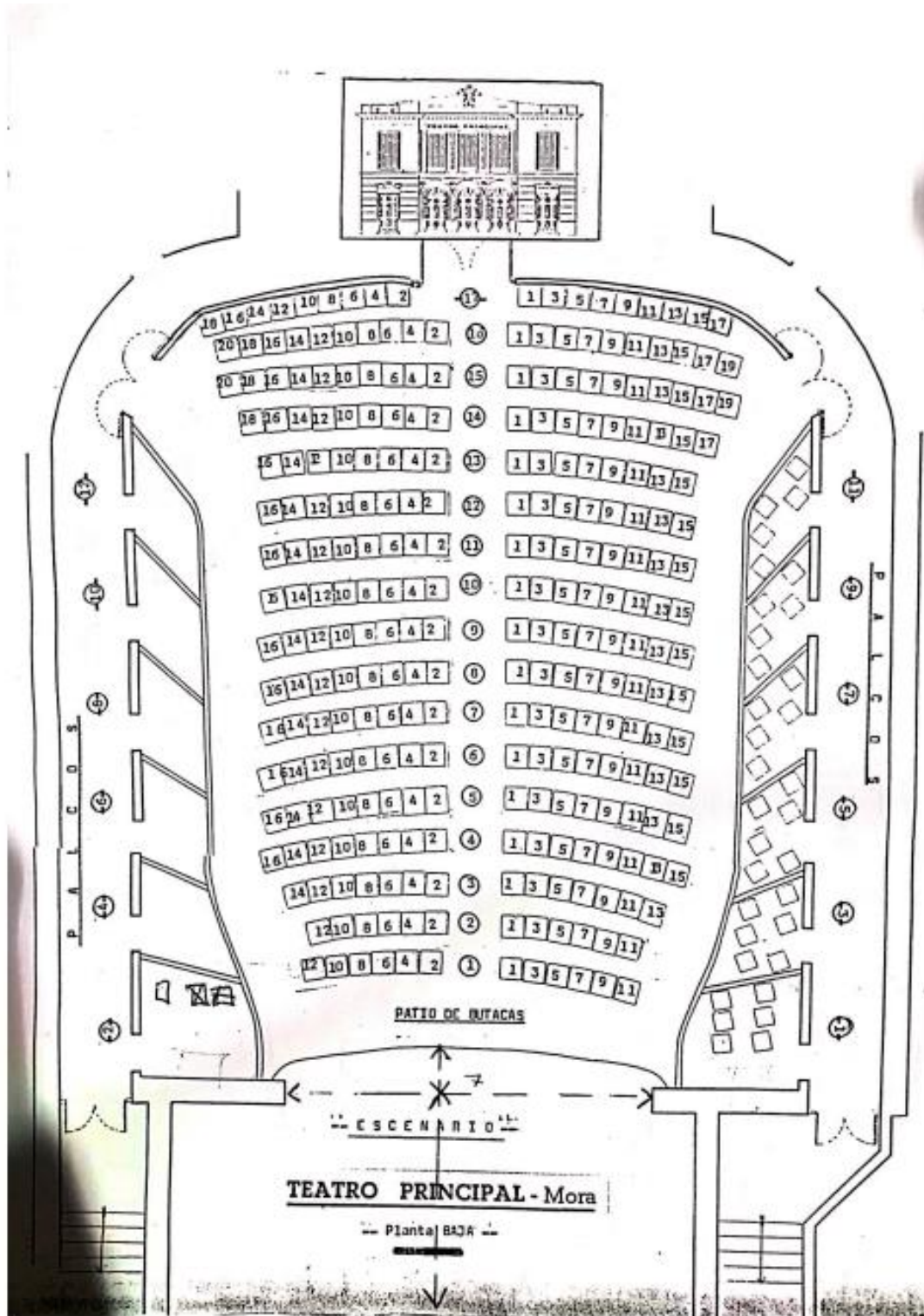


Ilustración 89. Plano del patio de butacas.

