



UNIVERSIDAD DE LEÓN



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

MÁSTER EN
INGENIERÍA ACÚSTICA Y VIBRACIONES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

OPTIMIZACIÓN DEL PROYECTO ACÚSTICO DE UN
RECINTO MULTIUSOS

Autora:

Dña. Roberta Maria Capra

Tutor Académico:

Dña. María Machimbarrena

Colaboradores:

D. Ángel Arenaz Gambau

D. Daniel Bravo Arranz

Valladolid, Julio de 2013



UNIVERSIDAD DE LEÓN



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

MÁSTER EN
INGENIERÍA ACÚSTICA Y VIBRACIONES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***OPTIMIZACIÓN DEL PROYECTO ACÚSTICO DE UN
RECINTO MULTIUSOS***

Autora:

Dña. Roberta Maria Capra

Tutor Académico:

Dña. María Machimbarrena

Valladolid, Julio de 2013

INDICE

ANTECEDENTES	pag. 5
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	pag. 6
2. DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS BAJO ESTUDIO	pag. 7
3. PARÁMETROS Y SOFTWARE UTILIZADOS	pag. 15
4. METODOLOGÍA OPERATIVA	pag. 25
4.1. Análisis de la normativa de aplicación	pag. 26
4.2. Establecimiento de objetivos específicos a cumplir	pag. 27
4.3. Estudio acondicionamiento acústico inicial y evaluación del cumplimiento de objetivos	pag. 29
4.3.1. Aula 1	pag. 29
Estudio del condicionamiento acústico (Odeón, CTE, Placo)	
Evaluación de cumplimiento de objetivo y conclusiones preliminares	
4.3.2. Aula 2	pag. 39
Estudio del condicionamiento acústico (Odeón, CTE, Placo)	
Evaluación de cumplimiento de objetivo y conclusiones preliminares	
4.3.3. Sala polivalente	pag. 49
Estudio del condicionamiento acústico (Odeón)	
Evaluación de cumplimiento de objetivo y conclusiones preliminares	

4.4. Propuestas de mejora y optimización del acondicionamiento	pag. 59
4.4.1. Aula 1	pag. 59
Propuestas de mejoras del acondicionamiento acústico (Odeón, CTE, Placo)	
Evaluación de cumplimiento de objetivo y conclusiones	
4.4.2. Aula 2	pag. 81
Propuestas de mejoras del acondicionamiento acústico (Odeón, CTE, Placo)	
Evaluación de cumplimiento de objetivo y conclusiones	
4.4.3. Sala polivalente	pag. 100
Propuestas de mejoras del acondicionamiento acústico (Odeón)	
Evaluación de cumplimiento de objetivo y conclusiones	
4.5. Estudio del aislamiento acústico inicial y evaluación del cumplimiento de objetivos	pag. 147
Estudio del aislamiento acústico entre las aulas (CTE)	
Evaluación de cumplimiento de objetivos y conclusiones	
4.6. Propuestas de mejora y optimización del aislamiento entre aulas	pag. 149
Propuestas de mejoras del aislamiento acústico entre aulas	
Evaluación de cumplimiento de objetivos y conclusiones	
5. VALORACIÓN DEL TRABAJO Y CONCLUSIONES	pag. 156
6. ÍNDICE DE TABLAS, FIGURAS Y GRÁFICOS	pag. 158
7. BIBLIOGRAFIA	pag. 162

ANEXO A	pag. II
Planos	
ANEXO B	pag. VIII
Recopilación de datos obtenidos “in situ”	
Acondicionamiento acústico del aula 1	
Acondicionamiento acústico de la sala polivalente	
Aislamiento acústico entre aulas	
ANEXO C	pag. XXIX
Inmisión de ruidos en exteriores e interiores	

ANTECEDENTES

El trabajo fin de máster forma parte de la titulación del máster. En este caso he optado por la modalidad de desarrollar el TFM en la empresa Audiotec.

La empresa se localiza en el Parque Tecnológico de Boecillo y ofrece servicios dentro del campo de acústica aplicada, con desarrollo de productos propios, para el control del ruido en el sector industrial, de la construcción y medio ambiental.

Se ocupa de la realización de mapas del ruido, estudios acústicos, mediciones e informes acústicos, instalación y mantenimiento de limitadores de ruido, adecuación al CTE, insonorización en el ámbito de la industria, instalación de barreras acústicas y proyectos acústicos en la edificación. En general, se ocupa del control del ruido en el ámbito de la industria, construcción y medio ambiente.

Hoy en día se habla mucho del ruido y de cómo este agente afecte a la vida cotidiana de las personas. A partir de aquí nace la exigencia de leyes para el control de este problema.

Mi estancia en la empresa ha durado 4 meses y, además del trabajo que se va a presentar, he tenido la oportunidad de trabajar en el desarrollo de proyectos acústicos de unas viviendas justificadas mediante el software del DB-HR, el acondicionamiento acústico de salas con un volumen mayor de 350 m³ mediante un software desarrollado por la Technical University of Denmark (Dpt. of Acoustic Technology), la instalación de limitadores de ruido en unos locales de la comunidad de Castilla y León, mediciones “in situ” del aislamiento a ruido aéreo, del aislamiento a ruido de impacto y del tiempo reverberación en unos locales y viviendas de la comunidad de Castilla y León y Madrid, el diseño en Autocad de soluciones constructivas y una certificación acústica mediante ensayo “in situ” de un muestreo representativo de un edificio.

De todos estos trabajos se expone como memoria del TFM la parte dedicada al estudio de un edificio multiusos en lo que respecta a aislamiento y acondicionamiento acústico de una sala polivalente y dos salas de conferencias.

Aunque se superan las 100 páginas, mucha información está en forma de imágenes. Los planos y las mediciones “in situ” se recogen en los anexos finales.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El objeto del presente Proyecto Fin de Master es optimizar el acondicionamiento y el aislamiento acústico del proyecto de un **centro cultural multiusos** que, entre otros espacios, cuenta con una sala polivalente y escenario añadido, una sala de exposiciones, dos aulas y un recinto que se podría considerar ruidoso de acuerdo a la definición de recintos ruidosos encontrada en el DB HR y que se copia a continuación:

Recinto ruidoso: *Recinto*, de uso generalmente industrial, cuyas actividades producen un nivel medio de presión sonora estandarizado, ponderado A, en el interior del recinto, mayor que 80 dBA.

Aunque el CTE no aborda recintos ruidosos, la normativa municipal sí lo hace, por eso, sería interesante profundizar en su estudio en futuras ocasiones.

En este caso la empresa no había participado en la fase de diseño y definición de propuestas de mejora de aislamiento y acondicionamiento acústico, por lo que la información con la que se ha trabajado en este proyecto es el proyecto básico del edificio y sus recintos, y con una serie de propuestas de mejora que en su día planteó la Dirección Facultativa sin la realización de ningún estudio ni análisis acústico previo.

La realización de este Proyecto Fin de Master tendrá una utilidad práctica ya que en Castilla y León existen muchos pequeños y medianos municipios que tienen previsto construir centros culturales de este tipo en los que puedan desarrollarse diversos tipos de actividades (clases, charlas, seminarios, teatro, salón de actos, actuaciones musicales, etc...), por lo que la experiencia y aplicación práctica obtenida durante la realización de este proyecto podrá ser aplicada a futuros proyectos de este tipo que se lleven a cabo.

Los principales objetivos planteados en este proyecto son:

- Evaluar la efectividad y cumplimiento de las soluciones acústicas previstas en el proyecto inicial.
- Diseñar y optimizar el acondicionamiento acústico de la sala principal para su uso multifuncional.
- Diseñar y optimizar el acondicionamiento acústico de las dos aulas.
- Diseñar y optimizar el aislamiento acústico entre aulas.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS BAJO ESTUDIO

El caso bajo estudio es un edificio de nueva construcción, ubicado en un municipio de Castilla y León de menos de 5.000 habitantes y del cual nos han facilitado los planos y descripción de cerramientos contemplados en el proyecto básico.

En dicho edificio estudiaremos en detalle el proyecto acústico de la sala polivalente y de las dos aulas de conferencias, ya que se considera que son las que requieren de mejores condiciones acústicas.

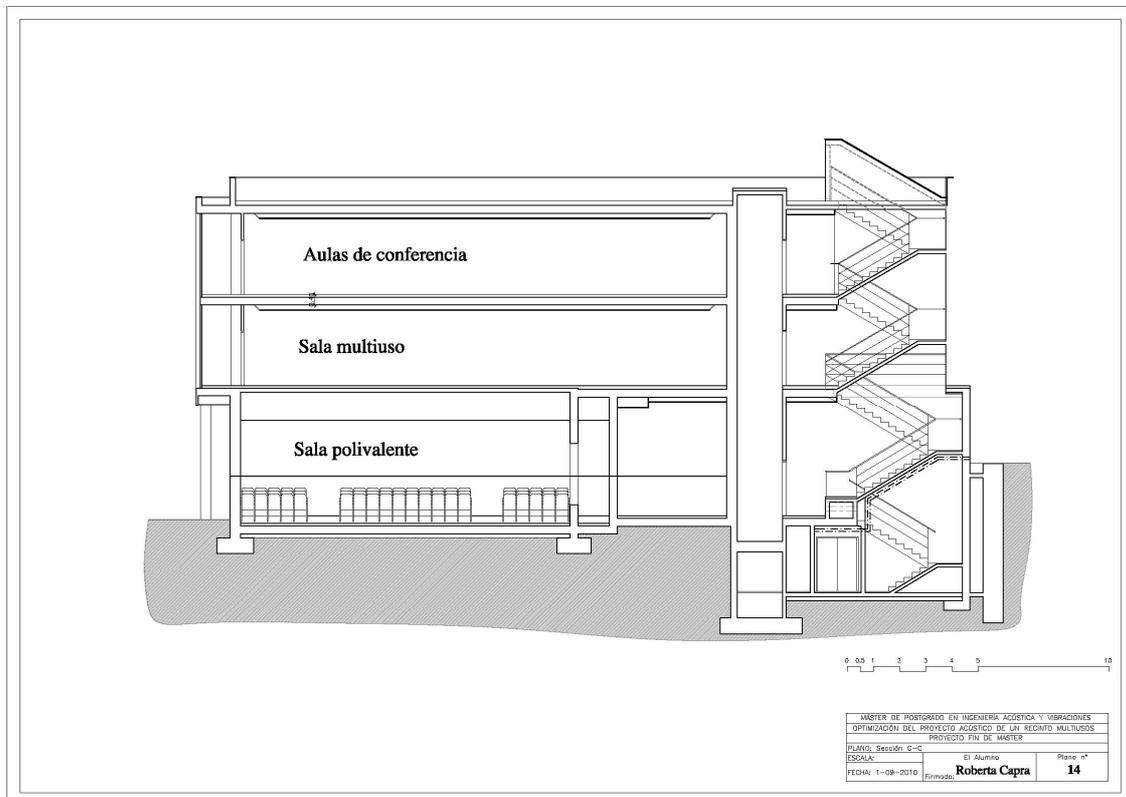


Fig 1: Sección del edificio.

A continuación se indican unas características generales de estas salas:

- **Aula 1** ubicada en la segunda planta con las siguientes características:
 - ❑ Superficie del suelo y del techo: 48 m².
 - ❑ Superficie de las paredes: 84 m².
 - ❑ Volumen: 142 m³ y una altura inicial de 2,95 m.
 - ❑ Uso previsto: La sala está pensada para desarrollar actividades como charlas y conferencias.
 - ❑ Disposición del aula: La sala tiene dos puertas de acceso por las que se accede al aula y una ventana sellada a través de la cual se ve el pasillo colindante.
En su interior se encuentran 31 butacas móviles.
 - ❑ Se adjunta un plano de dicha aula en el Anexo A.

La información contenida en el proyecto inicial en cuanto a los sistemas constructivos previstos inicialmente es la siguiente:

- Paredes: Tabique hueco doble de 115mm, enlucido con yeso de 15mm;

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Coefficiente absorción	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.08

Aislamiento acústico: $R_A = 40$ dBA según Catálogo Elementos Constructivos.

- Suelo: Forjado en bovedilla cerámica unidireccional, pavimento cerámico;

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Coefficiente absorción	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02

Aislamiento acústico: $R_A = 52$ dBA según Catálogo Elementos Constructivos.

- Techo: Forjado en bovedilla cerámica unidireccional, acabado con enlucido yeso;

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Coefficiente absorción	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03

Aislamiento acústico: $R_A = 52$ dBA según Catálogo Elementos Constructivos.

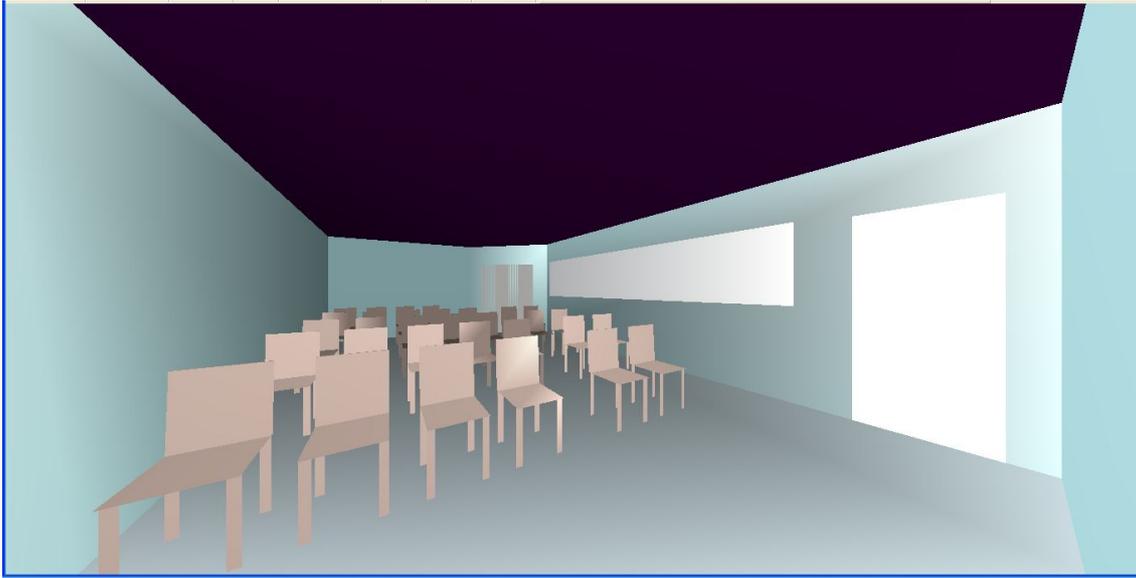


Fig. 4: Aula de conferencia 1 con mobiliario

- **Aula 2.** ubicada en la segunda planta con las siguientes características:
 - ❑ Superficie del suelo y del techo: 42 m².
 - ❑ Superficie de las paredes: 72 m².
 - ❑ Volumen: 125 m³ y una altura inicial de 2,95 m.
 - ❑ Uso previsto: La sala está pensada para desarrollar actividades como charlas y conferencias.
 - ❑ Disposición del aula: La sala tiene dos puertas de acceso por las que se accede al aula y una ventana sellada a través de la cual se ve el pasillo colindante.

En su interior se encuentran 33 butacas móviles.

- ❑ Se adjunta un plano de dicha aula en el Anexo A.

La información contenida en el proyecto inicial en cuanto a los sistemas constructivos previstos inicialmente es la siguiente:

- Paredes: Tabique hueco doble de 115mm, enlucido con yeso de 15 mm;

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Coefficiente absorción	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.08

Aislamiento acústico: $R_A = 40$ dB según Catálogo Elementos Constructivos.

