

Grado en Ingeniería de Sistemas Audiovisuales  
2017-2018

*Trabajo Fin de Grado*

“Estudio acústico y simulación de un  
recinto al aire libre: Auditorio El  
Torreón”

---

Ignacio Domínguez Gómez

Tutor

Luis Antonio Azpicueta Ruiz

Leganés, 9 de julio de 2018



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**



## RESUMEN

El presente trabajo consiste en simular mediante software el comportamiento acústico del auditorio al aire libre El Torreón. Para ello, se debe realizar un modelo en tres dimensiones del recinto, ajustarlo o calibrarlo mediante una serie de medidas in situ. Y, por último, obtener una valoración del comportamiento acústico del recinto para diferentes tipos de uso.

La generación del modelo es el primer paso y uno de los más costosos debido a la poca información inicial con la que se cuenta. Una vez generado el modelo es necesario configurar los materiales de las distintas superficies que a priori son desconocidos. Para poder ajustar las características de estos materiales se realizaron una serie de medidas de nivel sonoro en el recinto, las cuales se utilizan para calibrar el modelo virtual. Mediante el software EASE es posible replicar los puntos de medida y las características de la fuente. El proceso de ajuste es complicado y muy tedioso debido al alto número de materiales y la dependencia de las características de absorción y dispersión en frecuencia. Una vez completado el ajuste se realiza la simulación de diferentes parámetros acústicos como, por ejemplo, el tiempo de reverberación o el nivel de presión sonora.

Estas simulaciones arrojan la conclusión de que, gracias a su alta inteligibilidad de la palabra, el recinto se comportaría mejor en el caso de una representación teatral, que en un concierto. Para el caso de la música las características no entran dentro de los valores considerados como óptimos. Sin embargo, para el caso de la palabra, todos los parámetros estudiados entran en el margen de valores que se consideran ideales.

**Palabras clave:** Acústica; Recinto al aire libre; Simulación acústica; Inteligibilidad.



## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, agradecer a mi familia por apoyarme en la decisión de comenzar esta carrera y estar siempre en las buenas y malas rachas vividas en estos años. También a Paloma por aguantarme en los mejores y peores momentos.

Agradecer también a mi tutor Luis, por la completa disposición, por el interés puesto en el proyecto desde la primera reunión y por todo lo que he aprendido en la carrera gracias a sus asignaturas y su acompañamiento durante el proyecto.

También agradecer al Ayuntamiento de Pozuelo de Alarcón, por la posibilidad que me dieron de hacer el trabajo en el Auditorio El Torreón. En especial a Eva, Carlos y Pablo por todo el material proporcionado y por la atención que me han prestado.

Dar las gracias también a Luis, Aitor y Paloma por acompañarme a realizar las medidas al recinto.

Por último, agradecer a los de siempre, que, aunque a veces no entiendan qué estudio, nunca fallan.



# ÍNDICE

Resumen .....	3
Agradecimientos .....	5
Índice .....	7
Índice de figuras .....	10
Índice de tablas .....	13
1. Introducción .....	14
2. Conceptos básicos relacionados con la acústica .....	16
2.1. Generalidades del sonido .....	16
2.2. Reflexión del sonido .....	17
2.3. Teoría geométrica .....	18
2.4. Teoría estadística .....	19
2.5. Propagación del sonido en espacio libre .....	19
2.6. Propagación del sonido en un recinto cerrado .....	20
2.7. Directividad de una fuente sonora .....	20
2.7.1. Directividad .....	20
2.7.2. Factor de directividad Q .....	21
2.7.3. Índice de directividad DI .....	21
3. Propagación del sonido en el exterior .....	23
3.1. Absorción atmosférica .....	24
3.2. Condiciones meteorológicas .....	24
3.2.1. Temperatura .....	25
3.2.2. Viento .....	25
3.2.3. Humedad .....	27
3.3. Terreno .....	27
3.4. Vegetación .....	27
3.5. Obstáculos .....	27
4. Teatros al aire libre .....	28
4.1. Teatros clásicos griegos .....	28
4.2. Teatros clásicos romanos .....	30
4.3. Auditorio El Torreón .....	32
5. Generación del modelo en EASE .....	36
5.1. Generación del modelo geométrico .....	36
5.2. Simplificaciones y suposiciones realizadas durante la creación del modelo ...	40
5.2.1. Estimación del efecto de los árboles .....	40
5.2.2. Simulación del aire libre .....	41
5.2.3. Aproximación de la curvatura de la concha acústica .....	42
5.2.4. Simplificaciones y estimaciones en el torreón .....	43

5.2.5.	Elección de los materiales iniciales .....	43
6.	Medidas realizadas en el recinto .....	45
7.	Ajuste del modelo en ease .....	54
7.1.	Revisión y preparación de las medidas .....	54
7.1.1.	Corrección de la diferencia de nivel obtenida por los sonómetros .....	54
7.1.2.	Comprobación de la diferencia de las medidas y el ruido de fondo .....	55
7.1.3.	Comprobación de las componentes impulsivas .....	55
7.1.4.	Obtención del valor de ruido de fondo para introducir en EASE .....	56
7.1.5.	Obtención de las condiciones meteorológicas para EASE .....	56
7.2.	Elección del margen de aceptación de las medidas .....	57
7.3.	Modificación de los materiales .....	57
7.4.	Resultados del ajuste .....	62
8.	Medidas adicionales de la directividad de la fuente dodecaédrica .....	70
9.	Estudio de los principales parámetros acústicos en función del uso del recinto .....	75
9.1.	Parámetros a estudiar .....	75
9.1.1.	Tiempo de reverberación (RT) .....	75
9.1.2.	Tiempo de decaimiento temprano (EDT) .....	76
9.1.3.	Calidez (BR) .....	77
9.1.4.	Brillo (br) .....	77
9.1.5.	Claridad (C) .....	77
9.1.6.	%Alcons .....	78
9.1.7.	STI .....	79
9.2.	Simulación de la ocupación del recinto .....	80
9.3.	Evaluación del Auditorio El Torreón para los distintos tipos de uso .....	81
9.3.1.	Evaluación del ruido de fondo .....	81
9.3.2.	Evaluación del nivel total .....	83
9.3.3.	Evaluación del tiempo de reverberación .....	85
9.3.4.	Evaluación del parámetro EDT .....	87
9.3.5.	Evaluación del parámetro %Alcons .....	87
9.3.6.	Evaluación del parámetro STI .....	88
9.3.7.	Evaluación de la claridad de la palabra (C <sub>50</sub> ) y la claridad musical (C <sub>80</sub> ) .....	88
9.3.8.	Evaluación de la calidez y el brillo .....	89
9.4.	Resumen del comportamiento del recinto .....	90
9.4.1.	Evaluación para representaciones musicales .....	90
9.4.2.	Evaluación para la palabra y teatro .....	90
10.	Conclusiones y trabajos futuros .....	91
11.	Marco regular y entorno socio-económico .....	93
11.1.	Marco regulador .....	93
11.2.	Presupuesto .....	93
11.3.	Entorno socio-económico .....	94



ANEXO A: EXTENDED ABSTRACT .....	95
A.1. Sound propagation on outdoors .....	95
A.2. Outdoor theatres .....	96
A.3. Model generation .....	97
A.4. On-site measurements .....	98
A.5. Model adjustment.....	98
A.6. Source directivity .....	99
A.7. Conclusions.....	100
Bibliografia.....	102

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1. Comparación de los niveles audibles por el oído humano y las zonas de nivel para la palabra y la música. [1] .....	17
Fig. 2.2. Ecograma que muestra el sonido directo, las primeras reflexiones y la cola reverberante en un receptor concreto. [1].....	18
Fig. 2.3. Representación gráfica de la ley de reflexión. [1].....	18
Fig. 2.4. Diagrama polar de una fuente real para diferentes frecuencias. [18].....	21
Fig. 3.1. A la izquierda gradiente negativo de temperatura. A la derecha gradiente positivo de temperatura. [19] .....	25
Fig. 3.2. Efecto del viento en las ondas sonoras cuando llevan la misma dirección. [22] .....	26
Fig. 3.3. Efecto del viento en las ondas sonoras cuando llevan dirección contraria. [22] .....	26
Fig. 4.1. Teatro de Epidauro en la actualidad. [20] .....	28
Fig. 4.2. Planta del teatro de Epidauro. [23].....	29
Fig. 4.3. Teatro de Epidauro: ángulos de incidencia del sonido directo y el sonido reflejado en la orquesta. [1].....	30
Fig. 4.4. Sección longitudinal del teatro de Aspendus, Turquía. [1] .....	31
Fig. 4.5. Planta del teatro de Aspendus, Turquía. [1] .....	31
Fig. 4.6. Imagen aérea del Auditorio El Torreón.....	32
Fig. 4.7. Escenario del Auditorio El Torreón, visto desde la parte trasera.....	33
Fig. 4.8. Gradas y torreón del Auditorio El Torreón, observados desde el escenario. ...	33
Fig. 4.9. Barreras acústicas artificiales situadas en la parte posterior del Auditorio El Torreón. ....	34
Fig. 4.10. Situación de las zonas de audiencia del Auditorio El Torreón. ....	35
Fig. 5.1. Captura del modelo de EASE sólo con el escenario. ....	37
Fig. 5.2. Captura del modelo de EASE con las gradas incluidas. ....	37
Fig. 5.3. Captura del modelo de EASE con la parte trasera incluida. ....	38
Fig. 5.4. Captura del modelo de EASE final. ....	38
Fig. 5.5. Captura del modelo de EASE con todas las superficies.....	39
Fig. 5.6. Vista de las 22 áreas de audiencia presentes en el modelo de EASE.....	39
Fig. 5.7. Vista del modelo final 3D del recinto, incluyendo zonas de audiencia y puntos de medida. ....	40
Fig. 5.8. Conjunto de vegetación presente en el Auditorio El Torreón. ....	41
Fig. 5.9. Conjunto de vegetación presente en el Auditorio El Torreón, generado en el modelo de tres dimensiones. ....	41
Fig. 5.10. Coeficientes de absorción y scattering del material utilizado para simular el aire libre.....	42
Fig. 5.11. Concha acústica del auditorio vista desde el frente del escenario.....	42
Fig. 5.12. Concha acústica del auditorio generada en el modelo y vista desde el punto de medida 86. ....	43

Fig. 6.1. Planta del recinto con la situación de los puntos de medida y la posición de la fuente.....	46
Fig. 6.2. Planta del recinto con las posiciones de medida del ruido de fondo. ....	47
Fig. 6.3. Esquema de las conexiones de los equipos para las medidas in situ.....	47
Fig. 6.4. Configuración de los equipos en el escenario. ....	48
Fig. 6.5. Comprobación de la calibración de un sonómetro. ....	49
Fig. 6.6. Colocación de los equipos para la comprobación de los sonómetros. ....	50
Fig. 6.7. Comprobación del nivel de la fuente dodecaédrica en campo libre.....	52
Fig. 7.1. Comparación de los espectros de los dos sonómetros en diferentes momentos de la mañana de medidas. En azul, el sonómetro referencia (99). En naranja, el segundo sonómetro (98). ....	54
Fig. 7.2. Diagrama explicativo del proceso de corrección de las medidas por diferencia de sonómetros.....	55
Fig. 7.3. Valores del ruido de fondo en el recinto introducidos en EASE. ....	56
Fig. 7.4. Distribución de los distintos materiales en el recinto, visto desde la parte trasera. ....	58
Fig. 7.5. Distribución de los distintos materiales en el recinto, visto desde la parte delantera. ....	58
Fig. 7.6. Coeficientes de absorción y scattering del material "concretes".....	58
Fig. 7.7. Coeficientes de absorción y scattering del material "concreter".....	59
Fig. 7.8. Coeficientes de absorción y scattering del material "BrickFloor". ....	59
Fig. 7.9. Coeficientes de absorción y scattering del material "WOOFLR HWD". ....	59
Fig. 7.10. Coeficientes de absorción y scattering del material "TREES".....	60
Fig. 7.11. Coeficientes de absorción y scattering del material "GRASS". ....	60
Fig. 7.12. Coeficientes de absorción y scattering del material "Suelo_Escenario". ....	60
Fig. 7.13. Coeficientes de absorción y scattering del material "STEEL". ....	61
Fig. 7.14. Coeficientes de absorción y scattering del material "LADRILLOS". ....	61
Fig. 7.15. Coeficientes de absorción y scattering del material "GLS/WL 2". ....	62
Fig. 8.1. Diagramas de directividad de la fuente dodecaédrica para diferentes frecuencias. [14].....	70
Fig. 8.2. Medidas realizadas en la cámara anecoica a la fuente dodecaédrica a diferentes alturas y ángulos.....	71
Fig. 8.3. Medidas realizadas en la cámara anecoica a la fuente dodecaédrica a diferentes alturas. ....	72
Fig. 8.4. Medidas realizadas en la cámara anecoica a la fuente dodecaédrica a diferentes ángulos. ....	72
Fig. 8.5. Comparación del espectro original y el promediado para diferentes casos, utilizados en EASE.....	73
Fig. 9.1. Comparación visual del EDT y el RT. [1] .....	76
Fig. 9.2. Ábacos necesarios para realizar el cálculo del parámetro %Alcons. [4] .....	79
Fig. 9.3. Imagen del modelo que muestra la colocación de los bloques que simulan la audiencia.....	80

Fig. 9.4. Coeficientes de absorción y <i>scattering</i> utilizados para simular la ocupación del público.....	81
Fig. 9.5. Definición de las curvas NR (Noise Ratio). [21] .....	82
Fig. 9.6. Distribución del nivel total para todas las frecuencias generado en EASE. ....	84
Fig. 9.7. Distribución del parámetro T30 en la frecuencia de 1kHz para el recinto sin ocupar.....	85
Fig. 9.8. Distribución del parámetro T30 en la frecuencia de 1kHz para el recinto ocupado. ....	85
Fig. 9.9. Mapeo del parámetro EDT simulado en EASE para un recinto ocupado. ....	87
Fig. 9.10. Mapeo del parámetro %Alcons en el modelo del Auditorio El Torreón. ....	87
Fig. 9.11. Mapeo del parámetro STI en el modelo del Auditorio El Torreón. ....	88
Fig. 9.12. Distribución del parámetro C50 en el modelo del recinto ocupado. ....	89
Fig. 9.13. Distribución del parámetro C80 en el modelo del recinto ocupado. ....	89

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Valores del coeficiente de absorción del aire para una temperatura de 20°C.	24
Tabla 6.1. Valores del SPL a 1 m introducidos en EASE. ....	53
Tabla 7.1. Valores de las condiciones meteorológicas en Pozuelo de Alarcón en el momento de la realización de las medidas, obtenidos en <a href="http://www.aemet.es/">http://www.aemet.es/</a> . ...	56
Tabla 7.2. Resultados del ajuste para los puntos situados en el escenario. ....	63
Tabla 8.1. Comparación entre los valores originales de la fuente y el promedio realizado tras estudiar la directividad de la misma. ....	74
Tabla 9.1. Relación entre sensación de inteligibilidad y el valor de %Alcons.....	79
Tabla 9.2. Relación entre sensación de inteligibilidad y el valor de STI. ....	79
Tabla 9.3. Nivel de las curvas NR para cada octava. ....	83
Tabla 9.4. Curvas objetivo para diferentes espacios. ....	83
Tabla 9.5. Promedio del ruido de fondo del recinto, en octavas. ....	83
Tabla 9.6. Valores del parámetro T30 y RT para el recinto sin audiencia y con audiencia.....	86
Tabla 9.7. Comparación de los valores óptimos y los simulados para una representación musical en un recinto al aire libre. ....	90
Tabla 9.8. Comparación de los valores óptimos y los simulados para la palabra y el teatro en un recinto al aire libre.....	90
Tabla 11.1. Costes materiales para la realización del proyecto.....	93
Tabla 11.2. Costes de mano de obra para la realización del proyecto.....	94

# 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los pilares del plan de estudios del grado en Ingeniería de Sistemas Audiovisuales es el campo de la acústica, sin embargo, se profundiza poco en lo relacionado con la acústica de recintos. Por esto, se buscaba un proyecto conectado con ello y que supusiese ir un paso más allá de los trabajos previos y lo estudiado durante todo el grado. Se decidió elegir un recinto concreto y realizar una simulación y estudio del mismo.

La cantidad de trabajos previos sobre recintos al aire libre en la Escuela Politécnica Superior de la UC3M es mucho menor que la de proyectos de estudios de recintos cerrados. Esto, sumado a las grandes dimensiones del recinto seleccionado y una serie de características únicas del mismo, suponía un gran reto y una alta motivación.

La memoria cuenta con una introducción teórica basada en tres pilares: conceptos básicos relacionados con la acústica sobre los que se apoya la solución práctica; la propagación del sonido al aire libre y las características de los teatros griegos y romanos.

Para entender e interpretar los resultados de las investigaciones realizadas en el trabajo es necesario conocer algunos conceptos teóricos de la acústica. En una primera parte se introducen conceptos como el SPL (nivel de presión sonora), la percepción del sonido por el oído humano o la directividad de una fuente sonora.

La manera en la que se propaga el sonido al aire libre es muy distinta a la forma en que lo hace en un recinto cerrado. Además, la propagación depende de diferentes factores como pueden ser la temperatura, la humedad, el viento o la presión atmosférica. La variación de estos factores se puede dar en pequeños lapsos de tiempo y modificar el comportamiento acústico de un entorno. En este trabajo se explica la influencia de todos estos factores.

Una característica interesante del recinto es la disposición del graderío, que recuerda a los antiguos auditorios griegos y romanos. Por ello, se ha dedicado una parte de esta memoria a explicar qué características tenían este tipo de construcciones y cuáles son las similitudes y diferencias con El Torreón.

Una vez realizada la introducción teórica, el proyecto se divide en tres fases: la creación de un modelo en tres dimensiones del auditorio; el ajuste de dicho modelo basándose en medidas realizadas in situ en el recinto y la posterior evaluación de los parámetros acústicos objetivos.

La creación del modelo en tres dimensiones se ha realizado con el software de simulación acústica EASE (*Enhanced Acoustic Simulation for Engineers*). Mediante dicho modelo virtual se tratan de considerar todos los elementos que tienen influencia acústica en la propagación del sonido en este recinto, partiendo de las partes que lo forman (escenario, gradas, etc) y las características acústicas de los materiales de los que está compuesto. Sin embargo, es habitual que en la creación de modelos virtuales no se disponga de toda la información sobre el recinto (por ej. La absorción acústica de ciertos materiales), y se

asuman además simplificaciones en la construcción del modelo. Por ello, el proceso de simulación acústica mediante software debe llevar asociada una fase de calibración o ajuste del modelo virtual. Para realizar este ajuste es necesario realizar una serie de medidas in situ y mediante un proceso iterativo de modificación de los materiales se deben ir comparando dichas medidas con el resultado de las simulaciones, hasta alcanzar la concordancia deseada.

En la última parte de la memoria se ha realizado una pequeña evaluación del comportamiento acústico para distintos tipos de representaciones. En concreto, para representaciones musicales y teatrales. Finalmente, se hace un análisis del marco regulador, se añade un presupuesto del proyecto y se analiza el entorno socio-económico.

## 2. CONCEPTOS BÁSICOS RELACIONADOS CON LA ACÚSTICA

### 2.1. Generalidades del sonido

El sonido es la sensación auditiva que se tiene debida a una vibración mecánica propagada por un medio elástico y denso. Una fuente sonora tiene que generar una vibración inicial de algún elemento mecánico, a continuación, esta vibración se transmite a las partículas contiguas del medio y estas a las siguientes, hasta llegar al receptor.

En un punto concreto se recibe una presión acústica que puede expresarse como una suma ponderada de senos referenciada a la presión atmosférica estática. Como toda onda con forma de seno, tiene un cierto periodo y una cierta frecuencia. La frecuencia dependerá del elemento que provoque la vibración inicial, por ejemplo, un instrumento musical. Por lo general, una persona es capaz de oír sonidos a partir de 20 Hz y hasta 20000 Hz. Los infrasonidos (por debajo de 20 Hz) y los ultrasonidos (20000 Hz) tienen otro tipo de aplicaciones que no se van a detallar en este trabajo.

El sonido se desplaza a una cierta velocidad (denominada con la letra  $c$ ) dependiente del medio de propagación. A mayor densidad y menor elasticidad del medio, mayor será la velocidad de propagación. Se suele utilizar el valor de 340 m/s, es la velocidad del sonido para 1 atm de presión y 22°C de temperatura.

El siguiente concepto a definir es la longitud de onda, relaciona tanto la velocidad como la frecuencia. Se define como la distancia entre dos puntos consecutivos de la onda sonora que tienen la misma amplitud. La relación entre estos tres términos se muestra en la [Ecuación (2.1)].

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ [m]} \quad (2.1)$$

La longitud de onda depende del medio de propagación, ya que la velocidad depende del mismo. También se puede comprobar que la longitud de onda y la frecuencia son inversamente proporcionales.

Debido a que el oído no se comporta de manera lineal, resulta incómodo manejar una magnitud lineal como es la presión. Por ello, se hace uso de una escala logarítmica para representar la presión sonora ya que se aproxima mejor a la percepción del oído humano. En este caso hablamos del nivel de presión sonora o SPL. En la [Ecuación (2.2)] se muestra su cálculo.

$$\text{SPL} = 10 \log \frac{p_{\text{ef}}^2}{p_{\text{ref}}^2} \text{ [dB]} \quad (2.2)$$

El término del numerador es la presión eficaz y el del denominador es la presión de referencia correspondiente al umbral de audición para una frecuencia de 1 kHz, siendo  $2 \times 10^{-5}$  Pa.



Hay que tener en cuenta la relación del nivel de presión sonora y la frecuencia. Una señal de la misma energía genera diferente sensación en cuanto a nivel percibido en función de la frecuencia. A bajas frecuencias el oído es muy insensible, esto quiere decir que es necesario tener un nivel más alto para que se aprecie con la misma sonoridad que uno de menor nivel a frecuencias medias. Esto ocurre también para frecuencias muy altas. Todo esto se puede observar en la [Fig. 2.1].

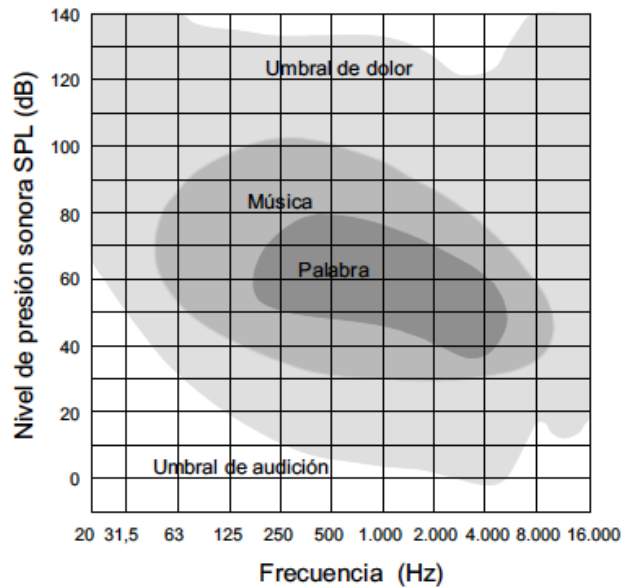


Fig. 2.1. Comparación de los niveles audibles por el oído humano y las zonas de nivel para la palabra y la música. [1]

## 2.2. Reflexión del sonido

La reflexión del sonido en un recinto se puede dividir en dos tipos. Las primeras reflexiones o reflexiones de orden menor de 3 (rebotan tres veces o menos desde la fuente hasta llegar al receptor) y la cola reverberante compuesta por las reflexiones que ya han rebotado numerosas veces y su cantidad de energía es bastante menor. Por cuestiones prácticas, se toma un límite temporal para delimitar las primeras reflexiones y la cola reverberante, normalmente se toman como primeras reflexiones a todas las que llegan al receptor con un retardo inferior de 100 ms. Las primeras reflexiones generalmente son beneficiosas ya que son responsables de la sensación sonora. La existencia de una cola reverberante demasiado larga puede llegar a influir negativamente en la escucha. A continuación, se muestra un ecograma, que puede obtenerse como el módulo de la respuesta al impulso en un recinto desde el emisor al receptor. Dicho ecograma incorpora información sobre el nivel energético de las reflexiones y su estructura temporal.

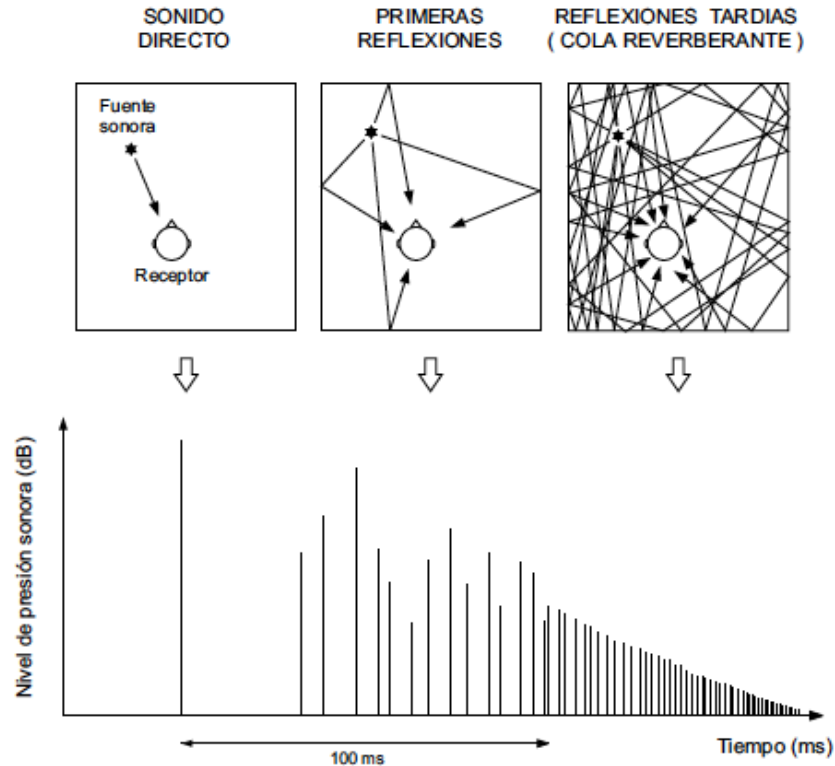


Fig. 2.2. Ecograma que muestra el sonido directo, las primeras reflexiones y la cola reverberante en un receptor concreto. [1]

Observando el ecograma, se pueden distinguir claramente las tres zonas diferentes. De manera general, se pueden considerar primeras reflexiones todas aquellas que llegan con un retardo no superior a 100 ms, aunque más adelante se verá que este retardo puede variar en función del tipo de sonido que se emita.

### 2.3. Teoría geométrica

Para simplificar el estudio de las primeras reflexiones se pueden considerar a los rayos sonoros como si fuesen rayos de luz. Así se puede considerar reflexión especular y hacer uso de la ley de la reflexión. Siendo  $\theta_i$  el ángulo incidente y  $\theta_r$  el ángulo reflejado:

$$\theta_i = \theta_r \quad (2.3)$$

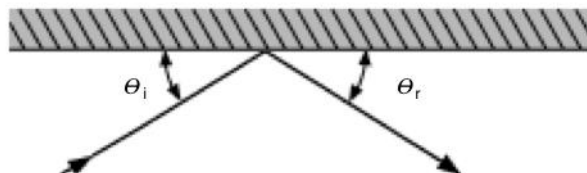


Fig. 2.3. Representación gráfica de la ley de reflexión. [1]

Se deben dar unas condiciones concretas en la superficie de reflexión para que la reflexión del sonido se pueda considerar especular. La dimensión de la superficie debe ser considerablemente mayor a la longitud de onda del sonido que se considere en ese momento y además debe ser lisa. En el caso de que la longitud de onda se pueda comparar o ser ligeramente menor que el tamaño de la superficie, se produce un fenómeno de difracción. En el caso de contar con una superficie no plana, con irregularidades, se genera una difusión del sonido.

## 2.4. Teoría estadística

En el caso de la cola reverberante, el tratamiento es diferente. La densidad de las reflexiones tardías es mayor conforme avanza el tiempo, se incrementa de manera exponencial. Esto hace que en todos los puntos haya una gran concentración de las mismas y con unas características prácticamente idénticas. En este caso la geometría del recinto no influye y por eso para modelar la cola reverberante se utiliza la teoría estadística.

En el caso del auditorio estudiado en este trabajo, al situarse al aire libre carece de cola reverberante. Por este motivo, no se entrará en detalles sobre la teoría estadística.

## 2.5. Propagación del sonido en espacio libre

En un caso general, cuando se enciende una fuente en un recinto cerrado y comienza a radiar energía, cualquier receptor en ese espacio va a recibir parte de la energía como campo directo y otra parte relacionada con las reflexiones sobre las superficies y objetos que presenta el recinto. En el caso particular del espacio libre, sólo se recibe el campo sonoro directo, el cual depende de la distancia entre fuente y receptor.

En el caso de una fuente real se puede considerar propagación en forma de ondas esféricas siempre y cuando se refiera al campo lejano de la fuente. Esto significa estar a una distancia muy superior a la dimensión característica de la fuente. Bajo esta situación se puede predecir el nivel de presión recibido a una cierta distancia con la [Ecuación (2.4)].

$$\text{SPL}(r, \theta, \varphi) = L_w + 10 \log \left( \frac{Q(\theta, \varphi)}{4\pi r^2} \right) [\text{dB}] \quad (2.4)$$

Donde:

$L_w$  es el nivel de potencia acústica de la fuente.

$Q(\theta, \varphi)$  es el factor de directividad de la fuente.

Y  $r$  la distancia entre fuente y receptor.

De esta fórmula se puede extraer la conclusión de que, si se dobla la distancia entre fuente y receptor sin variar la orientación, el nivel de presión sonora será 6 dB menor.

## 2.6. Propagación del sonido en un recinto cerrado

Para este caso, además de la energía que llega directa de la fuente, el receptor recibirá sonido procedente de la reflexión de los elementos del recinto. La cantidad de energía sonora que se recibe depende en este caso de lo largo que sea el camino total después de todas las reflexiones y los factores de absorción y *scattering* (coeficiente de dispersión) que tengan los materiales que reflejan estas ondas.

El coeficiente de absorción de una superficie se define como la relación entre la energía absorbida y la energía incidente. Toma valores de 0 a 1, siendo 0 una superficie totalmente reflectante y 1 una superficie totalmente absorbente.

Por otro lado, el coeficiente de dispersión o *scattering* se define como la proporción de la energía no reflejada de forma especular, sin tener en cuenta la forma en la que se distribuye la energía difusa.

Es importante tener en cuenta que ambos parámetros son dependientes de la frecuencia.

## 2.7. Directividad de una fuente sonora

Los parámetros de directividad, todos dependientes de la frecuencia, se suelen especificar de varias formas según sea el caso.

### 2.7.1. Directividad

El primer parámetro a estudiar es la directividad. Muestra la relación entre la presión eficaz generada por una fuente en una cierta dirección y a una cierta distancia, y la presión máxima generada por el emisor a esa distancia.

$$D(\theta, \varphi) = \frac{p_{ef}(\theta, \varphi)}{p_{max}} \quad (2.5)$$

Se hace uso de coordenadas esféricas siendo  $\theta$  el ángulo de elevación y  $\varphi$  el azimut. En el caso de que una fuente cuente con simetría de revolución con respecto a su eje z, la expresión de la directividad se simplifica, desapareciendo el ángulo  $\varphi$ .

$$D(\theta) = \frac{p_{ef}(\theta)}{p_{max}} \quad (2.6)$$

Normalmente en lugar de utilizar la expresión en unidades naturales, se utiliza la expresión logarítmica en decibelios.

$$D(\theta) = 10 \log \frac{p_{ef}^2(\theta)}{p_{max}^2} \quad (2.7)$$

La forma más sencilla y rápida de visualizar el concepto de la directividad, es mediante el uso de los diagramas de directividad. Se trata de una representación gráfica en tres dimensiones del parámetro para varias frecuencias en función de las coordenadas

esféricas ( $\theta$  y  $\varphi$ ). Una vez más, si la fuente posee simetría de revolución con respecto al eje z se pierde la dependencia del ángulo  $\varphi$  y se puede representar con un sencillo diagrama polar en dos dimensiones.

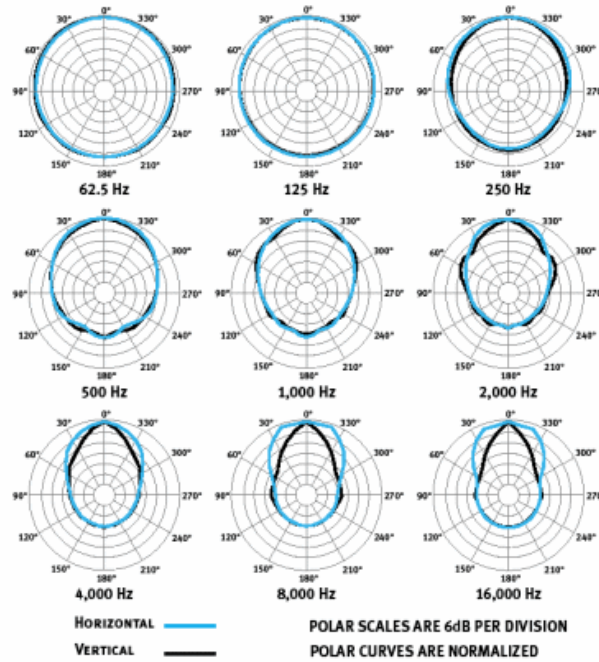


Fig. 2.4. Diagrama polar de una fuente real para diferentes frecuencias. [18]

### 2.7.2. Factor de directividad Q

En el caso del factor de directividad, el nivel de presión generado en un cierto ángulo se compara con un promedio de la presión generada por la fuente para todos los ángulos.

$$Q(\theta, \varphi) = \frac{p_{ef}^2(\theta, \varphi)}{\langle p_{ef}^2(\theta, \varphi) \rangle} \quad (2.8)$$

Es poco habitual, pero algunos fabricantes aportan el factor de directividad axial,  $Q_{ax}$ . Consiste en relacionar la presión generada en el eje de la fuente con el promedio de las presiones generadas en todos los ángulos.

$$Q_{ax} = \frac{p_{ef}^2(0, 0)}{\langle p(\theta, \varphi) \rangle} \quad (2.9)$$

### 2.7.3. Índice de directividad DI

El índice de directividad es simplemente la expresión logarítmica del factor de directividad.

$$DI(\theta, \varphi) = 10 \log Q(\theta, \varphi) \quad (2.10)$$

A su vez, se puede calcular el índice de directividad axial según la [Ecuación (2.11)].

$$DI_{ax} = 10\log Q_{ax} \quad (2.11)$$

### 3. PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN EL EXTERIOR

En este capítulo se va a estudiar la propagación del sonido en el exterior. Es de vital importancia conocer estas características para entender cómo pueden afectar al recinto bajo estudio.