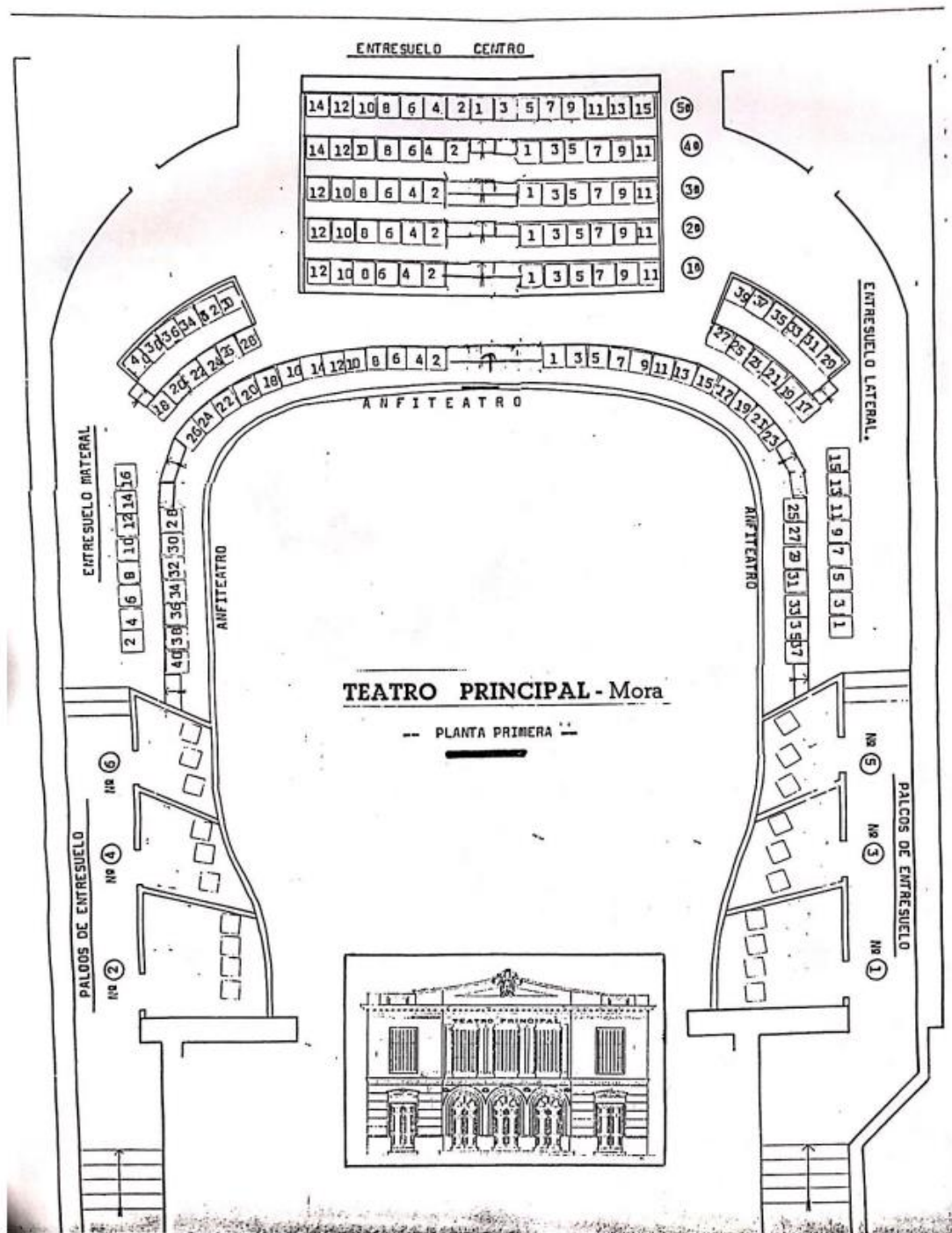


Ilustración 90. Plano de la planta primera.

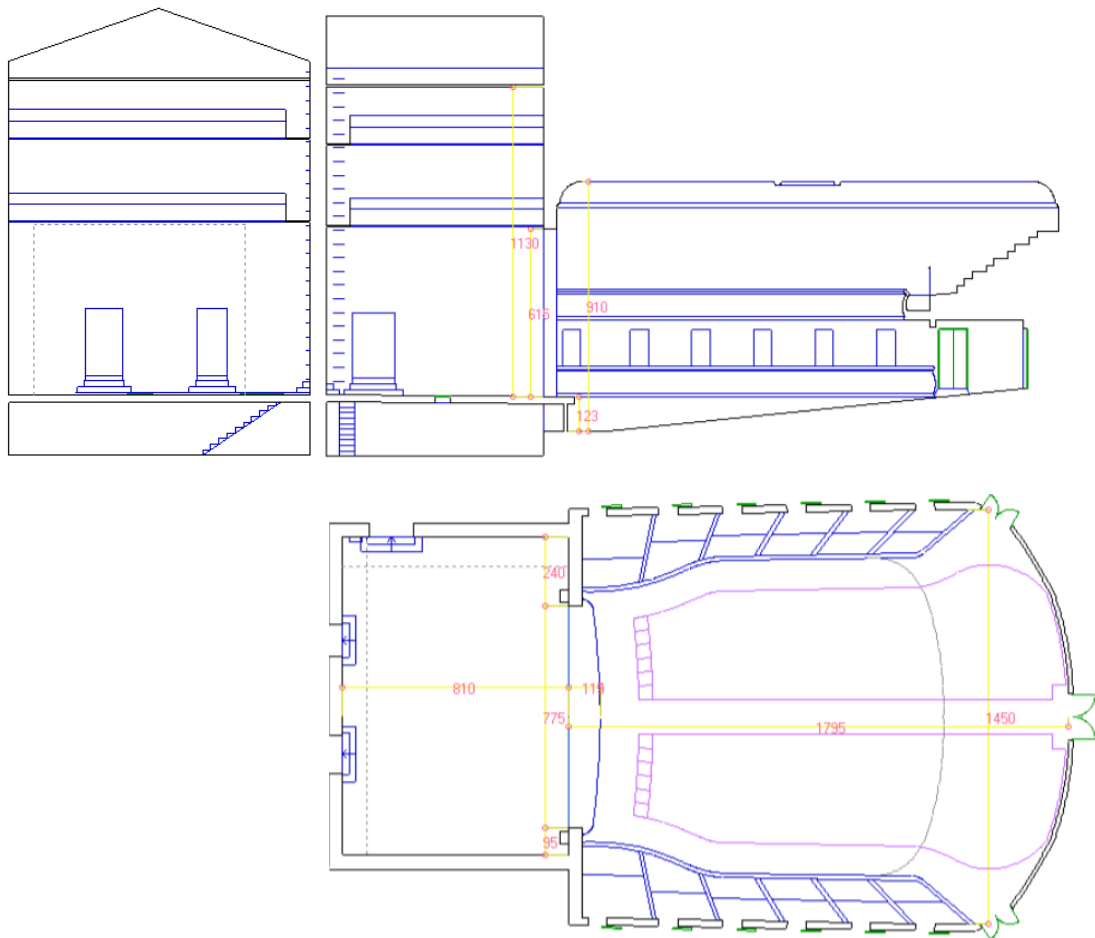


Ilustración 91. Planos adicionales en tres vistas. [14]