- Suelo: Forjado en bovedilla cerámica unidireccional, pavimento cerámico;

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Coefficiente absorción	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02

Aislamiento acústico: $R_A = 52$ dBA según Catálogo Elementos Constructivos.

- Techo: Forjado en bovedilla cerámica unidireccional, acabado con enlucido yeso;

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Coefficiente absorción	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03

Aislamiento acústico: $R_A = 52$ dBA según Catálogo Elementos Constructivos.

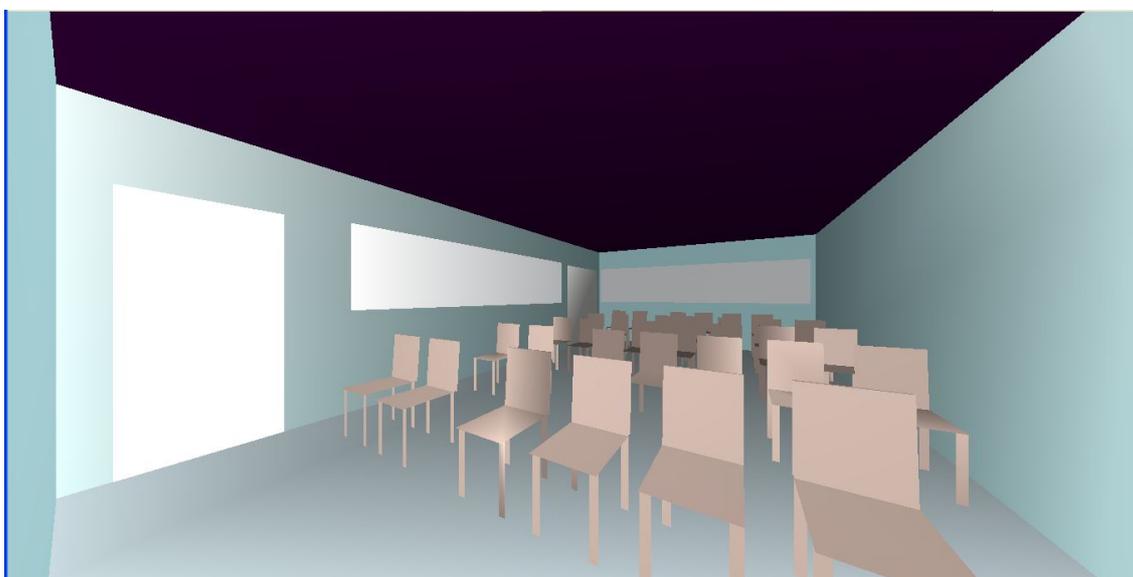


Fig. 5: Aula de conferencia 2 con mobiliario

- **Sala polivalente** ubicada en planta calle con las siguientes características:
 - Superficie de la platea: $192,80 \text{ m}^2$.
 - Superficie del escenario: $57,45 \text{ m}^2$.
 - Superficie del techo de la sala: 610 m^2 (excluida la parte trasera del escenario).
 - Superficie de las paredes de la sala: 374 m^2 .
 - Volumen: 1420 m^3 aproximadamente y una altura inicial de 6,3 metros en la zona del escenario hasta 4,8 metros en la zona trasera de acceso al auditorio.

- ❑ Ubicación: Esta sala se encuentra ubicada en planta calle y dos de sus laterales dan al exterior, otro lateral está flanqueado por una pared de roca y otra es ciega. Encima de ella se encuentra ubicada la sala de exposiciones.
- ❑ Uso previsto: Está previsto que en dicha sala se puedan desarrollar las siguientes actividades: conferencias, obras de teatro, actuaciones musicales, reuniones de vecinos.
- ❑ Disposición de la sala: La sala tiene dos puertas de acceso en los flancos laterales de su zona del fondo a través de las cuales se accede a una zona de butacas de 15 filas con 297 butacas fijas, más otras 3 reservadas para personas con movilidad reducida. En su zona principal existirá un escenario donde se podrán ubicar los oradores o donde se desarrollarán las obras de teatro o actuaciones musicales. Dicho escenario está ubicado a 75 cm de altura sobre el suelo.
- ❑ Además, existe un pasillo contiguo que se puede considerar parte del propio auditorio al estar comunicado con la zona de audiencia a través de huecos. Será considerado también en el estudio, al ser bastante influyente en el comportamiento acústico en la zona de audiencia.
- ❑ Se adjunta un plano de dicha sala en el Anexo A.

La información contenida en el proyecto inicial en cuanto a los sistemas constructivos previstos inicialmente es la siguiente:

- Paredes: tanto en el escenario como en la zona de audiencia y en un lado del pasillo son de hormigón liso, el otro lado del pasillo es placa de madera perforada;

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de hormigón liso	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04
α de placa de madera perforada	0.18	0.18	0.12	0.10	0.09	0.08	0.07	0.07

- Suelo: en la zona del escenario es de tarima de madera, en la zona de audiencia y del pasillo es linoleum sobre cemento, en la zona trasera elevada reservada para personas con movilidad reducida es entablado de madera;

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de tarima de madera	0.19	0.19	0.16	0.13	0.10	0.06	0.06	0.06
α de linoleum	0.15	0.15	0.12	0.11	0.10	0.07	0.08	0.08
α de entablado de madera	0.19	0.19	0.16	0.13	0.10	0.06	0.06	0.06

- Techo: Hormigón liso;

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de hormigón liso	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04

- Butacas distribuidas en la zona de audiencia: tapizadas con fieltro o terciopelo;

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de butacas con terciopelo	0.30	0.30	0.32	0.27	0.30	0.33	0.33	0.36

- Escaleras: Tarima de madera;

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de tarima de madera	0.19	0.19	0.16	0.13	0.10	0.06	0.06	0.06

- Puerta de acceso: madera convencional;

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de la madera convencional	0.14	0.14	0.10	0.06	0.08	0.10	0.10	0.10

- Paneles en el escenario que separan la zona de actuación: panel de fibra de madera.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de panel de fibra de madera	0.06	0.06	0.09	0.17	0.35	0.52	0.56	0.56



Fig. 6:Interior de la sala polivalente

3. PARÁMETROS Y SOFTWARE UTILIZADOS

Para valorar si las características acústicas del recinto tratado son las adecuadas para el tipo de actividad que ha de desarrollarse en su interior, es necesario estimar una serie de parámetros acústicos que permiten establecer una valoración del acondicionamiento adecuado para el recinto. En este caso, los parámetros acústicos más relevantes son:

- **Tiempo de reverberación (Tr)**, es el parámetro relacionado con la velocidad con que la energía sonora es absorbida en un recinto. Se evalúa excitando el recinto con una fuente sonora y midiendo el tiempo que transcurre desde que la fuente cesa su emisión, hasta que la energía acústica presente en el recinto cae 60 dB. Tiempos de reverberación muy altos pueden influir en una mala inteligibilidad de la palabra, y tiempos de reverberación muy bajos pueden influir en que se produzca una mala distribución sonora en la sala. Esta curva de decaimiento energético es distinta para cada posición dentro de la sala y además, varía con la frecuencia y está relacionado con las propiedades físicas del recinto. Como el ruido de fondo de la sala suele ocultar la parte final de dicha curva, en la práctica se miden el Tr_{20} y el Tr_{30} que son estimaciones del Tr. Es el tiempo que tarda en caer la energía acústica 20 dB o 30 dB multiplicado respectivamente por 3 y por 2.

Los valores recomendados del Tr para una sala ocupada son los siguientes:

Tipo de recinto	Tr sala ocupada (seg)
Sala de conferencias, aulas	0,6 – 0,9
Sala polivalente	1 - 1,5
Locutorio de radio	0,4 – 0,2

Tabla 1: Valores óptimos del Tr para distintos recintos.

- **Speech Transmission Index (STI)**, es la clasificación de la inteligibilidad de la palabra a partir del parámetro STI. Se puede realizar de la siguiente forma:

STI	0.88 – 1	0.66 – 0.87	0.5 – 0.64	0.36 – 0.49	0.24 – 0.34
Inteligibilidad	Excelente	Buena	Aceptable	Pobre	Mala

Tabla 2: Valores del STI.

En este caso, se necesita un valor de STI alto, ya que es necesario que exista un buen entendimiento y claridad de audición, tanto en lo relativo a la voz como a la música.

- **Early Decay Time (EDT)**, es un parámetro que mide la reverberación percibida (impresión subjetiva de la reverberación) y está relacionado con el Tr que mide la reverberación real (objetiva). Por este motivo, para determinar el grado de viveza de una sala es más fiable guiarse por el valor de EDT que de Tr. Una sala con un valor de EDT menor que de Tr resultará “subjetivamente” más apagada que lo que se deduciría del valor de Tr.

- **Definición (D_{50})**, está relacionada con la claridad auditiva y representa la proporción de energía que llega durante los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo respecto a la energía sonora total recibida. También estudia el comportamiento de las primeras reflexiones y se puede utilizar para valorar la claridad auditiva y la sonoridad.

Es decir, su valor depende de la posición del oyente respecto a la fuente sonora, disminuyendo al aumentar la distancia a la misma. Esto se debe a que alejándose de la fuente aumenta el nivel del campo reverberante y, como consecuencia, la proporción de energía de las primeras reflexiones disminuye.

- **Claridad musical (C_{80})**, indica el grado de separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical. Se determina a partir de la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 80ms desde la llegada del sonido directo y la que llega después de los primeros 80ms, calculada en cada banda de frecuencia entre 125Hz y 4KHz. Los valores recomendados dependen del tipo de música. El valor promedio para frecuencias medias-altas (500Hz, 1KHz y 2KHz) puede aceptarse entre -4 y 8 dB.

- **Nivel de Presión Sonora (SPL(dBA))**, mide la magnitud del campo sonoro en una determinada zona y en este caso da una idea de cómo se distribuye el nivel sonoro en todo el recinto, detectándose, a partir de él, si existen zonas donde el sonido está amplificado (zonas “vivas”) debido

a la gran cantidad de energía reflejada, lo cual va en detrimento de la calidad sonora en el interior de la misma.

Para evaluar el grado de cumplimiento de las soluciones constructivas respecto a los requisitos establecidos, se ha realizado una modelización acústica empleando las siguientes herramientas:

- **Odeón**, programa de simulación basado en acústica geométrica.

Es un programa muy potente que permite manejar, en un mismo modelo, la acústica de una sala, la instalación de altavoces y, en cierta medida, la transmisión del sonido. Permite diseñar la acústica de una sala controlando las reflexiones, la absorción del sonido y las propiedades de dispersión del sonido en las superficies con el fin de lograr la acústica deseada y una reducción adecuada de ruidos para discursos, conciertos, etc. A través de la simulación acústica de una sala es posible predecir su respuesta impulsiva en un modelo 3D desde el origen hasta el receptor y es posible sacar resultados en forma de parámetros acústicos, como el tiempo de reverberación Tr_{30} , Tr_{20} , EDT, STI, SPL, Claridad, etc., y el mapeo de sonido.

En la práctica, se ha modelado virtualmente la geometría interior del recinto en 3D, en formato CAD y se ha exportado al software de simulación acústica Odeón. Una vez configurado el modelo de cálculo, los datos geométricos, en condiciones de recinto cerrado y vacío (sin oyentes o espectadores), asignados los materiales, con sus correspondientes coeficientes de absorción a cada superficie, las distintas fuentes y receptores, se ha obtenido una estimación del comportamiento acústico de la sala a través de una simulación.

El programa permite obtener los resultados de tiempo de reverberación utilizando distintas funciones. Las que se han utilizado en este caso son: Job List, Quick Estimate Reverberation, Global Estimate Reverberation.

Con “**Job List**” es posible seleccionar las fuentes que estarán activas (al menos una tiene que estar activa), la señal sonora que emitirán y la orientación de los receptores para cada simulación.

El método utilizado es de trazado de rayos para fuentes puntuales. En caso de fuentes puntuales el método adoptado es híbrido, es decir, combina los métodos “Early Ray Reflection” y “Late Ray Reflection” (Nota 1).

Después, se ejecuta la aplicación “Grid Response”, que permite obtener un mapa de color (una vez especificada la escala), para cada una de las bandas de frecuencia, en el que se plasman los parámetros acústicos según una cuadrícula, previamente definida, que contiene varios receptores con distancia prefijada entre ellos.

Para definir la rejilla se deben escoger las superficies sobre las cuales estarán los receptores, la distancia entre ellos y su altura respecto a las superficies.

En este caso, los parámetros acústicos se obtuvieron a partir de la respuesta "grid", definiendo una rejilla con receptores distribuidos sobre el suelo, a 1,20 metros de altura y 0,20 metros de separación entre ellos.

En caso de que haya varias fuentes activas, el resultado en cada receptor será la suma de todas las contribuciones procedentes de cada fuente.

Los coeficientes de absorción para el ajuste de la simulación se han obtenido a través de la librería de materiales del propio programa e insertando en el mismo los valores indicados por los fabricantes en sus catálogos.

En el programa, el campo sonoro se calcula aplicando el método de trazado de rayos¹, consistente en la propagación de rayos lanzados desde la fuente y su posterior reflexión en las

1 Métodos de cálculo utilizados

1. Método Early Ray Reflection:

Este método es usado para obtener las primeras reflexiones de las fuentes puntuales. También recibe el nombre de 'Método de la Fuente Imagen Modificado', puesto que considera además de las reflexiones especulares, el fenómeno de dispersión asociado a la geometría específica del modelo.

El procedimiento seguido es el siguiente:

Inicialmente, la fuente puntual emite rayos en todas las direcciones de forma que el primer rayo es lanzado verticalmente hacia abajo y el último hacia arriba, consiguiendo que la distribución final sea uniforme.

Cuando uno de estos rayos impacta con una superficie del modelo, se calcula su fuente imagen correspondiente. Ésta queda definida por el ángulo de incidencia y la longitud del trayecto del rayo incidente.

Cada fuente imagen contribuye con un rayo reflejado según la ley de Snell (El ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia) y con un árbol de dispersión. Éste es simulado por Odeón como un conjunto de fuentes secundarias distribuidas sobre la superficie que originó la fuente imagen, emitiendo tantos rayos como indique el producto del coeficiente de dispersión de la superficie.

A su vez, los rayos generados por cada fuente imagen presentan una atenuación que tiene en cuenta:

superficies de la sala. Puede entenderse como una simulación discretizada del campo sonoro: cuanto mayor sea el número de rayos utilizado, mejor será la aproximación al caso real.

Sin embargo, el programa, a diferencia de los métodos clásicos, utiliza un método híbrido para las simulaciones, aplicando a las primeras reflexiones el método de fuente imagen modificado y a las reflexiones tardías el método de las fuentes secundarias. El primero es muy fiable, pero tiene el inconveniente que al aumentar el orden de la reflexión, el tiempo para realizar todos los cálculos se dispara. Por este motivo, sólo se utiliza con las primeras reflexiones. Además, el programa simula las pérdidas por dispersión, creando no sólo reflexiones especulares sino también reflexiones difusas. Añade la atenuación debida a la difracción, pero sólo a las primeras reflexiones. Todo ello mejora sus resultados respecto a otros métodos y con un tiempo de simulación no excesivamente alto.

-
- La directividad de la fuente primaria.
 - Los coeficientes de reflexión de la superficie que la generó.
 - La absorción del aire.
 - La atenuación con la distancia recorrida desde la fuente primaria hasta el receptor.
 - Las pérdidas de difracción debidas al tamaño limitado de las superficies.
 - Las pérdidas de dispersión, que tienen en cuenta el orden del rayo reflejado. Así, si el coeficiente de dispersión es α , la energía especular será multiplicada por un factor $(1 - \alpha)$ para un rayo de primer orden de reflexión, por $(1 - \alpha)^2$ si es de segundo orden, etc.