La propagación del sonido en un espacio exterior se ve afectada por una serie de factores diferentes a los que la modifican en un recinto cerrado. El conjunto de todos estos factores puede generar fluctuaciones de nivel muy grandes, a veces del orden de 10 dB o 20 dB. Cuanto mayor sea el camino que recorra el sonido directo, mayor será la variación de los niveles obtenidos.

Las principales causas de la modificación del nivel sonoro al aire libre son: la fuente en sí (su geometría o su tipo), las condiciones meteorológicas (viento, temperatura y humedad), la absorción atmosférica del sonido, el tipo del terreno y los obstáculos que puede haber en el entorno.

Todos estos factores y su influencia se detallan en la Norma UNE-EN ISO 9613-2:1996. Esta Norma define un método para calcular la atenuación del sonido cuando se propaga en exteriores.

En un entorno real existen varios factores a tener en cuenta a la hora de obtener el nivel producido por una fuente a una distancia concreta. A la atenuación producida por la divergencia esférica hay que añadirle la atenuación total por exceso.

$$L_p = L_w - 20 \log r - 11 + DI - A_{abs} - A_E \text{ [dB]} \quad (3.1)$$

Donde:

$L_w$  es el nivel de potencia acústica de la fuente.

El término  $20 \log r$  es la divergencia esférica.

$DI$  es el índice de directividad de la fuente.

$A_{abs}$  es la absorción producida por la atmósfera.

$A_E$  es la atenuación por exceso.

La atenuación total por exceso se trata de la suma de todas las fuentes de absorción. La absorción provocada por los efectos meteorológicos, las características del terreno, obstáculos físicos entre la fuente y el receptor, la vegetación y un factor de absorción reservado a otras causas.

### 3.1. Absorción atmosférica

Las partículas de aire de la atmósfera producen dos tipos de fenómenos que afectan al sonido. El primero consiste en que las ondas sonoras excitan las moléculas de aire produciendo el choque entre ellas y transformando energía sonora en calor. Por otro lado, las partículas del aire pueden absorber momentáneamente una cierta cantidad de energía sonora para liberarla más tarde. Esto último supone un problema en el caso de que la liberación de esta energía provoque una interferencia con las ondas sonoras que llegan en ese momento.

La absorción de la atmósfera depende principalmente de la frecuencia, la temperatura (en °C) y la humedad. Se puede calcular la absorción que produce la atmósfera a una cierta distancia  $d$  de la fuente como:

$$A = \gamma d \text{ [dB]} \quad (3.2)$$

Donde  $\gamma$  es el coeficiente de atenuación del aire [dB/km]. Este coeficiente se obtiene de unas tablas referenciadas a una temperatura determinada. A modo de ejemplo, se muestra a continuación la tabla con los coeficientes para una temperatura de 20 °C.

Frecuencia	Humedad relativa		
	50%	70%	90%
125 Hz	0,45	0,34	0,27
250 Hz	1,3	1,1	0,97
500 Hz	2,7	2,8	2,7
1000 Hz	4,7	5	5,3
2000 Hz	9,9	9	9,1
4000 Hz	29	23	20

Tabla 3.1. Valores del coeficiente de absorción del aire para una temperatura de 20 °C.

De la [Ecuación (3.2)] y la [Tabla 3.1] se puede extraer la conclusión de que a menor distancia, esta absorción es más importante en frecuencias altas, mientras que conforme aumenta la distancia el efecto es apreciable para todas las frecuencias.

### 3.2. Condiciones meteorológicas

Las condiciones meteorológicas son un condicionante con alta influencia en la propagación del sonido al aire libre. En este grupo de factores se incluyen la temperatura, la humedad o el viento. A continuación, se detalla la influencia de cada uno de ellos.



### 3.2.1. Temperatura

Una forma muy clara de justificar el efecto de la temperatura en la propagación del sonido, es mediante la fórmula de la velocidad del sonido.

$$c \approx 343,2 \sqrt{\frac{T}{293}} \text{ [m/s]} \quad (3.3)$$

Como se puede ver, depende directamente de la temperatura (T) en Kelvin. Según esta expresión, es fácil comprobar que por cada grado que aumenta la temperatura, la velocidad del sonido se incrementa en 0,6 m/s.

Un suceso común en la atmósfera es la existencia de gradientes verticales negativos de temperatura. Esto ocurre cuando la temperatura desciende conforme se aumenta la altura. Esto se acentúa por la tarde durante los días soleados. En estos casos el sol produce una gran acumulación de calor en la superficie y, además, esta radia parte de ese calor al aire más cercano. Este fenómeno provoca que las ondas de sonido (en todas las direcciones) se desvíen alejándose de la superficie desde la fuente. Se genera una zona de sombra acústica circular.

La situación contraria, la generación de un gradiente positivo, ocurre algunas noches. La temperatura aumenta conforme aumenta la altura. Esto se debe a que el aire cercano a la superficie se enfría muy rápido, provocado por la rápida absorción del calor por parte del terreno. En este caso las ondas sonoras se curvan hacia la superficie mejorando así la propagación de las mismas a mayores distancias.

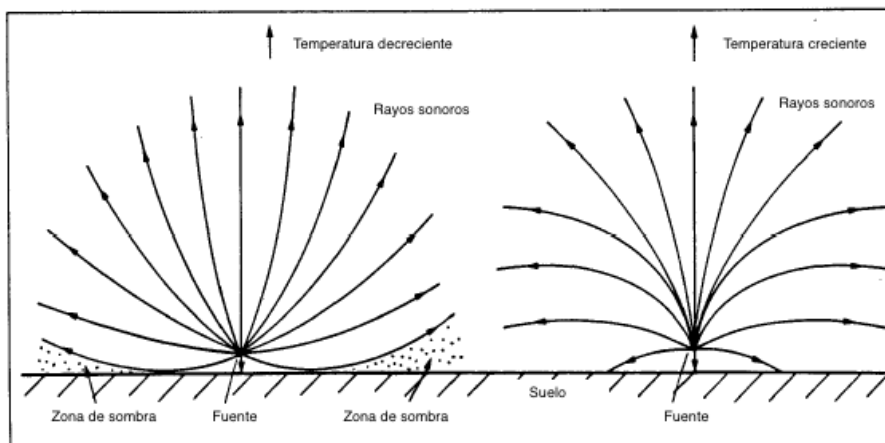


Fig. 3.1. A la izquierda gradiente negativo de temperatura. A la derecha gradiente positivo de temperatura. [19]

### 3.2.2. Viento

Según diversos estudios se ha llegado a la conclusión de que la influencia del viento no es significativa hasta superados los 50 m de distancia entre la fuente sonora y el punto donde se realiza la medida. La modificación del sonido por parte del viento depende en

gran medida de la dirección de propagación de las ondas sonoras y la dirección y velocidad del viento. También es necesario tener en cuenta que, en una situación real, la velocidad del viento suele ser mayor conforme se aumenta la altura. A continuación, se describen dos escenarios para ilustrar la influencia del viento.

En un primer caso, se supone que el sonido se propaga a favor del viento, es decir, que tienen la misma dirección. Para esta situación, la velocidad del viento y del sonido se suman. Esto provoca que cuando la onda sonora alcanza una cierta altura y distancia desde la fuente, la onda se flexiona refractándose de nuevo hacia la superficie. En el receptor se percibirá un aumento de la presión sonora. Es importante tener en cuenta que este efecto se hace más notable para distancias mayores de 300 m desde el emisor hasta el receptor.

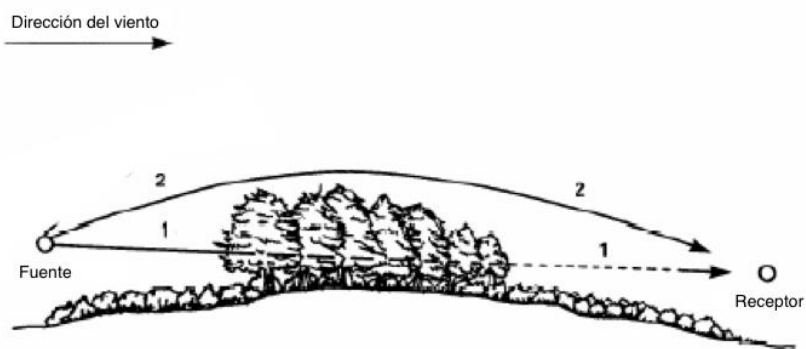


Fig. 3.2. Efecto del viento en las ondas sonoras cuando llevan la misma dirección. [22]

Si por el contrario el sonido está propagándose en contra del viento, la velocidad de ambos se resta. Este factor provoca una refracción de las ondas de sonido alejándose de la superficie. Si el receptor está situado a una distancia de más de 300 m de la fuente y el viento tiene velocidades superiores a los 16 km/h, pueden generarse zonas de sombra en las que el nivel sonoro puede llegar a ser 20 dB menor.

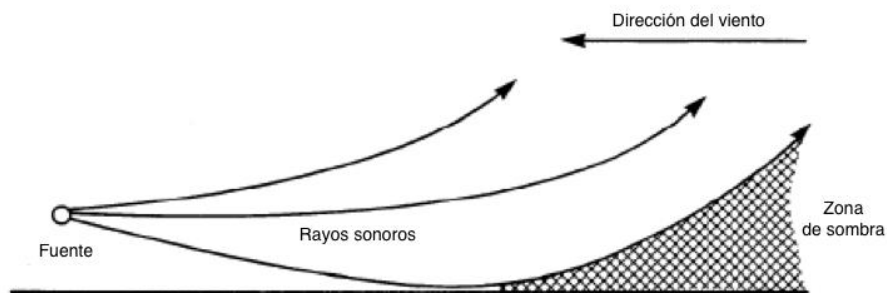


Fig. 3.3. Efecto del viento en las ondas sonoras cuando llevan dirección contraria. [22]

### **3.2.3. Humedad**

La humedad relativa en el ambiente influye directamente en la propagación del sonido, ya que condiciona la elección del coeficiente de absorción atmosférica como se muestra en la [Tabla 3.1]. A mayor humedad, este coeficiente es menor.

### **3.3. Terreno**

Salvo en casos excepcionales (grandes masas de agua, hielo u hormigón, entre otros), no se puede considerar una superficie totalmente rígida o con reflexión total. En la mayoría de los casos, las características de composición de las superficies permiten la absorción de energía sonora por parte de las mismas.

A su vez, las superficies, cuando la onda incide con ángulo muy pequeño o si se trata de ondas de baja frecuencia, se comportan como un canal de transmisión. Esto sucede porque la energía acústica se transforma en energía vibratoria, excitando las partículas del terreno. Cuanta menor sea la frecuencia, más distancia recorrerán las ondas hasta desvanecerse.

### **3.4. Vegetación**

La vegetación es un elemento muy utilizado como barrera antirruído debido a sus propiedades absorbentes. Según los estudios, una masa espesa de vegetación presente desde el suelo hasta una cierta altura, supone una atenuación de 1 dB por cada 10 m de espesor. Teniendo en cuenta esta cifra, para obtener una atenuación considerable, por ejemplo 6 dB, sería necesaria una masa de vegetación de unos 60 m de espesor. Esto ocurre por ejemplo en los bosques cercanos a una carretera, la presencia de dicha vegetación, consigue atenuar en gran medida el ruido producido por el tráfico.

### **3.5. Obstáculos**

En el momento en el que un obstáculo rígido y no poroso evita la visión entre la fuente y el receptor, para que el sonido sea capaz de llegar al receptor, es necesario que las ondas sonoras se difracten por encima del obstáculo.

La atenuación producida por estos elementos depende mucho de la distancia a la que se encuentren, cuanta superficie tienen y el material del que están contruidos.

## 4. TEATROS AL AIRE LIBRE

Debido a las características directivas de la voz humana, un mensaje es inteligible hasta los 42 m enfrente del orador, 30 m lateralmente y sólo 17 m situándose detrás. Estas distancias sólo se alcanzan en un entorno muy silencioso y con ausencia total de viento que pueda modificar la propagación.

Como se ha explicado anteriormente, el auditorio bajo estudio se encuentra al aire libre. Tiene además una ligera similitud con los primeros espacios arquitectónicos construidos para las representaciones teatrales, los teatros griegos y romanos. Por ello, en este capítulo se comentan las características de ambos y las características del Auditorio El Torreón.

### 4.1. Teatros clásicos griegos

Para explicar este tipo de construcciones se toma como ejemplo el teatro de Epidauro. Este teatro construido alrededor del año 300 a.C. se encuentra en el Santuario de Asclepio, en Epidauro, Grecia. Está declarado como Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO desde el año 1988. Hoy en día es el más grande y mejor conservado.



Fig. 4.1. Teatro de Epidauro en la actualidad. [20]

Las tres partes más importantes a destacar son, el graderío (denominado como *koilon* en griego), la orquesta y el conjunto del proscenio y la escena, lo que hoy en día sería el escenario.

El graderío está construido sobre la ladera de una montaña aprovechando la inclinación de la misma, debido a que los griegos no conocían como tratar la piedra en formas abovedadas. Las gradas se disponen en forma circular cubriendo un ángulo de algo más de 180°. Cuenta con dos anillos principales de graderías separados por un pasillo circular utilizado para acceder a dichos asientos. A su vez, ambos anillos se dividen en 12 sectores distribuidos en forma radial para el anillo inferior y en 22 para el superior, todos ellos separados por escaleras para facilitar el acceso de los espectadores a las localidades.

La orquesta tiene una forma completamente circular y separa las gradas del escenario. Esta zona juega un importante papel en la buena acústica del teatro, tal y como se explica más adelante en la memoria.

El escenario estaba compuesto por el proscenio y la escena, actualmente destruida. El proscenio es donde se colocaban los actores para realizar las representaciones, lo que conforma escenario de los teatros actuales. La escena era una pared de piedra con columnas y esculturas vistosas colocada detrás del proscenio realizando la función de decorado.

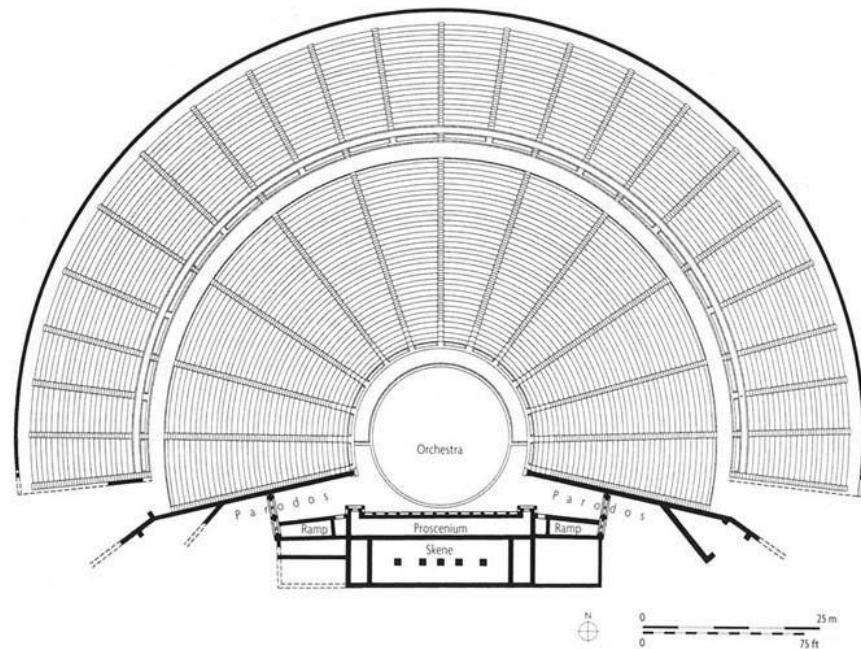


Fig. 4.2. Planta del teatro de Epidauro. [23]

La acústica de este teatro es excepcional ya que es posible escuchar y entender a los actores situados en el escenario desde todos los puntos del graderío. Incluso desde las últimas filas situadas a unos 70 m del proscenio. Evidentemente sin usar ningún tipo de sistema de refuerzo sonoro.

Para conseguir esto se dan una serie de circunstancias que en conjunto mejoran de manera muy notable la propagación del sonido. La principal razón radica en que el recinto se situaba en una zona que contaba con un ruido ambiental muy bajo. Esta situación en combinación con las características constructivas hacía de estas construcciones un espacio acústico prácticamente perfecto. Pero esto no es suficiente para justificar el aumento de la distancia máxima de escucha a los 70 m. Hay que tener en cuenta el efecto de las primeras reflexiones en la orquesta y el efecto amplificador de las máscaras utilizadas por los actores.

Debido a que el escenario estaba a una cierta altura sobre la orquesta, se producía una reflexión de las ondas en esta última. La suma del sonido directo y estas reflexiones, que son de primer orden (llegan con un retardo inferior a 50 ms) generan un aumento de nivel

en el receptor. Concretamente la energía se dobla en la superficie reflectante provocando un incremento de 3 dB y un factor de aumento de la distancia máxima de  $\sqrt{2}$ . Con esto se logra alcanzar los 60 m. Si sumamos el efecto de las reflexiones en la parte posterior del proscenio (la escena) y el efecto megáfono de las máscaras de los actores, se puede alcanzar una distancia de 70 m manteniendo la inteligibilidad del mensaje.

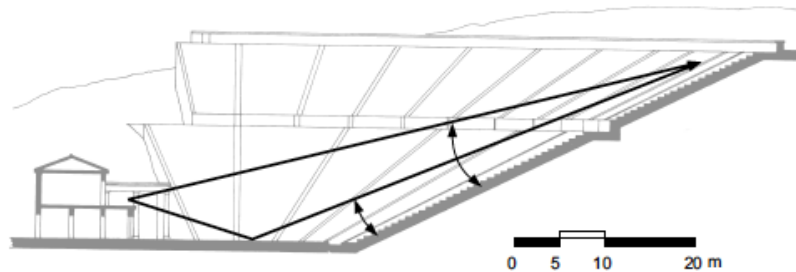


Fig. 4.3. Teatro de Epidauro: ángulos de incidencia del sonido directo y el sonido reflejado en la orquesta. [1]

Se ha llegado a la conclusión de que las gradas del recinto provocan un filtro paso alto debido a su disposición acanalada, generando un efecto difusor a las ondas. Esto hace que las bajas frecuencias se atenúen conforme el sonido va alejándose del escenario y a su vez, las frecuencias altas se reflejen generando un realce en las siguientes filas. Este efecto es perfecto para la aplicación típica de los teatros (la transmisión de la palabra), ya que la mayor parte de ruido es de baja frecuencia (el murmullo de los espectadores, el movimiento de los árboles por el viento, etc) y la voz se sitúa en medias y altas frecuencias alrededor de los 3000 Hz. Este efecto es muy parecido al que realizan los difusores acústicos muy utilizados en todo tipo de recintos.

En definitiva, todos estos factores en conjunto hacían de este teatro un excelente entorno para representaciones teatrales ante más de 14000 personas.

## 4.2. Teatros clásicos romanos

En líneas generales, los teatros romanos son muy similares a los griegos, pero existen ciertas diferencias. Estas diferencias hacen que las prestaciones acústicas de los teatros romanos sean algo peores con respecto a los teatros griegos.

La forma del graderío pasa a ser un arco de 180° reduciendo así la apertura de las gradas con respecto a los teatros griegos. Además, normalmente dichas gradas están unidas al escenario, cerrando así los laterales. En este caso las gradas ya sí se construyen sobre grandes bóvedas de piedra.

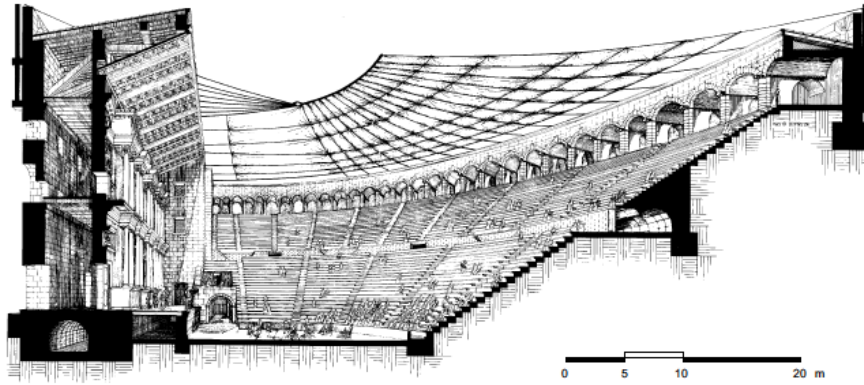


Fig. 4.4. Sección longitudinal del teatro de Apendus, Turquía. [1]

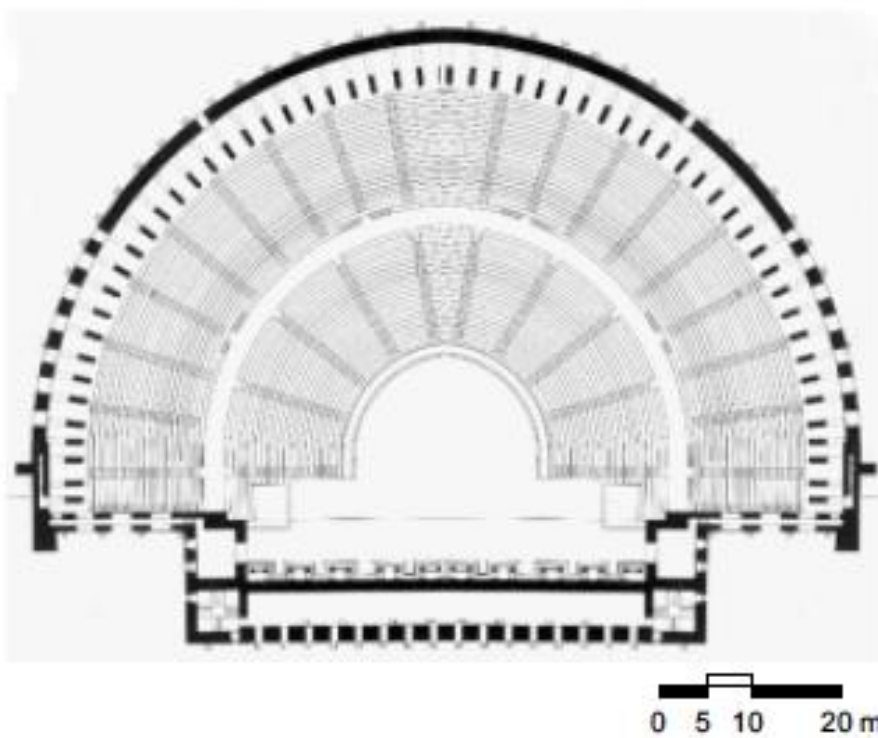


Fig. 4.5. Planta del teatro de Apendus, Turquía. [1]

Los teatros romanos cuentan con menos filas de asientos y además se disponen en un ángulo de inclinación mayor que el de los teatros griegos. Esto hace que la altura del escenario sea menor, para que las reflexiones en la orquesta lleguen correctamente a las gradas.

Otro detalle es que, con frecuencia, la orquesta se utilizaba para sentar a las autoridades. Esto generaría un efecto negativo ya que se perderían las reflexiones de primer orden de la orquesta y además los propios cuerpos de los espectadores absorberían gran parte del sonido.



Todas estas diferencias hacen que la distancia máxima de escucha baje a unos 50 m. Así disminuye de manera drástica el tamaño del teatro y el número de espectadores que podían acudir a las representaciones.

### 4.3. Auditorio El Torreón

El Auditorio El Torreón está situado en el Camino de Las Huertas Nº42, en el municipio madrileño de Pozuelo de Alarcón.



Fig. 4.6. Imagen aérea del Auditorio El Torreón.

Se trata de un recinto al aire libre construido en el año 1993. En función del espectáculo que se desarrolla, la audiencia se sitúa de pie o bien, en sillas de plástico colocadas a tal efecto. El aforo varía en función de la configuración elegida en función del espectáculo, siendo de unas 2000 localidades con el público sentado y 3000 si es de pie.

En este recinto se han celebrado representaciones teatrales, conciertos orquestales, cine de verano y conciertos de pop-rock de reconocidos artistas nacionales e internacionales. En alguno de los casos se hace uso de un andamiaje completo para la instalación de los equipos de sonido e iluminación.

Las gradas se distribuyen en forma de arco, de manera similar a los teatros de la antigüedad como se ha explicado previamente en este mismo capítulo. El escenario cuenta con una concha acústica de madera en su parte posterior para mejorar la proyección del sonido hacia las zonas de audiencia. Como curiosidad, previamente a la construcción del auditorio, existía un torreón edificado (se restauró y mantuvo como parte del auditorio), de ahí proviene el nombre del mismo y se puede observar desde varios puntos del municipio.





Fig. 4.7. Escenario del Auditorio El Torreón, visto desde la parte trasera.



Fig. 4.8. Gradas y torreón del Auditorio El Torreón, observados desde el escenario.

Desde su construcción, el auditorio ha sufrido dos pequeñas modificaciones. Originalmente, la superficie del escenario era semicircular. En el año 2000 se amplió para que tuviese forma rectangular y aumentar así su superficie de manera considerable. Posteriormente se colocaron unas barreras acústicas artificiales al fondo del recinto para minimizar la molestia de ruido generada en las viviendas colindantes.



Fig. 4.9. Barreras acústicas artificiales situadas en la parte posterior del Auditorio El Torreón.

En el caso de que se coloquen las sillas para el público, se pueden identificar cuatro zonas de audiencia principales. Las dos más cercanas al escenario cuentan con 6 alturas diferentes y 3 filas por cada altura, siendo un total de 18 filas. Las dos zonas superiores cuentan con 5 alturas diferentes y 3 filas por cada altura, haciendo un total de 15 filas de asientos. De ahora en adelante, las áreas de audiencia se denominarán con las letras A, B, C y D, tal y como se muestra en la siguiente imagen.

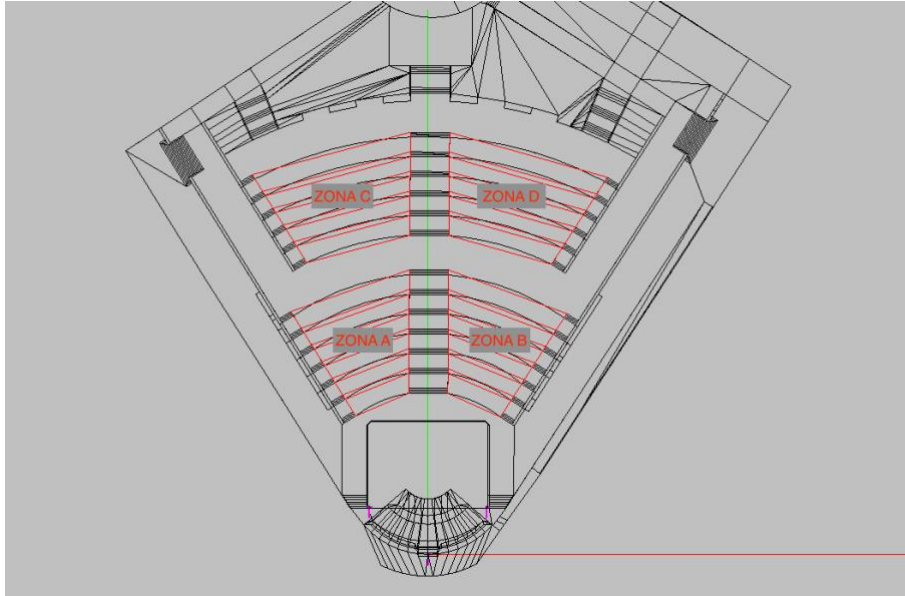


Fig. 4.10. Situación de las zonas de audiencia del Auditorio El Torreón.

## 5. GENERACIÓN DEL MODELO EN EASE

Para la realización del modelo en tres dimensiones del recinto y su posterior simulación, se ha utilizado el software EASE (*Enhanced Acoustic Simulator for Engineers*) en su versión 4.4. Este software de la marca comercial AFMG permite generar un modelo en tres dimensiones del recinto a estudiar, para posteriormente simular las características acústicas del mismo mediante el módulo AURA (*Analysis Utility for Room Acoustics*). Este módulo basado en los algoritmos CAESAR desarrollados en la Universidad de Aachen, permite el cálculo de los parámetros acústicos definidos en la Norma UNE-EN ISO 3382, el estándar internacional de medidas en recintos acústicos. Estos algoritmos funcionan proyectando numerosos rayos en todas direcciones desde la fuente y calculan los caminos recorridos y sus diferentes reflexiones. Este módulo necesita que los recintos estén cerrados.

La construcción se realiza introduciendo una serie de vértices y generando a partir de estos las caras del recinto. Se pueden introducir y modificar las características de los diferentes materiales de las superficies, configurar diferentes fuentes, insertar áreas de audiencia o colocar puntos de escucha concretos. Con toda esta información se puede simular el comportamiento acústico del recinto en términos de nivel sonoro, tiempo de reverberación o inteligibilidad, entre otras características.

En el caso de este trabajo de fin de grado se ha utilizado el software para generar el modelo en tres dimensiones del auditorio y posteriormente calibrarlo (modificando las características de los materiales, corrigiendo posibles errores de construcción, etc.) según las medidas in situ realizadas en el propio recinto.

### 5.1. Generación del modelo geométrico

Desde un principio se tuvo en cuenta que la creación del modelo iba a ser muy laboriosa por las grandes dimensiones del recinto (tiene una superficie de 8500 m<sup>2</sup>), por la complejidad de algunas estructuras como la concha acústica y por la representación de elementos como la vegetación.

Para comenzar con la construcción del modelo tan sólo se contaba con un plano de situación proporcionado por el personal de la Concejalía de Cultura del Ayuntamiento de Pozuelo de Alarcón. Este primer plano daba una idea sobre el recinto, pero no contaba con cotas que facilitasen el trabajo. Gracias al departamento de topografía del Ayuntamiento de Pozuelo de Alarcón se obtuvo acceso a los planos en formato CAD del escenario (en planta y alzado) y del resto del recinto (sólo en planta).

Para completar los datos que no aparecían en los mismos y tomar algunas fotografías, se acudió en dos ocasiones al recinto. Durante estas visitas se trataba de tomar medidas de detalles o elementos no presentes en los planos, con un metro laser. Como los planos de

las gradas sólo eran en planta, se tuvieron que medir todas las alturas que faltaban en los planos, siendo una labor muy costosa.

El complejo proceso de construcción del modelo comenzó desde el escenario, sin tener en cuenta la concha acústica y algunos detalles como las columnas.

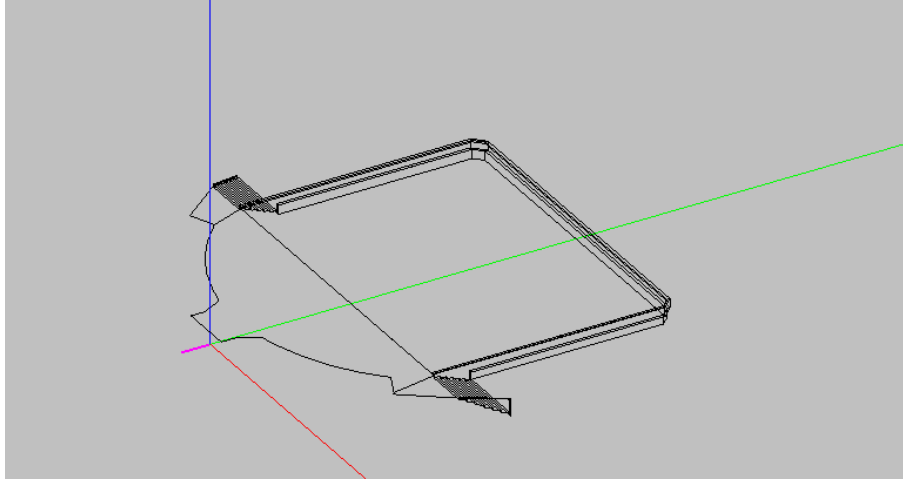


Fig. 5.1. Captura del modelo de EASE sólo con el escenario.

El siguiente paso fue añadir todas las gradas con todos sus escalones y además se añadieron los pasillos de acceso laterales.

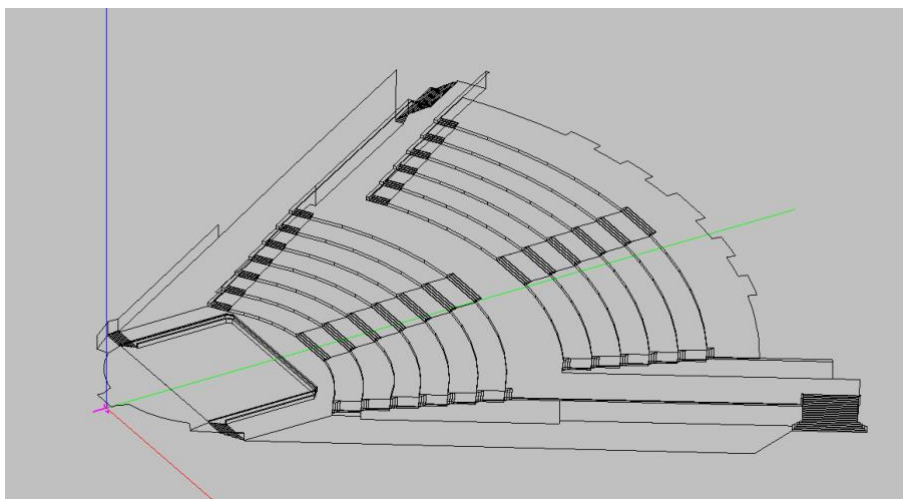


Fig. 5.2. Captura del modelo de EASE con las gradas incluidas.

A continuación, se añadieron los elementos situados en la parte trasera del auditorio. Entre ellos, el torreón, los pasillos de acceso traseros con sus escaleras correspondientes y el césped. El modelado de este último fue algo especialmente complejo ya que hubo que aproximar su curvatura por caras planas.