2. Método Late Ray Reflection:

Para las fuentes puntuales se consideran también los rayos que representan las reflexiones tardías o cola reverberante.

Cada vez que un rayo choca contra una superficie de la sala, se crea en el punto de impacto una fuente secundaria. Esta fuente emite un rayo en una dirección que varía según la dispersión de Lambert, la dirección del nuevo rayo se calcula teniendo en cuenta el coeficiente de dispersión de la superficie.

Por ejemplo, si el coeficiente de dispersión vale 0.7, la energía del nuevo rayo se distribuye en dos componentes: un 30% constituye la componente según la dirección especular y el 70% restante sigue la dirección de dispersión según la distribución de Lambert, es decir, la energía dispersada es proporcional a $\cos \theta$. Si el coeficiente vale 0, toda la energía será reflejada y si vale 1, será sólo dispersada según la ley de Lambert para dispersiones ideales, $\sin^2 \theta$.

Al terminar, Odeón comprueba qué fuentes secundarias son visibles desde el receptor, descartando las que no lo son. Y aplica a cada nuevo rayo una atenuación debida a los siguientes factores:

- La directividad de la fuente primaria.
- El factor de directividad de las fuentes secundarias $4\cos\theta$, según la ley de Lambert.
- Los coeficientes de reflexión de la superficie que la generó.
- La absorción del aire.
- La atenuación con la distancia recorrida desde la fuente primaria hasta el receptor.

En la realidad la propagación del sonido conduce a un número exponencialmente creciente de reflexiones, sin embargo, en la simulación interesa acotar el tiempo de cálculo. Por este motivo, el proceso de trazado de rayos cumple que la densidad de reflexión durante todo el tiempo de simulación, es siempre la misma.

Con este método, para que una reflexión sea detectada por el receptor, no es necesario que pase muy próxima a él. Como consecuencia, con un número no muy grande de rayos emitidos se consigue un número aceptable de reflexiones en el receptor, pudiendo obtener resultados estadísticamente fiables.

La fiabilidad de los resultados depende también de los valores asignados a los parámetros configurables de la simulación, como el número de rayos, la longitud de la respuesta impulsiva, el orden de transición, el máximo orden de reflexión y las simplificaciones hechas al modelar el recinto. Por ejemplo, las superficies curvas son modeladas como un conjunto de superficies planas.

El programa permite estimar también 8 parámetros relacionados al tiempo de reverberación a través de las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau y mediante el método de las reflexiones tardías.

Con **Quick Estimate Reverberation** se estima el tiempo de reverberación mediante las fórmulas estadísticas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades, incluyendo la influencia del aire. Las estimaciones son calculadas para 8 bandas de frecuencia.

Los tiempos de reverberación obtenidos con las expresiones de Sabine y Eyring, presuponen condiciones de campo sonoro difuso, es decir, una situación en la que el sonido venga de todas direcciones, además, las superficies tienen que tener características de absorción muy bajas y no son válidas en recintos con una absorción desigualmente distribuida, es decir, todas las superficies tienen que tener las mismas propiedades de absorción, independientemente de la fuente seleccionada. El tiempo de reverberación calculado según Arau-Puchades considera las variaciones de absorción en todas las direcciones (x,y,z) y coincide con el valor devuelto por Eyring, cuando todos los coeficientes de absorción en las tres direcciones son iguales en promedio.

Junto a estas tres expresiones aparecen otras tres que son modificaciones de las primeras y que tienen en cuenta la forma de la sala. En consecuencia, sus resultados son más fiables. En ellas se utiliza el coeficiente de absorción medio, calculado a partir de la probabilidad de que los rayos emitidos por la fuente activa se propaguen por la sala y choquen contra cada una de las superficies (método “Late ray reflection”). Si una superficie no es golpeada por uno de estos rayos, no será incluida en los cálculos. Y cuantas más reflexiones procedan de una superficie, mayor peso tendrá en la media del coeficiente de absorción.

En la realidad, esta opción sirve exclusivamente para seleccionar qué material conviene más para los resultados buscados y tener una idea de la magnitud del tiempo de reverberación y así poder

dar un valor al parámetro “Impulse Response Length”, pero no se pueden considerar como valores finales, más bien se utiliza por su rapidez de cálculo.

Con **Global Estimate Reverberation** se inicia el cálculo de la respuesta global de la sala para una fuente dada. El proceso de cálculo devuelve el “Estimated Reverberation Times” con un diagrama de barras en el que se visualizan los parámetros Tr_{20} y Tr_{30} , para las 8 bandas de frecuencia.

El método utilizado es el “Late ray reflection”. A medida que los rayos avanzan por el recinto, sufren pérdidas de energía debidas a los coeficientes de absorción de las paredes con las que chocan y a la absorción del aire, particularmente importante en altas frecuencias.

A pesar de ser una aproximación, sus resultados son más realistas que los devueltos por la estimación hecha con “Quick Estimate”, ya que aquí se tiene en cuenta la distribución de la absorción y la geometría de la sala.

Así, por ejemplo, cuando la absorción se concentra en el techo y las fuentes están en el suelo, “Global Estimate” devuelve valores mayores e incluso pueden duplicar a los calculados en “Quick Estimate”. Sin embargo, en auditorios donde la audiencia representa la máxima absorción y está próxima a la fuente, los valores Tr_{20} y Tr_{30} estiman un tiempo de reverberación menor.

Con esta opción, el parámetro “Impulse Response Length” deberá tener un valor equiparable al del tiempo de reverberación.

- **CTE.C.** Es una herramienta que permite comprobar el cumplimiento del Código Técnico de la Edificación (CTE) en un proyecto, según lo establecido en el Documento Básico de protección frente al ruido. Se insertan los datos geométricos del recinto a estudiar y los materiales del que está compuesto. El programa da la posibilidad de calcular la absorción acústica mínima que deberá de tener el techo según el método simplificado y el tiempo de reverberación según el método general (Utiliza coeficientes de absorción acústica medio α_m de cada paramento, para las bandas de octava centradas en 500, 1000 y 2000 Hz).

Los valores expresados están en el CEC, en el caso en el que no estén se deberá consultar en el catálogo del fabricante para saber la absorción de cada material.

- **Programa Placo Tr.** Es una aplicación web diseñada para facilitar el cálculo del tiempo de reverberación de los distintos tipos de recintos afectados por las exigencias recogidas en la norma vigente DB-HR "Protección frente al ruido", Real Decreto 1371/2007. Se insertan datos geométricos y materiales. El programa da la posibilidad de calcular el Tr según el método general y las fórmulas teóricas de Sabine y Eyring² (Para el cálculo del TR(s), según las fórmulas de Sabine y Eyring, se utilizan coeficientes de absorción acústica de cada paramento, para las bandas de octava centradas en 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz), proporciona la absorción acústica media del techo según el método simplificado.

Los valores expresados están en el propio programa y no permite añadir otros materiales, están limitados a los comercializados por la empresa y a otros pocos materiales de uso corriente para permitir la comparación entre la fase preoperacional y postoperacional.

La valoración del aislamiento a ruido aéreo y a ruido de impacto entre las dos aulas de conferencias se efectúa a través de una serie de parámetros que siguen expresados a continuación.

De esta forma se evalúa si las características acústicas son las adecuadas para el tipo de actividad que ha de desarrollarse en su interior.

² Fórmula de Sabine: Esta fórmula fue postulada por Sabine partiendo del supuesto de que existe un reparto homogéneo de absorbentes con un coeficiente de absorción bajo.

$$T = 0,161 [V/A]$$

Donde: T es el tiempo de reverberación [s], V el volumen de la sala [m³] y A la absorción total [m²] obtenida a partir de $A = \alpha \cdot S$

Siendo: α el coeficiente de absorción sonora y S el área de la superficie de la sala [m²].

Fórmula de Norris – Eyring: Esta fórmula sólo es aplicable cuando los coeficientes de absorción sonora son de valores numéricos parecidos para todas las superficies límite.

$$T = 0,161 [V/(-S \ln(1 - \alpha_m))]$$

Donde: α_m es el coeficiente de absorción medio.

Las fórmulas de Sabine y de Norris – Eyring, son de aplicación cuando los coeficientes de absorción son parecidos y de valores inferiores a 0,2.

○ **$D_{nT,A}$, la diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, entre *recintos* interiores** que es la valoración global, en dBA, de la diferencia de niveles estandarizada, entre recintos interiores, D_{nT} , para ruido rosa.

Se define mediante la expresión siguiente:

$$D_{nT,A} = -10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{(L_{Ar,i} - D_{nT,i})/10} \quad [\text{dBA}]$$

Siendo:

$L_{Ar,i}$ valor del espectro normalizado del ruido rosa, ponderado A, en la banda de frecuencia i , [dBA];

i recorre todas las bandas de frecuencia de tercio de octava de 100 Hz a 5 kHz.

$D_{nT,i}$ diferencia de niveles estandarizada en la banda de frecuencia i , [dB]. Diferencia entre los niveles medios de presión sonora producidos en dos recintos por una o varias fuentes de ruido emitiendo en uno de ellos, normalizada al valor 0,5 s del tiempo de reverberación. En general es función de la frecuencia. Se define mediante la expresión siguiente: $D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \lg T/T_0$ [dB] siendo:

L_1 nivel medio de presión sonora en el *recinto* emisor, [dB];

L_2 nivel medio de presión sonora en el *recinto* receptor, [dB];

T *tiempo de reverberación* del *recinto* receptor, [s];

T_0 *tiempo de reverberación* de referencia; su valor es $T_0=0,5$ s.

La relación con el R'_A índice global de reducción acústica aparente, ponderado A, [dBA] es la siguiente

$$D_{nT,A} = R'_A + 10 \lg \frac{0.32V}{S_s} \quad [\text{dBA}]$$

Siendo:

V el volumen del *recinto* receptor, [m^3];

S_s área compartida del elemento de separación, [m^2],

Para obtener el índice global de reducción acústica aparente, ponderado A, R'_A , se utilizarán los índices globales de reducción acústica de las *transmisiones directas* y las *transmisiones indirectas* de

los elementos constructivos, R_A , dando como resultado los correspondientes valores de aislamiento in situ.

○ **$L'_{nT,w}$ Nivel global de presión de ruido de impactos estandarizado** que es la valoración global del nivel de presión de ruido de impactos estandarizado, L'_{nT} .

L'_{nT} , Nivel de presión de ruido de impactos estandarizado es el nivel de presión sonora medio, en dB, en el *recinto* receptor normalizado a un *tiempo de reverberación* de 0,5 s, cuando el elemento constructivo de separación respecto al *recinto* emisor es excitado por la máquina de impactos normalizada. Es función de la frecuencia. Se define mediante la expresión siguiente:

$$L'_{nT} = L - 10 \cdot \lg T / T_0 \text{ [dB]}$$

Siendo:

L nivel medio de presión sonora en el *recinto* receptor, [dB];

T *tiempo de reverberación* del *recinto* receptor, [s];

T_0 *tiempo de reverberación* de referencia; su valor es $T_0=0,5$ s.

Para evaluar el grado de cumplimiento de las soluciones constructivas respecto a los requisitos establecidos, se ha utilizado la herramienta dada por el CTE:

○ **CTE.C.** Como se ha comentado anteriormente, es la herramienta que permite comprobar el cumplimiento del Código Técnico de la Edificación (CTE) en un proyecto, según lo establecido en el DB-HR. El programa da la posibilidad de calcular el aislamiento acústico a ruido aéreo y de impactos entre los distintos tipos de recintos según el método general insertando los datos geométricos del recinto a estudiar y los materiales del que está compuesto.

Los valores expresados están en el CEC, en el caso en el que no estén se deberá consultar en el catálogo del fabricante.

4. METODOLOGÍA OPERATIVA

Este apartado recoge y sintetiza el trabajo de análisis, evaluación, optimización y re-evaluación de los parámetros de interés anteriormente descritos.

A continuación se describe la metodología seguida en distintas fases.

En la primera se analiza la normativa de aplicación.

En la segunda se establecen los objetivos a cumplir para el caso de las dos aulas y para el de la sala polivalente.

En la tercera se analiza el acondicionamiento acústico de los recintos bajo estudio en las condiciones iniciales.

En la cuarta se proponen unas mejoras para optimizar el acondicionamiento de los mismos.

En la quinta se estudia el aislamiento acústico entre las aulas en las condiciones iniciales.

En la sexta se proponen unas mejoras para optimizar el aislamiento entre ellas.

En la séptima se recopilan los datos obtenidos in situ en base a las soluciones constructivas realmente instaladas.

4.1. Análisis de la normativa de aplicación

A la hora de realizar este proyecto se ha tomado como referencia la siguiente normativa de aplicación para este tipo de edificios en Castilla y León:

- *Real Decreto 1371/2007, de 19 de Octubre, por el que se aprueba el documento básico “DB HR Protección frente al ruido” del Código Técnico de la Edificación.*
- *Ley 5/2009 del ruido de Castilla y León.*

Nota: En el municipio donde se llevó a cabo la ejecución del edificio no existía Ordenanza Municipal, por lo que se tomó como normativa de referencia la Ley 5/2009 del Ruido de Castilla y León.

En estas normativas de aplicación existen los siguientes requisitos de aplicación al caso que estamos evaluando:

- Requisitos de acondicionamiento acústico de aulas:
 - En el DB HR y en la Ley 5/2009 del Ruido de Castilla y León se contempla que el tiempo de reverberación máximo que debe haber en las aulas vacías, cuyo volumen sea menor de 350 m^3 , es de 0,7 seg.
- Requisitos de acondicionamiento acústico de la sala polivalente: En el DB HR, en su apartado 2.2. se indica que en las salas con más de 350 m^3 debe llevarse a cabo un estudio específico, no existiendo a priori ningún valor límite. En el caso en cuestión, según el uso al que está destinado el recinto, el objetivo es obtener unos valores que estén comprendidos entre 1 y 1,5 segundos (ver tabla 1, apdo 3).
- Requisitos de aislamiento acústico entre aulas: Al considerarse recintos protegidos, en el DB HR, se contempla que el aislamiento acústico a ruido aéreo “in situ” entre aulas debe ser de $D_{nT,A} \geq 50 \text{ dBA}$ y el aislamiento a ruido de impactos $L'_{nT,w}$ no será mayor que 65 dB.

4.2. Establecimiento de objetivos específicos a cumplir

Una vez analizada la información de partida, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- **Optimizar los acondicionamientos acústicos de las aulas**, justificando el cumplimiento de los requisitos establecidos en el DB-HR y en la Ley 5/2009 (0,7 segundos en las aulas y salas de conferencia). Para ello:
 - Se han analizado, como se ha explicado en el apdo 3, varios programas de cálculo existentes para predecir y justificar los valores de tiempo de reverberación de salas con el objeto de determinar el más adecuado para la optimización de soluciones.
 - Para cada caso, se ha seleccionado el programa de cálculo, se ha analizado el grado de cumplimiento de los requisitos normativos empleando la solución propuesta inicialmente en proyecto.
 - A continuación se han analizado distintas propuestas de mejora encaminadas a mejorar las condiciones acústicas del aula y optimizar su coste de ejecución.
 - Finalmente se ha seleccionado y definido la solución final a ejecutar, y se ha justificado que es adecuada para cumplir con los requisitos establecidos en el DB-HR y en la Ley 5/2009 del Ruido de Castilla y León.