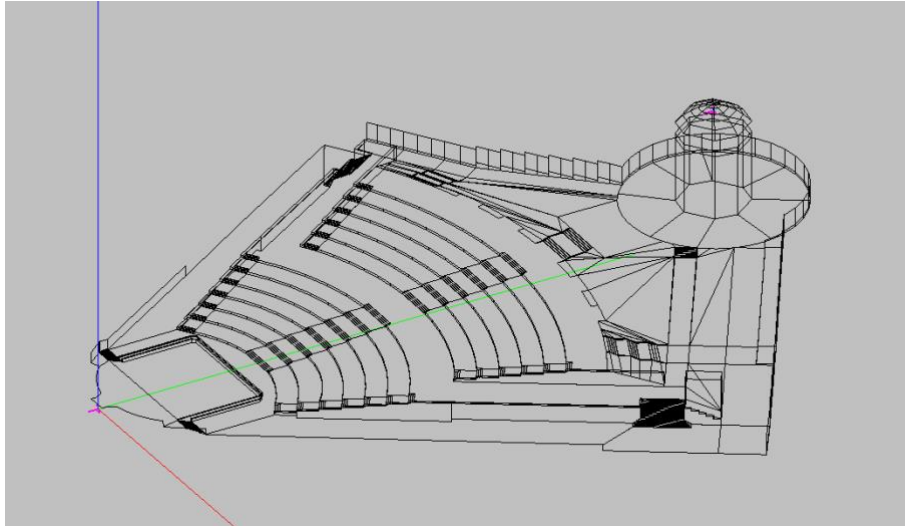


Fig. 5.3. Captura del modelo de EASE con la parte trasera incluida.

Uno de los últimos pasos en la creación del modelo fue insertar la concha acústica, la vegetación y la pared del recinto deportivo colindante, además de otros pequeños detalles.

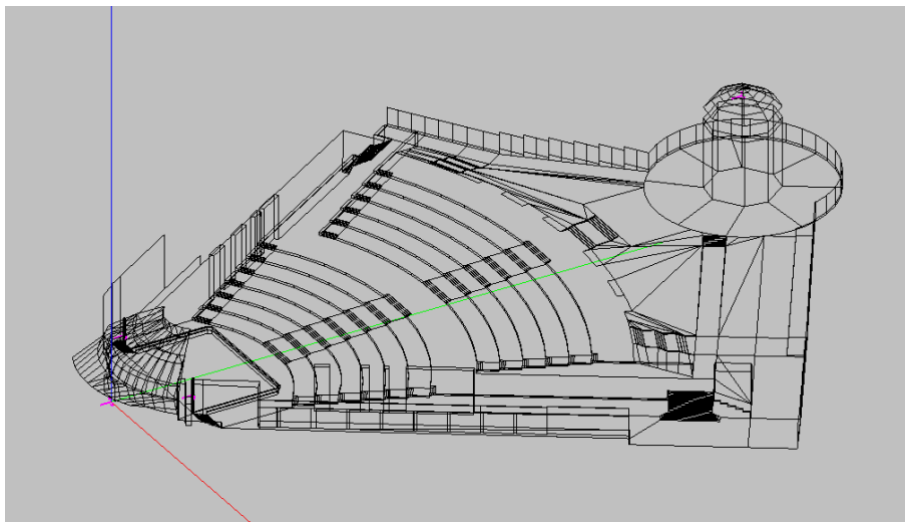


Fig. 5.4. Captura del modelo de EASE final.

Las últimas superficies añadidas fueron las que simularían el aire libre para poder así cerrar el modelo del recinto, tal y como exige el módulo AURA.

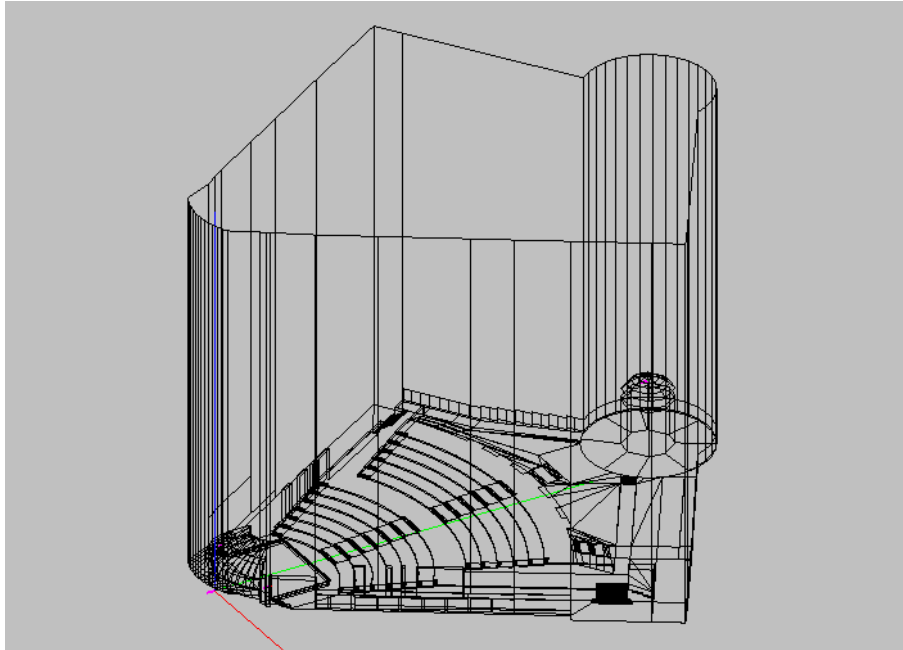


Fig. 5.5. Captura del modelo de EASE con todas las superficies.

Una vez creadas todas las superficies, se insertaron las zonas de audiencia. Como se ha comentado en el [Apartado 4.3], el auditorio puede dividirse en 4 zonas de audiencia principales. Para el caso del modelo, estas 4 zonas se subdividieron en otras, una zona de audiencia para cada altura de público diferente. Esto quiere decir que para la zona de audiencia A, en el modelo se introdujeron 6 zonas diferentes, una para cubrir cada escalón de las gradas. La zona B se dividió en otras 6 zonas y las zonas C y D, al tener un escalón menos, se dividieron en 5 zonas. Por lo tanto, el modelo final contó con 22 áreas de audiencia. Un detalle importante a tener en cuenta es la altura a la que se coloca el área de audiencia. En el modelo se optó por ponerlo a 1,25 m sobre la altura del escalón correspondiente. Esta altura es la considerada como media para un adulto sentado.

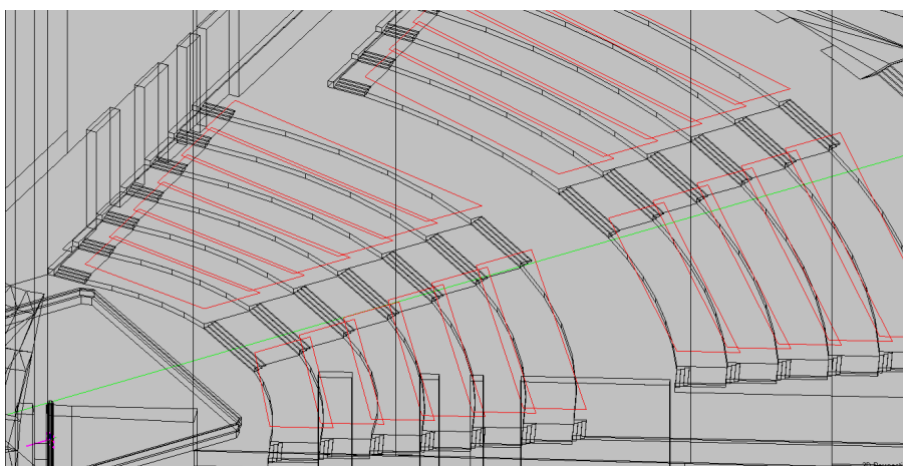


Fig. 5.6. Vista de las 22 áreas de audiencia presentes en el modelo de EASE.



Una vez situadas las zonas de audiencia, se colocaron los puntos de escucha y el modelo de la fuente omnidireccional. El modelo final contó con 2419 vértices, 1586 caras, 22 zonas de audiencia y 80 puntos de escucha.

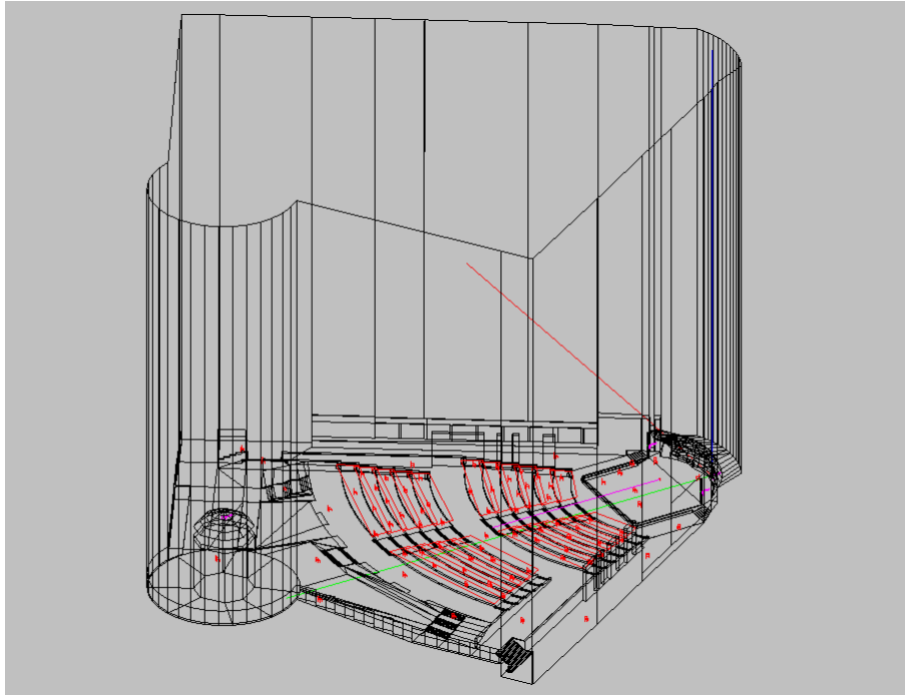


Fig. 5.7. Vista del modelo final 3D del recinto, incluyendo zonas de audiencia y puntos de medida.

## 5.2. Simplificaciones y suposiciones realizadas durante la creación del modelo

### 5.2.1. Estimación del efecto de los árboles

Se comprobó que el recinto contaba con una cantidad considerable de vegetación que afectaría a la propagación del sonido, con lo cual, era necesario tenerlo en cuenta en EASE. Sin embargo, este software no tiene objetos de este tipo. Ante esta limitación se tomó la decisión de colocar bloques del tamaño aproximado de los árboles y arbustos y posteriormente aplicarles un material de la base de datos denominado como *TREES* [Fig. 5.9]. Es necesario destacar que tan sólo se tuvo en cuenta la vegetación más cercana al escenario debido a que es la más influyente en los resultados de las medidas en las áreas de audiencia.





Fig. 5.8. Conjunto de vegetación presente en el Auditorio El Torreón.

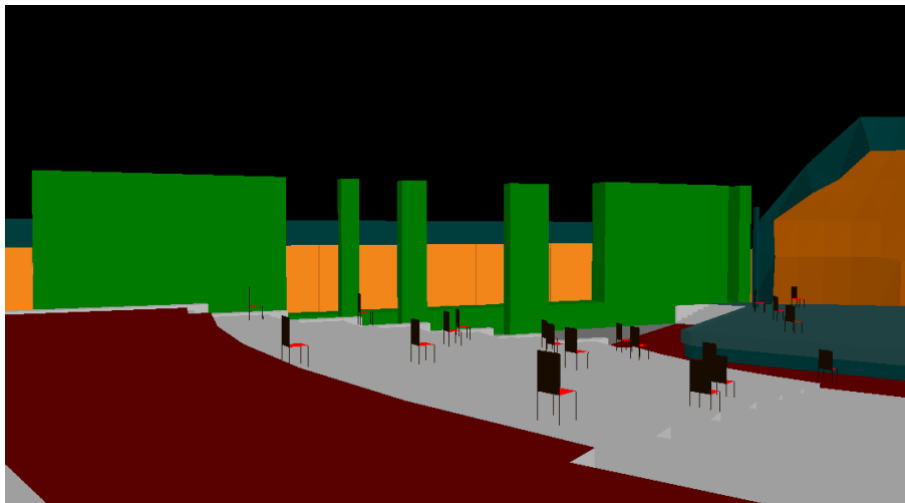


Fig. 5.9. Conjunto de vegetación presente en el Auditorio El Torreón, generado en el modelo de tres dimensiones.

### 5.2.2. Simulación del aire libre

Por los requisitos de AURA era necesario cerrar el recinto e intentar aproximar el comportamiento de las superficies al aire libre. Para esto se tomó la decisión de crear un techo de una altura muy elevada, concretamente 100 m. Además, se dotó de un material con un coeficiente de absorción del 100% y de *scattering* 0% a las paredes del recinto que serían el aire libre. Esto no genera ninguna reflexión y por lo tanto simula que el sonido se disipa totalmente en estas superficies como ocurre con el aire libre.

En la [Fig. 5.7] se puede ver como el modelo cuenta con paredes laterales y un techo muy alto, estas superficies son las que tienen el material 100% absorbente.

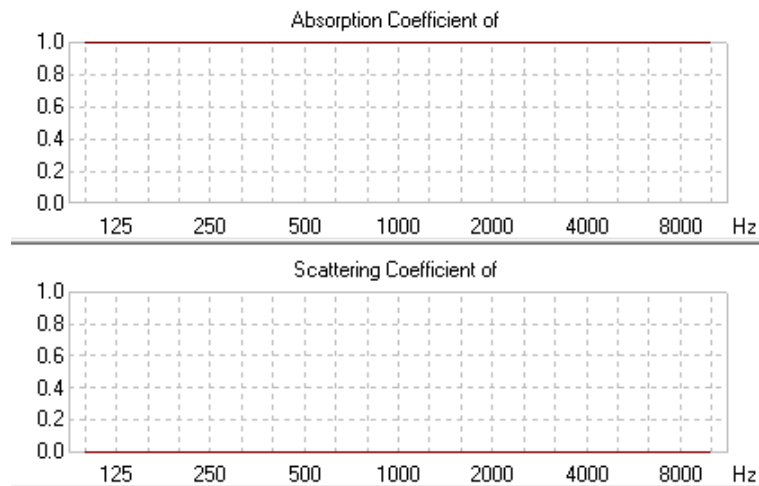


Fig. 5.10. Coeficientes de absorción y *scattering* del material utilizado para simular el aire libre.

### 5.2.3. Aproximación de la curvatura de la concha acústica

El software tiene una limitación muy importante, no permite la representación de elementos curvos. Este tipo de elementos, como por ejemplo la concha acústica del auditorio, se deben aproximar mediante un conjunto de superficies planas.

Para introducir la concha en el diseño se optó por agrupar las diferentes lamas de madera en superficies más grandes para simplificar y facilitar el modelo.



Fig. 5.11. Concha acústica del auditorio vista desde el frente del escenario.

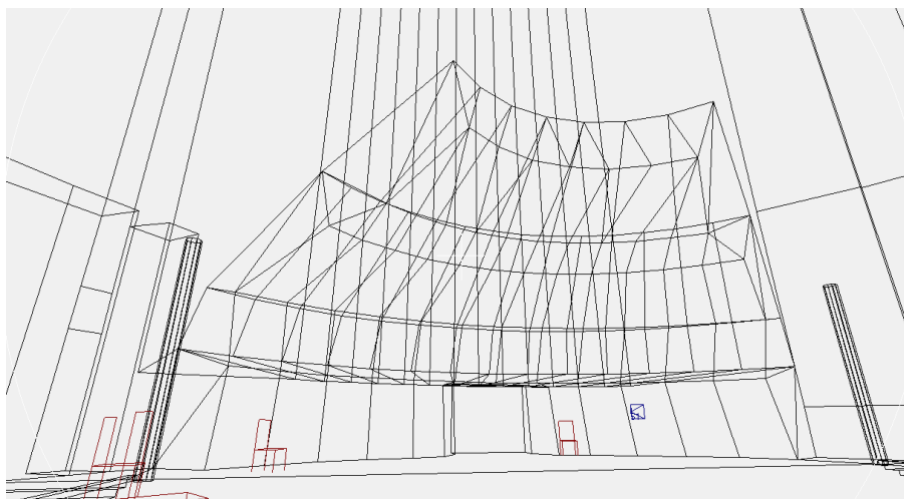


Fig. 5.12. Concha acústica del auditorio generada en el modelo y vista desde el punto de medida 86.

En la [Fig. 5.11] se pueden apreciar cuatro marcas de separación. Estas cuatro separaciones se tomaron como referencia para tomar las superficies de la concha. Para el tramo de arco desde el suelo hasta la línea de separación 1, se tomaron 10 superficies, sin contar con la puerta y sus laterales. Para el arco entre las separaciones 1 y 2, se tomaron 12 superficies. Entre las separaciones 2 y 3, otras 12 superficies. Para el arco entre las separaciones 3 y 4, 14 superficies. Y el último arco entre la separación 4 y el final de la concha, consta de 12 superficies. La parte de la puerta, con sus laterales, está formada por 7 caras. Esto hace que la parte de madera de la concha cuente en el modelo con un total de 67 caras. Esta solución es tan solo una aproximación a la realidad.

#### 5.2.4. Simplificaciones y estimaciones en el torreón

Una parte característica del auditorio es el torreón situado al final del recinto. En los planos iniciales solo se contaba con la planta de este elemento, faltaban datos importantes como la altura o la estructura de la cúpula superior. En los diversos desplazamientos al recinto no fue posible acceder al interior de dicho torreón para realizar medidas, por lo tanto, para el modelo se tuvo que estimar la altura y la forma de la cúpula. Debido a que la influencia de este elemento en las zonas de audiencia no parecía muy grande, no se entró en más detalle.

#### 5.2.5. Elección de los materiales iniciales

Cada superficie debe tener un material asociado para poder realizar los diferentes cálculos. Por defecto, todas las superficies cuentan con un material 100% absorbente. Durante la realización del modelo se eligieron los materiales de la base de datos del programa. Muchas de estas selecciones fueron evidentemente aproximadas ya que no se contaba con las características específicas de cada material presente en el recinto. Por ejemplo, en la base de datos del software, existen más de 10 tipos de maderas y se eligió la primera de ellas para la concha.

De esta suposición surge la necesidad de realizar un ajuste del modelo descrito anteriormente. Se trata de un proceso iterativo muy largo en el que hay que ir

seleccionando diferentes materiales o incluso cambiando características de absorción o *scattering* para algún material concreto en unas frecuencias concretas, hasta que los resultados simulados en EASE sean los más parecidos posible a los obtenidos en el recinto.

## **6. MEDIDAS REALIZADAS EN EL RECINTO**

Como se ha adelantado anteriormente, es necesario obtener unas mediciones reales del recinto para poder reproducir la situación en EASE y mediante la modificación de los materiales, calibrar o ajustar el modelo.

Se decidió realizar varias medidas del nivel sonoro presente en el auditorio excitándolo con una señal de ruido rosa, mediante una fuente omnidireccional situada en el centro del escenario.

Todas las medidas se realizaron el día 20 de noviembre de 2017 en el Auditorio El Torreón, situado en la localidad madrileña de Pozuelo de Alarcón.

Como trabajo previo a este día, se realizó un análisis conjunto del modelo del recinto creado en EASE y las características del auditorio observadas en las visitas realizadas en los meses previos. Mediante este análisis se obtuvieron una serie de condiciones y limitaciones a tener en cuenta.

El primer factor limitante fue el tiempo disponible que tendríamos en el recinto para las medidas. Contábamos con el lapso de tiempo entre las nueve de la mañana y las dos y media del mediodía. Teniendo esto en cuenta, para realizar las medidas se seleccionaron un total de 81 puntos de medida distribuidos por todo el recinto. En las zonas de audiencia donde se sitúan los espectadores, la densidad de puntos es mayor para obtener más precisión a la hora de realizar el ajuste del modelo y la caracterización del nivel recibido en estas zonas. Además, la posición de fuente S1 se colocó en el centro del escenario.

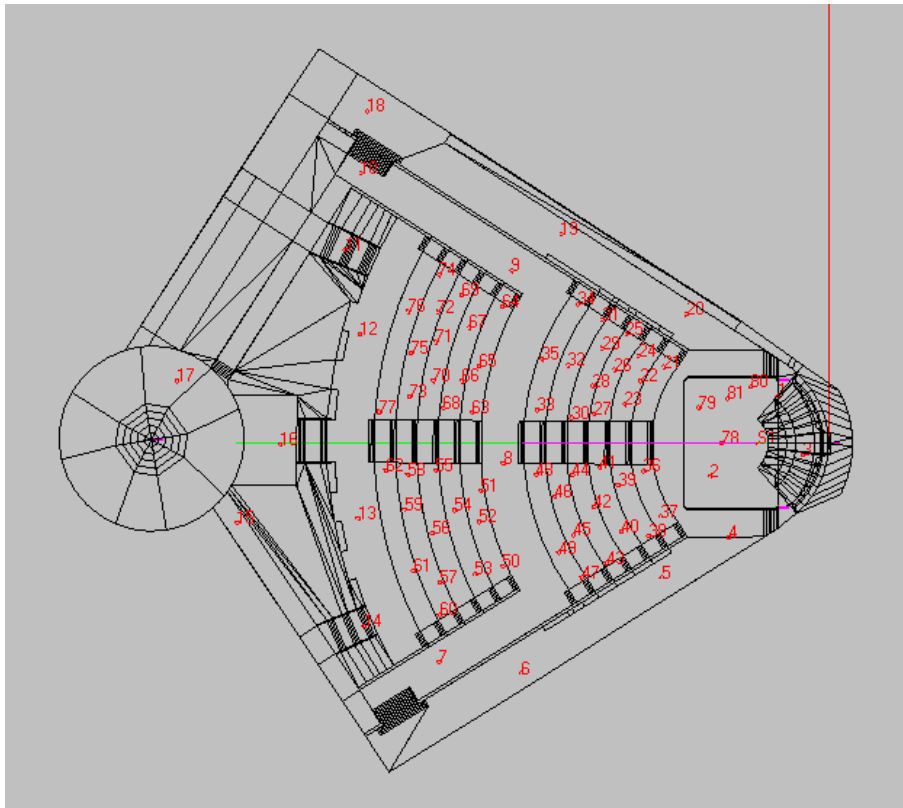


Fig. 6.1. Planta del recinto con la situación de los puntos de medida y la posición de la fuente.

Al ser un recinto al aire libre, también fue necesario contar con los posibles factores meteorológicos que podrían afectar durante la toma de medidas. Los días previos a la realización de las mismas se comprobó la evolución del tiempo para el día seleccionado. Era necesario comprobar que no hubiese una probabilidad considerable de precipitaciones y que además, no hubiese viento con una velocidad superior a 5 m/s. Bajo estas condiciones no se puede medir, ya que cambian las condiciones de propagación del sonido, como se ha visto en el [Capítulo 3] de esta memoria y los resultados no serían correctos. El factor de la temperatura se tuvo en cuenta para elegir la hora de inicio y fin de las medidas. Se tomó la decisión de comenzar alrededor de las once de la mañana y terminar a las dos y media de la tarde ya que en ese intervalo de tiempo la temperatura no tiene grandes fluctuaciones.

Además, se debía buscar un método para medir el ruido de fondo presente en el auditorio. Hubo que buscar una solución que obtuviese un muestreo lo suficientemente completo en espacio y tiempo, pero evitando elevar excesivamente el número de medidas debido al tiempo disponible para tomarlas. Se tomó la decisión de medir el ruido de fondo antes de las medidas, tres veces entre medidas parando la fuente, y una última vez después de todas las medidas. Para realizar estas cinco series de medidas se eligieron cinco puntos, concretamente fueron el 8, 26, 42, 56 y 71. El 8 en el centro del recinto, el 26 en el área de audiencia B, el 42 en el área de audiencia A, el 56 en el área de audiencia C y, por

último, el 71 en el área de audiencia D. A continuación, se muestra la posición en el plano de estos puntos.

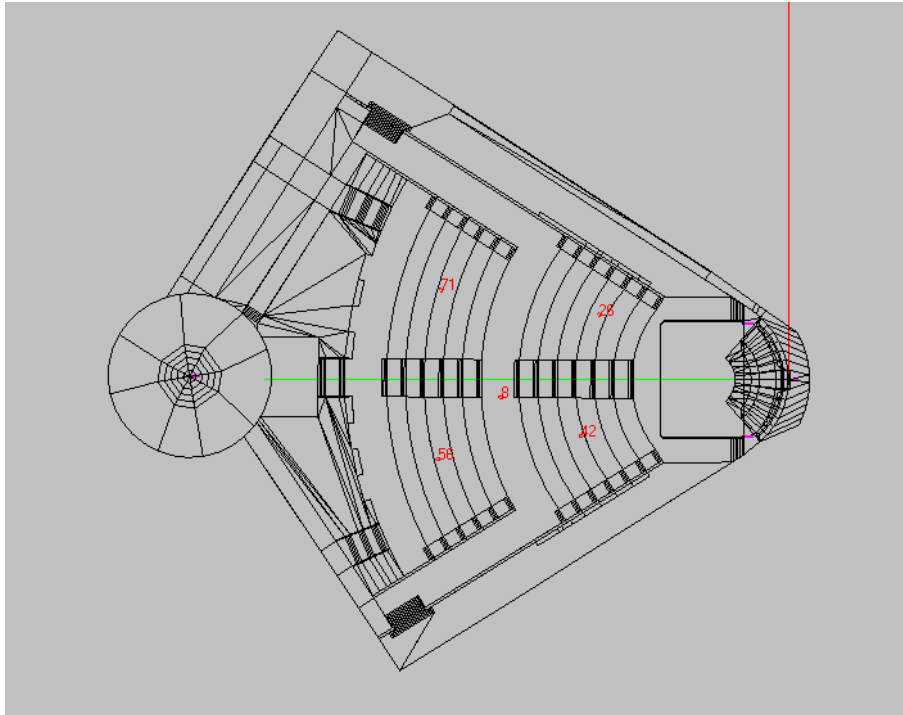


Fig. 6.2. Planta del recinto con las posiciones de medida del ruido de fondo.

Después de realizar este plan de medida se tomó la decisión de realizar las medidas con dos analizadores sonoros para poder paralelizar el proceso y reducir el tiempo de la toma de medidas. Para distinguir los sonómetros se tomaron las dos últimas cifras del código identificativo del equipo en la universidad, siendo uno el 98 y otro el 99.

Una vez en el recinto se comenzó a montar y configurar los siguientes equipos:

- Generador de ruido RG16 de la marca FALM.
- Amplificador de potencia CA6 de la marca Crest Audio. Cuenta con dos fuentes de potencia dentro, con diferentes configuraciones posibles en función de la potencia necesaria.
- Fuente dodecaédrica omnidireccional DO12 de Alava Ingenieros.



Fig. 6.3. Esquema de las conexiones de los equipos para las medidas in situ.

La salida del generador de señal conectada a la entrada A de la etapa mediante un cable Coaxial-Jack. La salida de la etapa de potencia A conectada a la fuente dodecaédrica mediante un cable de tipo speak-on. El centro de esta fuente se situó a 1,5 m del suelo y en el centro del escenario, tal y como se planeó anteriormente.



Fig. 6.4. Configuración de los equipos en el escenario.

Posteriormente se realizó una comprobación de calibración de los dos analizadores sonoros a utilizar. Para realizar esto se inserta el micrófono en un calibrador, como se muestra en la [Fig. 6.5].





Fig. 6.5. Comprobación de la calibración de un sonómetro.

Este calibrador genera un tono de 94 dB en la frecuencia de 1 kHz. Para el sonómetro 98 se obtuvo un valor de 93,4 dB y en el sonómetro 99, 93,6 dB.

Como se apreció, los dos sonómetros no daban el mismo valor, había una diferencia de calibración. Debido a que con esta primera prueba sólo se tenía la diferencia de nivel de los sonómetros para una sola frecuencia, se realizó una segunda prueba. Se procedió a montar los sonómetros en sus respectivos trípodes, se colocaron los micrófonos a una altura de 1,25 m sobre el suelo y se pusieron las pantallas antiviento en ambos equipos (accesorio necesario para las medidas al aire libre, atenúa entre 10 y 12 dB el efecto del viento hasta 5 m/s). A continuación, se situó el sonómetro 98 a 2 m de la fuente y se realizó una serie de tres medidas de 30 segundos con la fuente encendida. Se repitió el proceso para el otro sonómetro. Con esto se tiene la diferencia de ambos sonómetros en el espectro completo para poder realizar las correcciones correspondientes. A partir de este momento se tomó como referencia el analizador sonoro que daba el nivel más cercano a 94 dB (sonómetro 99).



Fig. 6.6. Colocación de los equipos para la comprobación de los sonómetros.

Llegados a este punto, según el plan inicial, se debía realizar la primera comprobación del ruido de fondo. De manera subjetiva se apreciaba que existían unas obras en las inmediaciones del recinto que generaban un ruido no constante y acompañado de fuertes golpes en ciertos momentos. Esto generaba un problema para tomar las medidas ya que se contaminaban las mismas y el ajuste del modelo y la caracterización no sería correcto. Ante esta situación se barajaron varias opciones.

Como primer paso se contactó con el personal de la obra para conocer cuánto duraría el ruido. La respuesta fue que sólo pararían de dos a tres de la tarde y las obras durarían al menos dos semanas.

Conocida esta información se sopesó cambiar la fecha de las medidas, pero por la incertidumbre de las condiciones meteorológicas, la incompatibilidad de horarios y otra serie de factores, se decidió buscar otra alternativa. Tras estudiar varias alternativas para poder estimar el efecto del ruido de la obra de la manera más realista, se hizo una pequeña comprobación. Se eligieron varios puntos para comprobar de manera subjetiva y con los sonómetros, la influencia del ruido de la obra. Con la fuente encendida, tan sólo en los puntos más alejados del escenario y a la vez lo más cercanos a la zona de obras había problemas de relación señal a ruido.

Teniendo en cuenta toda la información recogida, se tomó la decisión final de proceder con la medida de todos los puntos de la siguiente manera.

- Medidas de los puntos del escenario y los puntos situados en los tres primeros escalones de las áreas de audiencia A y B.
- Comprobación de las diferencias de los sonómetros a 2 m de la fuente, como al principio.
- Dos medidas de ruido de fondo, una en cada área de audiencia A (punto 42) y B (punto 32).
- Medidas de los puntos en el resto de escalones de las áreas de audiencia A y B.
- Comprobación de las diferencias de los sonómetros a 2 m de la fuente.
- Medidas de ruido de fondo en los puntos 32, 40, 67, 80.

En este momento cesaron las actividades en la obra y, por lo tanto, se procedió a realizar las medidas en los puntos en los que la influencia de la obra era mayor y no se pudieron medir antes.

- Medidas en los puntos de la zona de audiencia C, pasillos laterales y parte del torreón.
- Comprobación de las diferencias de los sonómetros a 2 m de la fuente.
- Medidas del ruido de fondo en los cinco puntos seleccionados en un principio, tal y como se muestra en la [Fig. 7.2]. Posteriormente estos datos se usarían para configurar el ruido de fondo en EASE.
- Comprobación de la calibración de ambos sonómetros con el comprobador de calibración, obteniendo valores de 93,6 dB y 93,7 dB. Estos valores son ligeramente mayores a los comprobados antes de comenzar a medir debido al aumento de la temperatura con el paso de la mañana.

Realizadas todas estas medidas, se contaba con la información necesaria para poder comenzar con la calibración del modelo, a excepción del dato del nivel de la fuente necesario para introducirlo en el software.

Para la simulación en EASE es necesario configurar una fuente con las mismas características y en la misma posición y altura que en las medidas realizadas en el recinto. Para esto, se realizó una sencilla medida en la cámara anecoica de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid. A continuación, se describe la configuración y desarrollo de la misma.

Se realizó el mismo montaje que en el escenario del auditorio (generador de señal, etapa de potencia y fuente dodecaédrica) dentro de la cámara anecoica, la mejor aproximación de campo libre. Esta vez el sonómetro se situó a 1,75 m de la fuente. Como detalle importante y para evitar que la etapa de potencia reflejase el sonido y se perdiesen las características de campo libre que posee la cámara, se colocó material absorbente cubriendo dicha etapa. En la siguiente imagen se aprecia la colocación de los equipos.



Fig. 6.7. Comprobación del nivel de la fuente dodecaédrica en campo libre.

Para comenzar se realizó una comprobación de la calibración del sonómetro, obteniendo un resultado de 93,6 dB. A continuación, se configuró el sonómetro para realizar una medida de cinco minutos de duración, se encendió la fuente al mismo nivel que el utilizado en las medidas del auditorio y se cerró la cámara. En este caso se utiliza un tiempo de medida mayor para que la fuente y la etapa de potencia alcancen la temperatura óptima. Una vez realizada la medida se realizó una última comprobación de la calibración y se obtuvo de nuevo un valor de 93,6 dB.

Una vez realizada esta medida, se procesaron los datos y se realizó un pequeño cálculo, teniendo en cuenta la ley de divergencia esférica para corregir las medidas por distancia y obtener el nivel de la fuente a 1 m, dato necesario para el software EASE, y que puede apreciarse en la [Tabla 6.1].

<b>Frecuencia</b>	<b>SPL (1 m)</b>
<b>100 Hz</b>	95,74 dB
<b>125 Hz</b>	98,74 dB
<b>165 Hz</b>	101,07 dB
<b>200 Hz</b>	101,09 dB
<b>250 Hz</b>	100,64 dB
<b>315 Hz</b>	98,94 dB
<b>400 Hz</b>	97,65 dB
<b>500 Hz</b>	95,88 dB
<b>630 Hz</b>	95,09 dB
<b>800 Hz</b>	93,03 dB
<b>1000 Hz</b>	89,81 dB
<b>1250 Hz</b>	88,2 dB
<b>1600 Hz</b>	93,72 dB
<b>2000 Hz</b>	93,56 dB
<b>2500 Hz</b>	94,38 dB
<b>3150 Hz</b>	89,39 dB
<b>4000 Hz</b>	86,85 dB
<b>5000 Hz</b>	85,26 dB
<b>6300 Hz</b>	84,14 dB
<b>8000 Hz</b>	77,5 dB
<b>10000 Hz</b>	68,69 dB

Tabla 6.1. Valores del SPL a 1 m introducidos en EASE.