- **Optimizar los acondicionamientos acústicos de la sala polivalente** para que en ella puedan desarrollarse los distintos tipos de actividades previstas con una adecuada calidad acústica. Para ello:
 - En primer lugar, se han establecido los requisitos de acondicionamiento acústico que se quieren obtener (para una sala polivalente el rango varía entre 1-1,5 segundos).
 - A continuación, se ha analizado la propuesta inicial empleando el programa de cálculo predictivo de interiores adecuado para volúmenes mayores de 350 m³.
 - Posteriormente, se han considerado y simulado diversas propuestas de mejora del acondicionamiento acústico, en función de distintas geometrías, con el objeto de optimizar las propiedades acústicas de la sala.

- Finalmente se ha seleccionado una solución que da cumplimiento a los requisitos de partida previstos y optimiza el coste de ejecución respecto a otros.

- **Optimizar los aislamientos acústicos de las aulas**, justificando el cumplimiento de los requisitos establecidos en el DB-HR ($D_{nT,A} \geq 50$ dBA y $L'_{nT,w} \leq 65$ dB). Para ello:
 - Se han analizado distintas soluciones constructivas para predecir y justificar los valores de aislamiento acústico entre recintos con el objeto de determinar el más adecuado para la optimización de soluciones.
 - Se ha analizado el grado de cumplimiento de los requisitos normativos empleando la solución propuesta inicialmente en proyecto.
 - A continuación se han analizado distintas propuestas de mejora encaminadas a mejorar los aislamientos acústicos entre las aulas y optimizar su coste de ejecución.
 - Finalmente se ha seleccionado y definido la solución final a ejecutar, y se ha justificado que es adecuada para cumplir con los requisitos establecidos en el DB-HR.

4.3. Estudio acondicionamiento acústico inicial y evaluación del cumplimiento de objetivos

4.3.1. Aula 1

Estudio del condicionamiento acústico (CTE, Placo, Odeón)

Resultado empleando el método general con la herramienta del CTE

El resultado del tiempo de reverberación obtenido, para el aula vacía, con estas características,

	Paramentos	$\alpha_{m,i}$	S_i (m ²)	$\alpha_{m,i} S_i$
Pared	Enlucido de yeso	0,03	84,016	2,5
Techo	Yeso acabado con enlucido fino	0,04	48,22	1,8
Suelo	Pavimento cerámico	0,02	48,22	0,8

y calculado según esta fórmula $T = \frac{0,16 \cdot V}{A}$

siendo:

$V=142 \text{ m}^3$ el volumen de la sala

$A=5,09 \text{ m}^2$ el area equivalente definida como $A = \sum_{i=1}^m \alpha_{m,i} \cdot S_i$

Donde:

$\alpha_{m,i}$ es el coeficiente de absorción medio de cada material

S_i es la superficie de cada elemento constructivo

ha sido el siguiente:

Tiempo de reverberación T_{r60} (s)	4,47	<0,7 seg	NO CUMPLE
---------------------------------------	------	----------	------------------

Resultado empleando el método simplificado con la herramienta del CTE

Como se ha explicado en el apdo 3, el método simplificado proporciona el valor mínimo del coeficiente de absorción medio que tendría que tener el material del que está constituido el techo si se quisiera considerar solamente un techo acústico en los cálculos realizados y respetar, a la vez, los parámetros establecidos por ley del tiempo de reverberación para el caso bajo estudio.

En el apartado 2, se da el valor del coeficiente de absorción del techo α_t para cada frecuencia. La media entre 500, 1000 y 2000 Hz corresponde a $\alpha_{m,t}=0,04$.

El resultado obtenido del coeficiente de absorción mínimo del techo $\alpha_{m,t}$, para el aula de volumen hasta 350 m^3 sin butacas tapizadas, y calculado según esta fórmula

$$\alpha_{m,t} = h \cdot \left(0,23 - \frac{0,12}{\sqrt{S_t}} \right) = 0,63$$

Siendo:

$h=2,95 \text{ m}$ la altura inicial de la sala

$S_t= 48,22 \text{ m}^2$ la superficie del techo

ha sido el siguiente:

El coeficiente de absorción acústica medio del techo ha de ser igual o superior a: 0,63

La absorción no es suficiente

Para que el Tr_{60} esté por debajo del límite de 0,7 seg el área de absorción equivalente del techo, en este caso, debería ser

$$A_t = \alpha_{m,t} \cdot S_t = 30,26 \text{ m}^2$$

pero realmente el area equivalente total es $A=5,09 \text{ m}^2$.

Resultados empleando el método placo Tr

Este software proporciona cuatro tipos de datos, un dato por el método general, otro por el método simplificado, otro en relación al Tr calculado por el método de Sabine y otro en base al cálculo de Eyring.



Los resultados obtenidos se muestran en las gráficas 1 y 2:



Gráficas 1 y 2: Valores del Tr_{60} en el aula 1 calculado con el método general y con las fórmulas teóricas en las condiciones iniciales.

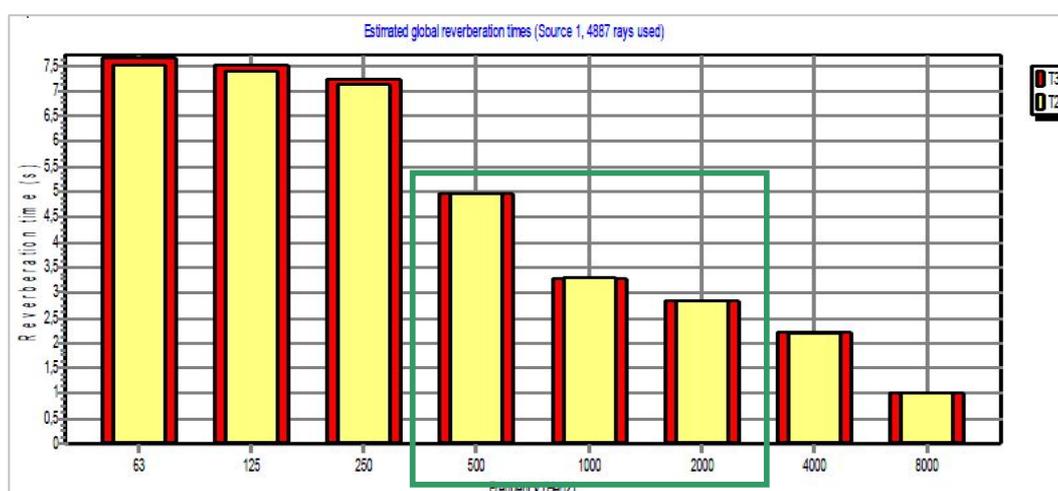
Método general <0,7 seg	Método simplificado Valor min exigido: 0,63	Método Sabine	Método Eyring
4,18 s	$\alpha_m = 0,04$	4,61 s	4,55

Resultados empleando el Odeón

Una vez introducidas la geometría, la fuente sonora, los receptores, las configuraciones de software y los materiales en el software predictivo, se ha llevado a cabo una modelización del comportamiento acústico del aula.

Primeramente se representan los tiempos de reverberación globales estimados, Tr_{20} (s) y Tr_{30} (s), en las distintas bandas de frecuencia de octava desde 63 Hz hasta 8000 Hz. La gráfica se realiza simulando y teniendo en cuenta la caída (de 20 o 30 dB, según el caso) de los primeros rayos desde la fuente.

Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T20	7.51	7.40	7.13	4.97	3.29	2.84	2.19	1.00
T30	7.65	7.52	7.22	4.97	3.28	2.84	2.21	1.01



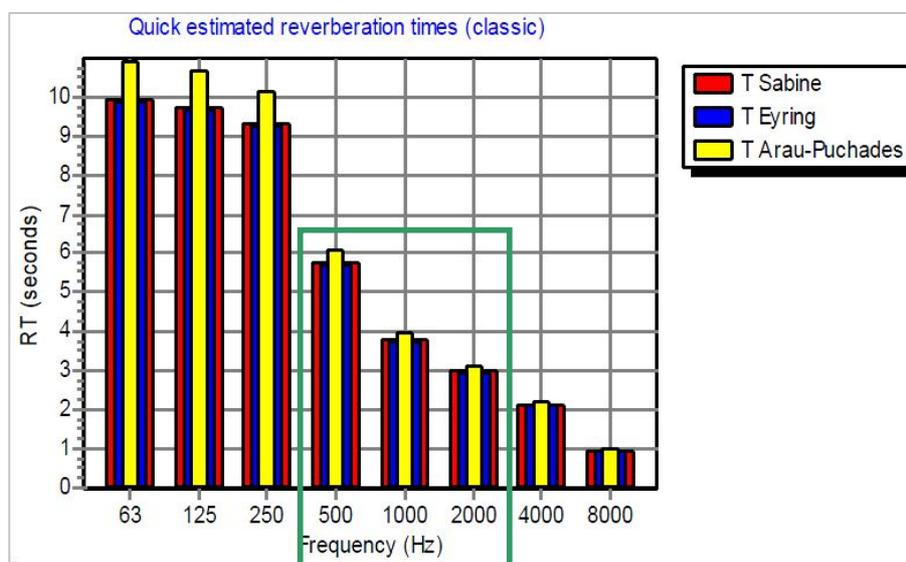
Gráfica 3: Se representa el tiempo de reverberación global estimado en el aula 1 con el método Late ray reflection en las condiciones iniciales.

El Tr_{20} y el Tr_{30} medio para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz es de 3,70 segundos.

Posteriormente se representa un gráfico con los tiempos de reverberación estimados en las distintas bandas de frecuencia de octava desde 63 Hz hasta 8000 Hz, para las aproximaciones de Sabine, Eyring y Arau-Puchades (s).

Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
TEyring	9.86	9.68	9.24	5.71	3.74	2.96	2.10	0.95
TEyring (modified)	9.86	9.68	9.24	5.71	3.74	2.96	2.10	0.95
TSabine	9.93	9.74	9.29	5.76	3.79	3.00	2.12	0.96
TSabine (modified)	9.93	9.74	9.29	5.76	3.79	3.00	2.12	0.96
T Arau-Puchades	10.89	10.67	10.13	6.07	3.94	3.12	2.25	1.02
T Arau-Puchades (modified)	10.89	10.67	10.13	6.07	3.94	3.12	2.25	1.02

Tal y como se ha explicado en el apdo 3, junto a las tres expresiones teóricas aparecen otras tres que son modificaciones de las primeras y que tienen en cuenta la forma de la sala.



Gráfica 4: Se representa el Tr en el aula 1 mediante las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades, incluyendo la influencia del aire en las condiciones iniciales.

Esta gráfica se obtiene teniendo en cuenta cálculos teóricos a partir del área de absorción equivalente de cada superficie, según los materiales y coeficientes de absorción de cada una de ellas y teniendo en cuenta el volumen total del recinto, entre otros parámetros.

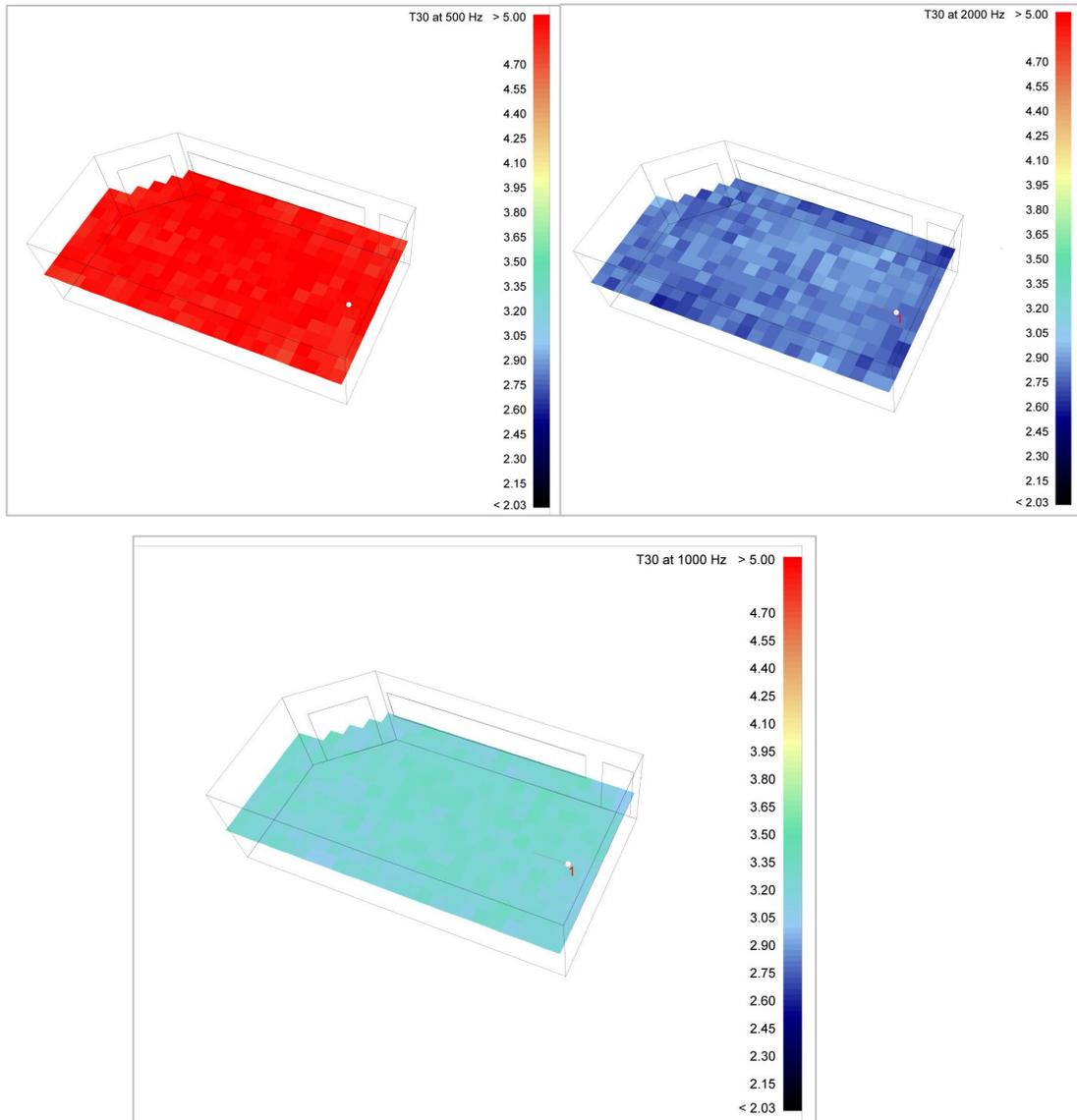
El Tr medio para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz según la fórmula de Eyring es de 4,10 seg y según la fórmula de Sabine es de 4,18 seg.

Teniendo las superficies características de absorción muy bajas y teniendo todas las superficies las mismas propiedades de absorción los valores teóricos son iguales a los valores estimados.

Además, se aproximan a los valores encontrados con el programa Placo Tr y el CTE.C.

A continuación, tras la simulación, se representan los resultados, de forma gráfica, de los parámetros acústicos definidos más relevantes para este estudio.

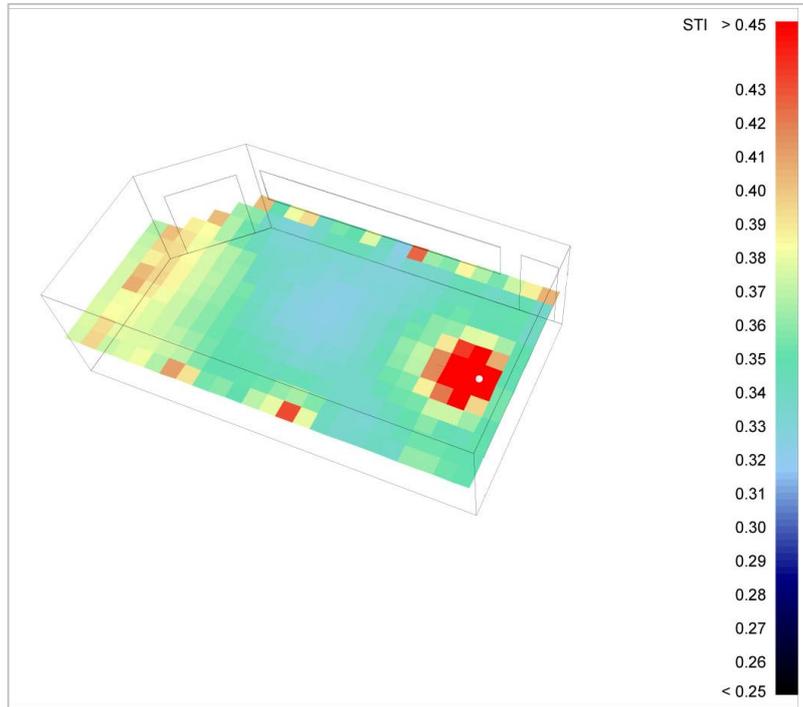
Tiempo de reverberación, Tr_{30} , en 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz;



Gráfica 5: Se representa el tiempo de reverberación estimado en el aula 1 en las condiciones iniciales combinando los métodos Early Ray Reflection y Late Ray Reflection.

El Tr_{30} aproximado que se obtiene a 500 Hz es de 4,80 seg, a 1000 Hz es de 3,20 seg y a 2000 Hz es de 2,90 seg. Resulta igualmente distribuido en toda el aula pero es demasiado elevado, sobre todo considerando que es un aula destinada a charlas y conferencias.

Inteligibilidad de la palabra en la sala, STI;

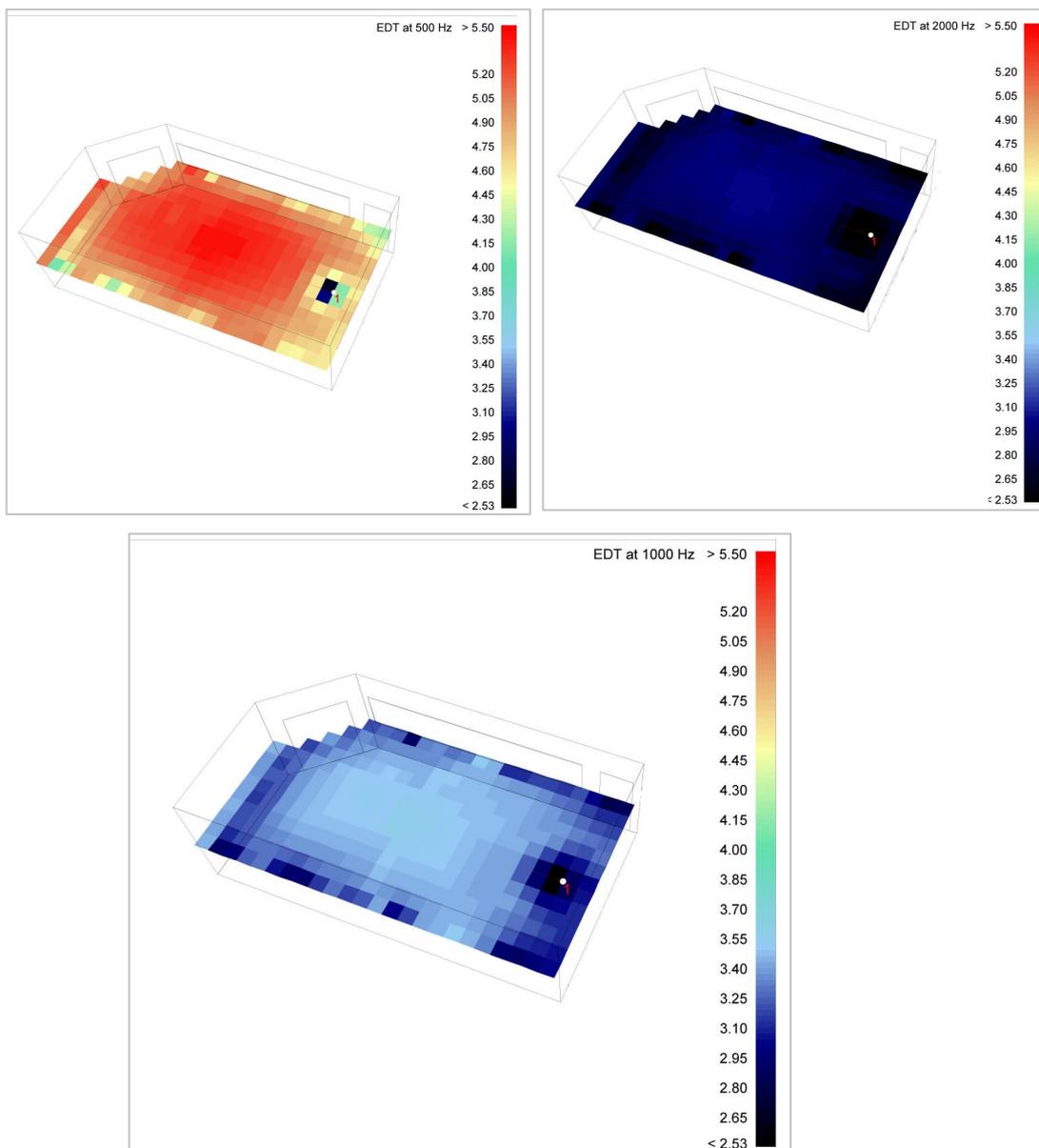


Gráfica 6: Se representa la inteligibilidad de la palabra en el aula 1 en las condiciones iniciales.

La inteligibilidad, STI, tiene valores uniformes en casi toda el aula, pero son muy bajos, calificándose de inteligibilidad pobre. Resulta necesario aumentar su valor para que no existan problemas de entendimiento.

En la zona cercana al hablante existe un valor de inteligibilidad un poco más elevado por la cercanía de la fuente.

Tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;

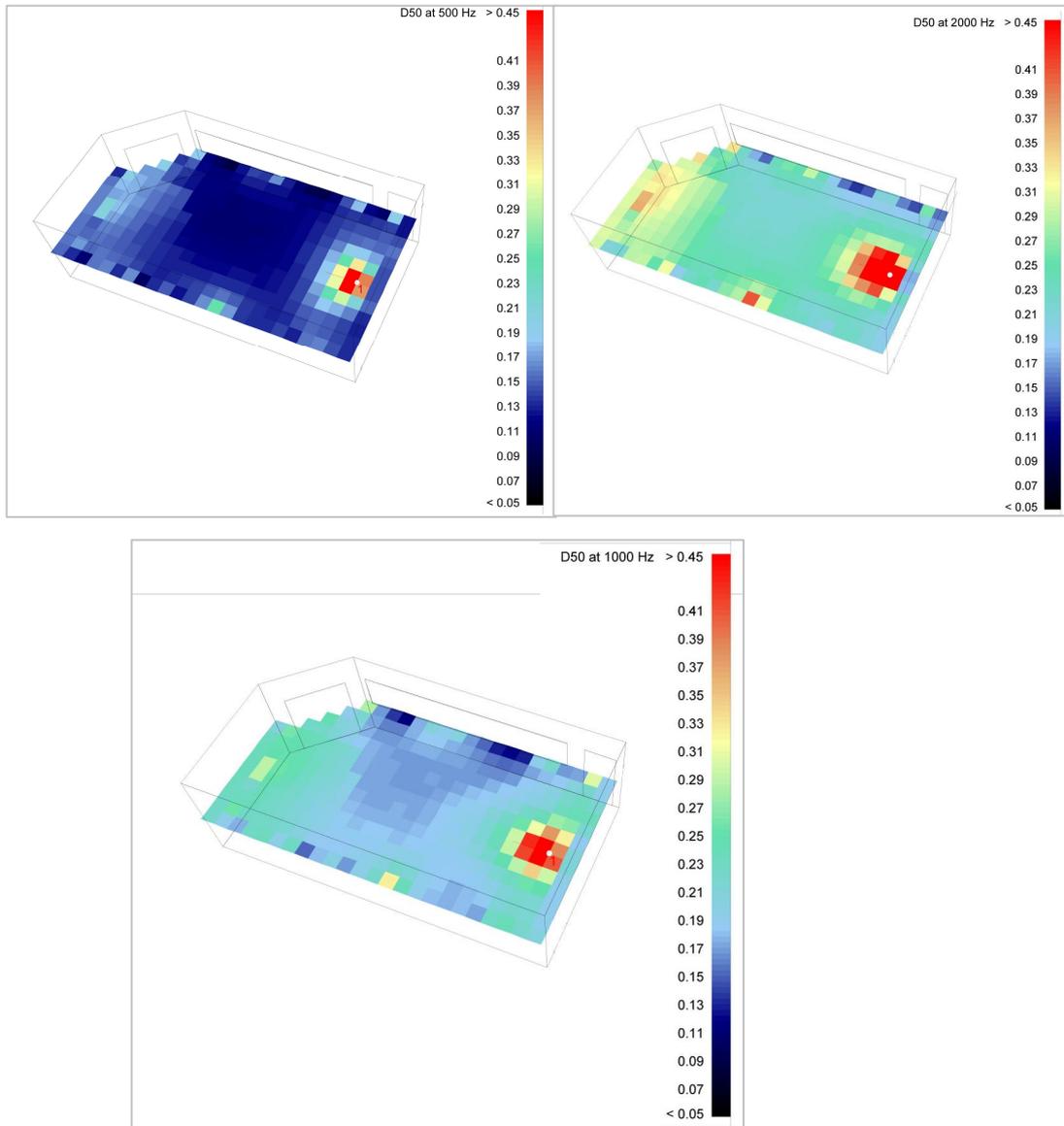


Gráfica 7: Se representa el tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en el aula 1 en las condiciones iniciales.

Al igual que en el caso del Tr se representan los resultados en las bandas de frecuencia de 500, 1000 y 2000 Hz, al ser las frecuencias donde se mueve la voz humana y de mayor percepción sonora.

El tiempo de reverberación subjetivo, EDT (s), aproximadamente a 500 Hz es de 5,20 seg, a 1000 Hz es de 3,40 seg, y a 2000 Hz es de 3,10 seg. Tiene valores ligeramente por encima del Tr_{30} . Esto significa que el aula no se percibe como apagada sino que tiene excesiva viveza y no resulta adecuada para la palabra.

Definición, D_{50} , en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;

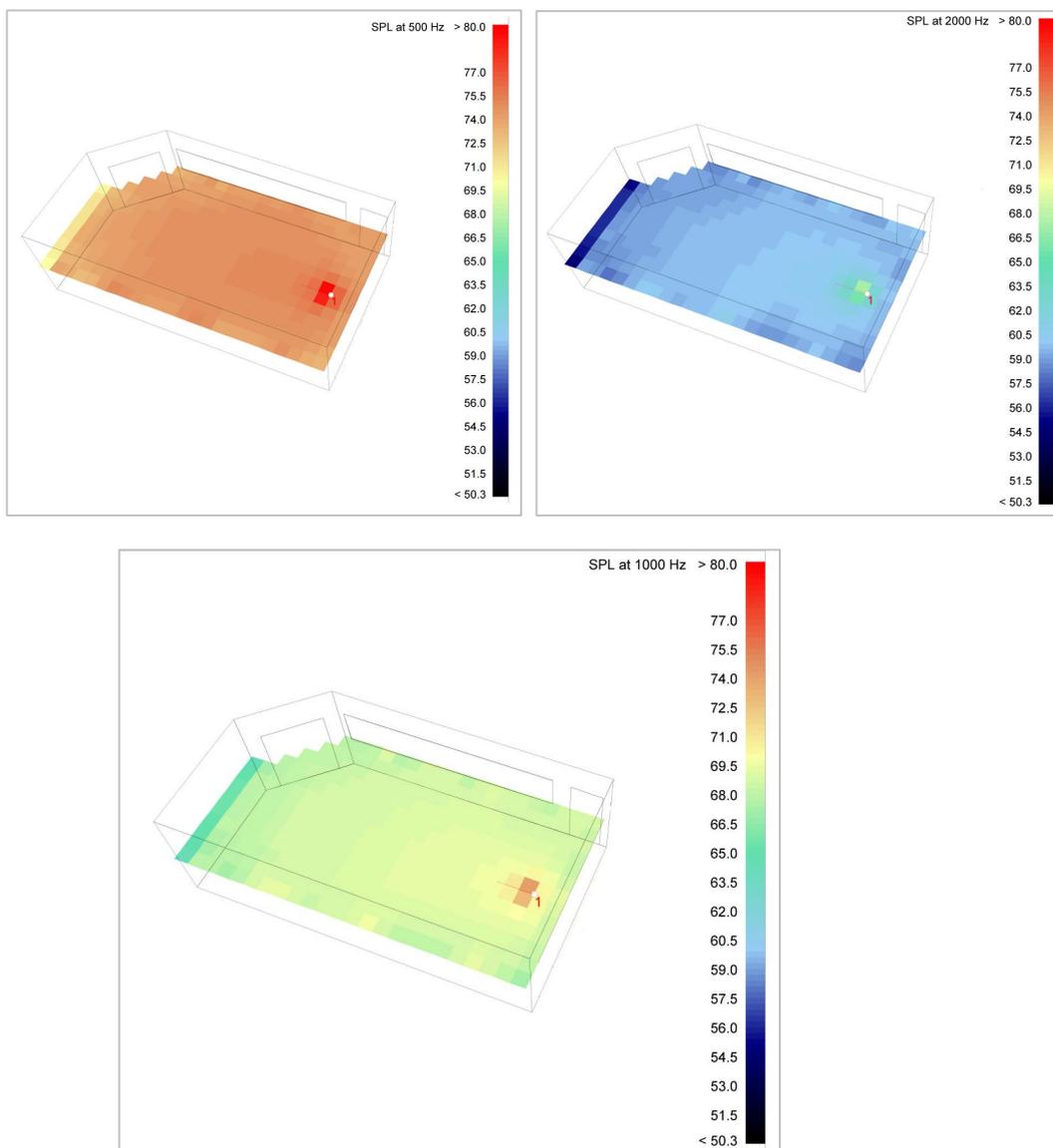


Gráfica 8: Se representa la definición, D_{50} , en el aula 1 en las condiciones iniciales.

La definición, D_{50} , valora la claridad auditiva y como se ha dicho en el apdo 3 depende de la posición del oyente respecto a la fuente sonora. Tiene valores muy bajos a bajas, medias y alta frecuencias. No se alcanzan valores superiores a 0,3, salvo en la zona cercana a la fuente.

Nos interesa que sea lo más próximo posible a 1, con lo cual, la claridad auditiva no es la adecuada. Siendo la definición casi nula existirían dificultades en obtener un sonido claro, con el consiguiente peor entendimiento.

Distribución sonora en el recinto: SPL (dBA) en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz.



Gráfica 9: Se representa la distribución sonora, SPL, en el aula 1 en las condiciones iniciales.

La distribución sonora, SPL (dBA), resulta bastante buena y uniforme en toda el aula, no variando más de 4 dB en la misma frecuencia.