## 7. AJUSTE DEL MODELO EN EASE

### 7.1. Revisión y preparación de las medidas

Con todas las medidas disponibles, había que realizar una serie de cálculos y comprobaciones para comenzar a realizar el ajuste. Era necesario referenciar todas las medidas al sonómetro tomado como referencia y comprobar que ninguna de las medidas se tuviese que descartar por afectar el ruido de fondo. Además, fueron necesarios una serie de cálculos de valores para introducir en EASE, un valor promedio del ruido de fondo y las condiciones meteorológicas, necesarias para el cálculo del tiempo de reverberación.

#### 7.1.1. Corrección de la diferencia de nivel obtenida por los sonómetros

Debido a que los dos sonómetros daban unos niveles diferentes por diferencias de calibración, era necesario corregir todas las medidas tomadas con el sonómetro no elegido como referencia (sonómetro 98). Para hacer esto se realizaron varias series de medidas a la misma distancia de la fuente para comparar sus espectros y realizar las correcciones correspondientes.



Fig. 7.1. Comparación de los espectros de los dos sonómetros en diferentes momentos de la mañana de medidas. En azul, el sonómetro referencia (99). En naranja, el segundo sonómetro (98).

Para realizar la corrección de todas las medidas del segundo sonómetro (98), se utilizó un criterio temporal, ya que la diferencia entre ambos sonómetros variaba a lo largo de la mañana. Esto quiere decir que las medidas obtenidas en el lapso de tiempo más cercano a la primera comprobación de los espectros, se corregían con esa primera diferencia, las siguientes con la diferencia de la segunda comprobación y así con todas las demás. Para aclarar estas correcciones se incluye un diagrama a continuación.

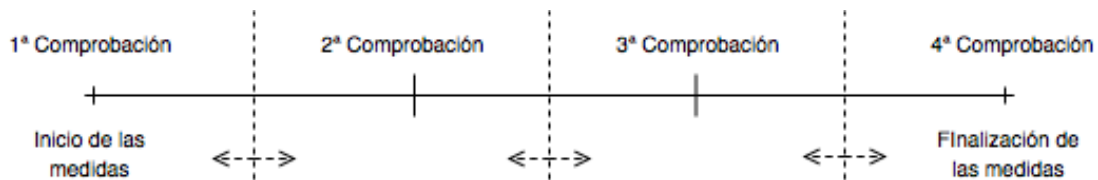


Fig. 7.2. Diagrama explicativo del proceso de corrección de las medidas por diferencia de sonómetros.

### 7.1.2. Comprobación de la diferencia de las medidas y el ruido de fondo

Una vez referenciadas todas las medidas se comprobó una por una si afectaba el ruido de fondo. Esto se hizo comparando cada medida con la medida de ruido de fondo disponible más cerca en tiempo y espacio. En el caso de que la diferencia entre la medida y el valor del ruido de fondo sea mayor de 10 dB, la medida no se debe corregir por ruido de fondo. Si la diferencia se encuentra entre 3 y 10 dB, se aplica la corrección por ruido de fondo mediante la [Ecuación (7.1)]. Por último, en el caso de que la diferencia entre el ruido de fondo y la medida sea menor de 3 dB, tampoco se corrige porque no se sabe si el modelo matemático es adecuado, en este momento la medida pasa a ser una cota.

$$L_{\text{Corr}} = 10 \log(10^{0,1L_{\text{meas}}} - 10^{0,1L_{\text{RF}}}) \quad (7.1)$$

Donde:

$L_{\text{meas}}$  es el valor de la medida.

$L_{\text{RF}}$  es el valor del nivel de ruido de fondo.

Tras el estudio de todas las medidas se comprobó que tan sólo había que realizar pequeñas correcciones por ruido de fondo en 5 puntos y en frecuencias altas. La corrección no cambiaba el valor en más de 1 dB. Con la excepción del punto 17, el más alejado del escenario, en el que el ruido de fondo enmascaraba el ruido producido por la fuente. Dada la poca importancia para el ajuste de este punto, se decidió obviarlo.

### 7.1.3. Comprobación de las componentes impulsivas

Como se ha comentado en el [Capítulo 6] en el momento de las medidas había una obra en una parcela colindante. Se producían ruidos impulsivos provocados por los golpes de las máquinas y el movimiento de escombros. Para comprobar que ninguna de las medidas se veía afectada por este tipo de ruidos, se hizo una comprobación de componentes impulsivas, descrita en el RD1367/2007. La siguiente resta no debía dar un resultado mayor de 10 dB.

$$L_{\text{A}_{\text{Ieq}}} - L_{\text{A}_{\text{eq}}} \quad (7.2)$$

Siendo  $L_{\text{A}_{\text{Ieq}}}$  el nivel continuo equivalente con la constante de tiempo impulsiva configurada en el detector del analizador sonoro. Durante las medidas se configuró el equipo para que se calculase este nivel.

Tras la comprobación se confirmó que ninguna de las medidas tenía componentes impulsivas, por lo tanto, no era necesaria ninguna corrección.

#### 7.1.4. Obtención del valor de ruido de fondo para introducir en EASE

Para obtener este valor se realizó un sencillo promedio de todas las medidas obtenidas al final de la mañana, en los puntos 8, 26, 42, 56 y 71.

	Noise Level [dB]
100 Hz	44.73
125 Hz	41.86
160 Hz	40.76
200 Hz	40.96
250 Hz	40.06
315 Hz	36.03
400 Hz	34.97
500 Hz	34.38
630 Hz	34.80
800 Hz	31.34
1000 Hz	30.97
1250 Hz	30.65
1600 Hz	27.27
2000 Hz	25.92
2500 Hz	23.28
3150 Hz	21.92
4000 Hz	17.23
5000 Hz	15.27
6300 Hz	13.09
8000 Hz	15.81
10000 Hz	11.25

Fig. 7.3. Valores del ruido de fondo en el recinto introducidos en EASE.

#### 7.1.5. Obtención de las condiciones meteorológicas para EASE

Ya que no se contaba con equipo específico para medir las condiciones meteorológicas de humedad y temperatura en cada momento, se tomaron los valores de AEMET (Agencia Española de Meteorología). Esta agencia cuenta con una estación en el municipio de Pozuelo de Alarcón, de ahí se tomaron los datos correspondientes a las 3 horas que duraron las medidas.

Hora	Temperatura	Humedad
12:00	14,2 °C	40%
13:00	16 °C	36%
14:00	17,5 °C	33%

Tabla 7.1. Valores de las condiciones meteorológicas en Pozuelo de Alarcón en el momento de la realización de las medidas, obtenidos en <http://www.aemet.es/>.

Ya que EASE necesita un valor único para cada parámetro, se realizó un promedio, obteniendo 15,9 °C de temperatura media y un 36% de humedad media.



## 7.2. Elección del margen de aceptación de las medidas

Para elegir el margen en el que las medidas se darían por ajustadas, se debía tener en cuenta la incertidumbre introducida por dichas medidas, por la instrumentación, por EASE, etc. Se calculó la incertidumbre de las medidas obteniendo de media un valor de  $\pm 2$  dB para cada tercio de octava. No fue posible confirmar la incertidumbre introducida por el software, por lo tanto, se tomó la decisión de aproximar esta influencia. Por ello, se decidió aumentar el margen establecido por la incertidumbre calculada. Se tomarían como ajustadas todas las medidas simuladas que se encontrasen 3,5 dB por encima o por debajo de las medidas realizadas en el recinto.

## 7.3. Modificación de los materiales

Tras tener claro el margen de valores en los que los resultados se darían por buenos, se procedió a realizar simulaciones del SPL Total recibido en cada punto de medida. Para hacer coincidir los valores de la simulación con los valores de las medidas realizadas en el recinto, se fueron cambiando los distintos materiales. Se realizaron cambios del material de las superficies y se ajustaron los coeficientes de absorción y *scattering* de los mismos.

Sin duda, esta es la parte más tediosa y difícil de todo el proyecto. Entran en juego diferentes materiales en diferentes zonas y con diferentes características dependientes de la frecuencia. Las modificaciones de dichos materiales se realizaron de manera iterativa, realizando pequeños cambios manualmente y simulando de nuevo. Tras numerosas modificaciones y simulaciones se apreció un error sistemático en prácticamente la totalidad de los puntos y en el mismo rango de frecuencias. Había desviaciones de más del doble del margen de ajuste elegido. A pesar de todos los esfuerzos en la modificación de los materiales no se conseguía ajustar el modelo. La hipótesis que más sentido tenía estaba relacionada con una posible deficiencia en la directividad de la fuente omnidireccional. En el [Capítulo 8] se detallan una serie de comprobaciones realizadas para justificar esta situación y se llega a la conclusión de que el defecto en la fuente existía y no permitía un ajuste correcto con esta sistemática.

Una vez comprobada la anomalía de la directividad de la fuente, se configuró la fuente de EASE con los valores obtenidos en la [Tabla 8.1]. Se continuó con el proceso de ajuste de la misma forma, cambiando los materiales de las distintas superficies. El mejor resultado se obtuvo con 10 materiales diferentes cuyas características y distribución se muestran a continuación.

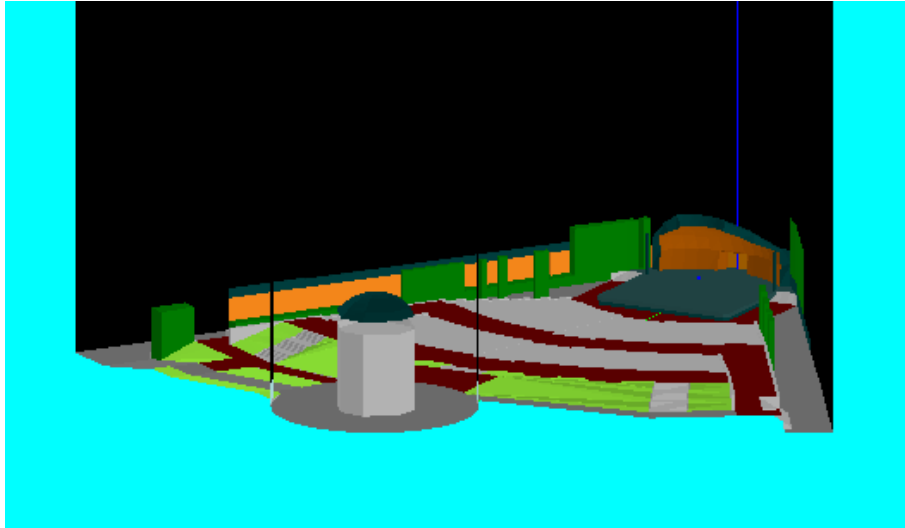


Fig. 7.4. Distribución de los distintos materiales en el recinto, visto desde la parte trasera.

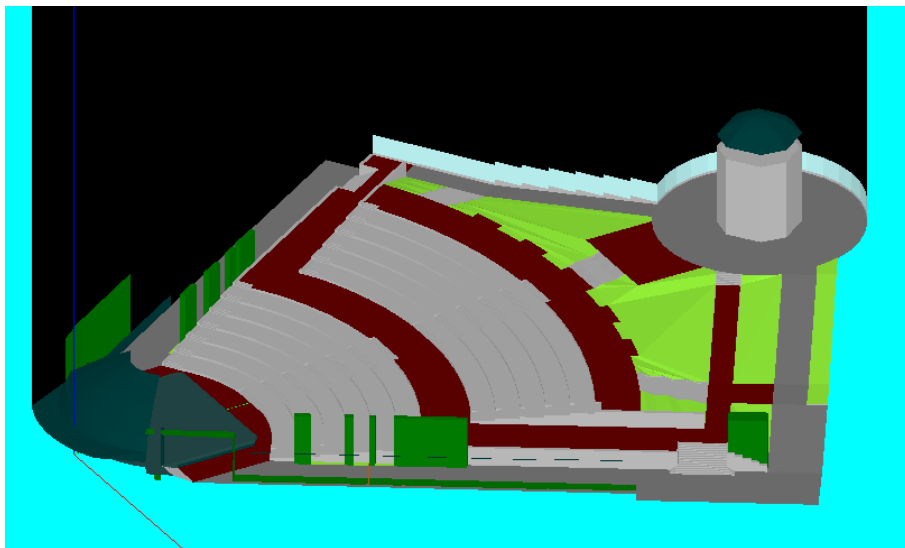


Fig. 7.5. Distribución de los distintos materiales en el recinto, visto desde la parte delantera.

El color gris claro corresponde al material “concretes”. Se trata de hormigón liso.

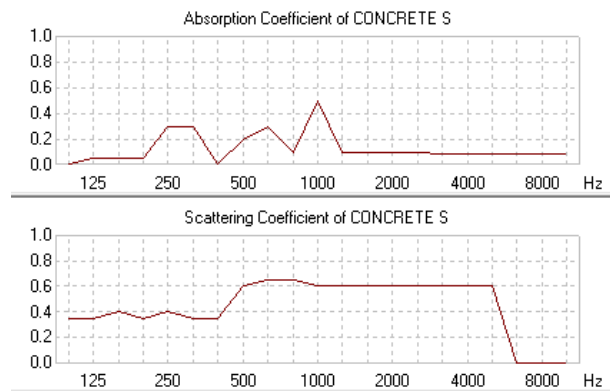


Fig. 7.6. Coeficientes de absorción y *scattering* del material "concretes".

El color marrón oscuro corresponde al material “concreter”. Es un hormigón rugoso con unos coeficientes algo diferentes a los del hormigón liso.

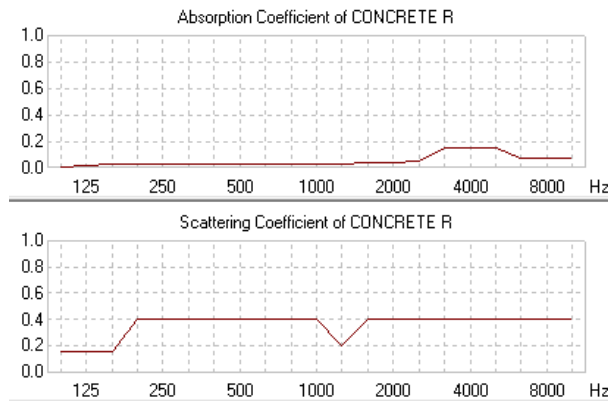


Fig. 7.7. Coeficientes de absorción y *scattering* del material "concreter".

El color gris oscuro corresponde al material “BrickFloor”. Utilizado para modelar el suelo enladrillado.

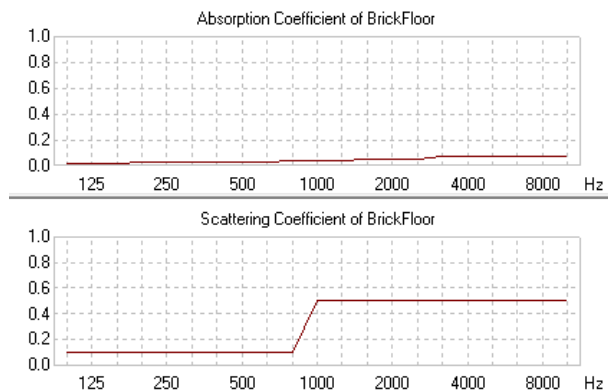


Fig. 7.8. Coeficientes de absorción y *scattering* del material "BrickFloor".

El color marrón claro corresponde al material “WOOF LR HWD“. Modela la madera del interior de la concha acústica del escenario.

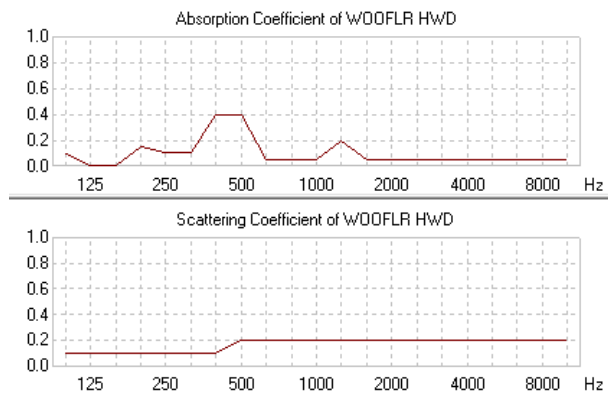


Fig. 7.9. Coeficientes de absorción y *scattering* del material "WOOF LR HWD".

El color verde claro corresponde al material “*TREES*”. Simula el comportamiento de la vegetación.

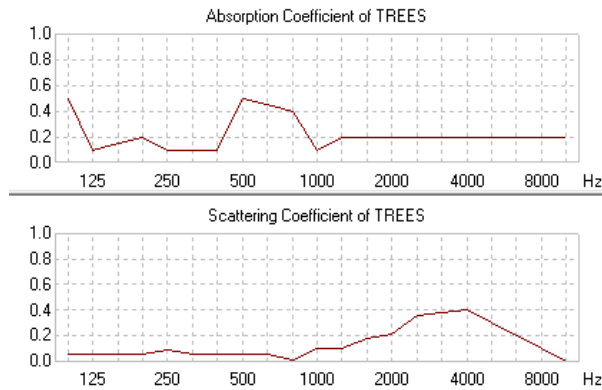


Fig. 7.10. Coeficientes de absorción y *scattering* del material "TREES".

El color verde pistacho corresponde al material “*GRASS*”. Simula la presencia de césped en las partes traseras del auditorio.

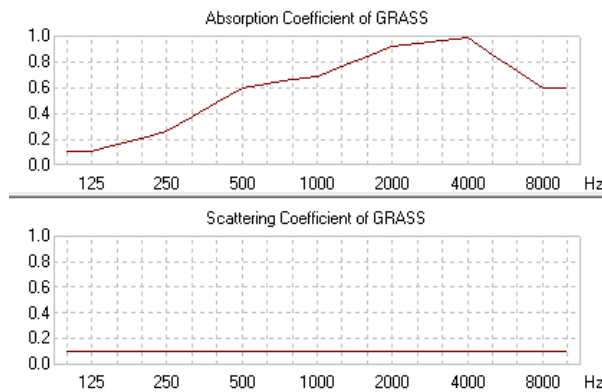


Fig. 7.11. Coeficientes de absorción y *scattering* del material "GRASS".

Al suelo del escenario, verde oscuro, se le asignó un material propio “*Suelo\_Escenario*”.

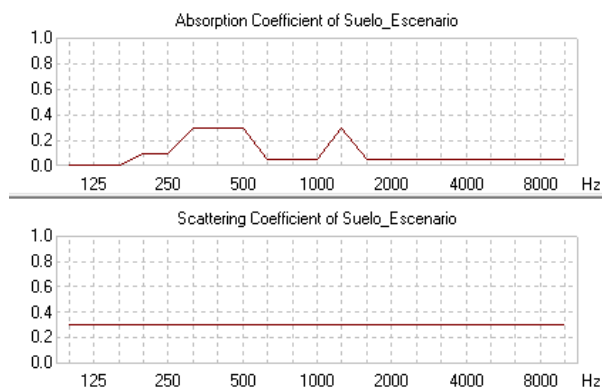


Fig. 7.12. Coeficientes de absorción y *scattering* del material "Suelo\_Escenario".

Las partes de verde oscuro que no son el suelo del escenario, son de metal y se les asignó el material “*STEEL*”.

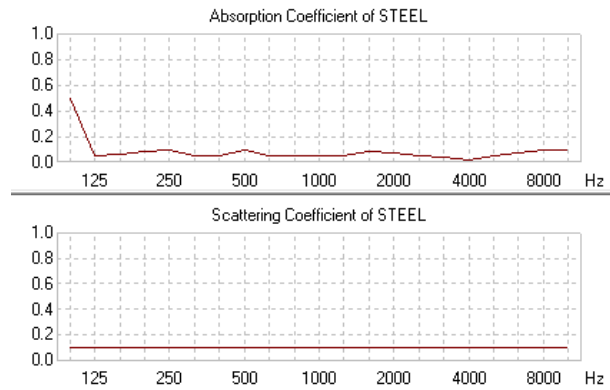


Fig. 7.13. Coeficientes de absorción y *scattering* del material "STEEL".

La parte naranja tiene asignada el material “LADRILLOS”. Este material modela el comportamiento de la pared de ladrillos del polideportivo aledaño.

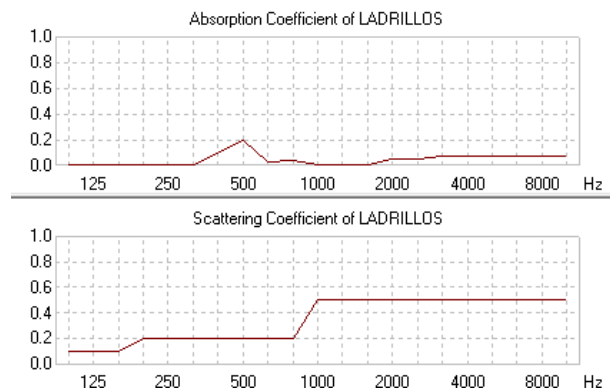


Fig. 7.14. Coeficientes de absorción y *scattering* del material "LADRILLOS".

Por último, la parte de color azul claro cuenta con el material “*GLS/WL 2*”. Este material modela el comportamiento del cristal de las barreras acústicas colocadas al final del recinto.

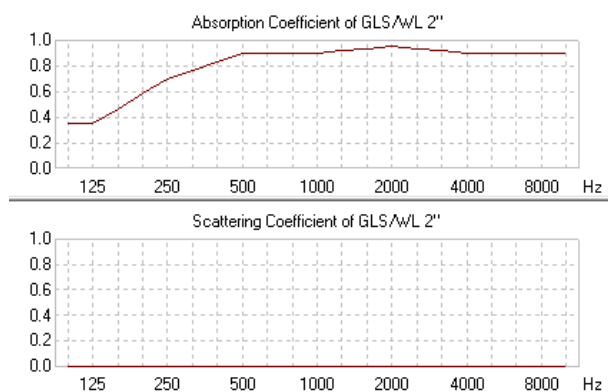


Fig. 7.15. Coeficientes de absorción y *scattering* del material "GLS/WL 2".

#### 7.4. Resultados del ajuste

A continuación, se muestran los resultados del ajuste obtenidos mediante la simulación en EASE. Están organizados en 6 tablas diferentes, una para el escenario, 4 para las zonas de audiencia y una última con el resto de puntos de medida. Las filas azules contienen los resultados obtenidos in situ, las naranjas los valores simulados en EASE y la fila gris muestra la diferencia entre ambas. En verde se muestran los tercios de octava que quedan dentro del margen establecido ( $\pm 3,5$  dB) y en rojo los tercios de octava de cada punto que se salen del margen.

	100Hz	125Hz	165Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz	5000Hz	6300Hz	8000Hz	10000Hz
<b>1 in situ</b>	78,67	86,59	90,52	89,27	89,76	86,17	86,92	83,16	82,81	83,35	81,19	76,29	81,74	80,32	80,62	78,69	74,47	73,17	71,93	63,86	53,23
<b>1 EASE</b>	82,9	86,06	88,27	87,11	85,01	83,05	82,79	80,92	81,81	80,24	77,77	76,83	82,07	78,02	76,51	75,22	73,25	73,57	70,43	62,37	52,67
<b>1 Dif.</b>	-4,23	0,53	2,25	2,16	4,75	3,12	4,13	2,24	1	3,11	3,42	-0,54	-0,33	2,3	4,11	3,47	1,22	-0,4	1,5	1,49	0,56
<b>2 in situ</b>	79,77	86,42	89,18	87,38	84,55	81,64	77,47	77,69	83,85	81,71	77,41	77,99	83,78	75,87	74,37	76,13	72,56	75,21	71,46	65,92	56,4
<b>2 EASE</b>	80,96	83,99	86,16	85,32	82,94	81,16	81,56	79,46	79,58	78,05	75,45	75,02	79,84	75,8	74,27	72,97	70,97	71,23	68,3	60,1	50,31
<b>2 Dif.</b>	-1,19	2,43	3,02	2,06	1,61	0,48	-4,09	-1,77	4,27	3,66	1,96	2,97	3,94	0,07	0,1	3,16	1,59	3,98	3,16	5,82	6,09
<b>3 in situ</b>	78,67	86,59	90,52	89,27	89,76	86,17	86,92	83,16	82,81	83,35	81,19	76,29	81,74	80,32	80,62	78,69	74,47	73,17	71,93	63,86	53,23
<b>3 EASE</b>	85,61	88,65	90,79	89,52	87,27	85,39	84,97	83,13	84,1	82,53	79,92	79,07	84,35	80,33	78,78	77,48	75,5	75,85	72,8	64,75	55,08
<b>3 Dif.</b>	-6,94	-2,06	-0,27	-0,25	2,49	0,78	1,95	0,03	-1,29	0,82	1,27	-2,78	-2,61	-0,01	1,84	1,21	-1,03	-2,68	-0,87	-0,89	-1,85
<b>78 in situ</b>	81,14	84,8	87,02	86,46	83,91	80,64	75,26	73,99	79,18	81,15	76,81	71,91	83,29	78,02	75,89	75,52	72,56	71,7	72,53	64,74	55,73
<b>78 EASE</b>	80,19	83,32	85,5	84,61	82,41	80,52	80,87	78,92	79,13	77,58	75,18	74,56	79,49	75,44	73,93	72,64	70,66	70,97	67,88	59,82	50,19
<b>78 Dif.</b>	0,95	1,48	1,52	1,85	1,5	0,12	-5,61	-4,93	0,05	3,57	1,63	-2,65	3,8	2,58	1,96	2,88	1,9	0,73	4,65	4,92	5,54
<b>78 in situ</b>	80,28	85,6	87,5	85,69	82,04	80,06	74,63	77,5	81,89	81,43	75,48	71,99	79,52	76,98	77,74	78,01	73,58	72,13	70,98	62,49	50,63
<b>79 EASE</b>	80,59	83,6	85,77	84,95	82,67	80,84	81,29	79,26	79,31	77,78	75,29	74,81	79,62	75,58	74,05	72,76	70,79	71,13	68,19	60,16	50,56
<b>79 Dif.</b>	-0,31	2	1,73	0,74	-0,63	-0,78	-6,66	-1,76	2,58	3,65	0,19	-2,82	-0,1	1,4	3,69	5,25	2,79	1	2,79	2,33	0,07
<b>79 in situ</b>	83,99	88,49	89,83	89,66	86,89	88,66	84,46	83,12	85,66	83,94	81,09	78,46	81,92	80,36	81,27	77,52	75,3	73,09	69,88	63,38	51,94
<b>80 EASE</b>	85,75	88,8	91,01	89,71	87,56	85,38	85,26	83,33	84,18	82,6	80,07	79,02	84,38	80,33	78,76	77,46	75,47	75,8	72,74	64,71	55,14
<b>80 Dif.</b>	-1,76	-0,31	-1,18	-0,05	-0,67	3,28	-0,8	-0,21	1,48	1,34	1,02	-0,56	-2,46	0,03	2,51	0,06	-0,17	-2,71	-2,86	-1,33	-3,2
<b>80 in situ</b>	78,97	85,59	87,44	86,56	84,32	83,02	80,4	73,72	78,56	78,8	77,78	76,76	76,59	75,62	78,48	73,36	74,16	73,57	71,87	63,53	54,52
<b>81 EASE</b>	79,26	82,32	84,44	83,58	81,14	79,37	79,93	77,54	77,62	76,15	73,6	73,2	78,02	73,96	72,37	71,03	68,99	69,24	66,4	58,11	48,21
<b>81 Dif.</b>	-0,29	3,27	3	2,98	3,18	3,65	0,47	-3,82	0,94	2,65	4,18	3,56	-1,43	1,66	6,11	2,33	5,17	4,33	5,47	5,42	6,31

Tabla 7.2. Resultados del ajuste para los puntos situados en el escenario.

En el escenario, tan sólo el punto 80 quedó ajustado en todas sus frecuencias. Las desviaciones en el resto de puntos puede que seguramente fueran provocadas por la aproximación realizada a la hora de introducir la concha acústica en el modelo, tal y como se explica en el [Apartado 5.2.3] y por el efecto de la directividad de la fuente detallado en el [Capítulo 8]. Debido a esto último, en las altas frecuencias, ajustar los puntos 1, 3, 79 y 80, provocaba un desajuste en los puntos 2, 78 y 81, como se aprecia en la [Tabla 7.2].

	100Hz	125Hz	165Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz	5000Hz	6300Hz	8000Hz	10000Hz
36 in situ	72,1	77,9	76,06	78,78	76,95	77,48	77,19	71,94	74,23	70,44	67,43	66,42	69,5	67,07	65,41	65,29	60,38	63,69	57,96	49,99	42,44
36 EASE	76,22	79,53	81,47	80,65	77,59	76,15	77,31	73,91	73,47	72,35	69,33	69,89	74,32	70,24	68,48	66,99	64,71	64,66	62,15	53,07	42,05
36 Dif.	-4,12	-1,63	-5,41	-1,87	-0,64	1,33	-0,12	-1,97	0,76	-1,91	-1,9	-3,47	-4,82	-3,17	-3,07	-1,7	-4,33	-0,97	-4,19	-3,08	0,39
37 in situ	74,18	77,45	79,29	81,86	77,11	76,2	81,11	75,29	76,37	71,81	69,36	69,74	69,6	67,51	68,57	68,93	64,45	64,32	62,51	52,61	44,88
37 EASE	74,66	78,11	80,14	79,42	76,59	75,13	76,19	73,05	72,66	71,46	68,53	68,92	73,38	69,28	67,62	66,2	63,98	63,92	61,08	52,18	41,41
37 Dif.	-0,48	-0,66	-0,85	2,44	0,52	1,07	4,92	2,24	3,71	0,35	0,83	0,82	-3,78	-1,77	0,95	2,73	0,47	0,4	1,43	0,43	3,47
38 in situ	73,37	77,03	77,34	78,47	77,98	77,57	77,22	74,36	76,28	70,47	67,64	70,39	74,58	71,71	73,89	67,39	68,84	66,28	62,74	53,65	44,18
38 EASE	73,23	76,87	78,92	78,04	75,41	73,88	74,72	71,82	71,57	70,38	67,61	67,89	72,36	68,23	66,57	65,1	62,84	62,74	59,16	50,13	39,21
38 Dif.	0,14	0,16	-1,58	0,43	2,57	3,69	2,5	2,54	4,71	0,09	0,03	2,5	2,22	3,48	7,32	2,29	6	3,54	3,58	3,52	4,97
39 in situ	71,82	81,01	81,32	81,79	76,67	73,42	76,78	72,54	74,78	69,71	67,3	70,27	72,84	69,92	69,07	65,48	65,97	65,4	61,8	53,59	40,2
39 EASE	73,84	77,63	79,65	78,67	75,95	74,48	75,35	72,14	71,82	70,76	67,87	68,35	72,66	68,52	66,67	65,15	62,78	62,64	59,1	49,82	38,53
39 Dif.	-2,02	3,38	1,67	3,12	0,72	-1,06	1,43	0,4	2,96	-1,05	-0,57	1,92	0,18	1,4	2,4	0,33	3,19	2,76	2,7	3,77	1,67
40 in situ	71,29	77,69	76,92	79,9	74,42	71,55	76,36	70,96	72,17	67,49	66,24	67,05	71,85	68,13	67,45	62,96	63,93	63,08	60,21	51,93	38,72
40 EASE	72,72	76,55	78,58	77,73	75,13	73,66	74,53	71,3	70,97	69,84	67,15	67,43	71,78	67,63	65,81	64,28	61,95	61,78	58,23	48,96	37,65
40 Dif.	-1,43	1,14	-1,66	2,17	-0,71	-2,11	1,83	-0,34	1,2	-2,35	-0,91	-0,38	0,07	0,5	1,64	-1,32	1,98	1,3	1,98	2,97	1,07
41 in situ	74,02	79,47	78,85	79,42	76,04	71,05	76,56	70,61	74,07	71,66	67,35	68,25	71,09	67,95	65,28	63,37	62,06	61,49	58,81	50,85	37,69
41 EASE	74,65	78,16	80,08	79,05	76,16	74,72	75,51	72,16	71,95	70,82	67,91	68,35	72,81	68,7	66,83	65,28	62,81	62,58	59,43	49,93	38,29
41 Dif.	-0,63	1,31	-1,23	0,37	-0,12	-3,67	1,05	-1,55	2,12	0,84	-0,56	-0,1	-1,72	-0,75	-1,55	-1,91	-0,75	-1,09	-0,62	0,92	-0,6
42 in situ	74,25	80,64	76,23	75,7	73,98	72,5	75,67	70,97	72,03	68,07	66,16	69,09	72,23	68,09	65,31	64,67	63,79	63,53	57,62	50,58	37,77
42 EASE	72,43	76,29	78,28	77,37	74,81	73,28	74,05	70,87	70,65	69,48	66,76	66,89	71,31	67,13	65,24	63,69	61,24	60,99	57,32	47,83	36,21
42 Dif.	1,82	4,35	-2,05	-1,67	-0,83	-0,78	1,62	0,1	1,38	-1,41	-0,6	2,2	0,92	0,96	0,07	0,98	2,55	2,54	0,3	2,75	1,56
43 in situ	69,29	75,82	77,8	77,69	71,98	72,41	74,54	67,93	71,75	64,45	64,05	65,65	67,91	64,2	60,78	59,94	58,19	57,75	54,8	45,98	34,85
43 EASE	70,53	74,26	76,31	75,28	72,72	71,1	71,79	69,06	68,88	67,67	64,84	65,06	69,52	65,36	63,61	62,09	59,69	59,39	55,3	45,86	34,31
43 Dif.	-1,24	1,56	1,49	2,41	-0,74	1,31	2,75	-1,13	2,87	-3,22	-0,79	0,59	-1,61	-1,16	-2,83	-2,15	-1,5	-1,64	-0,5	0,12	0,54
44 in situ	72,14	74,54	79,5	80,34	71,63	72,56	76,23	67,31	71,49	67,84	66,52	67,84	69,29	65,25	63,08	61,74	59,58	59,66	55,55	49,2	36,46
44 EASE	72,76	76,37	78,3	77,22	74,41	72,93	73,75	70,6	70,35	69,22	66,24	66,76	71,17	67,02	65,17	63,53	61,03	60,67	56,91	47,2	35,29
44 Dif.	-0,62	-1,83	1,2	3,12	-2,78	-0,37	2,48	-3,29	1,14	-1,38	0,28	1,08	-1,88	-1,77	-2,09	-1,79	-1,45	-1,01	-1,36	2	1,17
45 in situ	71,03	76,82	76,32	76,13	70,78	70,39	74,5	67,92	70,3	64,63	63,63	67,64	70,31	65,94	63,75	63,32	61,46	61,28	55,62	46,73	33,97
45 EASE	70,75	74,62	76,64	75,69	73,03	71,6	72,4	69,12	68,89	67,78	64,94	65,27	69,62	65,46	63,55	61,95	59,42	59,08	55,21	45,51	33,6
45 Dif.	0,28	2,2	-0,32	0,44	-2,25	-1,21	2,1	-1,2	1,41	-3,15	-1,31	2,37	0,69	0,48	0,2	1,37	2,04	2,2	0,41	1,22	0,37
46 in situ	70,22	77,14	77,87	77,74	71,6	71,17	72,55	68,42	72,25	64,96	63,57	68,1	69,63	64,19	62,22	61,77	58,61	60,48	53,84	47,46	32,77
46 EASE	70,9	75,07	77,06	76,05	73,49	72,09	72,83	69,44	69,24	68,12	65,4	65,66	69,9	65,7	63,7	62,05	59,5	59,12	55,08	45,28	33,25
46 Dif.	-0,68	2,07	0,81	1,69	-1,89	-0,92	-0,28	-1,02	3,01	-3,16	-1,83	2,44	-0,27	-1,51	-1,48	-0,28	-0,89	1,36	-1,24	2,18	-0,48
47 in situ	69,57	76,6	76,25	73,7	70,27	69,21	74,9	67,98	68,16	64,64	64,05	66,96	68,51	63,44	60,32	61,87	56,28	59,02	51,8	44,74	32,99
47 EASE	69,41	73,28	75,37	74,42	72,19	70,55	71,03	68,29	68,16	66,85	64,52	64,35	68,72	64,48	62,59	61,04	58,57	58,28	54,11	44,64	33
47 Dif.	0,16	3,32	0,88	-0,72	-1,92	-1,34	3,87	-0,31	0	-2,21	-0,47	2,61	-0,21	-1,04	-2,27	0,83	-2,29	0,74	-2,31	0,1	-0,01
48 in situ	73,65	78,63	77,6	77,65	70,92	69,13	74,21	66,98	67,86	64,96	63,9	65,55	68,97	64,22	62,3	60,65	58,46	57,31	53,54	44,42	31,45
48 EASE	71,96	75,47	77,38	76,26	73,44	71,97	72,61	69,53	69,43	68,17	65,19	65,49	69,99	65,89	63,97	62,28	59,69	59,2	55,42	45,38	32,99
48 Dif.	1,69	3,16	0,22	1,39	-2,52	-2,84	1,6	-2,55	-1,57	-3,21	-1,29	0,06	-1,02	-1,67	-1,67	-1,63	-1,23	-1,89	-1,88	-0,96	-1,54
49 in situ	69,64	75,55	74,63	75,38	70,42	69,17	73,62	65,9	69,2	62,86	63,24	67,54	69,54	64,14	64,28	63,33	59,31	59,38	54,28	46,44	31,93
49 EASE	69,12	72,59	74,59	73,55	70,78	69,18	69,96	67,01	66,97	65,79	62,74	62,96	67,59	63,44	61,64	60,03	57,5	56,99	53,03	43,11	30,99
49 Dif.	0,52	2,96	0,04	1,83	-0,36	-0,01	3,66	-1,11	2,23	-2,93	0,5	4,58	1,95	0,7	2,64	3,3	1,81	2,39	1,25	3,33	0,94

Tabla 7.3. Resultados del ajuste para los puntos situados en la zona de audiencia A.



	100Hz	125Hz	165Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz	5000Hz	6300Hz	8000Hz	10000Hz
21 in situ	73,65	74,92	80,18	79,31	78,16	78,74	79,49	75,29	73,03	73,77	67,92	67,77	71,57	67,08	69,07	67,31	65,33	63,82	64,88	56,51	46,05
21 EASE	74,58	78,07	80,1	79,37	76,6	75,13	76,16	72,98	72,61	71,42	68,62	68,94	73,4	69,28	67,6	66,16	63,93	63,92	61,02	52,16	41,45
21 Dif.	-0,93	-3,15	0,08	-0,06	1,56	3,61	3,33	2,31	0,42	2,35	-0,7	-1,17	-1,83	-2,2	1,47	1,15	1,4	-0,1	3,86	4,35	4,6
22 in situ	73,47	76,39	78,86	77,8	76,04	75,01	75,95	74,38	71,15	71,01	66,62	68,85	72,62	67,49	67,63	64,31	65,24	65,94	62,22	54,3	42,74
22 EASE	74,4	78,02	80,08	79,26	76,5	75,03	75,98	72,88	72,55	71,37	68,44	68,8	73,22	69,11	67,38	65,9	63,6	63,47	60,3	51,17	40,12
22 Dif.	-0,93	-1,63	-1,22	-1,46	-0,46	-0,02	-0,03	1,5	-1,4	-0,36	-1,82	0,05	-0,6	-1,62	0,25	-1,59	1,64	2,47	1,92	3,13	2,62
23 in situ	75,73	75,8	81,17	75,82	76,28	75,78	75,27	73,88	73,79	71,89	67,47	67,34	70,45	67,88	66,72	62,6	61,03	61,47	62,12	48,82	39,71
23 EASE	74,36	77,95	79,98	79,1	76,29	74,82	75,73	72,83	72,47	71,3	68,27	68,77	73,13	69,02	67,28	65,77	63,46	63,27	59,79	50,53	39,3
23 Dif.	1,37	-2,15	1,19	-3,28	-0,01	0,96	-0,46	1,05	1,32	0,59	-0,8	-1,43	-2,68	-1,14	-0,56	-3,17	-2,43	-1,8	2,33	-1,71	0,41
24 in situ	69,32	75,74	79,77	77,97	77,24	74,95	74,79	71,86	69,9	68,61	67,45	66,65	72,13	69,05	69,33	65,83	65,73	64,97	61,87	52,82	42,5
24 EASE	73,31	76,87	78,91	78,11	75,34	73,89	74,88	71,73	71,32	70,24	67,22	67,74	72,13	68,01	66,24	64,8	62,49	62,38	59,02	49,88	38,77
24 Dif.	-3,99	-1,13	0,86	-0,14	1,9	1,06	-0,09	0,13	-1,42	-1,63	0,23	-1,09	0	1,04	3,09	1,03	3,24	2,59	2,85	2,94	3,73
25 in situ	68,36	75,63	78,24	78,64	73,91	75,18	74,06	70,08	67,86	67,54	65,96	65,27	70,41	67,6	67,18	63,96	63,68	61,66	59,96	50,5	40,11
25 EASE	71,53	74,99	77,05	76,13	73,47	71,9	72,72	69,98	69,73	68,54	65,46	65,87	70,38	66,27	64,6	63,09	60,79	60,54	56,74	47,51	36,24
25 Dif.	-3,17	0,64	1,19	2,51	0,44	3,28	1,34	0,1	-1,87	-1	0,5	-0,6	0,03	1,33	2,58	0,87	2,89	1,12	3,22	2,99	3,87
26 in situ	74,12	73,24	79,26	75,65	76,11	73,32	72,09	70,72	69,58	68,88	66,02	67,46	72,29	68,13	68,48	64,73	64,35	64,83	60,26	51,92	40,45
26 EASE	73,02	76,83	78,88	78	75,3	73,84	74,66	71,58	71,32	70,18	67,19	67,52	71,96	67,82	66,07	64,54	62,17	61,91	58,35	48,97	37,54
26 Dif.	1,1	-3,59	0,38	-2,35	0,81	-0,52	-2,57	-0,86	-1,74	-1,3	-1,17	-0,06	0,33	0,31	2,41	0,19	2,18	2,92	1,91	2,95	2,91
27 in situ	73,19	75,66	82,12	81,96	74,97	72,46	72,84	72,05	72,07	69,05	65,48	65,84	71,18	68,55	66,84	62,93	60,87	59,83	56,97	46,94	33,57
27 EASE	73,67	77,18	79,15	78,07	75,24	73,78	74,57	71,51	71,25	70,17	67,05	67,62	72,03	67,92	66,09	64,51	62,08	61,81	58,16	48,64	37,01
27 Dif.	-0,48	-1,52	2,97	3,89	-0,27	-1,32	-1,73	0,54	0,82	-1,12	-1,57	-1,78	-0,85	0,63	0,75	-1,58	-1,21	-1,98	-1,19	-1,7	-3,44
28 in situ	75,9	76,13	79,85	76,14	76,1	75,14	73,58	73,64	72,65	70,85	66,98	67,35	71,06	67,12	65,72	62,7	60,27	61,26	61,37	48,45	38,32
28 EASE	72,44	76,43	78,46	77,57	74,92	73,45	74,21	71,24	71,03	69,8	66,86	67,1	71,51	67,35	65,55	64,01	61,58	61,23	57,46	47,9	36,25
28 Dif.	3,46	-0,3	1,39	-1,43	1,18	1,69	-0,63	2,4	1,62	1,05	0,12	0,25	-0,45	-0,23	0,17	-1,31	-1,31	0,03	3,91	0,55	2,07
29 in situ	70,41	74,17	77,65	74,78	76,11	74,25	72,31	70,23	68,24	66,79	64,83	65,94	70,75	67,29	67,35	64,29	64,57	62,72	58,4	48,32	39,95
29 EASE	71,3	75,02	77,09	76,23	73,45	71,95	72,84	70,01	69,71	68,51	65,51	65,89	70,34	66,2	64,5	62,95	60,53	60,17	56,39	46,84	35,24
29 Dif.	-0,89	-0,85	0,56	-1,45	2,66	2,3	-0,53	0,22	-1,47	-1,72	-0,68	0,05	0,41	1,09	2,85	1,34	4,04	2,55	2,01	1,48	4,71
30 in situ	72,47	74,43	80,32	78,89	73,81	75,18	72,4	68,1	70,25	67,51	64,55	64,83	68,72	65,91	65,59	60,45	60,21	58,7	54,93	45,25	33,33
30 EASE	73,49	77,01	78,93	77,85	74,96	73,51	74,27	71,15	70,92	69,77	66,74	67,25	71,69	67,58	65,7	64,1	61,58	61,22	57,56	47,78	35,78
30 Dif.	-1,02	-2,58	1,39	1,04	-1,15	1,67	-1,87	-3,05	-0,67	-2,26	-2,19	-2,42	-2,97	-1,67	-0,11	-3,65	-1,37	-2,52	-2,63	-2,53	-2,45
31 in situ	69,96	73,45	74,34	73,07	73,9	72,43	72,33	68,15	66,26	65,58	62,94	64,52	70,87	67,11	65,87	64,16	63,51	61,28	56,61	46,52	37,33
31 EASE	70,28	73,84	75,95	75,02	72,69	71,07	71,55	69,05	68,96	67,64	64,99	64,93	69,41	65,24	63,49	61,92	59,57	59,37	55,33	46,13	34,85
31 Dif.	-0,32	-0,39	-1,61	-1,95	1,21	1,36	0,78	-0,9	-2,7	-2,06	-2,05	-0,41	1,46	1,87	2,38	2,24	3,94	1,91	1,28	0,39	2,48
32 in situ	73,89	76,41	75,84	73,42	73,26	72,68	70,94	68,79	67,47	65,05	63,82	64,77	69,29	63,91	61,78	59,91	58,81	59,3	56,18	45,55	33,34
32 EASE	71,23	75,12	77,18	76,21	73,56	72,03	72,75	70,02	69,78	68,54	65,49	65,75	70,21	66,03	64,27	62,65	60,16	59,65	55,55	45,67	33,59
32 Dif.	2,66	1,29	-1,34	-2,79	-0,3	0,65	-1,81	-1,23	-2,31	-3,49	-1,67	-0,98	-0,92	-2,12	-2,49	-2,74	-1,35	-0,35	0,63	-0,12	-0,25
33 in situ	69,91	74,14	79,35	77,76	72,64	72,31	70,56	68,39	65,56	67,58	63,46	62,29	68,47	64,78	63,43	59,5	58,43	56,84	53,87	43,54	30,06
33 EASE	72,04	75,63	77,5	76,38	73,63	72,15	72,77	69,48	69,39	68,18	65,36	65,57	70,05	65,91	63,94	62,23	59,67	59,15	55,28	45,28	32,91
33 Dif.	-2,13	-1,49	1,85	1,38	-0,99	0,16	-2,21	-1,09	-3,83	-0,6	-1,9	-3,28	-1,58	-1,13	-0,51	-2,73	-1,24	-2,31	-1,41	-1,74	-2,85
34 in situ	70,27	73,63	75,36	73,09	72,31	69,81	69,23	68,03	65,54	62,84	61,24	64,98	69,92	65,8	65,36	62,52	61,88	60,13	54,71	43,81	34,6
34 EASE	68,04	71,5	73,62	72,57	70,16	68,45	68,95	66,76	66,73	65,4	62,56	62,53	67,14	62,99	61,35	59,79	57,35	56,91	52,46	42,92	31,22
34 Dif.	2,23	2,13	1,74	0,52	2,15	1,36	0,28	1,27	-1,19	-2,56	-1,32	2,45	2,78	2,81	4,01	2,73	4,53	3,22	2,25	0,89	3,38
35 in situ	68,81	77,18	77,2	72,48	71,57	71,72	68,79	68,23	66,92	65,04	61,95	63,23	66,97	62,11	59,16	57,88	55,92	55,98	53,55	42,17	30,7
35 EASE	69,89	73,93	75,97	74,92	72,26	70,75	71,43	68,57	68,49	67,27	64,31	64,49	68,95	64,78	62,96	61,31	58,71	58,1	53,88	43,73	31,35
35 Dif.	-1,08	3,25	1,23	-2,44	-0,69	0,97	-2,64	-0,34	-1,57	-2,23	-2,36	-1,26	-1,98	-2,67	-3,8	-3,43	-2,79	-2,12	-0,33	-1,56	-0,65

Tabla 7.4. Resultados del ajuste para los puntos situados en la zona de audiencia B.

	100Hz	125Hz	165Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz	5000Hz	6300Hz	8000Hz	10000Hz
50 in situ	67,14	70,65	72,94	69,96	68,52	67,82	68	64,04	63,82	62,44	58,26	62,13	67,13	59,88	59,9	58,08	56,57	54,2	51,32	38,4	26,73
50 EASE	68,32	72,15	74,13	73,25	70,75	69,18	69,89	66,67	66,44	65,25	62,76	62,69	67,01	62,8	60,72	58,96	56,22	55,6	51,46	41,05	28,14
50 Dif.	-1,18	-1,5	-1,19	-3,29	-2,23	-1,36	-1,89	-2,63	-2,62	-2,81	-4,5	-0,56	0,12	-2,92	-0,82	-0,88	0,35	-1,4	-0,14	-2,65	-1,41
51 in situ	67,61	74,91	72,77	70,91	69,2	67,97	65,7	64,88	66,46	63,49	60,44	61,56	64,19	58,78	60,16	57,12	54,51	52,03	48,19	37,84	27,1
51 EASE	69,59	73,27	75,18	74,14	71,38	69,88	70,6	67,39	67,26	65,99	63,1	63,2	67,74	63,52	61,58	59,77	57,08	56,35	52,47	42,01	28,99
51 Dif.	-1,98	1,64	-2,41	-3,23	-2,18	-1,91	-4,9	-2,51	-0,8	-2,5	-2,66	-1,64	-3,55	-4,74	-1,42	-2,65	-2,57	-4,32	-4,28	-4,17	-1,89
52 in situ	69,87	71,15	72,33	69,33	67,76	68,57	68,25	64,8	65,53	63,28	58,69	61,82	66,13	59,98	57,68	56,46	53,93	54,44	48,13	37,8	25,23
52 EASE	68,23	72,2	74,21	73,06	70,47	68,99	69,58	66,26	66,25	65,11	62,31	62,34	66,8	62,55	60,51	58,77	56,01	55,33	51,01	40,58	27,6
52 Dif.	1,64	-1,05	-1,88	-3,73	-2,71	-0,42	-1,33	-1,46	-0,72	-1,83	-3,62	-0,52	-0,67	-2,57	-2,83	-2,31	-2,08	-0,89	-2,88	-2,78	-2,37
53 in situ	68,37	69,81	73,28	69,26	66,37	66,65	66,01	63,15	63,41	61,13	58,24	61,04	65,1	58,48	59,44	57,09	56,27	53,18	49,64	36,72	25,16
53 EASE	66,85	70,66	72,63	71,76	69,08	67,68	68,47	65,12	64,76	63,67	60,96	61,23	65,47	61,18	59,16	57,39	54,64	53,95	49,81	39,35	26,28
53 Dif.	1,52	-0,85	0,65	-2,5	-2,71	-1,03	-2,46	-1,97	-1,35	-2,54	-2,72	-0,19	-0,37	-2,7	0,28	-0,3	1,63	-0,77	-0,17	-2,63	-1,12
54 in situ	71,21	76	71,48	73,53	68,76	67,54	69,61	65,25	66,22	61,16	58,48	63,93	65,51	60,23	58,79	57,08	53,76	52,48	46,04	38	25,37
54 EASE	67,83	71,77	73,74	72,68	70,09	68,59	69,21	65,84	65,78	64,68	61,98	62,03	66,41	62,12	60,08	58,31	55,53	54,8	50,61	40,02	26,83
54 Dif.	3,38	4,23	-2,26	0,85	-1,33	-1,05	0,4	-0,59	0,44	-3,52	-3,5	1,9	-0,9	-1,89	-1,29	-1,23	-1,77	-2,32	-4,57	-2,02	-1,46
55 in situ	65,24	72,75	74,8	71,72	71,1	69,23	66,59	64,02	67,29	62,36	59,48	63,2	64,61	60,96	62,96	60,24	56,29	53,29	48,47	36,39	23,46
55 EASE	67,93	71,73	73,59	72,63	69,81	68,39	69,36	65,95	65,46	64,25	61,55	61,91	66,04	61,84	59,76	57,91	55,09	54,31	50,4	39,67	26,2
55 Dif.	-2,69	1,02	1,21	-0,91	1,29	0,84	-2,77	-1,93	1,83	-1,89	-2,07	1,29	-1,43	-0,88	3,2	2,33	1,2	-1,02	-1,93	-3,28	-2,74
56 in situ	64,41	72,21	73,93	72,29	66,37	64,92	67,8	62,91	64,98	60,55	58,33	64,65	65,54	59,76	57,92	56,99	53,35	52,93	48,38	37,12	23,44
56 EASE	66,32	70,25	72,24	70,97	68,38	66,83	67,36	64,07	64,28	63,07	60,23	60,22	64,78	60,52	58,44	56,68	53,84	52,94	48,35	37,52	24,06
56 Dif.	-1,91	1,96	1,69	1,32	-2,01	-1,91	0,44	-1,16	0,7	-2,52	-1,9	4,43	0,76	-0,76	-0,52	0,31	-0,49	-0,01	0,03	-0,4	-0,62
57 in situ	65,67	72,89	68,56	68,23	67,88	66,26	67,61	64,38	64,88	61,24	58,96	63,67	64,33	58,44	59,45	56,91	54,61	52,66	49,7	35,61	24
57 EASE	65,14	69,13	71,12	70,09	67,73	66,21	66,72	63,69	63,55	62,24	59,91	59,75	64,02	59,69	57,63	55,79	52,99	52,15	47,34	36,65	23,23
57 Dif.	0,53	3,76	-2,56	-1,86	0,15	0,05	0,89	0,69	1,33	-1	-0,95	3,92	0,31	-1,25	1,82	1,12	1,62	0,51	2,36	-1,04	0,77
58 in situ	67,4	71,88	71,36	71,42	69,87	65,97	65,53	62,95	63,91	61,81	58,83	61,82	64,28	61,58	61,36	57,55	54,93	51,81	47,12	35,31	22,46
58 EASE	67,05	70,83	72,72	71,68	69,04	67,56	68,37	65,18	64,81	63,55	60,89	61,07	65,21	61	58,87	57	54,13	53,26	49,02	38,12	24,41
58 Dif.	0,35	1,05	-1,36	-0,26	0,83	-1,59	-2,84	-2,23	-0,9	-1,74	-2,06	0,75	-0,93	0,58	2,49	0,55	0,8	-1,45	-1,9	-2,81	-1,95
59 in situ	67,22	71,35	73,35	70,19	63,85	62,57	66,77	61,65	63,87	61,26	57,5	60,92	62,56	57,36	56,07	54,81	51,06	49,22	44,61	34,41	22,84
59 EASE	66,98	70,76	72,71	71,59	68,97	67,44	68,03	64,88	64,85	63,58	60,93	60,9	65,28	60,99	58,91	57,05	54,15	53,21	48,81	37,83	24,01
59 Dif.	0,24	0,59	0,64	-1,4	-5,12	-4,87	-1,26	-3,23	-0,98	-2,32	-3,43	0,02	-2,72	-3,63	-2,84	-2,24	-3,09	-3,99	-4,2	-3,42	-1,17
60 in situ	63,95	68,33	72,24	71,25	66,81	65,82	66,45	61	63,73	59,87	57,58	62,7	64,78	58,81	56,12	56,16	52,75	51,02	48,39	35,98	24,21
60 EASE	65,31	69,48	71,48	70,52	68,18	66,61	67,16	64,04	63,83	62,62	60,28	60,05	64,25	59,92	57,74	55,84	52,97	52,18	47,15	36,34	22,72
60 Dif.	-1,36	-1,15	0,76	0,73	-1,37	-0,79	-0,71	-3,04	-0,1	-2,75	-2,7	2,65	0,53	-1,11	-1,62	0,32	-0,22	-1,16	1,24	-0,36	1,49
61 in situ	64,74	74,36	68,63	67,25	65,72	64,81	65,93	62,58	63,92	61,77	58,1	63,29	65,07	58,42	58,22	56,53	53,49	51,41	48,27	34,5	22,51
61 EASE	64,45	68,6	70,62	69,58	67,22	65,73	66,16	63,1	63,03	61,74	59,36	59,13	63,37	59,06	56,97	55,1	52,23	51,39	46,37	35,61	22,05
61 Dif.	0,29	5,76	-1,99	-2,33	-1,5	-0,92	-0,23	-0,52	0,89	0,03	-1,26	4,16	1,7	-0,64	1,25	1,43	1,26	0,02	1,9	-1,11	0,46
62 in situ	66,2	72,31	71,52	72,58	66,5	67,17	65,96	61,85	63,54	60,48	58,13	61,85	63,93	59,88	60,5	57,15	53,78	50,56	46,32	34,12	22,74
62 EASE	66,23	70,02	71,89	70,82	68,23	66,76	67,42	64,46	64,08	62,78	60,12	60,21	64,4	60,17	58,02	56,15	53,19	52,21	47,69	36,63	22,7
62 Dif.	-0,03	2,29	-0,37	1,76	-1,73	0,41	-1,46	-2,61	-0,54	-2,3	-1,99	1,64	-0,47	-0,29	2,48	1	0,59	-1,65	-1,37	-2,51	0,04

Tabla 7.5. Resultados del ajuste para los puntos situados en la zona de audiencia C.

	100Hz	125Hz	165Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz	5000Hz	6300Hz	8000Hz	10000Hz
63 in situ	69,69	73,73	73,99	73,73	69,37	68,34	70,84	65,17	67,22	62,68	60,81	61,99	66,92	64,51	63,89	61,4	59,91	56,51	50,44	40,79	26,66
63 EASE	69,17	72,86	74,76	73,78	70,82	69,39	70,41	66,97	66,54	65,4	62,52	63,02	67,27	63,08	61,11	59,33	56,59	55,85	52,24	41,72	28,64
63 Dif.	0,52	0,87	-0,77	-0,05	-1,45	-1,05	0,43	-1,8	0,68	-2,72	-1,71	-1,03	-0,35	1,43	2,78	2,07	3,32	0,66	-1,8	-0,93	-1,98
64 in situ	68,01	71,13	73,03	69,13	69,1	67,83	67,68	65,75	63,83	61,18	59,64	61,5	67,75	64,1	61,33	60,06	58,02	56,78	50,68	39,25	28,52
64 EASE	67,6	71,69	73,68	72,86	70,15	68,66	69,45	66,61	66,32	65,04	62,08	62,34	66,67	62,44	60,57	58,84	56,14	55,3	50,97	40,41	27,38
64 Dif.	0,41	-0,56	-0,65	-3,73	-1,05	-0,83	-1,77	-0,86	-2,49	-3,86	-2,44	-0,84	1,08	1,66	0,76	1,22	1,88	1,48	-0,29	-1,16	1,14
65 in situ	68,93	74,12	71,38	71,74	67,13	66,66	70,69	65,45	66,43	65,3	60,36	62,75	64,84	60,38	60,38	56,88	54,26	52,67	51,69	37,24	27,3
65 EASE	68,13	72,01	74,06	72,85	70,21	68,65	69,22	66,12	66,24	65,03	62,09	62,13	66,71	62,47	60,54	58,76	56,06	55,23	50,73	40,19	27,14
65 Dif.	0,8	2,11	-2,68	-1,11	-3,08	-1,99	1,47	-0,67	0,19	0,27	-1,73	0,62	-1,87	-2,09	-0,16	-1,88	-1,8	-2,56	0,96	-2,95	0,16
66 in situ	69,78	73,06	71,74	68,93	68,14	67,3	67,82	64,58	66,97	63,06	60,21	61,59	64,82	60,2	60,27	56,98	55,21	51,04	48,8	35,74	21,47
66 EASE	67,68	71,42	73,37	72,27	69,57	68,01	68,64	65,26	65,38	64,18	61,24	61,27	65,83	61,6	59,67	57,86	55,15	54,34	50,25	39,65	26,49
66 Dif.	2,1	1,64	-1,63	-3,34	-1,43	-0,71	-0,82	-0,68	1,59	-1,12	-1,03	0,32	-1,01	-1,4	0,6	-0,88	0,06	-3,3	-1,45	-3,91	-5,02
67 in situ	70,42	73,6	72,06	69,78	68,74	68,89	65,05	63,58	63,48	62,01	59,03	61,13	65,71	60,98	59,37	56,87	55,13	54,74	49,69	38,15	25,88
67 EASE	67,06	71,24	73,23	72,26	69,69	68,27	69	65,76	65,53	64,32	61,59	61,73	66,01	61,72	59,73	57,96	55,2	54,4	49,93	39,31	26,12
67 Dif.	3,36	2,36	-1,17	-2,48	-0,95	0,62	-3,95	-2,18	-2,05	-2,31	-2,56	-0,6	-0,3	-0,74	-0,36	-1,09	-0,07	0,34	-0,24	-1,16	-0,24
68 in situ	65,5	69,57	75,13	73,09	69,23	69,33	67,32	63,1	65,67	63,12	59,26	61,81	65,1	61,21	61,35	57,56	55,54	53,6	49,01	36,5	24,35
68 EASE	68,38	72,08	73,95	73,01	70,09	68,66	69,7	66,25	65,8	64,68	61,83	62,33	66,5	62,32	60,26	58,44	55,64	54,83	50,98	40,27	26,88
68 Dif.	-2,88	-2,51	1,18	0,08	-0,86	0,67	-2,38	-3,15	-0,13	-1,56	-2,57	-0,52	-1,4	-1,11	1,09	-0,88	-0,1	-1,23	-1,97	-3,77	-2,53
69 in situ	67,19	69,91	72,79	67,67	67,84	67,23	65,99	62,03	61,43	62,17	59,51	62,01	66,75	61,38	60,24	58,2	57,31	56	49,17	37,71	25,76
69 EASE	67,03	70,96	72,98	72,14	69,52	68,07	68,86	65,7	65,39	64,1	61,27	61,48	65,7	61,42	59,44	57,58	54,8	53,89	49,46	38,61	25,12
69 Dif.	0,16	-1,05	-0,19	-4,47	-1,68	-0,84	-2,87	-3,67	-3,96	-1,93	-1,76	0,53	1,05	-0,04	0,8	0,62	2,51	2,11	-0,29	-0,9	0,64
70 in situ	70,56	71,98	70,84	69,8	68,21	66,09	66,96	64,17	65,54	64,05	60,23	61,15	64,34	60,83	60,49	56,43	54,39	52,08	48,89	35,43	21,16
70 EASE	67,43	71	72,92	71,73	68,92	67,33	68,04	64,79	64,86	63,59	60,67	60,78	65,36	61,16	59,2	57,38	54,53	53,62	49,47	38,63	25,08
70 Dif.	3,13	0,98	-2,08	-1,93	-0,71	-1,24	-1,08	-0,62	0,68	0,46	-0,44	0,37	-1,02	-0,33	1,29	-0,95	-0,14	-1,54	-0,58	-3,2	-3,92
71 in situ	66	70,57	71,2	70,9	67	65,49	65,85	62,84	64,51	61,2	59,25	62,46	63,81	60,85	58,89	55,72	51,86	50,48	50,47	34,31	24,05
71 EASE	66,72	70,58	72,57	71,55	68,99	67,53	68,16	64,99	64,86	63,67	60,68	60,85	65,13	60,84	58,83	56,95	54,16	53,28	48,59	37,82	24,29
71 Dif.	-0,72	-0,01	-1,37	-0,65	-1,99	-2,04	-2,31	-2,15	-0,35	-2,47	-1,43	1,61	-1,32	0,01	0,06	-1,23	-2,3	-2,8	1,88	-3,51	-0,24
72 in situ	68,4	72,8	68,9	67,1	67,3	67,14	65,44	62,09	63,79	61,43	58,86	61,41	65,82	61,13	58,7	56,95	54,58	53,42	47,94	36,04	22,48
72 EASE	65,15	69,18	71,18	69,81	67,4	65,87	66,15	63,24	63,34	62,06	59,46	59,25	63,77	59,52	57,51	55,69	52,82	51,89	47,08	36,33	22,86
72 Dif.	3,25	3,62	-2,28	-2,71	-0,1	1,27	-0,71	-1,15	0,45	-0,63	-0,6	2,16	2,05	1,61	1,19	1,26	1,76	1,53	0,86	-0,29	-0,38
73 in situ	66,68	71,48	72,55	69,76	66,17	66,79	67,2	64,13	64,91	63,11	59,31	60,9	64,05	60,85	60,96	56,28	54,32	51,8	47,72	34,79	22,86
73 EASE	67,62	71,38	73,23	72,1	69,36	67,95	68,61	65,47	65,22	63,9	61,17	61,38	65,64	61,42	59,39	57,49	54,62	53,66	49,43	38,44	24,64
73 Dif.	-0,94	0,1	-0,68	-2,34	-3,19	-1,16	-1,41	-1,34	-0,31	-0,79	-1,86	-0,48	-1,59	-0,57	1,57	-1,21	-0,3	-1,86	-1,71	-3,65	-1,78
74 in situ	62,19	69,69	73,23	70,12	66,48	65,92	65,18	61,02	60,41	61,47	59,4	61,26	66,44	61,77	58,88	56,59	56,34	54,18	47,83	36	24,73
74 EASE	66,14	70,24	72,26	71,41	69,08	67,55	68,19	65,19	64,93	63,68	61,22	61,14	65,3	60,98	58,87	57,02	54,17	53,33	48,31	37,59	24,11
74 Dif.	-3,95	-0,55	0,97	-1,29	-2,6	-1,63	-3,01	-4,17	-4,52	-2,21	-1,82	0,12	1,14	0,79	0,01	-0,43	2,17	0,85	-0,48	-1,59	0,62
75 in situ	65,37	71,46	71,6	66,43	64,03	66,78	65,51	62,42	62,82	61,27	58,6	58,49	64,11	60,42	59,3	56,81	53,04	49,07	46,9	32,96	20,67
75 EASE	65,76	69,49	71,52	70,33	67,84	66,26	66,68	63,8	63,92	62,63	59,69	59,59	64,07	59,75	57,75	55,85	53,03	52,1	47,14	36,25	22,63
75 Dif.	-0,39	1,97	0,08	-3,9	-3,81	0,52	-1,17	-1,38	-1,1	-1,36	-1,09	-1,1	0,04	0,67	1,55	0,96	0,01	-3,03	-0,24	-3,29	-1,96
76 in situ	67,5	70,75	71,01	66,03	65,36	65,81	64,34	60,35	61,94	60,25	57,64	59,52	63,93	58,8	56,71	54,4	52,82	52	47,68	35,33	24,48
76 EASE	63,78	67,75	69,78	68,52	66,25	64,65	64,9	62,23	62,34	60,99	58,46	58,23	62,62	58,35	56,3	54,44	51,54	50,59	45,22	34,35	20,7
76 Dif.	3,72	3	1,23	-2,49	-0,89	1,16	-0,56	-1,88	-0,4	-0,74	-0,82	1,29	1,31	0,45	0,41	-0,04	1,28	1,41	2,46	0,98	3,78
77 in situ	64,2	70,49	75,31	74,12	67,55	65,97	65,97	62,38	63,65	61,4	59,63	60,69	63,4	59,95	60,54	56,71	55,21	51,46	46,87	33,33	21,69
77 EASE	66,09	69,99	71,86	70,78	68,16	66,73	67,46	64,28	63,94	62,65	60,09	60,26	64,33	60,12	57,99	56,05	53,15	52,12	47,74	36,59	22,53
77 Dif.	-1,89	0,5	3,45	3,34	-0,61	-0,76	-1,49	-1,9	-0,29	-1,25	-0,46	0,43	-0,93	-0,17	2,55	0,66	2,06	-0,66	-0,87	-3,26	-0,84

Tabla 7.6. Resultados del ajuste para los puntos situados en la zona de audiencia D.

En las 4 zonas de audiencia se encuentran errores puntuales en baja frecuencia, muchos de ellos son por pocas décimas. Estas desviaciones podrían estar provocadas por los defectos de modelado de la concha. En alta frecuencia se encuentran algunos errores muy probablemente debidos a la anomalía de la fuente omnidireccional explicada en el [Capítulo 8].