Evaluación de cumplimiento de objetivo y conclusiones preliminares

A continuación se va a realizar una evaluación del grado de cumplimiento del objetivo en función de los resultados:

Método (Aula 1 vacía)	Resultados	Objetivo	Evaluación de cumplimiento
General	4,47 seg	< 0.7 seg	NO CUMPLE
Placo Tr general	4,18 seg	< 0.7 seg	NO CUMPLE
Placo Tr Sabine	4,61 seg (media)	< 0.7 seg	NO CUMPLE
Placo Tr Eyring	4,55 seg (media)	< 0.7 seg	NO CUMPLE
Odeón Tr ₃₀ (estimado)	3,7 seg (media)	< 0.7 seg	NO CUMPLE
Odeón Tr Sabine	4,18 seg (media)	< 0.7 seg	NO CUMPLE
Odeón Tr Eyring	4,14 seg (media)	< 0.7 seg	NO CUMPLE
Odeón Tr Arau-Puchades	4,38 seg (media)	< 0.7 seg	NO CUMPLE
Odeón Tr ₃₀ (simulado)	≈3,65 seg (media)	< 0.7 seg	NO CUMPLE

En la tabla anterior los resultados del Tr se corresponden con la media aritmética del tiempo de reverberación en las bandas de octava centradas en 500, 1000 y 2000 Hz.

A la vista de los resultados se puede concluir que:

- La solución prevista inicialmente para el acondicionamiento acústico del aula no cumple con los objetivos del DB-HR para ninguno de los casos y métodos de evaluación empleados.
- Los valores de Tr se encuentran muy por encima de los requeridos.
- Los valores de otros parámetros acústicos relevantes, tales como EDT, STI, D₅₀ y SPL, tampoco son adecuados con respecto al caso bajo estudio.
- Los recubrimientos de los materiales de las aulas son excesivamente reflectantes.

4.3.2. Aula 2

Estudio del condicionamiento acústico (CTE, Placo, Odeón)

Resultado empleando el método general con la herramienta del CTE

El resultado del tiempo de reverberación obtenido, para el aula vacía, con estas características,

	Paramentos	$\alpha_{m,i}$	S_i (m ²)	$\alpha_{m,i} S_i$
Pared	Enlucido de yeso	0,03	78,88	2,4
Techo	Yeso acabado con enlucido fino	0,04	42,54	1,6
Suelo	Pavimento cerámico	0,02	42,54	0,7

y calculado según esta fórmula
$$T = \frac{0,16 \cdot V}{A}$$

siendo:

$V=125 \text{ m}^3$ el volumen de la sala

$A=4,64 \text{ m}^2$ el area equivalente

ha sido el siguiente:

Tiempo de reverberación Tr_{60} (s)	4,33	<0,7 seg	NO CUMPLE
---------------------------------------	------	----------	------------------

Resultado empleando el método simplificado con la herramienta del CTE

Como ya se ha hecho con el aula 1, también en este caso, utilizando el método simplificado, se determina el valor mínimo del coeficiente de absorción medio del material del que está constituido el techo para cumplir con las exigencias de tiempo de reverberación establecidas por ley para el caso bajo estudio.

En el apdo 2, se da el valor del coeficiente de absorción del techo α_t para cada frecuencia. La media entre 500, 1000 y 2000 Hz equivale a $\alpha_{m,t}=0,04$.

Calculando el valor del coeficiente de absorción mínimo del techo $\alpha_{m,t}$, para el aula de volumen hasta 350 m^3 sin butacas tapizadas, según la fórmula

$$\alpha_{m,t} = h \cdot \left(0,23 - \frac{0,12}{\sqrt{S_t}} \right)$$

Donde: $h=2,95 \text{ m}$ la altura inicial de la sala

$S_t= 42,54 \text{ m}^2$ la superficie del techo

se obtiene el siguiente resultado:

El coeficiente de absorción acústica medio del techo ha de ser igual o superior a: 0,62
La absorción no es suficiente

Para que el Tr_{60} esté por debajo del límite de 0,7 seg el área de absorción equivalente del techo, en este caso, debería ser

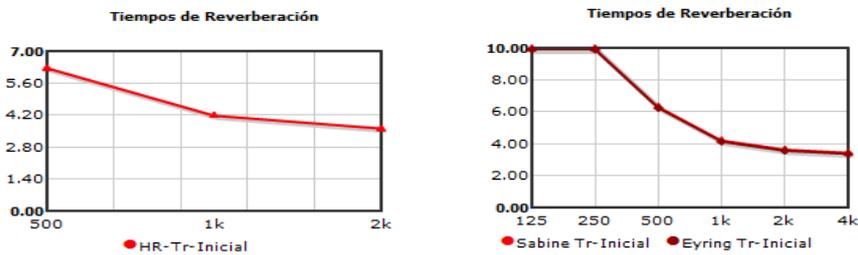
$$A_f = \alpha_{m,t} \cdot S_t = 26,55 \text{ m}^2$$

En la realidad el area equivalente total es $A=4,64 \text{ m}^2$, con lo cual se corrobora la insuficiencia de la absorción.

Resultados empleando el método placo Tr

Como ya se ha comentado para el aula 1, este software proporciona cuatro tipos de datos que se presentan a continuación.

Los resultados obtenidos se muestran en las gráficas 10 y 11:



Gráficas 10 y 11: Valores del Tr_{60} en el aula 2 calculado con el método general y con las fórmulas teóricas en las condiciones iniciales.

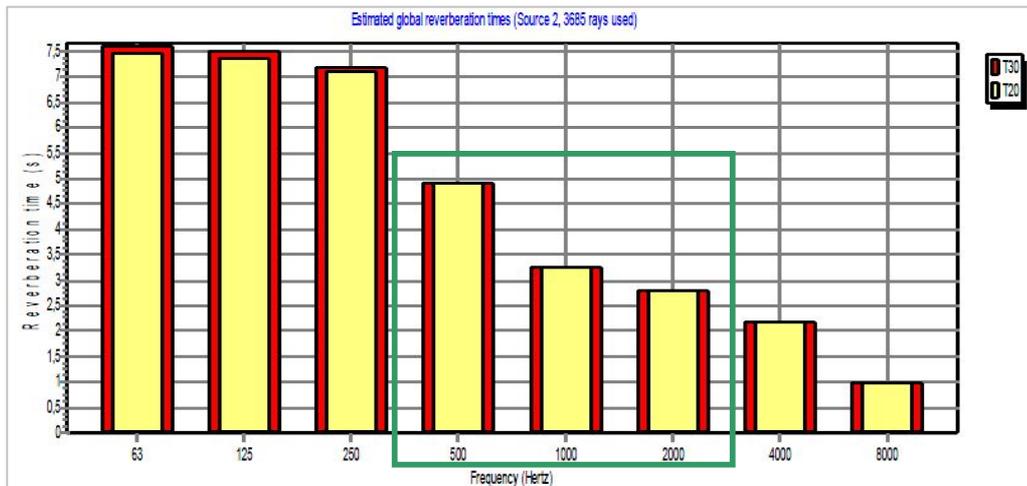
Método general	Método simplificado	Método Sabine	Método Eyring
<0,7 seg	Valor min exigido: 0,62		
4,08 s	$\alpha_m=0,04$	4,49 s	4,43

Resultados empleando el Odeón

Siguiendo el mismo procedimiento utilizado para el aula 1 se introduce la geometría, la fuente sonora, los receptores, las configuraciones de software y los materiales en el software predictivo, y se lleva a cabo una modelización del comportamiento acústico del aula.

A continuación se representan los tiempos de reverberación globales estimados, Tr_{20} (s) y Tr_{30} (s), en las distintas bandas de frecuencia de octava desde 63 Hz hasta 8000 Hz. La gráfica se realiza simulando y teniendo en cuenta la caída (de 20 o 30 dB, según el caso) de los primeros rayos desde la fuente.

Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T20	7.45	7.37	7.10	4.91	3.24	2.78	2.18	0.97
T30	7.80	7.49	7.16	4.91	3.24	2.79	2.18	0.99



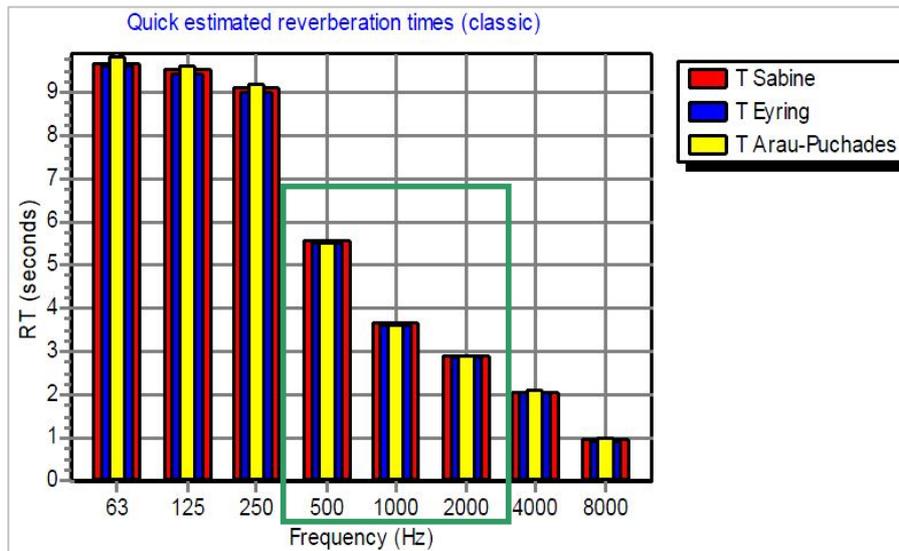
Gráfica 12: Se representa el tiempo de reverberación global estimado en el aula 2 con el método **Late ray reflection** en las condiciones iniciales.

A la vista de los datos se puede calcular el Tr_{20} y el Tr_{30} medio para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz y ambos resultan de 3,64 segundos.

Así mismo, se representa un gráfico con los tiempos de reverberación estimados en las distintas bandas de frecuencia de octava desde 63 Hz hasta 8000 Hz, para las aproximaciones de Sabine, Eyring y Arau-Puchades (s).

Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
TEyring	9.62	9.45	9.02	5.54	3.63	2.87	2.04	0.93
TEyring (modified)	9.62	9.45	9.02	5.54	3.63	2.87	2.04	0.93
TSabine	9.68	9.51	9.08	5.59	3.68	2.91	2.06	0.94
TSabine (modified)	9.68	9.51	9.08	5.59	3.68	2.91	2.06	0.94
TArau-Puchades	9.81	9.63	9.19	5.54	3.63	2.89	2.11	0.99
TArau-Puchades (modified)	9.81	9.63	9.19	5.54	3.63	2.89	2.11	0.99

Tal y como se ha explicado en el apdo 3, junto a las tres expresiones teóricas aparecen otras tres que son modificaciones de las primeras y que tienen en cuenta la forma de la sala.



Gráfica 13: Se representa el Tr en el aula 2 mediante las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades, incluyendo la influencia del aire en las condiciones iniciales.

Considerando el área de absorción equivalente de cada superficie se calcula el Tr.

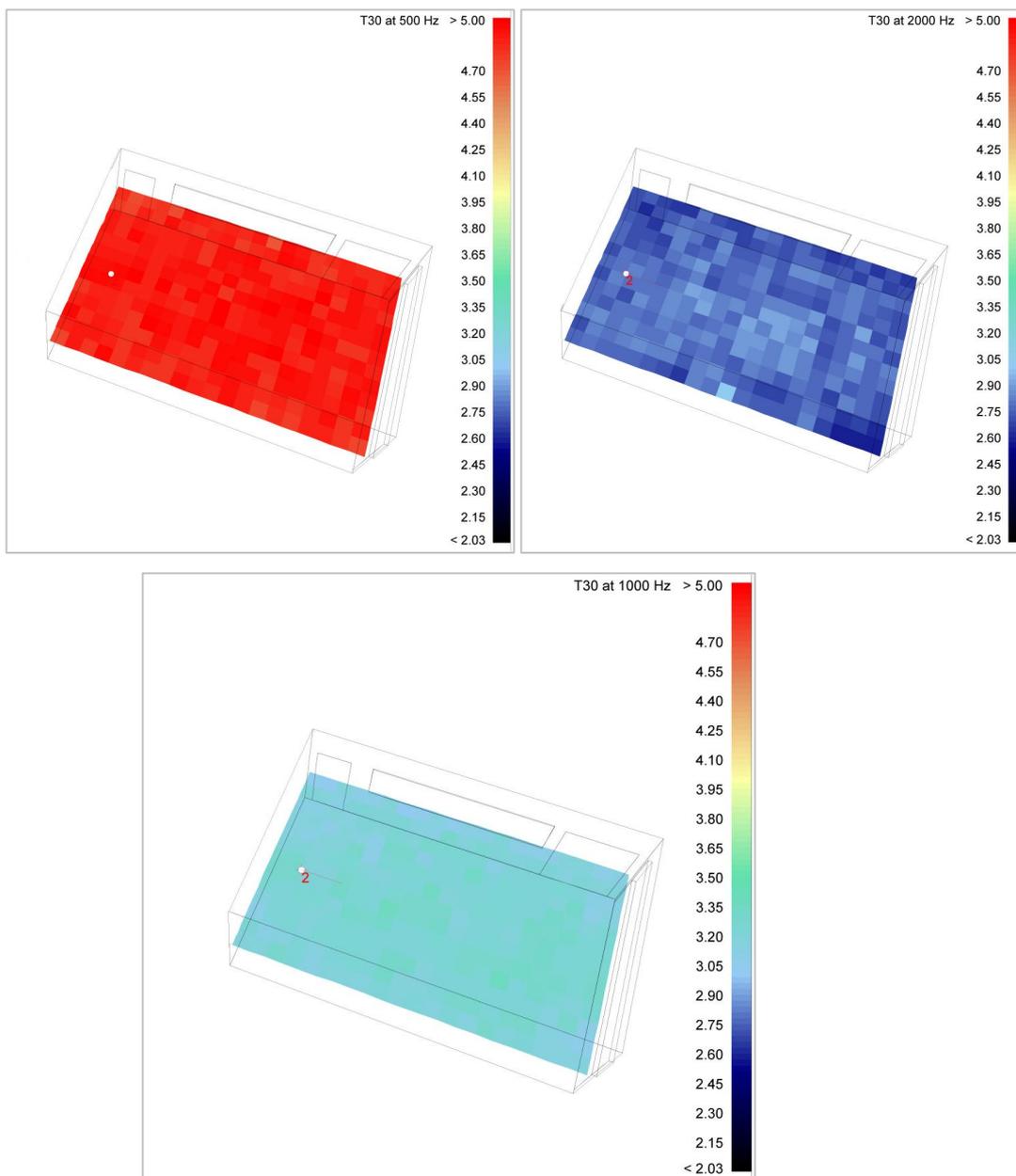
El Tr medio para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz según la fórmula de Eyring es de 4,01 seg y según la fórmula de Sabine es de 4,60 seg.

Los valores teóricos son iguales a los valores estimados por que las superficies tienen características de absorción muy bajas además de tener las mismas propiedades de absorción.

Tales valores se aproximan a los valores encontrados con el método Placo Tr y el CTE.C.

Como en el caso anterior del aula 1, se ha llevado a cabo una simulación obteniendo los resultados de los parámetros acústicos más relevantes para este estudio:

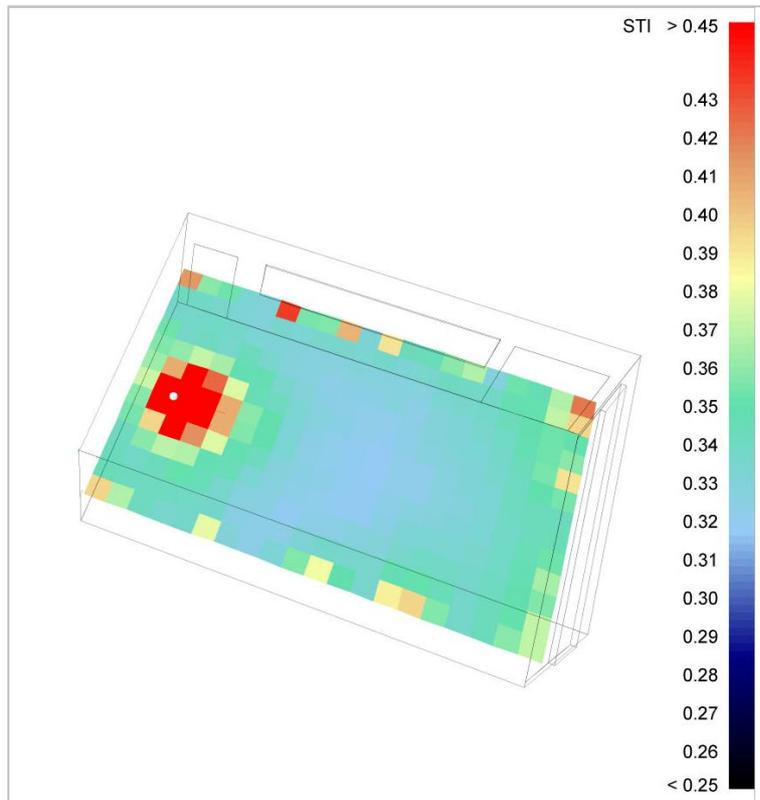
Tiempo de reverberación, Tr_{30} , en 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz;



Gráfica 14: Se representa el tiempo de reverberación estimado en el aula 2 en las condiciones iniciales combinando los métodos Early Ray Reflection y Late Ray Reflection.

El Tr_{30} aproximado que se obtiene a 500 Hz es de 4,70 seg, a 1000 Hz es de 3,05 seg y a 2000 Hz es de 2,80 seg. Resulta igualmente distribuido en todo el recinto pero no cumple con los objetivos acústicos que debería de tener un aula de conferencias.

Inteligibilidad de la palabra en la sala, STI;

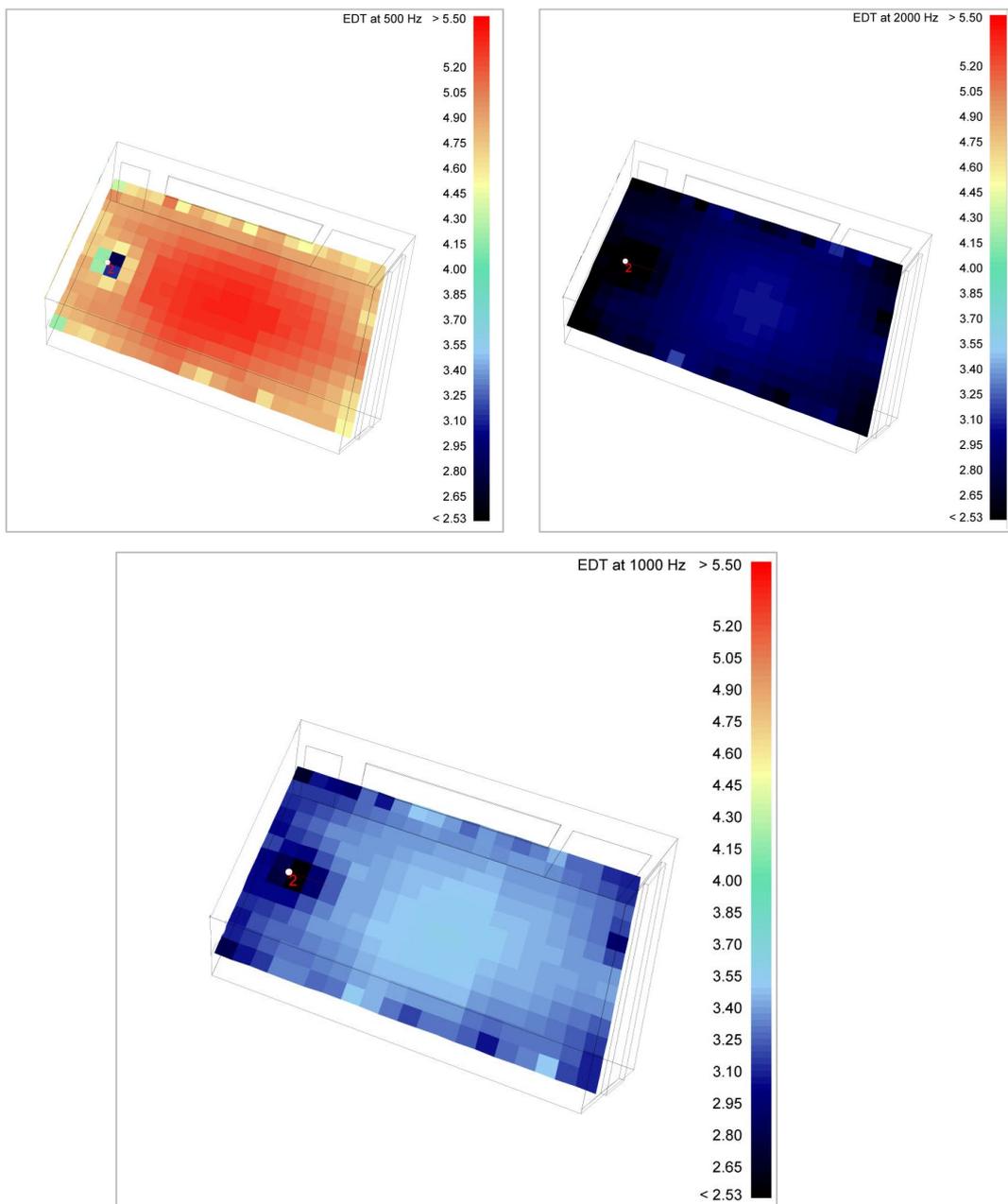


Gráfica 15: Se representa la inteligibilidad de la palabra en el aula 2 en las condiciones iniciales.

La inteligibilidad, STI, resulta pobre. Aunque tenga valores uniformes en casi toda el aula son muy bajos. Es necesario aumentar su valor para que no existan problemas de entendimiento.

Solamente en la zona cercana a la fuente el valor de la inteligibilidad es un poco más elevado.

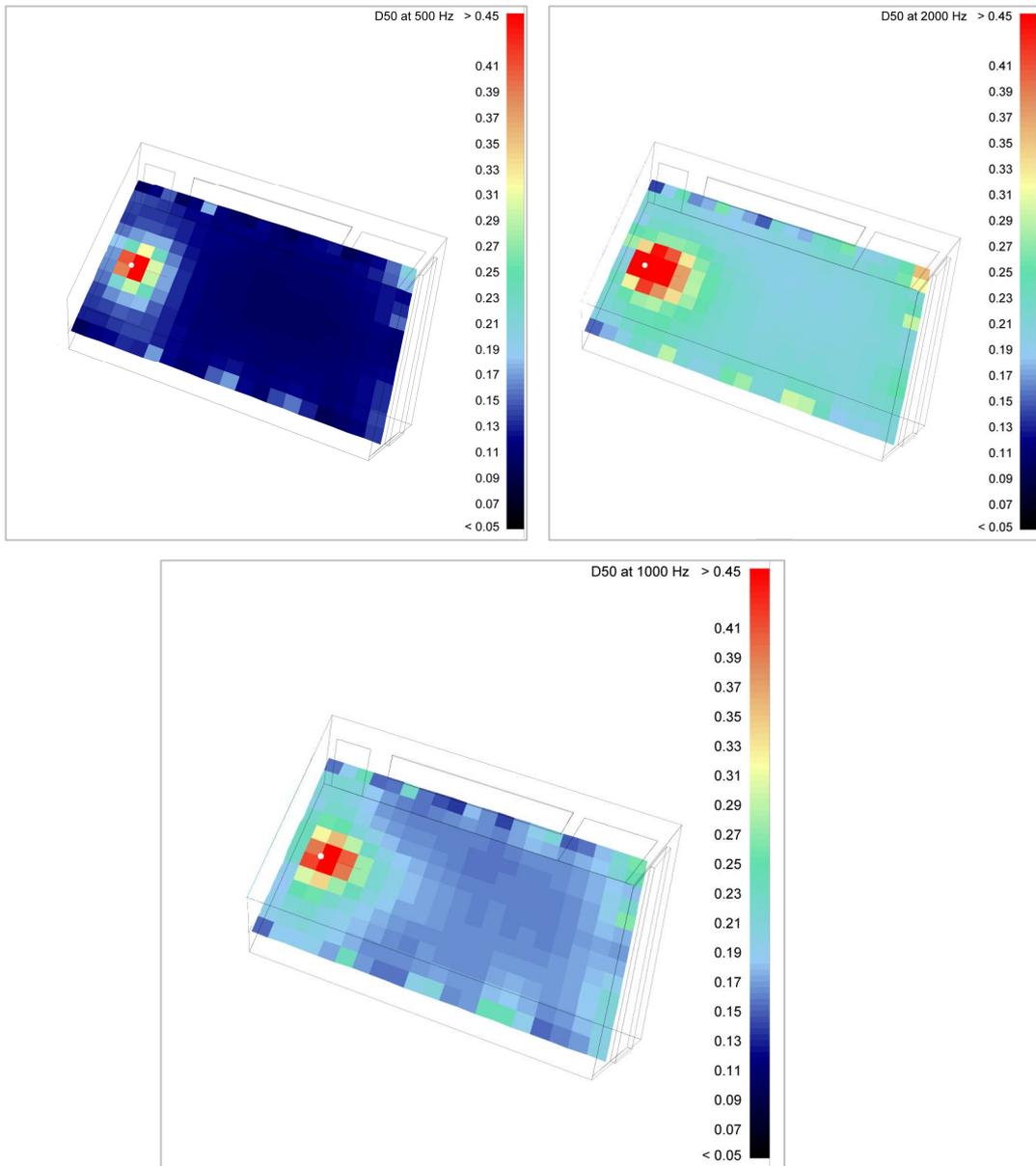
Tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;



Gráfica 16: Se representa el tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en el aula 2 en las condiciones iniciales.

El tiempo de reverberación subjetivo, EDT (s), a 500 Hz es aproximadamente de 5 seg, a 1000 Hz es de 3,45 seg, y a 2000 Hz es de 3,25 seg. Tiene valores ligeramente por encima del Tr_{30} . Siendo el aula destinada a charlas su grado de viveza no resulta adecuado.

Definición, D_{50} , en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;

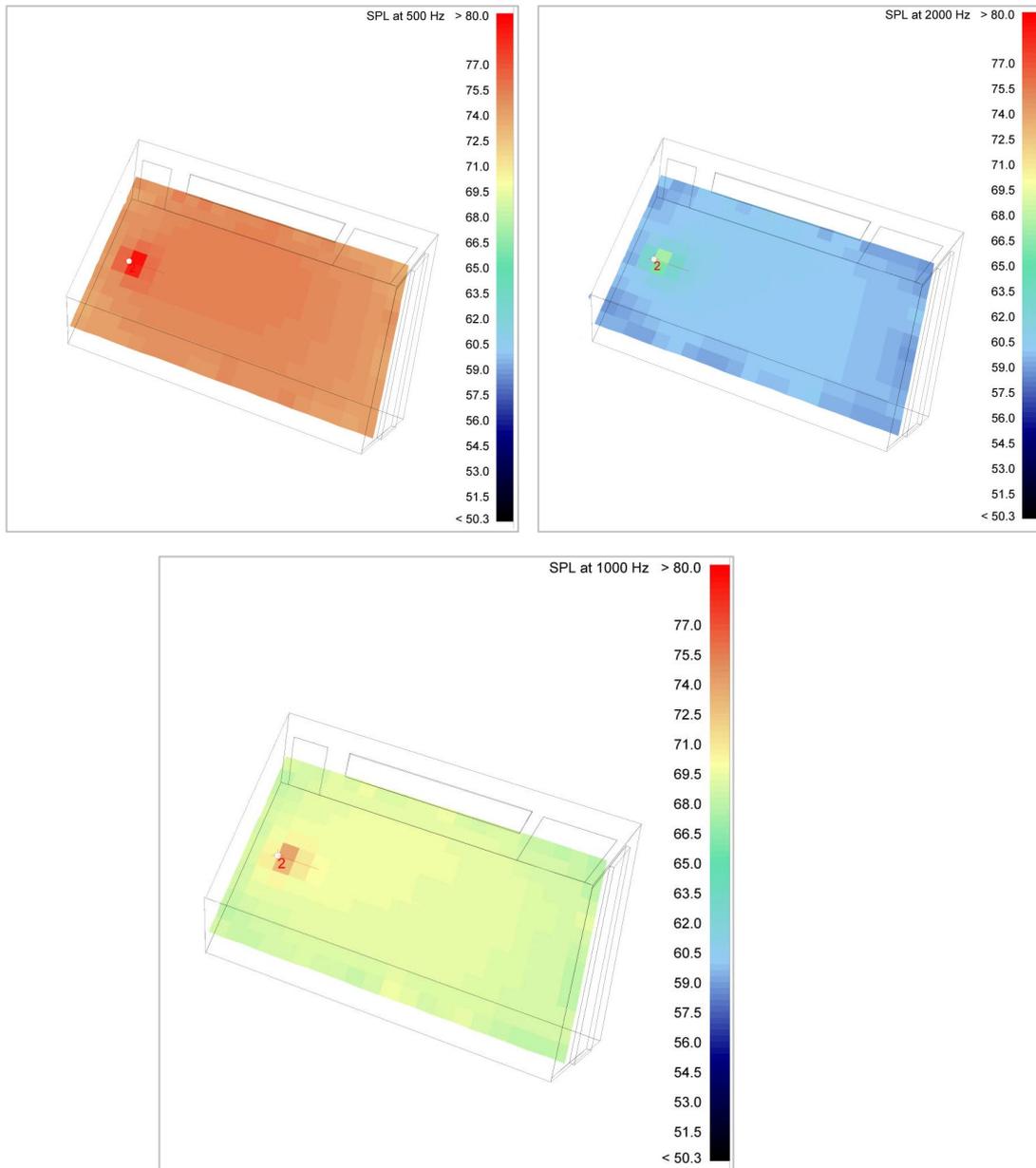


Gráfica 17: Se representa la definición, D_{50} , en el aula 2 en las condiciones iniciales.

La definición, D_{50} , depende de la posición del oyente respecto a la fuente sonora y tiene que ser lo más próximo posible a 1. En este caso tiene valores muy bajos en todo el rango de frecuencias considerado no alcanzando valores superiores a 0,3, salvo en la zona cercana a la fuente.

Siendo la claridad auditiva casi nula el entendimiento sería pésimo.

Distribución sonora en el recinto: SPL (dBA) en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz.



Gráfica 18: Se representa la distribución sonora, SPL, en el aula 2 en las condiciones iniciales.

En cuanto a la distribución sonora, SPL (dBA), se observa que es bastante buena y uniforme en todo el aula, no variando más de 4 dB en la misma frecuencia.