	100Hz	125Hz	165Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz	3150Hz	4000Hz	5000Hz	6300Hz	8000Hz	10000Hz
4 in situ	67,02	78,36	80,77	77,95	76,26	74,91	76,79	76,07	72,65	71,32	68,74	67,59	70,41	67,07	66,58	66,37	63,71	63,31	58,66	49,93	41,79
4 EASE	74,24	78,5	80,57	79,76	77,45	76,04	76,43	74,22	74,02	72,5	70,18	70,1	74,58	70,54	69,17	67,77	65,71	65,64	62,12	53,44	43,05
4 Dif.	-7,22	-0,14	0,2	-1,81	-1,19	-1,13	0,36	1,85	-1,37	-1,18	-1,44	-2,51	-4,17	-3,47	-2,59	-1,4	-2	-2,33	-3,46	-3,51	-1,26
5 in situ	72,86	76,4	77,23	79,76	74,17	73,61	72,28	66,59	66,74	66,74	64,51	63,54	67,51	65,35	68,69	63,31	61,76	61,65	54,33	44,36	36,38
5 EASE	70,78	75,31	77,4	76,52	74,09	72,68	73,18	70,83	70,65	69,18	66,46	66,49	70,82	66,74	65,23	63,75	61,52	61,23	57,45	48,26	37,13
5 Dif.	2,08	1,09	-0,17	3,24	0,08	0,93	-0,9	-4,24	-3,91	-2,44	-1,95	-2,95	-3,31	-1,39	3,46	-0,44	0,24	0,42	-3,12	-3,9	-0,75
6 in situ	65,72	68,78	73,23	70,51	70,75	68,67	65,67	63,27	60,5	57,52	54,11	53,31	58,94	56,25	57,88	53,89	50,34	48,26	43,18	32,02	20,99
6 EASE	61,64	67,71	69,47	68,19	65,95	64,56	64,7	60,72	61,04	59,71	56,83	56,06	60	55,53	53,09	51,39	48,56	48,16	43,38	33,14	20,29
6 Dif.	4,08	1,07	3,76	2,32	4,8	4,11	0,97	2,55	-0,54	-2,19	-2,72	-2,75	-1,06	0,72	4,79	2,5	1,78	0,1	-0,2	-1,12	0,7
7 in situ	64,93	70,51	70,91	68,47	68,14	64,35	64,4	61,73	61,4	58,25	56,21	58,84	62,37	56,74	54,67	52,62	49,38	49,29	43,4	34	22,35
7 EASE	65,26	69,53	71,3	70,17	67,68	66,18	66,5	63,05	62,73	61,31	59,02	58,68	62,63	58,17	55,93	54,07	51,22	50,41	46	35,31	21,86
7 Dif.	-0,33	0,98	-0,39	-1,7	0,46	-1,83	-2,1	-1,32	-1,33	-3,06	-2,81	0,16	-0,26	-1,43	-1,26	-1,45	-1,84	-1,12	-2,6	-1,31	0,49
9 in situ	65,73	72,17	72,39	69,04	67,62	69,2	66,52	63,51	62,37	60,25	58,56	62,59	67,38	62,72	62,68	60,16	58,14	55,8	50	38,79	27,62
9 EASE	65,71	69,84	71,86	70,92	68,66	67,14	67,5	64,92	64,74	63,32	60,95	60,78	65	60,73	58,85	57,09	54,46	53,79	49,12	39	26,45
9 Dif.	0,02	2,33	0,53	-1,88	-1,04	2,06	-0,98	-1,41	-2,37	-3,07	-2,39	1,81	2,38	1,99	3,83	3,07	3,68	2,01	0,88	-0,21	1,17
10 in situ	62,07	67,49	68,44	68,23	63,26	61,41	62	61,02	57,02	55,58	52,79	55,52	59,93	54,79	55,15	51,62	50,45	48,15	42,78	29,45	20,14
10 EASE	63,47	67,92	69,73	68,3	65,81	64,47	64,8	60,81	60,94	59,72	56,42	56,31	60,48	55,98	53,98	51,94	48,9	47,56	42,51	30,82	15,95
10 Dif.	-1,4	-0,43	-1,29	-0,07	-2,55	-3,06	-2,8	0,21	-3,92	-4,14	-3,63	-0,79	-0,55	-1,19	1,17	-0,32	1,55	0,59	0,27	-1,37	4,19
11 in situ	60,81	65,54	65,36	60,85	58,28	57,4	56,05	53,84	54,48	51,55	48,27	48,92	52,18	49,09	48,27	44,26	41,07	37,81	31,49	19,2	12,57
11 EASE	52	56,65	57,99	55,18	51,5	48,99	48,33	45,25	46,4	45,01	41,78	41,28	46,44	42,01	40,06	37,88	34,89	32,35	26,08	12,69	0
11 Dif.	8,81	8,89	7,37	5,67	6,78	8,41	7,72	8,59	8,08	6,54	6,49	7,64	5,74	7,08	8,21	6,38	6,18	5,46	5,41	6,51	12,57
12 in situ	65,12	69,77	66,89	64,03	64,89	65,82	62,57	61,24	60,86	59,95	56,9	59,09	62,14	56,86	56,81	52,51	49,89	48,67	46,97	31,63	21,37
12 EASE	63,54	67,31	69,3	68,05	65,63	63,97	64,23	61,4	61,57	60,12	57,64	57,24	61,68	57,34	55,38	53,38	50,41	49,27	44,47	33,15	18,88
12 Dif.	1,58	2,46	-2,41	-4,02	-0,74	1,85	-1,66	-0,16	-0,71	-0,17	-0,74	1,85	0,46	-0,48	1,43	-0,87	-0,52	-0,6	2,5	-1,52	2,49
13 in situ	67,31	70,5	70,29	65,73	62,4	61,02	61,34	61,44	61,37	59,65	56,38	59	61,33	56,45	55,1	52,6	50,13	47,69	42,23	31,21	20,81
13 EASE	64,97	69,07	70,99	69,75	67,19	65,67	66,17	62,74	62,74	61,44	59,05	58,87	63,11	58,79	56,57	54,62	51,66	50,58	46,31	34,94	20,67
13 Dif.	2,34	1,43	-0,7	-4,02	-4,79	-4,65	-4,83	-1,3	-1,37	-1,79	-2,67	0,13	-1,78	-2,34	-1,47	-2,02	-1,53	-2,89	-4,08	-3,73	0,14
14 in situ	61,28	65,68	69,1	64,04	63,44	61,24	62,18	61,01	60,3	57,67	56,47	56,87	58,88	54,16	53,24	52,46	49,58	47,48	43,16	29,64	17,21
14 EASE	61,91	66,01	67,98	66,9	64,75	63,2	63,5	60,63	60,43	58,98	56,86	56,45	60,52	56,19	54,03	52,1	49,03	47,94	42,62	31,31	17
14 Dif.	-0,63	-0,33	1,12	-2,86	-1,31	-1,96	-1,32	0,38	-0,13	-1,31	-0,39	0,42	-1,64	-2,03	-0,79	0,36	0,55	-0,46	0,54	-1,67	0,21
15 in situ	64,52	71,31	66,14	64,02	61,67	54,41	56,74	54,66	60,43	54,37	53,08	57,32	58,28	56,66	54,85	53,64	48,33	47,09	38,58	29,74	20,97
15 EASE	64,13	67,94	69,68	68,19	65,6	63,91	63,97	61,25	61,26	59,73	57,32	57,05	61,31	56,94	54,72	52,58	49,29	47,8	41,57	29,25	13,53
15 Dif.	0,39	3,37	-3,54	-4,17	-3,93	-9,5	-7,23	-6,59	-0,83	-5,36	-4,24	0,27	-3,03	-0,28	0,13	1,06	-0,96	-0,71	-2,99	0,49	7,44
16 in situ	65,85	70,01	73,93	72,71	72,33	69,27	62,67	58,7	61,11	59,45	56,64	58,47	60,92	58,89	58,53	54	52	48,04	43,07	29,85	21,46
16 EASE	64,28	68,1	69,88	68,67	66,08	64,49	64,98	61,97	61,66	60,27	57,86	57,76	61,9	57,54	55,35	53,23	50,03	48,69	43,19	31,27	16,14
16 Dif.	1,57	1,91	4,05	4,04	6,25	4,78	-2,31	-3,27	-0,55	-0,82	-1,22	0,71	-0,98	1,35	3,18	0,77	1,97	-0,65	-0,12	-1,42	5,32
17 in situ	63,84	67,53	70,23	65,74	62,64	57,89	59,82	54,04	56,73	52,15	51,43	53,63	55,48	53,88	53,84	49,39	44,69	41,15	33,25	20,94	13,05
17 EASE	63,55	67,17	68,93	67,75	64,98	63,47	64,12	60,99	60,59	59,21	56,18	56,44	60,53	56,14	53,89	51,67	48,21	46,46	40,39	27,6	11,11
17 Dif.	0,29	0,36	1,3	-2,01	-2,34	-5,58	-4,3	-6,95	-3,86	-7,06	-4,75	-2,81	-5,05	-2,26	-0,05	-2,28	-3,52	-5,31	-7,14	-6,66	1,94
18 in situ	66,4	65,77	69,11	67,21	66,91	63,28	63,67	57,35	57,34	50,67	50,55	55,26	56,91	52,03	52,47	48,26	43,67	40,63	33,02	21,47	15,28
18 EASE	57,22	63,07	64,39	62,53	59,62	58,15	58,77	52,07	53,97	53,19	49,62	48,8	53,79	49,09	46,8	44,46	41,08	39,44	35,35	23,27	7,68
18 Dif.	9,18	2,7	4,72	4,68	7,29	5,13	4,9	5,28	3,37	-2,52	0,93	6,46	3,12	2,94	5,67	3,8	2,59	1,19	-2,33	-1,8	7,6
19 in situ	69,56	77,52	79,33	75,32	75,4	70,31	69,56	63,74	62,63	61,34	57,95	60,71	61,02	57,75	57,31	55,1	52	52,23	47,6	35,05	22,38
19 EASE	64,62	70,84	72,59	71,23	69,44	68,12	68,4	62,72	63,67	62,59	60,29	59,51	63,73	59,26	57,05	55,13	52,33	51,91	47,72	37,73	25,26
19 Dif.	4,94	6,68	6,74	4,09	5,96	2,19	1,16	1,02	-1,04	-1,25	-2,34	1,2	-2,71	-1,51	0,26	-0,03	-0,33	0,32	-0,12	-2,68	-2,88
20 in situ	73,6	75,1	82,47	78,67	77,66	72,82	72,37	70,4	71,16	70,37	65,9	67,11	66,18	65,77	68,59	63,81	61,24	61,27	57,51	47,94	39,11
20 EASE	71,38	75,54	77,58	76,72	74,52	73,08	73,52	70,51	70,46	69,05	66,99	66,9	71,24	67,08	65,42	63,93	61,68	61,6	57,94	49,07	38,26
20 Dif.	2,22	-0,44	4,89	1,95	3,14	-0,26	-1,15	-0,11	0,7	1,32	-1,09	0,21	-5,06	-1,31	3,17	-0,12	-0,44	-0,33	-0,43	-1,13	0,85

Tabla 7.7. Resultados del ajuste para los puntos fuera del escenario y las zonas de audiencia.

En el caso de los puntos que no pertenecen ni al escenario ni a las zonas de audiencia, hay un número mayor de errores, sobre todo en los situados en los pasillos traseros del recinto. En estas zonas la exactitud del modelo es menor que en el resto, ya que el objetivo principal era modelar el comportamiento del auditorio en las zonas de audiencia donde se sitúan los espectadores.

Con estos resultados se ajustaron casi un 45% de los puntos en todas sus frecuencias dentro del margen establecido de  $\pm 3,5$  dB. Teniendo en cuenta el número de valores posibles a ajustar (puntos por bandas de frecuencia), se tiene un porcentaje del 88% dentro del margen establecido de  $\pm 3,5$  dB.

Teniendo en cuenta la complejidad del modelo, el número de simplificaciones hechas, el promedio realizado para el dato de la temperatura y la humedad y que en el margen de ajuste no se tuvo la posibilidad de introducir todas las fuentes de incertidumbre presentes, el resultado es muy positivo, aunque podría realizarse un estudio pormenorizado como trabajo futuro. Además, en la mayoría de puntos no ajustados, tan sólo algún tercio de octava se desvía del margen de ajuste y por pocas décimas.

## 8. MEDIDAS ADICIONALES DE LA DIRECTIVIDAD DE LA FUENTE DODECAÉDRICA

Como se ha comentado en el capítulo anterior, durante la realización del ajuste se detectaron grandes diferencias en el mismo rango de frecuencias para casi la totalidad de los puntos. A pesar de todas las modificaciones de materiales aplicadas de manera sistemática, los puntos quedaban desajustados superando el margen de ajuste establecido. Estas diferencias se detectaron en las bandas de media y alta frecuencia, a partir de la banda de 1000 Hz.

Tras realizar una comprobación de los cálculos y correcciones realizados a las medidas, se confirmó que eran correctos. Por esto, la teoría que más sentido tenía ante esta situación era una posible anomalía en la fuente utilizada, que anteriormente en otros trabajos no se detectó.

La fuente dodecaédrica como su nombre indica, consta de 12 altavoces situados uno en cada cara de un dodecaedro. Esta fuente se aproxima a una fuente omnidireccional, utilizándose por esa razón en medidas de aislamiento o tiempo de reverberación. Sin embargo, si comprobamos los diagramas de directividad aportados por el fabricante de la fuente, se puede apreciar que aunque para baja frecuencia la fuente se comporta de manera omnidireccional, para las altas frecuencias se empiezan a generar diferencias en función del ángulo.

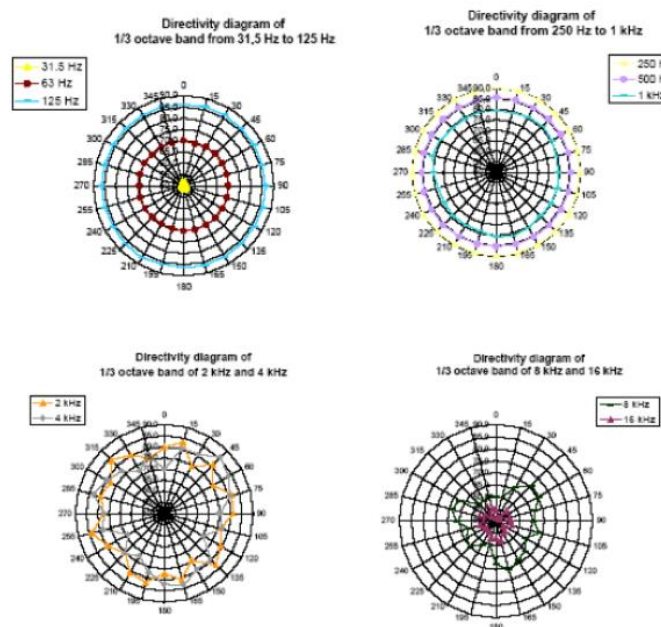


Fig. 8.1. Diagramas de directividad de la fuente dodecaédrica para diferentes frecuencias. [14]

En la medida realizada en la cámara anecoica explicada en el [Capítulo 6], no se tuvo esto en cuenta y la fuente quedó enfrentada al micrófono en una posición en la que ninguno de los doce altavoces quedaba apuntado.

Esta misma fuente ha sido utilizada en trabajos de otros alumnos de la Escuela Politécnica de Leganés, pero no se ha observado este comportamiento. En todos los casos anteriores se trataba de estudiar recintos cerrados, en los cuales existe un campo difuso compuesto por multitud de reflexiones en todas las direcciones. La existencia de este campo difuso es capaz de compensar este defecto de la fuente y permitir que la orientación de la misma sea indiferente.

Para confirmar este comportamiento y tratar de modelarlo y justificarlo se planearon una serie de nuevas medidas en la cámara anecoica. El esquema de montaje y la configuración de los equipos fue el mismo que el utilizado en el recinto el día de las medidas, tal y como se muestra en la [Fig. 6.3]. Se tomaron 11 medidas de 5 minutos de duración, a la misma distancia de fuente (1,70 m), pero variando la altura y ángulo de rotación de la misma y manteniendo el micrófono fijo. A continuación, se muestran unas gráficas con los resultados obtenidos para los diferentes casos.

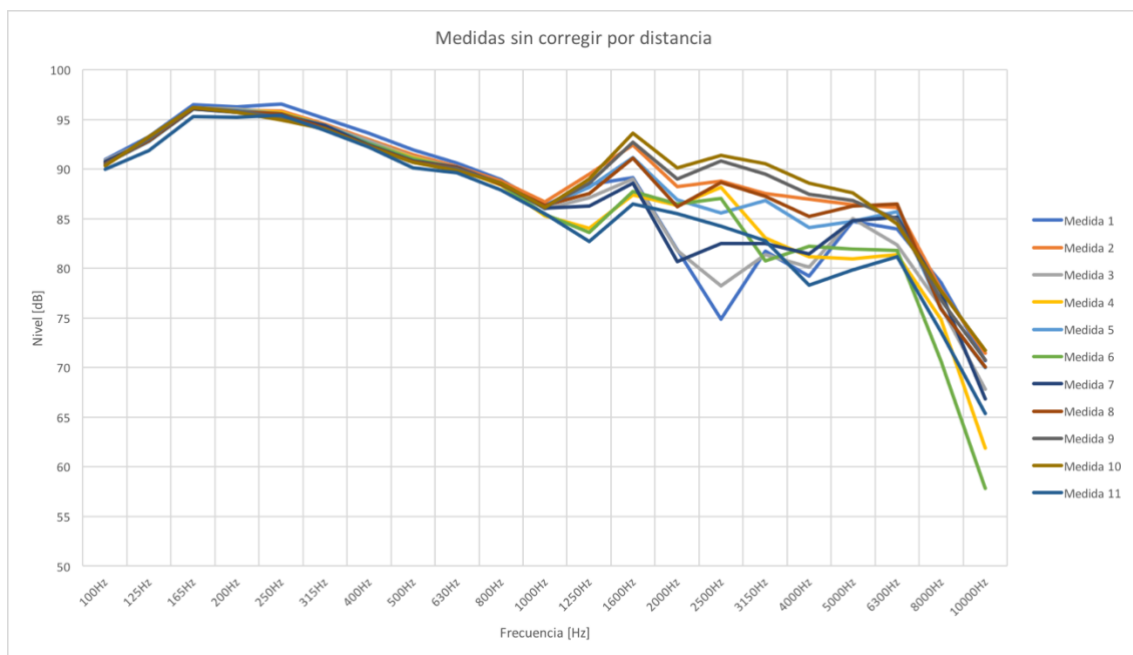


Fig. 8.2. Medidas realizadas en la cámara anecoica a la fuente dodecaédrica a diferentes alturas y ángulos.

En el caso de la [Fig. 8.2] ya se aprecia el efecto que se sospechaba, a partir de la banda de 1000 Hz, el nivel medido depende en gran medida de la orientación de la fuente con respecto al micrófono.

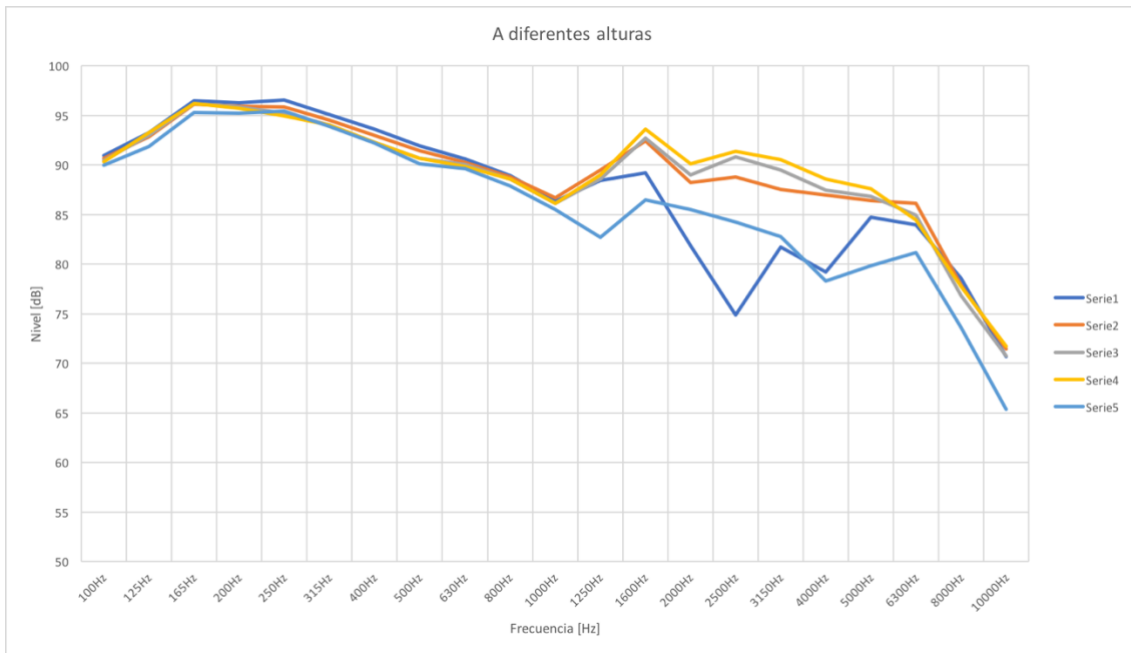


Fig. 8.3. Medidas realizadas en la cámara anecoica a la fuente dodecaédrica a diferentes alturas.

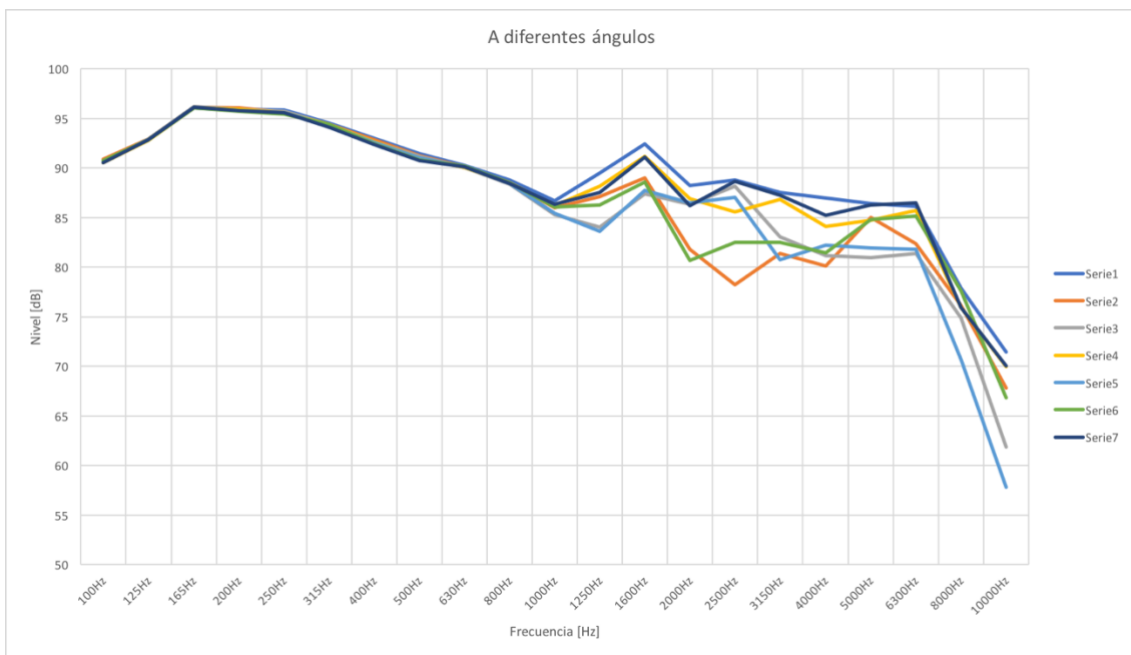


Fig. 8.4. Medidas realizadas en la cámara anecoica a la fuente dodecaédrica a diferentes ángulos.

Observando la [Fig. 8.3] y [Fig. 8.4], se ve que se generan mayores diferencias de nivel variando la altura que variando el ángulo de la fuente con respecto al micrófono.

Gracias a estas medidas, se pudieron extraer dos conclusiones clave para realizar el ajuste. Por un lado, la orientación de la fuente y el micrófono son claves para las bandas mayores de 1 kHz, por otro, que es más crítica la diferencia de las alturas entre la fuente y el micrófono en cada medida. Es obvio que para realizar un ajuste más exacto, se deberían



usar los valores del espectro obtenidos para cada altura y orientación en función del punto de medida. En este caso no era posible porque EASE no permite configurar más de un espectro para la fuente en EASE y además no contábamos con la información de la orientación que se usó para cada punto en el día de las medidas. Ante esta situación se decidió corregir cada una de las once medidas para una distancia de 1 m y realizar un promedio de las mismas. Esta solución funcionará mejor para unos puntos que otros a partir de 1000 Hz. Por ello, para estas frecuencias se dará por ajustado el modelo cuando se consigan las menores diferencias posibles, a pesar de que no entren en el margen previamente establecido.

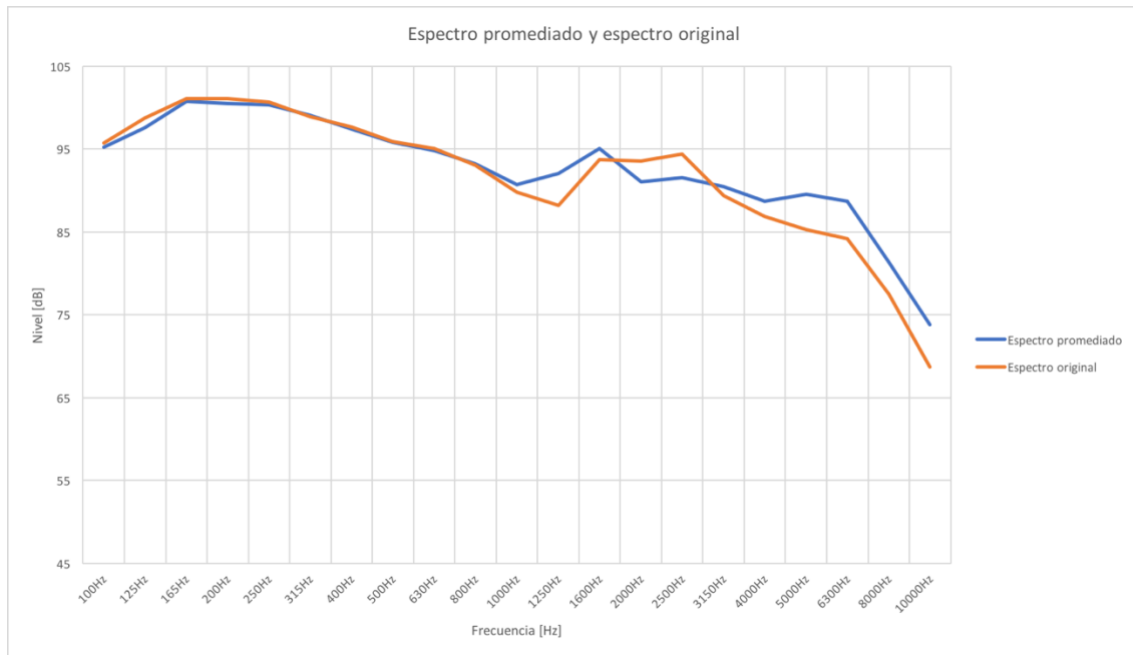


Fig. 8.5. Comparación del espectro original y el promediado para diferentes casos, utilizados en EASE.

<b>Frecuencia</b>	<b>SPL (1 m) Original</b>	<b>SPL (1 m) Promedio</b>	<b>Diferencia</b>
<b>100 Hz</b>	95,74 dB	95,25 dB	-0,49 dB
<b>125 Hz</b>	98,74 dB	97,54 dB	-1,2 dB
<b>165 Hz</b>	101,07 dB	100,77 dB	-0,3 dB
<b>200 Hz</b>	101,09 dB	100,52 dB	-0,57 dB
<b>250 Hz</b>	100,64 dB	100,34 dB	-0,3 dB
<b>315 Hz</b>	98,94 dB	99,06 dB	0,12 dB
<b>400 Hz</b>	97,65 dB	97,39 dB	-0,26 dB
<b>500 Hz</b>	95,88 dB	95,77 dB	-0,11 dB
<b>630 Hz</b>	95,09 dB	94,78 dB	-0,31 dB
<b>800 Hz</b>	93,03 dB	93,2 dB	0,17 dB
<b>1000 Hz</b>	89,81 dB	90,68 dB	0,87 dB
<b>1250 Hz</b>	88,2 dB	92,04 dB	3,84 dB
<b>1600 Hz</b>	93,72 dB	95,01 dB	1,29 dB
<b>2000 Hz</b>	93,56 dB	91,02 dB	-2,54 dB
<b>2500 Hz</b>	94,38 dB	91,57 dB	-2,81 dB
<b>3150 Hz</b>	89,39 dB	90,44 dB	1,05 dB
<b>4000 Hz</b>	86,85 dB	88,71 dB	1,86 dB
<b>5000 Hz</b>	85,26 dB	89,52 dB	4,26 dB
<b>6300 Hz</b>	84,14 dB	88,68 dB	4,54 dB
<b>8000 Hz</b>	77,5 dB	81,36 dB	3,86 dB
<b>10000 Hz</b>	68,69 dB	73,8 dB	5,11 dB

Tabla 8.1. Comparación entre los valores originales de la fuente y el promedio realizado tras estudiar la directividad de la misma.

## 9. ESTUDIO DE LOS PRINCIPALES PARÁMETROS ACÚSTICOS EN FUNCIÓN DEL USO DEL RECINTO

En este capítulo se va a comprobar, mediante la simulación en EASE, si el recinto bajo estudio cumple con las características objetivo, según el tipo de actividad que se desarrolle. Se van a tener en cuenta dos situaciones, recinto orientado a la representación musical y recinto orientado a la palabra. Se debe tener en cuenta de antemano que los resultados obtenidos pueden no ser del todo correctos debido al ajuste del recinto realizado, por lo que estos deben tomarse como una indicación del funcionamiento del recinto. Todos estos parámetros y su obtención en unas medidas reales se detallan en la Norma UNE-EN ISO 3382.

### 9.1. Parámetros a estudiar

A continuación, se detalla la definición de cada parámetro, la formulación que le corresponde y la sensación subjetiva que genera.

#### 9.1.1. Tiempo de reverberación (RT)

Este es uno de los parámetros más importantes a la hora de caracterizar la acústica de un recinto. Se define para cada frecuencia como el tiempo (expresado en segundos) que transcurre desde que una fuente sonora se detiene hasta que el nivel sonoro decae 60 dB respecto al nivel estacionario original. Para el cálculo existen numerosas teorías y expresiones, las dos más utilizadas son las de Sabine y Eyring. La aproximación de Sabine [Ecuación (9.1)] está indicada para recintos con coeficiente medio de absorción mayor de 0,15.

$$RT = 0,161 \frac{V}{A_{tot}} \quad (9.1)$$

Donde:

$V$  es el volumen total del recinto (en  $m^3$ ).

$A_{tot}$  es la absorción total del recinto.

La absorción total de un recinto se calcula a partir de la suma de las absorciones de cada superficie. A su vez, la absorción de una cierta superficie viene dada por el producto del coeficiente de absorción del material del que está hecha, y la superficie en  $m^2$ .

$$A_{tot} = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n \quad (9.2)$$

La comparación con los valores óptimos se realiza mediante el  $RT_{mid}$ .

$$RT_{\text{mid}} = \frac{RT(500 \text{ Hz}) + RT(1 \text{ kHz})}{2} \quad (9.3)$$

Por otro lado, la aproximación de Eyring [Ecuación (9.4)] se utiliza en recintos con un coeficiente de absorción mayor de 0,15.

$$RT = 0,161 \frac{V}{S[-2,3 \log(1 - \bar{\alpha})]} \quad (9.4)$$

Donde:

$S$  es la superficie total del recinto (en  $\text{m}^2$ ).

Y  $\bar{\alpha}$  el coeficiente medio de absorción.

Existen otras formas de calcular el tiempo de reverberación como son los parámetros T10, T20 o T30. Consisten en medir el tiempo de la caída de 10, 20 y 30 dB respectivamente. Este tiempo a su vez se debe multiplicar por 6, 3 y 2 respectivamente para obtener el valor del tiempo de reverberación. De estos tres parámetros, el T10 es el menos preciso y el T30, el más preciso.

### 9.1.2. Tiempo de decaimiento temprano (EDT)

El tiempo de reverberación genera una idea sobre la respuesta objetiva de un recinto, pero el principal objetivo es cuantificar de algún modo la sensación subjetiva de los espectadores que van a presenciar un espectáculo.

Estudiando la anatomía del oído humano y la teoría psicoacústica se propuso un parámetro que se acercase más a la sensación subjetiva del oído humano. Este parámetro es el tiempo de decaimiento temprano. Se define para cada frecuencia, como seis veces el tiempo (en segundos) que transcurre desde que una fuente sonora se detiene hasta que el nivel disminuye 10 dB con respecto al nivel estacionario original.

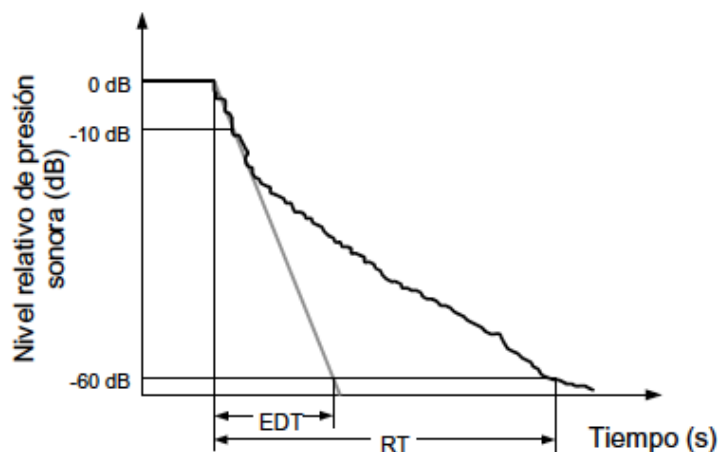


Fig. 9.1. Comparación visual del EDT y el RT. [1]

Para la evaluación objetiva del parámetro se utiliza el  $EDT_{\text{mid}}$ .

$$EDT_{\text{mid}} = \frac{EDT (500 \text{ Hz}) + EDT (1 \text{ kHz})}{2} \quad (9.5)$$

En general, lo ideal es que el valor de  $EDT_{\text{mid}}$  sea muy similar al  $RT_{\text{mid}}$ .

### 9.1.3. Calidez (BR)

La calidez de una sala (“*Bass Ratio*” en inglés) se obtiene a partir del tiempo de reverberación y aporta una idea de la respuesta de los sonidos graves en el recinto. Este parámetro será importante sobre todo en recintos orientados a la representación musical, ya que las bajas frecuencias son importantes en la misma. El parámetro objetivo se define como la relación entre la suma de los RT en las frecuencias de 125 Hz y 250 Hz, y la suma de los RT en 500 Hz y 1 kHz.

$$BR = \frac{RT (125 \text{ Hz}) + RT (250 \text{ Hz})}{RT (500 \text{ Hz}) + RT (1 \text{ kHz})} \quad (9.6)$$

### 9.1.4. Brillo (br)

En este caso, el concepto es el mismo, pero teniendo en cuenta la respuesta del recinto a las frecuencias altas mostrando la claridad y riqueza de los armónicos. Ahora, este parámetro tendrá mayor importancia en los recintos que se utilicen para la palabra, como por ejemplo un teatro. Su definición es similar al caso de la calidez, en este caso se cuantifica la relación entre la suma de los RT en 2 kHz y 4 kHz y la suma de los RT en las frecuencias de 500 Hz y 1 kHz.

$$br = \frac{RT (2 \text{ kHz}) + RT (4 \text{ kHz})}{RT (500 \text{ Hz}) + RT (1 \text{ kHz})} \quad (9.7)$$

Un valor mayor de la unidad para este parámetro haría que el sonido empezase a tener artefactos metálicos, alejándolo de la naturalidad. Es difícil que esto ocurra gracias a la absorción de las frecuencias altas producida por el propio aire.

### 9.1.5. Claridad (C)

Este parámetro relaciona la energía producida por el sonido directo y las primeras reflexiones y la energía producida por las reflexiones tardías. Con esto se puede cuantificar la cantidad de información que un determinado oyente es capaz de percibir de una manera clara.

Un parámetro importante a fijar es el tiempo a partir del cual se consideran reflexiones tardías. La elección de un tiempo u otro depende del tipo de representación que se estudie. Los dos más utilizados son el  $C_{50}$  y el  $C_{80}$ . El primero toma un tiempo de 50 ms y se utiliza en el caso de estar evaluando la claridad de la palabra. El segundo supone un tiempo de 80 ms y mide la claridad musical.

$$C_t = 10 \log \frac{\int_0^t p^2(t) dt}{\int_t^\infty p^2(t) dt} \quad (9.8)$$

La  $t$  indica si se mira la claridad de la palabra ( $t = 50$  ms) o la claridad musical ( $t = 80$  ms),  $p(t)$  es la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva. Esta respuesta es la generada en un recinto cuando se produce un sonido impulsivo como puede ser el disparo de una pistola de fogeo o la explosión de un globo.

Un valor elevado del parámetro  $C_{50}$  aumentará la inteligibilidad del recinto, ya que significa que la energía del campo directo y las primeras reflexiones es mucho mayor que la energía del campo reverberante que es el que empeora la inteligibilidad.

Se puede calcular un valor único para ambos casos. Para la claridad de la palabra, existe el “*speech average*”.

$$\begin{aligned} \text{speech average} = & 0,15 \cdot C_{50}(500 \text{ Hz}) + 0,25 \cdot C_{50}(1 \text{ kHz}) + 0,35 \cdot C_{50}(2 \text{ kHz}) \\ & + 0,25 \cdot C_{50}(4 \text{ kHz}) \end{aligned} \quad (9.9)$$

Y en el caso de la claridad musical, se puede calcular el promedio del valor del parámetro  $C_{80}$  en las bandas de 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz. Este valor único se denomina “*music average*”.

#### 9.1.6. %Alcons

Alcons proviene del inglés “*articulation Loss of Constants*”, muestra el porcentaje de pérdida de la articulación de las consonantes. Bajo el punto de vista subjetivo del oyente, sería el tanto por ciento de consonantes que no se llega a entender. Un valor muy alto significa que el recinto no genera una buena inteligibilidad de la palabra.

El cálculo del %Alcons se realiza mediante una relación entre el tiempo de reverberación, la diferencia entre campo directo y reverberante y además tiene en cuenta la SNR (relación señal a ruido).

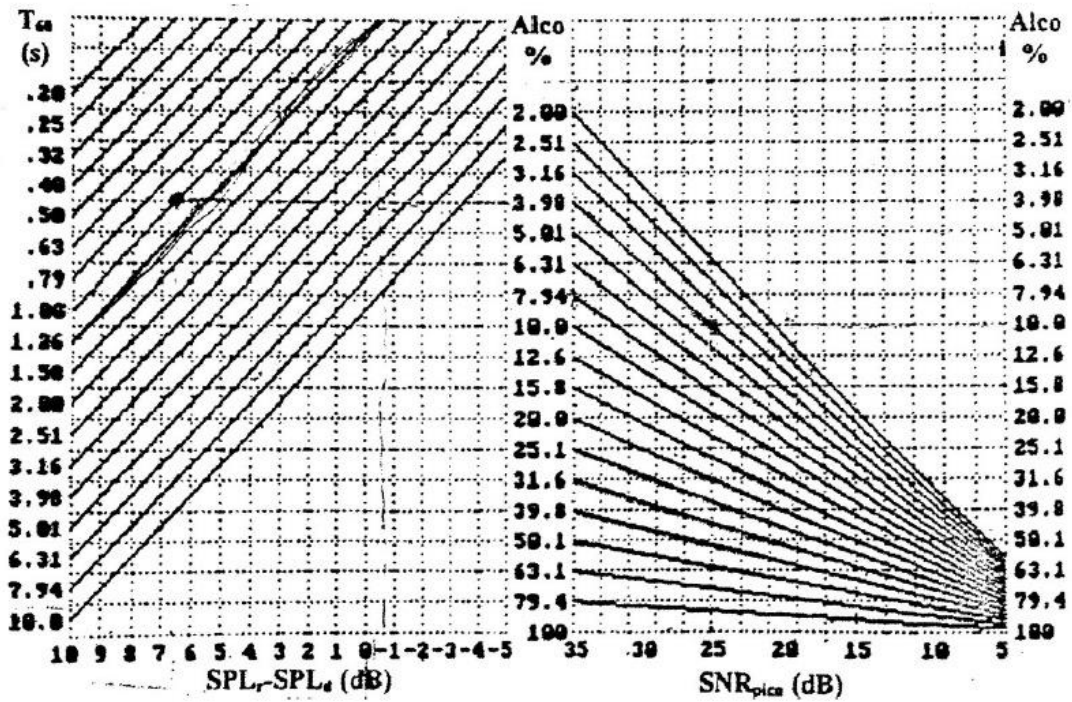


Fig. 9.2. Ábacos necesarios para realizar el cálculo del parámetro %Alcons. [4]

Inteligibilidad	Valores óptimos
Excelente	0% - 3%
Buena	3% - 7%
Aceptable	7% - 15%
Mala	15% - 33%
Inaceptable	≥ 33%

Tabla 9.1. Relación entre sensación de inteligibilidad y el valor de %Alcons.

### 9.1.7. STI

El índice STI es otro parámetro que aporta información sobre la inteligibilidad. Su escala va de 0 (inteligibilidad nula) a 1 (inteligibilidad perfecta). Se trata de un complejo cálculo que tiene en cuenta el tiempo de reverberación y el ruido de fondo.

Inteligibilidad	Valores óptimos
Excelente	0,75 - 1
Buena	0,6 - 0,75
Aceptable	0,45 - 0,6
Mala	0,3 - 0,45
Inaceptable	0 - 0,3

Tabla 9.2. Relación entre sensación de inteligibilidad y el valor de STI.

## 9.2. Simulación de la ocupación del recinto

En el diseño de cualquier recinto orientado a representaciones musicales o teatro, el objetivo principal es que la escucha para el público sea correcta, agradable y clara. Lo ideal sería que un recinto cumpla los objetivos acústicos para todas las situaciones, tanto si están vacíos como si hay público.

La existencia de público puede hacer cambiar las condiciones de propagación del recinto ya que el cuerpo humano se comporta como un material muy absorbente, sobre todo en frecuencias medias y altas. Además de que las personas ocupan un cierto volumen del recinto que se debe tener en cuenta a la hora de calcular el tiempo de reverberación.

Visto esto había que adaptar el modelo realizado del Auditorio El Torreón. Como se ha comentado en el [Apartado 4.3], el recinto está pensado para dos configuraciones, una con el público sentado sobre sillas de plástico y otra menos frecuente con el público de pie. Se decidió comprobar las características del recinto para la primera configuración, es decir con el público sentado, dejando la segunda comprobación como trabajo futuro.

Se realizaron dos modificaciones simples al modelo para simular tanto el volumen ocupado por las personas como la absorción que generan. Para simular el volumen se decidió crear bloques de 1 m de altura (algo menos de la altura media de un adulto sentado, que es 1,20 m) y situarlos en cada escalón de las zonas de audiencia como se muestra en la [Fig. 9.3]. Para aproximar la absorción del público se dotó a estos bloques de un material con coeficientes de absorción y *scattering* producidos por personas sentadas situadas ocupando cada una 1 m<sup>2</sup>.

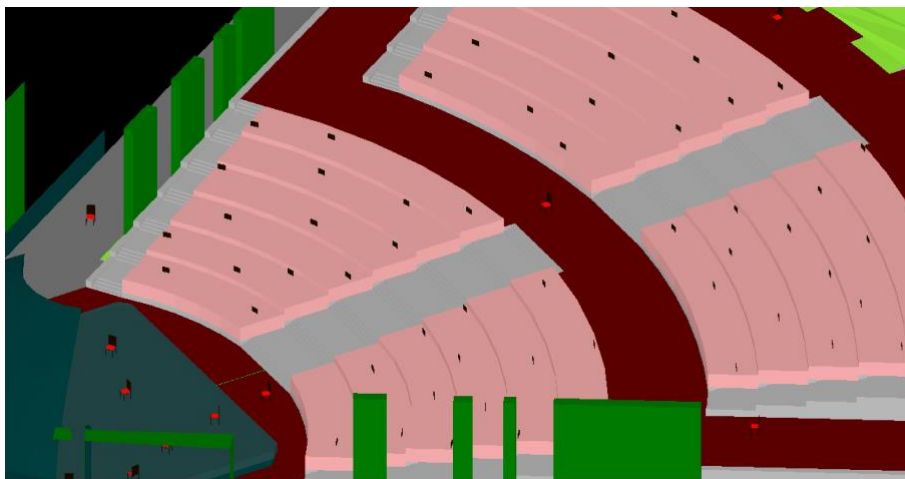


Fig. 9.3. Imagen del modelo que muestra la colocación de los bloques que simulan la audiencia.



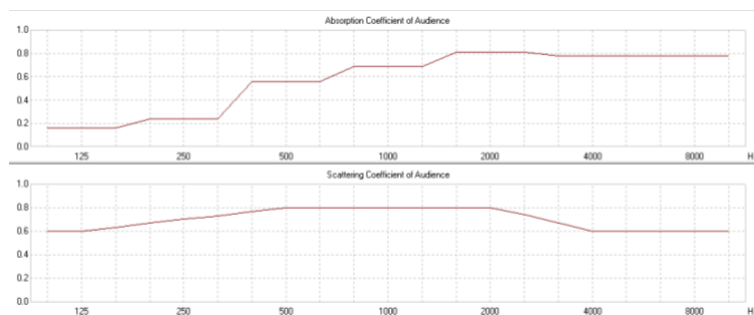


Fig. 9.4. Coeficientes de absorción y *scattering* utilizados para simular la ocupación del público.

### 9.3. Evaluación del Auditorio El Torreón para los distintos tipos de uso

A continuación, se proponen los parámetros a comprobar para cada caso y sus valores óptimos. Se han escogido los valores recomendados para un recinto de grandes dimensiones ocupado y al aire libre. En EASE es necesario configurar una o varias fuentes para poder simular algunos de los parámetros, como por ejemplo el nivel total. No tenía sentido utilizar la fuente omnidireccional como hasta ahora ya que no es una fuente que se vaya a utilizar en un caso real. Se colocó en el centro del escenario una fuente de EASE que simula la voz de un hombre hablando alto, pero los resultados obtenidos eran muy malos. En este punto se decidió simular algún sistema de refuerzo sonoro que se hubiese utilizado en una situación real en el recinto.

Tras conversaciones con los responsables del auditorio, se comprobó que todos los espectáculos en este recinto se realizan con un sistema de refuerzo sonoro, pero no se contaban con datos y configuraciones exactas ya que dependen de la empresa que realice la producción del evento. Ante la imposibilidad de acceder a los mismos, se tomó la decisión de utilizar un sencillo sistema de refuerzo sonoro a modo de ejemplo a pesar de que no era objeto del trabajo. Se introdujo en el modelo un sistema de dos *arrays* de altavoces, uno situado a cada lado del escenario y a una cierta altura, simulando estar en un andamio. Es necesario incidir en que la configuración del mismo, como la orientación, el ángulo de curvatura de las cajas o el nivel de potencia emitido no están optimizados para este recinto y muchas de las propiedades simuladas pueden quedar condicionadas a esta situación. Parámetros relacionados con el nivel dependerán de la configuración de estos *arrays*.

#### 9.3.1. Evaluación del ruido de fondo

Como se ha explicado en el [Capítulo 6], Al final de la realización de todas las medidas en el recinto, se hicieron un total de 8 medidas del ruido de fondo en 5 puntos diferentes del recinto ([Fig. 6.2]).

En la [Fig. 7.3] se muestra el promedio del ruido de fondo calculado para introducir en EASE. En esta tabla podemos observar como la mayor parte del ruido de fondo se acumula en medias y altas frecuencias, como es de esperar. Este tipo de ruido es probable

que proceda de los sistemas de ventilación del polideportivo y el centro comercial aledaños además del que producen los coches al circular por las vías cercanas. Es necesario comentar que el nivel del ruido de fondo no tiene por qué ser constante a lo largo del día. En determinadas horas el tráfico de los alrededores puede ser mayor, puede afectar el ruido de los patios de los colegios situados en las cercanías, etc.

Siempre es importante observar cómo afecta el ruido de fondo en un recinto, pero en el caso de un recinto abierto, es aún más crítico ya que suele ser mayor. Si el nivel de dicho ruido de fondo fuese muy alto, podría enmascarar el sonido producido en dicho recinto por la actividad que se esté desarrollando en un momento concreto.

Para evaluar cómo puede afectar el ruido de fondo a una actividad, existen unas curvas de referencia definidas por la ISO (International Organization for Standardization). Estas curvas se denominan NR (Noise Ratio). Estas curvas marcan el límite que puede alcanzar el espectro de ruido de fondo de un recinto según el uso del mismo. Existe una alternativa, las curvas NC (Noise Criteria) pero no se ha estudiado ya que se utiliza sobre todo en los Estados Unidos.

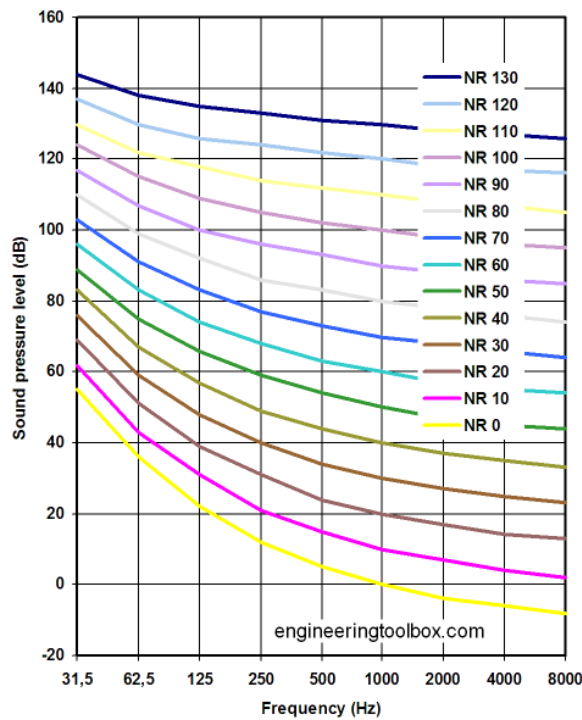


Fig. 9.5. Definición de las curvas NR (Noise Ratio). [21]

Curva NR	32 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
NR 0	55	36	22	12	5	0	-4	-6	-8
NR 10	62	43	31	21	15	10	7	4	2
NR 20	69	51	39	31	24	20	17	14	13
NR 30	76	59	48	40	34	30	27	25	23
NR 40	83	67	57	49	44	40	37	35	33
NR 50	89	75	66	59	54	50	47	45	44
NR 60	96	83	74	68	63	60	57	55	54
NR 70	103	91	83	77	73	70	68	66	64
NR 80	110	99	92	86	83	80	78	76	74
NR 90	117	107	100	96	93	90	88	86	85
NR 100	124	115	109	105	102	100	98	96	95
NR 110	130	122	118	114	112	110	108	107	105
NR 120	137	130	126	124	122	120	118	117	116
NR 130	144	138	135	133	131	130	128	127	126

Tabla 9.3. Nivel de las curvas NR para cada octava.

Curva NR	Aplicación
NR 25	Salas de conciertos, estudios de música e iglesias
NR 30	Hospitales, teatros, cines, salas de conferencia
NR 35	Bibliotecas, museos, colegios, hoteles
NR 40	Restaurantes, discotecas, oficinas, tiendas
NR 45	Centros comerciales, supermercados, cafeterías
NR 50	Imprentas, oficinas con maquinaria
NR 60	Industria con maquinaria ligera
NR 70	Fundiciones e industria con maquinaria pesada

Tabla 9.4. Curvas objetivo para diferentes espacios.

En el caso de este trabajo, todas las medidas se tienen en tercios de octava, pero los valores de las curvas NR están en octavas. Se decidió pasar el espectro de ruido de tercios de octava a octavas.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
RF	47,6	44,3	39,2	35,8	30,6	23,8	18,6

Tabla 9.5. Promedio del ruido de fondo del recinto, en octavas.

La curva NR correspondiente es la primera que quede por encima del espectro del ruido de fondo en todas las frecuencias. En este caso, la curva NR correspondiente fue la NR35. Es una curva de ruido un tanto elevada para los valores recomendados en un recinto orientado a conciertos y teatro, pero tratándose del aire libre, el valor puede ser aceptable.

### 9.3.2. Evaluación del nivel total

Una de las primeras características a estudiar es el nivel recibido en las zonas de audiencia, altamente dependiente del sistema de refuerzo sonoro utilizado. Se deben

estudiar dos condiciones, la primera es que exista un nivel suficiente en el recinto. Se considera nivel suficiente si la SNR (relación señal a ruido o diferencia entre la señal y el ruido) es mayor de 25 dB en todos los puntos del recinto. La segunda condición es el criterio de recubrimiento uniforme, esto quiere decir que la diferencia entre el valor mínimo y máximo de SPL en todas las zonas no debería ser mayor de 6 dB.

Estos valores son correspondientes al nivel continuo equivalente, por ello, se obtuvo el nivel continuo equivalente del ruido de fondo y el nivel continuo equivalente del SPL total en EASE. En la [Fig. 7.3] se muestran los valores del ruido de fondo por tercio de octava. Se calculó el nivel continuo equivalente, obteniendo un valor de 36,68 dB. Esto significa que, para el caso estudiado en este trabajo, el nivel mínimo debería ser de 61,68 dB.

Para obtener un valor único del parámetro Total SPL en EASE, se seleccionó la opción de promediado *broadband*, obteniendo el siguiente mapa.

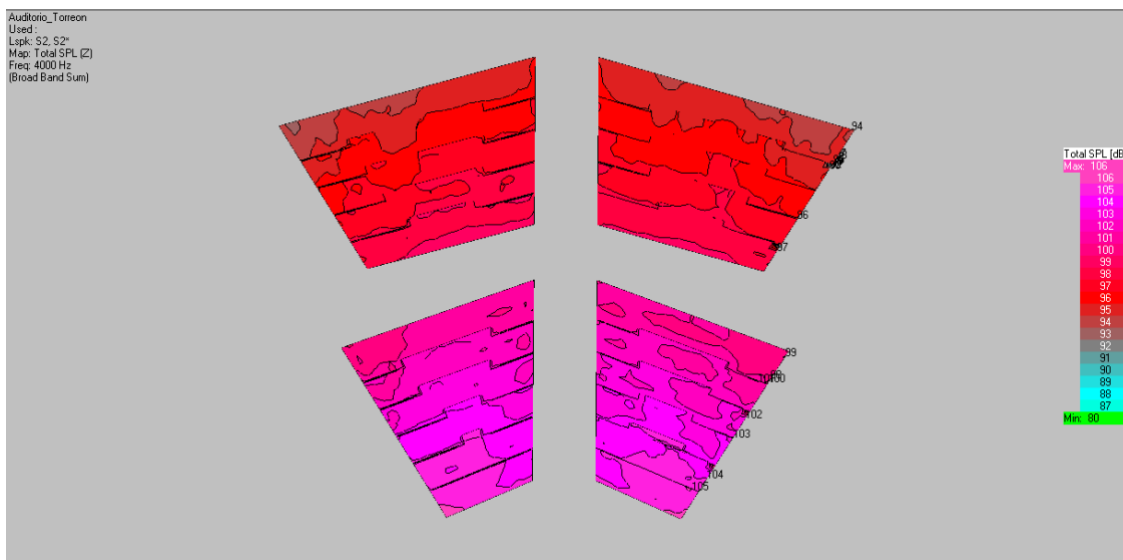


Fig. 9.6. Distribución del nivel total para todas las frecuencias generado en EASE.

Para las zonas de audiencia A y B se tienen valores de SPL entre 100 y 105 dB. Claramente se está por encima del mínimo de 61,68 dB y además se cumple con el criterio de recubrimiento uniforme al ser una diferencia entre máximo y mínimo de 5 dB.

Para el caso de las zonas de audiencia C y D, los valores de SPL se encuentran entre 94 y 98 dB. En estas zonas también se cumple el criterio de nivel suficiente y el criterio de recubrimiento uniforme.

Analizando en conjunto los resultados obtenidos en las 4 zonas de audiencia, está claro que con el refuerzo sonoro configurado a modo de ejemplo, el criterio de nivel suficiente se cumple en todas las zonas, no es así con el criterio de recubrimiento uniforme. Entre el máximo y mínimo absoluto hay una diferencia de 11 dB. Una correcta configuración

de la orientación de los altavoces, podría solucionar este problema de recubrimiento uniforme.

### 9.3.3. Evaluación del tiempo de reverberación

En el caso de un recinto abierto, estudiar el tiempo de reverberación no es tan crítico como estudiarlo en un recinto cerrado. Como se ha visto en capítulos anteriores, en espacios abiertos, el campo reverberante se disipa mucho más rápido que en un recinto cerrado. Teniendo esto en cuenta, se calculó el tiempo de reverberación a partir del parámetro T30 simulado en EASE, tanto para el recinto sin ocupar como con el recinto ocupado.

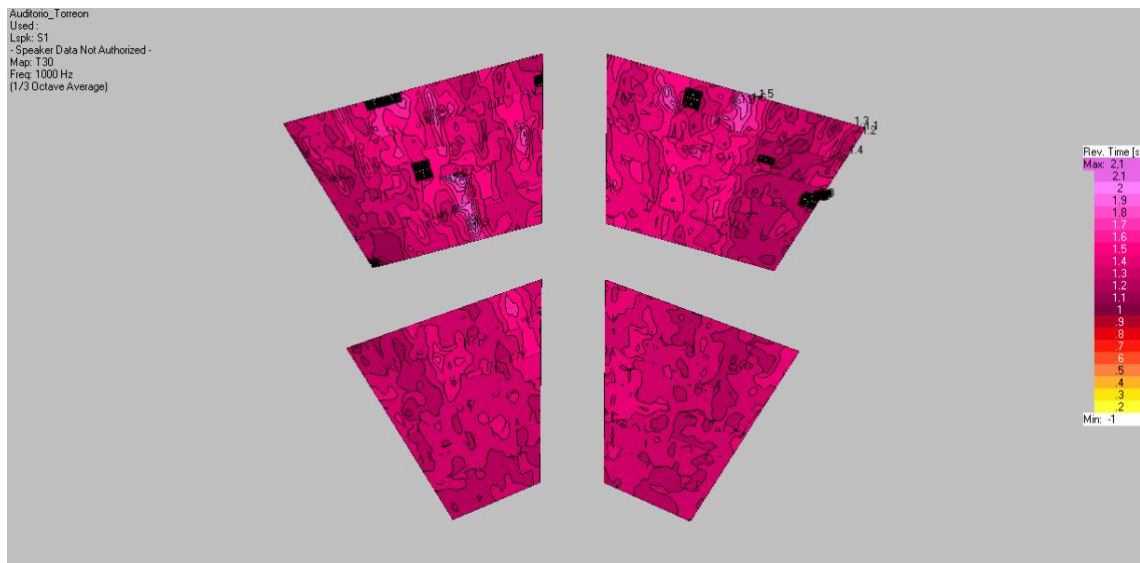


Fig. 9.7. Distribución del parámetro T30 en la frecuencia de 1kHz para el recinto sin ocupar.



Fig. 9.8. Distribución del parámetro T30 en la frecuencia de 1kHz para el recinto ocupado.

<b>Frecuencia</b>	<b>T30 recinto sin ocupar (s)</b>	<b>T30 recinto ocupado (s)</b>
<b>100 Hz</b>	1,31	1,25
<b>125 Hz</b>	1,35	1,48
<b>165 Hz</b>	1,37	1,42
<b>200 Hz</b>	1,38	1,35
<b>250 Hz</b>	1,4	1,34
<b>315 Hz</b>	1,42	1,29
<b>400 Hz</b>	1,42	1,26
<b>500 Hz</b>	1,23	1,06
<b>630 Hz</b>	1,23	1,14
<b>800 Hz</b>	1,27	1,13
<b>1000 Hz</b>	1,27	1,22
<b>1250 Hz</b>	1,31	1,26
<b>1600 Hz</b>	1,26	1,17
<b>2000 Hz</b>	1,23	1,08
<b>2500 Hz</b>	1,17	1,07
<b>3150 Hz</b>	1,11	1,02
<b>4000 Hz</b>	1,02	0,93
<b>5000 Hz</b>	0,91	0,79
<b>6300 Hz</b>	0,87	0,68
<b>8000 Hz</b>	0,66	0,49
<b>10000 Hz</b>	0,46	0,34

Tabla 9.6. Valores del parámetro T30 y RT para el recinto sin audiencia y con audiencia.

Con estos valores se calculó el  $RT_{mid}$  [Ecuación (9.3)] del recinto, obteniendo un valor de 1,25 s para el caso del recinto sin ocupar y 1,14 s cuando el recinto está ocupado. En este segundo caso es algo menor, como era de esperar, debido a la absorción generada por el público.

### 9.3.4. Evaluación del parámetro EDT.

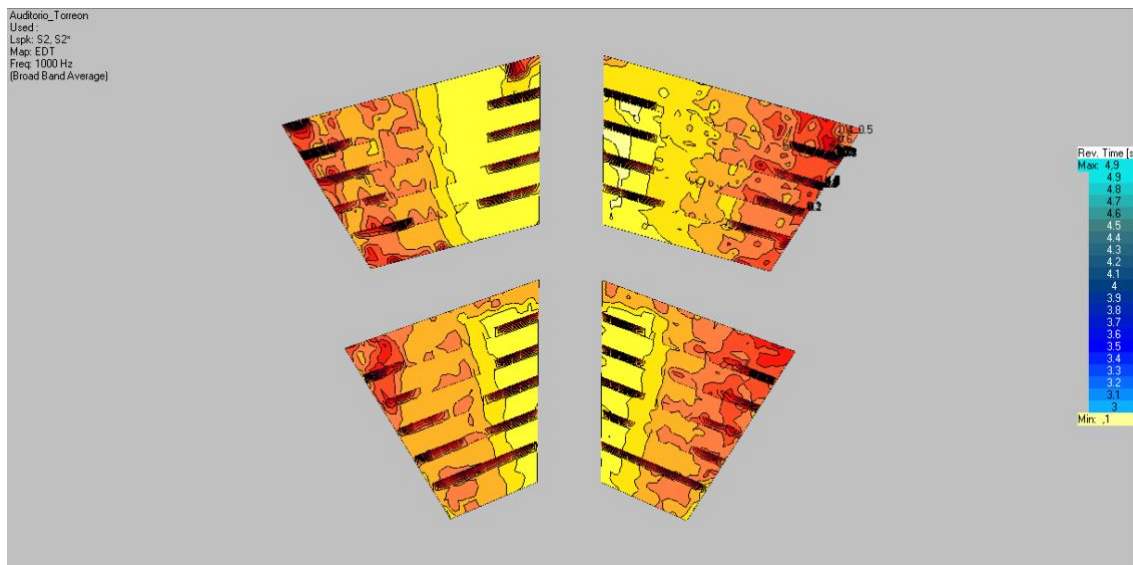


Fig. 9.9. Mapeo del parámetro EDT simulado en EASE para un recinto ocupado.

Aplicando la [Ecuación (9.5)], se obtuvo un valor de  $EDT_{mid}$  de 0,42 s, siendo un valor menor del deseado, que como se ha visto anteriormente, debería ser similar al tiempo de reverberación.

### 9.3.5. Evaluación del parámetro %Alcons

EASE facilita el trabajo con este parámetro, ya que lo calcula automáticamente.

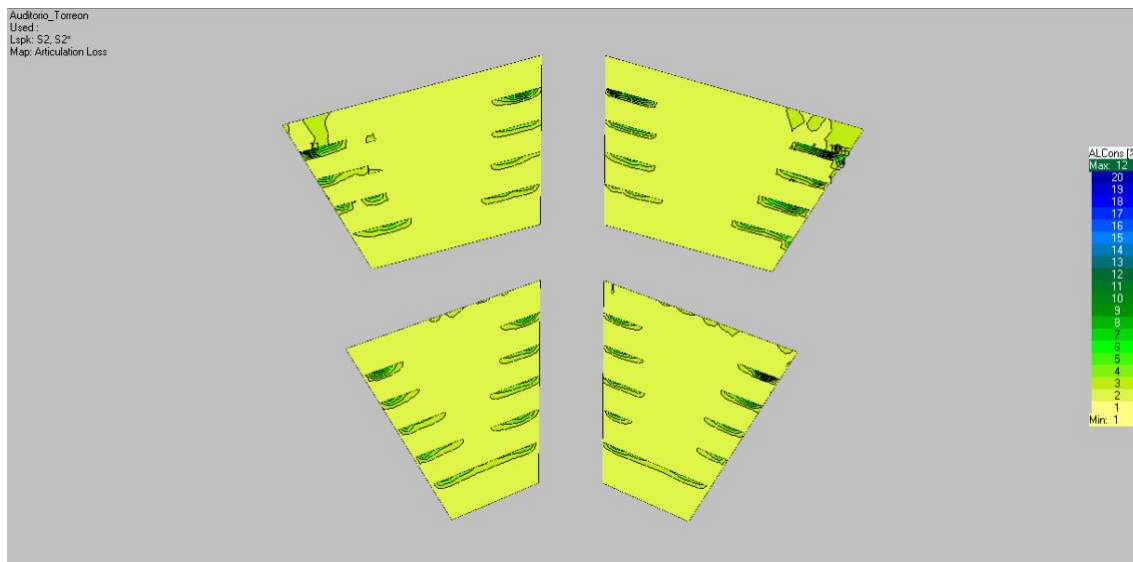


Fig. 9.10. Mapeo del parámetro %Alcons en el modelo del Auditorio El Torreón.

Comprobando la [Tabla 9.1] se confirma que este auditorio bajo el punto de vista del %Alcons cuenta con una excelente inteligibilidad. Se obtuvo un valor medio de 1,71% y con un 90% de los puntos con un %Alcons entre el 1% y el 3%.



### 9.3.6. Evaluación del parámetro STI

En este caso, EASE también lo calcula de forma automática mostrando un mapeo en las zonas de audiencia.

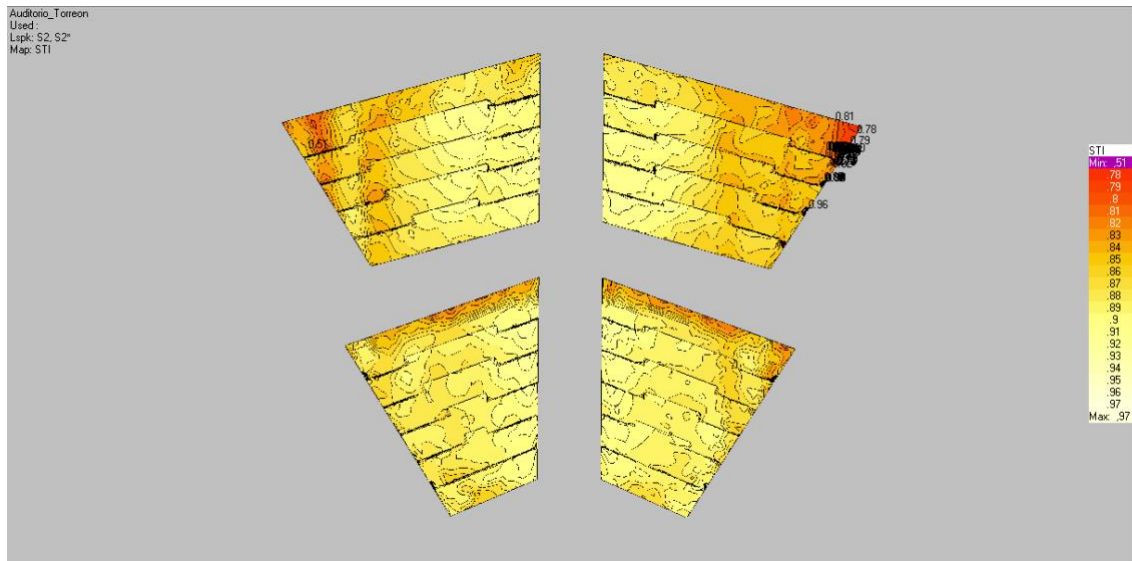


Fig. 9.11. Mapeo del parámetro STI en el modelo del Auditorio El Torreón.

En este caso se obtuvo un valor medio de 0,86 y casi en el 90% de los puntos se superaba el valor de 0,85. Comparando estos valores con la [Tabla 9.2] se llega a la conclusión de que bajo el punto de vista del parámetro STI, la inteligibilidad es generalmente muy buena.

Combinando los resultados obtenidos mediante el parámetro %Alcons y el STI, se puede concluir que la inteligibilidad del recinto en conjunto es excelente.

### 9.3.7. Evaluación de la claridad de la palabra ( $C_{50}$ ) y la claridad musical ( $C_{80}$ )

Mediante EASE se obtuvieron los valores promedio para todo el recinto ocupado de los parámetros  $C_{50}$  y  $C_{80}$ .



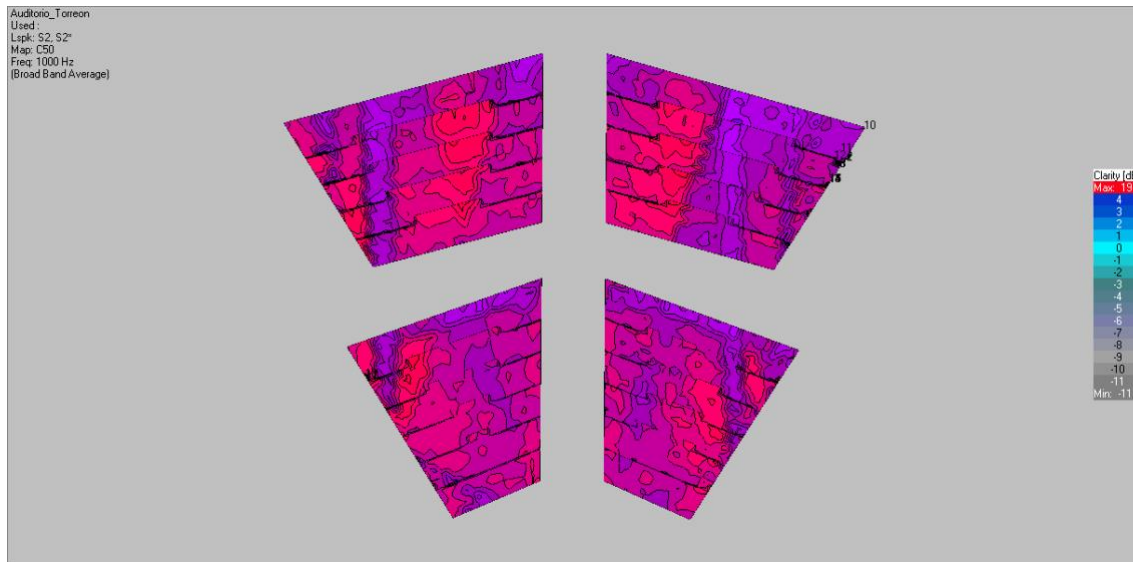


Fig. 9.12. Distribución del parámetro C50 en el modelo del recinto ocupado.

Aplicando la [Ecuación (9.9)] se obtuvo un valor de “*speech average*” de 15,78 dB. Para un recinto al aire libre se recomienda al menos un valor de 3 dB.

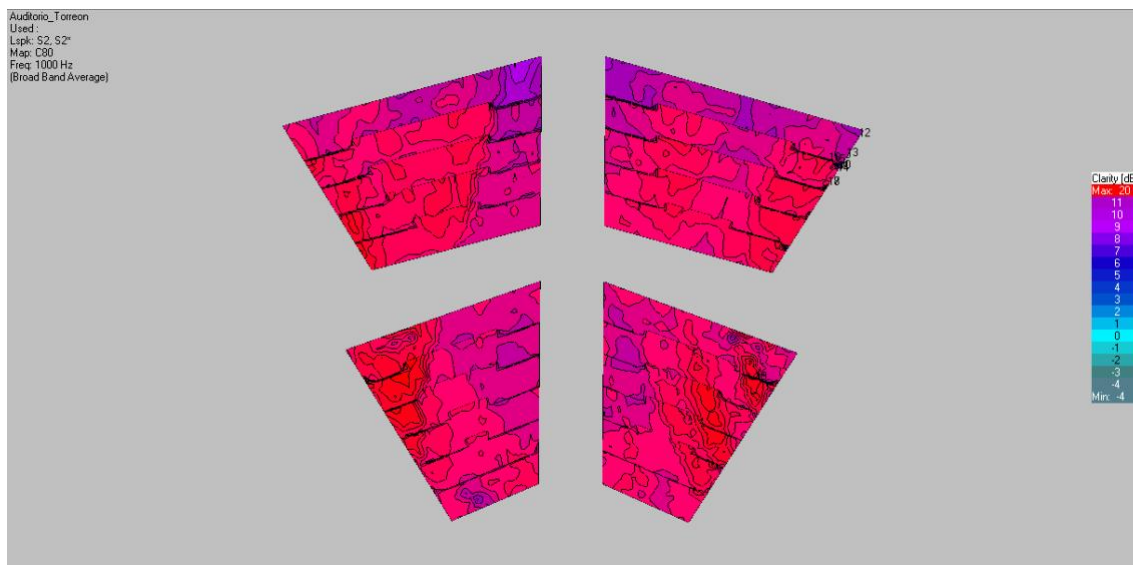


Fig. 9.13. Distribución del parámetro C80 en el modelo del recinto ocupado.

Aplicando el promedio del “*music average*” se obtuvo un valor de 17,31 dB. Para la situación de un recinto abierto se considera un valor bueno, entre -5 dB y +9 dB.

### 9.3.8. Evaluación de la calidez y el brillo

En este caso, EASE no proporciona estos parámetros, pero su cálculo es sencillo a partir del tiempo de reverberación obtenido.

En el caso de la calidez o “*Bass Ratio*”, siguiendo la [Ecuación (9.6)], se obtuvo un valor de 1,24 s. El margen recomendado para tener una buena sensación de graves en el recinto está entre 1,1 y 1,45 s. Por lo tanto, el Auditorio El Torreón en general, aporta a los

oyentes una buena sensación de graves, algo muy importante en las representaciones musicales.

Utilizando la [Ecuación (9.7)] se calculó el brillo, teniendo un valor de 0,88 s. Para los recintos abiertos se supone como valor óptimo cualquiera que sobrepase los 0,87 s. Por lo tanto, se puede considerar como bueno el valor obtenido para el recinto simulado.

## 9.4. Resumen del comportamiento del recinto

### 9.4.1. Evaluación para representaciones musicales

Para el caso de una representación musical, los parámetros más importantes son los siguientes: el tiempo de reverberación; el tiempo de decaimiento temprano; la claridad musical (C80); la calidez y el brillo.

Parámetro	Valor óptimo	Valor simulado
Tiempo de reverberación ( $RT_{mid}$ )	Entre 1,9 y 2,4 s	1,14 s
Tiempo de decaimiento temprano ( $EDT_{mid}$ )	Entre 2 y 2,5 s	0,42 s
Claridad musical (C80)	Entre -5 y +9 dB	17,31 dB
Calidez (BR)	Entre 1,1 y 1,45 s	1,24 s
Brillo (br)	Mayor de 0,87 s	0,88 s

Tabla 9.7. Comparación de los valores óptimos y los simulados para una representación musical en un recinto al aire libre.

A la vista de estos resultados se puede afirmar que el recinto con el sistema de refuerzo sonoro planteado no es adecuado para la realización de conciertos.

### 9.4.2. Evaluación para la palabra y teatro

En este caso los parámetros a tener en cuenta son: el tiempo de reverberación ( $RT_{mid}$ ); la claridad de la palabra (C50) y la definición (D50). Siendo los valores recomendados los mostrados en la siguiente tabla.

Parámetro	Valor óptimo	Valor simulado
Tiempo de reverberación ( $RT_{mid}$ )	Entre 0,7 y 1,2 s	1,14 s
Claridad de la palabra (C50)	Mayor de +3 dB	15,78 dB
%Alcons	Mostrados en [Tabla 9.1]	1,71%
STI	Mostrados en [Tabla 9.2]	0,86

Tabla 9.8. Comparación de los valores óptimos y los simulados para la palabra y el teatro en un recinto al aire libre.

Para este caso, el comportamiento del recinto es ideal para las representaciones teatrales, ya que todos los parámetros relacionados con la inteligibilidad se encuentran en los valores óptimos.

## 10. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Los tres principales objetivos de este trabajo eran: generar un modelo en tres dimensiones del auditorio al aire libre El Torreón, situado en Pozuelo de Alarcón; realizar un ajuste de dicho modelo mediante una serie de mediciones en el propio recinto; y por último comprobar el cumplimiento de los parámetros objetivos para los diferentes usos del recinto.

Los principales problemas para la creación del modelo fueron la falta de información sobre algunas dimensiones y diversos elementos del recinto y, sobre todo, la difícil representación de muchos de ellos (especialmente críticos la concha acústica y la vegetación) en el software de simulación. Las simplificaciones y suposiciones en esta tarea han condicionado los resultados de las siguientes fases. A todo esto, se puede sumar la complicación que genera que las dimensiones del recinto sean tan grandes.

El que esté situado al aire libre ha supuesto que el método de ajuste por niveles elegido en un principio no fuese el idóneo debido a un comportamiento no esperado de la fuente, tal y como se describe en el [Capítulo 8]. Por otro lado, en la zona del escenario, se aprecian fallos en el ajuste, debido seguramente a la aproximación de la curvatura de la concha, mediante varias superficies planas. A pesar de todo esto, las zonas de audiencia, donde es más importante el ajuste, han quedado prácticamente ajustadas.

Con el estudio de los parámetros acústicos simulados en EASE se ha detectado en primer lugar que el criterio de cobertura de nivel no se cumple en la totalidad del recinto, pero sí para las 4 zonas de audiencia individualmente. Esto probablemente se podría remediar optimizando el sistema de refuerzo sonoro que en este caso se ha introducido a modo de ejemplo.

En relación al ruido de fondo, el recinto no se adapta a la curva NR objetivo para el tipo de uso. Es cierto que al tratarse de un recinto al aire libre, el cumplir este requisito es algo más complicado que en un recinto cerrado. A pesar de no cumplir este objetivo, no se ha detectado que el ruido de fondo genere grandes problemas.

En general el recinto no se comporta como se esperaría en la realización de conciertos. El tiempo de reverberación es algo menor de lo ideal, suponiendo esto que el recinto tiene poca sonoridad. El valor tan alto de la claridad musical hace que en el recinto no sea posible percibir con claridad los diferentes sonidos de los instrumentos. Algo que sí se cumple en este caso es el criterio de calidez y brillo. Esto quiere decir que la percepción de los sonidos graves y los armónicos sería correcta bajo este criterio. Algunas de estas características se podrían corregir con una mejora del sistema de refuerzo sonoro. Otras como el tiempo de reverberación no dependen del mismo y su corrección es más complicada.

Por último, en el caso de que en el recinto se realice una representación teatral, el comportamiento va a ser muy bueno. El tiempo de reverberación no es muy elevado, lo

cual ayuda a la inteligibilidad de la palabra. Además, el resto de parámetros que aportan información sobre la inteligibilidad de la palabra en un recinto, como son el %Alcons, STI o la claridad de la palabra, se encuentran en valores óptimos para un recinto al aire libre. Todo en conjunto hace que el recinto sea muy adecuado para realizar representaciones teatrales.

Es necesario aclarar que estas conclusiones están condicionadas por las simplificaciones y suposiciones tomadas en el recinto, los problemas generados por la fuente omnidireccional y por la elección del sistema de refuerzo sonoro a modo de ejemplo.

Dicho todo esto, queda disponible un recinto muy complejo que propone diferentes líneas de trabajo futuras, tomando como base todo lo expuesto en esta memoria y el modelo generado en EASE.

- Sería de mucho interés realizar un modelo con mayor detalle, sobre todo en la parte de la concha (aproximando mejor la curva) y en los laterales y la parte trasera con los pasillos de acceso al torreón. En los puntos situados en estas zonas es donde el ajuste ha sido más complicado y no del todo preciso. Realizar mejor el diseño de estas partes podría mejorar resultados en el ajuste, principalmente en los puntos situados en el escenario. Podría incluirse también una simulación del recinto ocupado para la configuración de la audiencia de pie.
- Para evitar el problema comentado en el [Capítulo 8] de la memoria, se puede intentar realizar el ajuste mediante algún método que utilice magnitudes relativas. Se propone realizarlo mediante el estudio del tiempo de reverberación. El nivel de la fuente sería indiferente, siempre y cuando haya nivel suficiente para poder apreciar una caída suficiente una vez se desconecta la fuente. Seguramente con este método, el ajuste sería mucho más preciso, sobre todo para las altas frecuencias.
- Adicionalmente, se podría proponer una configuración de un sistema de refuerzo sonoro optimizada para este recinto.

## 11. MARCO REGULAR Y ENTORNO SOCIO-ECONÓMICO

### 11.1. Marco regulador

Las normativas más importantes utilizadas durante la realización del proyecto, estaban relacionadas principalmente con la realización de medidas y cálculos.

Entre ellas se encontraba la UNE-EN ISO 3382-1. Se trata de la primera parte de la Norma “Medición del tiempo de reverberación de recintos con referencia a otros parámetros acústicos”. Concretamente, la primera parte trata de “Medición de parámetros acústicos en salas de espectáculos”. Se utilizó como referencia a la hora de elegir los parámetros a medir y sobre todo la obtención de índices únicos de dichos parámetros.

A la hora de realizar las correcciones de las medidas tomadas en el recinto se utilizó como referencia el Real Decreto 1367/2007. Este Real Decreto detalla métodos para corregir medidas contaminadas con ruido de baja frecuencia, impulsivo o con componentes tonales. A su vez, para las correcciones de ruido de fondo, se acudió a la Norma UNE-EN ISO 1996-2:2009, “Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental. Parte 2: Determinación de los niveles del ruido ambiental”. Aquí se describe cuando se deben corregir las medidas por ruido de fondo y cómo hacerlo.

Por último, se utilizó la Norma ISO 9613-2:1996. “Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 2: General method of calculation”. En esta Norma se detallan todos los elementos que generan una atenuación del sonido en la propagación al aire libre. Además, aporta detalles de cómo calcular numéricamente su efecto.

### 11.2. Presupuesto

A continuación, se muestra un presupuesto orientativo en el caso de la realización de este proyecto. Se incluyen costes en mano de obra y en equipamiento, con su correspondiente amortización.

Item	Coste	Unidades	Amortización	TOTAL
Licencia Software de simulación EASE	1760 €	1	4%	70,40 €
Licencia del módulo AURA para EASE	800 €	1	2%	16 €
Metro láser	140 €	1	1%	2,80 €
Fuente dodecaédrica DO12 de Alava Ingenieros	2590 €	1	2%	51,80 €
Analizador sonoro 2250 Light de Brüel and Kjaer	7770 €	2	2%	310,80 €
Generador de ruido RG16 de la marca FALM	359 €	1	2%	7,18 €
Amplificador de potencia CA6 de Crest Audio	1432 €	1	2%	28,64 €
				487,62 €

Tabla 11.1. Costes materiales para la realización del proyecto.

Además de estos elementos se hizo uso de Excel (mediante una licencia gratuita como estudiante de la UC3M) y del software gratuito de Brüel and Kjaer necesario para extraer las y procesar las medidas realizadas con el analizador sonoro.

Item	Coste por hora	Nº de horas	Nº personas	TOTAL
Ingeniero encargado del diseño y análisis	20 €	640	1	12.800 €
Ingeniero presente durante las medidas in situ	20 €	7	4	560 €
				13.360 €

Tabla 11.2. Costes de mano de obra para la realización del proyecto

En total, la realización del proyecto de principio a fin tiene un coste total de 13.847,62 €.

### 11.3. Entorno socio-económico

El estudio de las características acústicas del Auditorio El Torreón permite descubrir las fortalezas y debilidades que posee el recinto actualmente. Gracias a esto es posible mejorar las condiciones de escucha en todo el recinto para que la mayor parte de los espectadores reciban un sonido de mayor calidad. Mejorar las capacidades acústicas del recinto puede conseguir atraer a más artistas, para así crear una mayor oferta cultural al aire libre y atraer a más espectadores.

Con esto se genera un impacto socio-económico grande en la localidad de Pozuelo de Alarcón y municipios de la zona noroeste de Madrid. Debido al gran aforo del recinto, un mayor número de personas podrán acceder a diversos espectáculos culturales en un entorno al aire libre.

Esto genera un impacto socio-económico muy grande debido a todo el personal necesario para producir eventos de este tipo o por la venta de entradas. Y no cabe duda de que los establecimientos hosteleros de la zona también se verían beneficiados por la afluencia de público al auditorio.

Por otra parte, un mayor aislamiento acústico del auditorio y el aumento del conocimiento sobre el mismo, pueden conseguir disminuir la molestia que producen los espectáculos a los vecinos de las parcelas vecinas. Esto aporta una mejora a la calidad de vida de estos vecinos y además podría reducir el número de denuncias recibidas por el Ayuntamiento, con el consecuente impacto económico que esto supondría.

## ANEXO A: EXTENDED ABSTRACT

The main objective of this work is to create a 3D model of the Auditorio El Torreón, then adjust this model based on some measurements in situ and finally a study of the acoustical characteristics.

Prior to this work, there were some similar projects on different venues, both at the UC3M and at other universities. In this case, the auditorium is a large outdoor space. The challenge of the complexity of the enclosure made it be chosen for this Project.

### A.1. Sound propagation on outdoors

The sound propagation changes radically between a closed room and an open-air space. First of all, on outdoors, there is no diffuse field. There are fewer reflections and dissipate faster due to the effect of the atmosphere. In these cases, the attenuation of sound is marked by some elements like the spherical divergence, the absorption produced by the atmosphere, the climatic conditions, the ground or obstacles like vegetation.

The SPL (Sound pressure level) produced by a certain sound source in a certain point is determined by the power level of the source, its directivity index, the spherical divergence, the atmospheric absorption and also the excess attenuation. This excess attenuation consists in the attenuation produced by the weather conditions, like the wind, the ground characteristics or the vegetation.

The spherical divergence produces an attenuation of 6 dB as the distance doubles. The atmospheric absorption depends on the temperature, the humidity and the distance between the source and the receptor. At small distances, there is a high attenuation at high frequencies. If the distance increases, the effect of this absorption becomes evident throughout the frequency range.

The weather conditions are included in the excess attenuation like it is said before. The temperature is directly related to the calculation of the speed of sound and also affects the election of the air absorption coefficient. In addition, the existence of vertical gradients of temperature generates different effects on the propagation of sound. If the gradient is negative, meaning the temperature decreases as the height increases, the sound waves tend to bend upwards in all directions, creating areas of acoustic shadow. In the opposite scenario, the temperature increases as the height increases, it is a positive gradient. In this situation, the propagation of the sound will be better because the sound waves will tend to tilt downwards.

In the case of wind, if the direction of sound propagation coincides with the direction of the wind, the speed of sound and the wind speed add up. The sound waves are refracted towards the ground, and this increases the maximum propagation distance. If the wind is against the direction of sound propagation, the sound waves will tend to bend upwards, leaving zones with an attenuation of up to 20 dB.

The humidity is also crucial to calculate the atmospheric absorption. The more humidity there is in the environment, the lower the air absorption coefficient is, therefore, the attenuation produced by the atmosphere will be less.

The characteristics of the soil and its properties are vital to understand the reflection of sound. Generally, the surfaces are not completely reflective, they usually absorb a certain amount of energy from the incident wave, thus attenuating the reflected wave. Also, when the angle of incidence is small, or the sound has low frequencies, some surfaces can behave as transmitters by vibration.

The presence of vegetation, especially if it has a considerable depth, and depending on the dimensions and the situation, can attenuate the sound up to 6 dB. Because of this, vegetation is usually placed around some roads to reduce noise in the vicinity. In a similar way, other types of obstacles like walls can affect the sound propagation.

## **A.2. Outdoor theatres**

The first constructions prepared for theatrical performances date from the 3rd century BC. These were built by the Greeks on the slopes of the mountains. These theatres had impressive acoustic characteristics, in spite of the last rows located about 70 meters from the stage, the sound was perceived and understood correctly. Under normal conditions, a person's voice cannot reach more than 45 meters away without losing intelligibility. But after conducting numerous studies and simulations the factors that improve the propagation of sound in these enclosures and justify the reach of 70 meters, has been given.

There are two key factors, one the low ambient noise present in these theatres and the other the good handling of sound reflections. These theatres were normally located in areas of very low environmental noise, on hillsides surrounded by a lot of vegetation. Also, the situation of the steps in the form of a ladder, in addition to allowing good visibility, worked as a high pass filter, thus attenuating the low frequencies and with it the possible external noise.

The stage was at a certain height regarding the orchestra. This made the sound waves coming from the actors, bounced in the orchestra and went out to the audience. These were first order reflections (with a delay of less than 50 ms compared to the direct sound). The energy of this type of reflections is added to the energy of the direct sound, making the total energy received greater, in addition, this does not cause a decrease in the intelligibility.

In the times of the Romans, the theatres underwent some changes. The opening angle of the stands was 180°, being somewhat lower than in the case of the Greek theatres that reached 210°. Frequently the tiers were attached to the proscenium on the sides, leaving only the upper part open. These spaces were smaller and the acoustic conditions were not



as good as in the theatres of ancient Greece. Sometimes in the orchestra, due to the authorities of the time sat there, it made the reflections in it disappear.

The site under study in this work has an area of 8500 m<sup>2</sup> and is outdoors. It belongs to the City Council of Pozuelo de Alarcón, Madrid. In this auditorium, they are represented from symphonic concerts or theatrical performances to the summer cinema. Depending on the type of show, the audience stands upright throughout the entire venue or they place plastic chairs to sit on. Additionally, special scaffolding for lighting or sound is placed in certain occasions, thus modifying the original configuration of the enclosure. To generate the initial model, the empty enclosure has been assumed, without chairs and without any additional element on the stage.

### **A.3. Model generation**

From the plans of the enclosure and some additional measurements made directly in the auditorium with a laser meter, the generation of the model in three dimensions was started with the software EASE (Enhanced Acoustic Simulator for Engineers). In this model, several simplifications were made due to lack of information or limitations of the program itself.

The vegetation in the enclosure was simulated by placing rectangular blocks of the approximate dimensions of the tree and shrub assemblages and they were provided with a material with the absorbent characteristics of the trees.

The software to perform the different simulations needs the model to be closed and calculate the volume. Therefore, an alternative solution was looked into to simulate the behavior of the open air. The decision made was to place a very high ceiling and assign to the surfaces that would be air, a material with a total absorption coefficient.

The auditorium stage has a circular acoustic shell, but the software only supports flat faces. It was necessary to approximate the curvature of the shell by successive flat surfaces.

At the end of the enclosure there is a characteristic element, a tower. The height and some details such as the upper dome were tried to approximate since it was not possible to access to measure it and this information did not appear in the plans. This was not a major problem since its influence in the audience areas was minimal.

Once the construction of the model was completed, 81 measurement points were inserted, the 22 audience zones divided into 4 main zones.

#### **A.4. On-site measurements**

Because of the lack of knowledge of the characteristics of the materials and the simplifications made in the model, it was necessary to make a number of measurements in the enclosure in order to calibrate the model.

It was decided to carry out several measurements of the sound pressure level received in a number of points distributed throughout the enclosure, being the density of the points in the audience areas greater. To perform this type of measurement it is necessary to excite the enclosure with an omnidirectional source reproducing a stationary noise such as pink noise with enough power to receive a good level at all points.

Some background noise checks were made because at the time of the measurements there was an impulsive noise coming from the works carried out in a nearby plot. It was verified that it did not affect the measurements since the level produced by the source masked the noise coming from the works in all the points of the enclosure.

All the measurements were made, including the background noise necessary for the EASE software. Later, in the anechoic chamber of the UC3M, the level measurement generated by the source was measured at 1 m distance in free field, this fact is mandatory to configure the source in EASE.

After all this, the measurement positions and the source of its data were replicated in the previously generated three-dimensional model to be able to start with the calibration of it.

#### **A.5. Model adjustment**

After dumping all the measurements made in the enclosure and in the anechoic chamber, the calculations and corrections necessary to begin the adjustment were processed and carried out.

The adjustment consists in matching the measurements made in the enclosure with the measurements provided by EASE for each of the 81 points taken in the enclosure. To endorse a measure, all bands of a point should be between -3.5 dB and +3.5 dB in relation to the measurement made in the theatre. To achieve this, it was necessary to assign the materials to the surfaces of the model and modify them to match the measurements.

This process was one of the longest and most complex of the entire project along with the modeling of the enclosure with EASE. This is due to the total lack of knowledge of the characteristics of the materials used in the construction of the enclosure and the frequency dependence of these characteristics. This iterative process involved changing small data and carrying out simulations until adjusting all the zones. During this process, a systematic error in the adjustment was detected from the frequency of 1 kHz. After numerous attempts to correct the error by modifying the materials, the hypothesis made was that the directivity of the source might not be totally omnidirectional in an outdoor

enclosure. A series of detailed checks of the source directivity were made later and confirmed the theory, this will be detailed in this same annex later on. The values of the SPL at 1 m introduced at the beginning of the adjustment were modified, and the process of modifying the materials was followed.

Despite not adjusting 100% of the points, the adjustment was considered good with 45% of the adjusted points in all its frequencies, and the total percentage of adjusted frequencies per point amounted to almost 90%. These small imbalances can be justified in different ways explained in the following lines. The anomaly of the directivity of the source in high frequency made it impossible to adjust several of the points without mismatching others in these frequencies. The simplification of the acoustic shell probably generated the problem of adjustment in the scenario due to reflections. In the points located at the end of the enclosure, there were large errors probably caused by the poor precision of the model in this area, since it was more interesting to have the model adjusted in the audience areas. Other simplifications such as the estimation of the meteorological conditions at the time of carrying out the measurements could also affect.

Finally, the choice of the acceptance margin should perhaps be studied in more depth, taking into account more sources of uncertainty. Despite all these issues, the results of the adjustment were good enough to study the acoustic behavior of the enclosure.

## **A.6. Source directivity**

As mentioned before, during the adjustment process, a systematic error was detected in the measurements and the main hypothesis has a possible anomaly in the directivity of the omnidirectional source.

The omnidirectional source consists of 12 directing loudspeakers that, combined in a dodecahedron, ensure that the source as a whole has an omnidirectional directivity and is suitable for insolation and reverberation time measurements. It was thought that there was the possibility that in an outdoor enclosure, where there is no diffuse field, the orientation of the source regarding the microphone could influence the levels measured in medium and high frequency, where the source is less omnidirectional.

To verify this, a number of measurements were proposed in the anechoic chamber. They consisted in measuring the level of the source for different heights and rotations of it. When checking the results of all these measurements, it was detected that up to 1000 Hz, all the spectra were practically the same, but from this frequency, the position of the source generated different results. This caused that the source orientation used in the measurements completed in the enclosure was key. As this information was not available and EASE only allows a unique spectrum value for the source, the average of all measurements made in the anechoic chamber for different heights and rotations was performed.

Taking all this into account, the initial theory was confirmed, there would be points that would be impossible to adjust without mismatching others. Even so, this was the compromise solution chosen.

## A.7. Conclusions

To perform a study of the acoustic characteristics of the enclosure without performing all the measurements in situ, the simulation of the model adjusted in EASE was used using the AURA module. As the enclosures are oriented to the enjoyment of the spectators, it was necessary to study the acoustic parameters of the occupied enclosure. To do this, the occupation of the site had to be simulated in order to subsequently carry out the appropriate simulations. To achieve this, blocks were generated in the stands simulating the volume occupied by the people seated configured with the absorption of the human body.

EASE needs at least one source in the model to be able to simulate some of the parameters. It did not make sense to use the omnidirectional source since it is used only to make the measurements. As an example, two line array were used as sound reinforcement, one of each placed on each side of the stage at a certain height, simulating that they were on scaffolding.

In an enclosure, there are two mandatory requirements related to the total level received in the audience zones. One is to have an SNR of at least 25 dB at all points. In the case of the enclosure under study, this minimum level was 61.68 dB. Analysing the results of the simulations, it was found that in all areas the total level exceeded this value. The other condition is to have a difference of less than 6 dB between all the points of the enclosure. In this case, the difference between the minimum level obtained and the maximum level exceeded 6 dB, failing the standard of uniform coverage. This could probably be solved by optimizing the reinforcement system used in the enclosure.

In terms of reverberation time, a value of 1.14 s was obtained. This value is sufficient for a theatrical performance but it is not enough for the case of a concert since a low value of reverberation time makes the venue has less sonority.

In terms of intelligibility, the %Alcons and STI parameters were studied. For the first one, an average value of 1.71% was obtained, and for the STI, an average of 0.86. These values are excellent and make the enclosure have a high intelligibility of the word. Any value that exceeds 3 dB is also considered as a good value of clarity of the word (C50). In the case of the simulation, a value of 15.78 dB was obtained, thus fulfilling the objective.

In addition to these parameters, others were simulated related to musical representations such as musical clarity or warmth and brightness. In the case of musical clarity (C80), a value of 17.31 dB was obtained, much higher than the recommended maximum of 9 dB. On the other hand, the parameters of warmth and brightness are within the target range, obtaining values of 1.24 s and 0.88 s respectively. These ones generate a good feeling of bass and a good appreciation of the harmonics.

In summary, the results obtained for the representation of the word are ideal, but for the case of concerts, the compound a priori would not behave so well. It should be clear that these results are conditioned to the adjustment, simplifications and assumptions made. In

addition, the sound reinforcement system, proposed as an example, is not optimized for this enclosure.

All things considered, a very complex enclosure is available and it can be proposed different lines of future work, based on everything described in this report and the model generated in EASE.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Antoni Carrión Isbert. *Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos*. Primera edición. Barcelona: Edicions UPC, 1998.
- [2] AFMG. EASE FAQ. Disponible en: <http://ease.afmg.eu/index.php/ea-faq-all-en.html>.
- [3] Luis Antonio Azpicueta Ruiz. Apuntes de la asignatura Campos electromagnéticos.
- [4] Luis Antonio Azpicueta Ruiz. Apuntes de la asignatura Sistemas electroacústicos y sonorización.
- [5] Luis Antonio Azpicueta Ruiz. Apuntes de la asignatura Instrumentación acústica y control de ruido.
- [6] Ayuntamiento de Pozuelo de Alarcón. Planos del auditorio el Toreón.
- [7] Pedro de Los Reyes Sánchez, “Estudio y simulación acústica del Auditorio de la Universidad Carlos III de Madrid”, trabajo fin de grado, Departamento de Teoría de la Señal, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés.
- [8] Aitor Montes Odriozola, “Sonorización del Polideportivo Ignacio Pinedo”, trabajo fin de grado, Departamento de Teoría de la Señal, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés.
- [9] José Luis Sánchez Bote, *Altavoces: Características, filtros de cruce y bocinas*.
- [10] *Medición de Parámetros Acústicos en Recintos Parte 1: Salas de Espectáculos*, AENOR. UNE-EN ISO 3382-1:2010.
- [11] *Zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas*, REAL DECRETO 1367/2007.
- [12] AFMG. EASE User’s Guide and Tutorial. Disponible en: [http://www.afmg-support.de/SoftwareDownloadBase/AFMG/EASE/EASE\\_4.3\\_Tutorial\\_English.pdf](http://www.afmg-support.de/SoftwareDownloadBase/AFMG/EASE/EASE_4.3_Tutorial_English.pdf).
- [13] *Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 2: General method of calculation*, ISO 9613-2:1996.
- [14] Alava Ingenieros. “Datasheet Fuente dodecaédrica DO12”. Disponible en: **¡Error! Referencia de hipervínculo no válida.**
- [15] Messelektronik Ulrich FALM. “Datasheet Generador de ruido RG16”. Disponible en: <http://www.falm.de/wp-content/uploads/RG16-and-RG16F-Product-Data-english.pdf>
- [16] Andrzej GOŁAŚ, Katarzyna SUDER-DEBSKA. *Multi-Channel System for Sound Creation in Open Areas*. AGH University of Science and Technology. 2012.

- [17] Nicolás Andrés Bastián, Alexis Campos. *Caracterización acústica de superficies a través de coeficientes de absorción, difusión y dispersión*. Paper publicado en el IX Congreso Iberoamericano de Acústica. 2014.
- [18] Ethan Winer, “Front Wall absorption”, *Real Traps*. [En línea]. Disponible en: [https://realtraps.com/art\\_front-wall.htm](https://realtraps.com/art_front-wall.htm)
- [19] J. S. Lamancusa, “Outdoor Sound Propagation”, *Engineering Noise Control*. [En línea]. Disponible en: [http://www.mne.psu.edu/lamancusa/me458/10\\_osp.pdf](http://www.mne.psu.edu/lamancusa/me458/10_osp.pdf)
- [20] Ronny Siegel, Andrew Barclay, “Santuario de Esculapio en Epidauro”, *Viaje al Patrimonio*. [En línea]. Disponible en: <http://viajealpatrimonio.com/listing/santuario-esculapio-epidauro/>
- [21] “NR – Noise Rating Curve”, *The Engineering Toolbox*. [En línea]. Disponible en: [https://www.engineeringtoolbox.com/nr-noise-rating-d\\_60.html](https://www.engineeringtoolbox.com/nr-noise-rating-d_60.html)
- [22] Lindsay Hannah, “Wind and temperature effects on sound propagation”, artículo del paper *Factors affecting outdoor sound propagation*. Massey University. 2006.
- [23] Jhennifer A. Amudson, “Image collection for Greece”, *Jhennifer A. Mudson, architectural historian*. [En línea]. Disponible en: <http://jhenniferamundson.net/arc-231-2/arc-231-image-collection/arc-231-image-collection-for-greece/>
- [24] Diego Fernando Hidalgo Patiño. “Medición y análisis de parámetros acústicos en diez salas de concierto y teatros de Bogotá”, paper publicado en las *Primeras jornadas regionales de acústica*, Rosario, Argentina. 2009.
- [25] Nebraska Acoustic Group, “Warmth and Brilliance”, *concerthalls.org*. [En línea]. Disponible en: [http://www.concerthalls.org/?page\\_id=90](http://www.concerthalls.org/?page_id=90)
- [26] Zühre Sü and Semiha Yilmazer, “The Acoustical performance Analysis of Bilkent Amphitheater: Proposal for Acoustical Renovation”. Disponible en: <http://www.mezzostudyo.com/medya/pdf/961369488720.pdf> . 2005