Evaluación de cumplimiento de objetivo y conclusiones preliminares

A continuación se va a realizar una evaluación del grado de cumplimiento de los resultados obtenidos respecto a los objetivos previstos:

Método (Aula 2 vacía)	Resultados	Objetivo	Evaluación de cumplimiento
General	4,33 seg	< 0.7 seg	NO CUMPLE
Placo Tr general	4,08 seg	< 0.7 seg	NO CUMPLE
Placo Tr Sabine	4,49 (media)	< 0.7 seg	NO CUMPLE
Placo Tr Eyring	4,43 (media)	< 0.7 seg	NO CUMPLE
Odeón Tr ₃₀ (estimado)	3,65 seg (media)	< 0.7 seg	NO CUMPLE
Odeón Tr Sabine	4,06 seg (media)	< 0.7 seg	NO CUMPLE
Odeón Tr Eyring	4,01 seg (media)	< 0.7 seg	NO CUMPLE
Odeón Tr Arau-Puchades	4,02 seg (media)	< 0.7 seg	NO CUMPLE
Odeón Tr ₃₀ (simulado)	≈3,52 seg (media)	< 0.7 seg	NO CUMPLE

En la tabla anterior los resultados del Tr se corresponden con la media aritmética del tiempo de reverberación en las bandas de octava centradas en 500, 1000 y 2000 Hz.

A la vista de los resultados se puede concluir que:

- La solución prevista inicialmente para el acondicionamiento acústico del aula no cumple con los objetivos del DB-HR para ninguno de los casos y métodos de evaluación empleados.
- Los valores de Tr se encuentran muy por encima de los requeridos.
- Los valores de otros parámetros acústicos relevantes, tales como EDT, STI, D₅₀ y SPL, tampoco son adecuados con respecto al caso bajo estudio.
- Los recubrimientos de los materiales de las aulas son excesivamente reflectantes.
- Siendo el aula 2 ligeramente más pequeña que el aula 1, los valores encontrados son iguales a los del aula 1 con una diferencia aproximada de 0,1 seg.

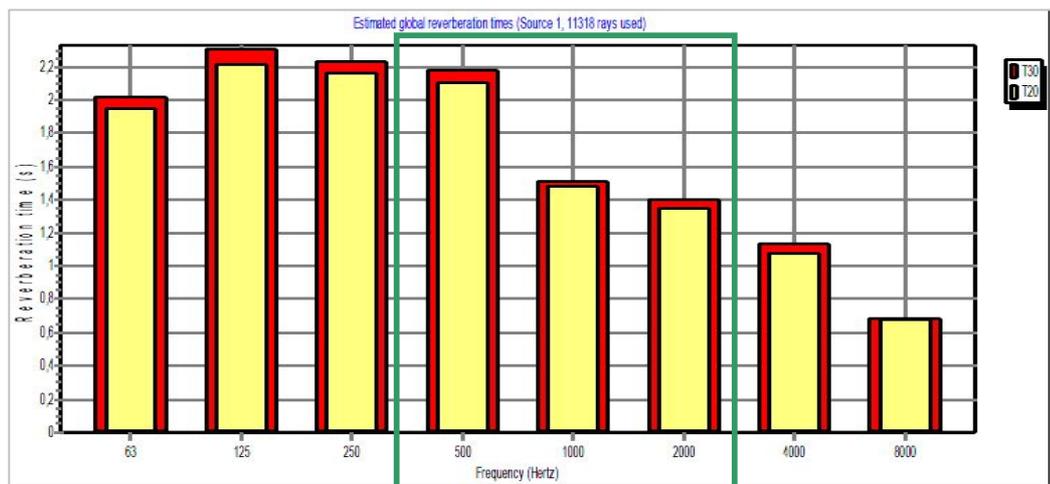
4.3.3. Sala polivalente

Estudio del condicionamiento acústico (Odeón)

En el caso de la sala polivalente se estudia el comportamiento acústico del recinto usando sólo el Odeón, dado que tiene un volumen mayor de 350 m³. Como en los caso anteriores, se tienen en cuenta la geometría, las fuentes sonoras, los receptores, las configuraciones de software y los materiales en el software predictivo.

A través de una simulación y teniendo en cuenta la caída (de 20 o 30 dB, según el caso) de los primeros rayos desde la fuente se obtiene la gráfica de los tiempos de reverberación globales estimados, Tr_{20} (s) y Tr_{30} (s), en las distintas bandas de frecuencia de octava desde 63 Hz hasta 8000 Hz.

Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T20	1.94	2.21	2.16	2.11	1.49	1.35	1.08	0.68
T30	2.02	2.30	2.23	2.18	1.51	1.40	1.13	0.68

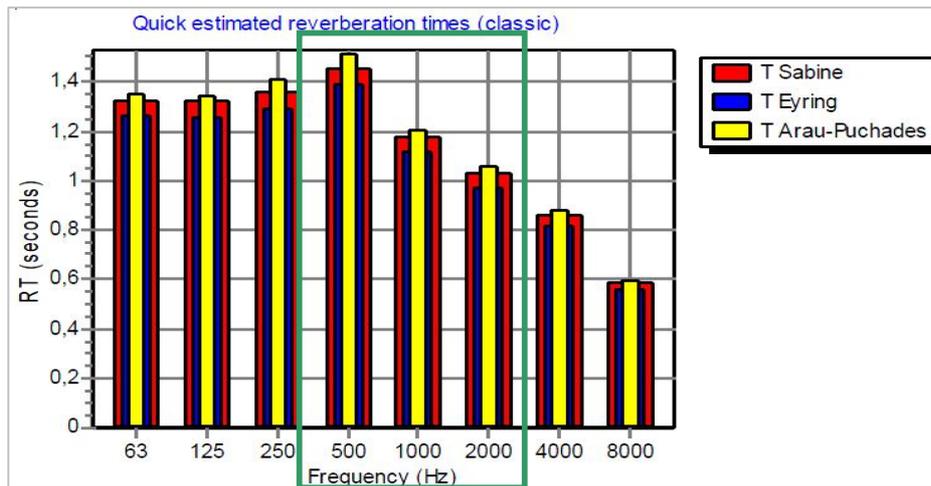


Gráfica 19: Se representa el tiempo de reverberación global estimado en la sala con el método Late ray reflection en las condiciones iniciales.

El Tr_{20} medio para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz es de 1,65 seg y el Tr_{30} medio es de 1,70 seg.

A continuación se calculan los tiempos de reverberación en las distintas bandas de frecuencia de octava desde 63 Hz hasta 8000 Hz, para las aproximaciones de Sabine, Eyring y Arau-Puchades (s).

Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
TEyring	1.26	1.26	1.29	1.39	1.11	0.97	0.81	0.56
TEyring (modified)	1.31	1.30	1.33	1.41	1.10	0.94	0.79	0.55
TSabine	1.32	1.32	1.36	1.45	1.17	1.03	0.86	0.59
TSabine (modified)	1.37	1.37	1.39	1.47	1.16	1.00	0.84	0.58
T Arau-Puchades	1.35	1.34	1.41	1.51	1.21	1.06	0.88	0.59
T Arau-Puchades (modified)	1.40	1.40	1.45	1.53	1.19	1.03	0.86	0.58



Gráfica 20: Se representa el Tr en la sala mediante las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades, incluyendo la influencia del aire en las condiciones iniciales.

La gráfica es una representación de los valores encontrados utilizando las fórmulas teóricas.

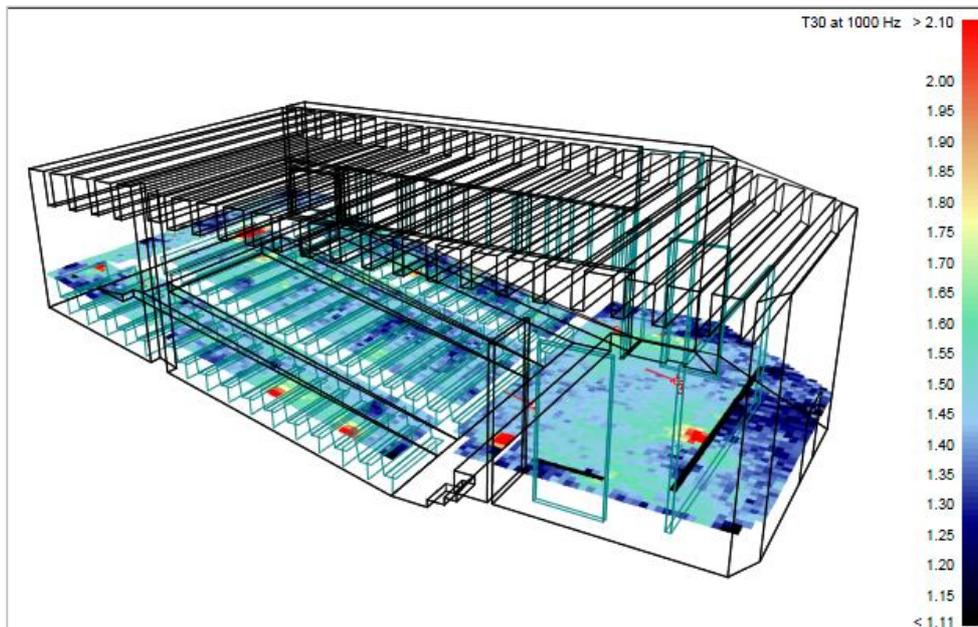
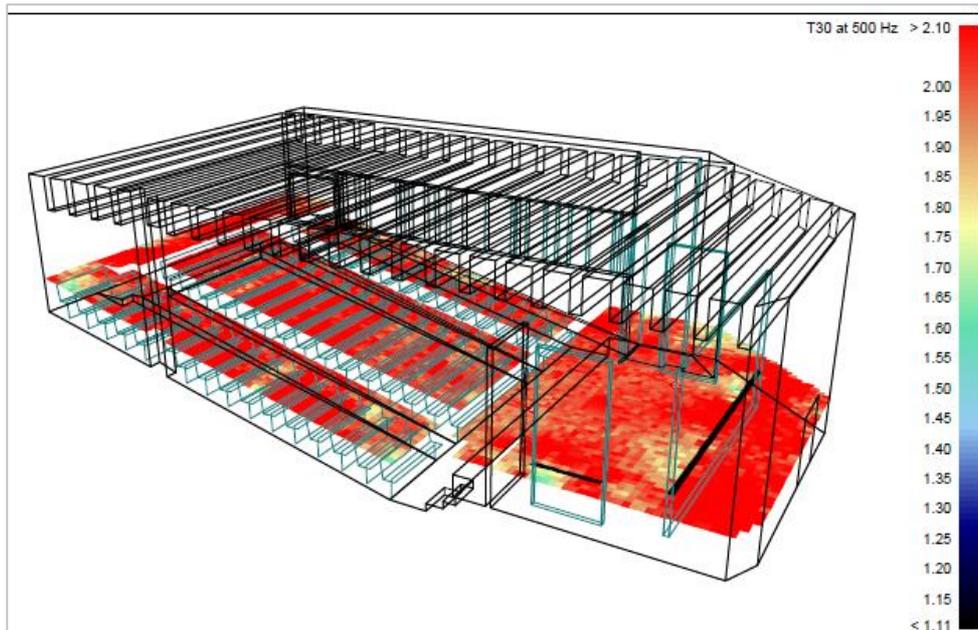
El Tr medio para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz según la fórmula de Eyring es de 1,15 seg y según la fórmula de Sabine es de 1,22 seg.

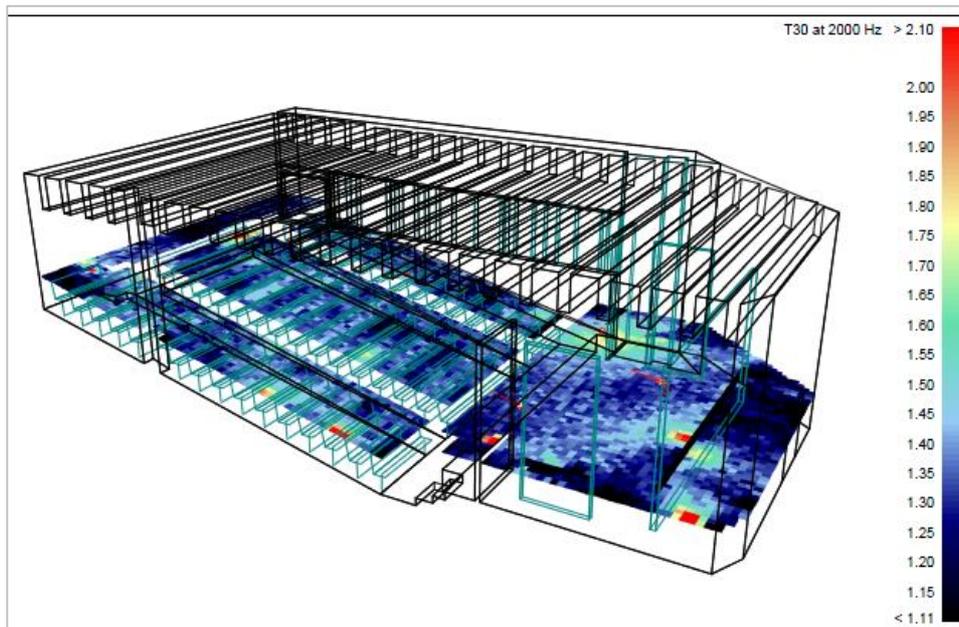
Todas las superficies tienen características de absorción muy bajas excepto las butacas de terciopelo que tienen un coeficiente de absorción de 0,31 en buena parte de su superficie. Eso, influye ligeramente y favorablemente en el tiempo de reverberación de la sala.

Por otra parte, al ser las propiedades de absorción ligeramente dispares, es posible que los valores teóricos calculados con las fórmulas Sabine, Eyring y Arau-Pachades sean menos precisos.

A continuación, tras la simulación, se representan graficamente los resultados de los parámetros acústicos definidos más relevantes para este estudio.

Tiempo de reverberación, Tr_{30} , en 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz;





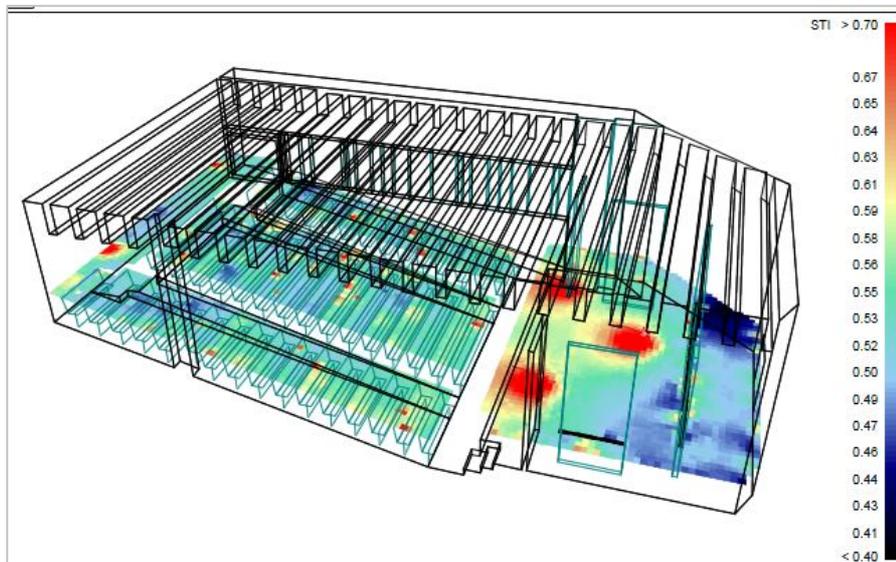
Gráfica 21: Se representa el tiempo de reverberación estimado en la sala en las condiciones iniciales combinando los métodos Early Ray Reflection y Late Ray Reflection.

El Tr_{30} aproximado que se obtiene a 500 Hz es de 2 seg, a 1000 Hz es de 1,55 seg y a 2000 Hz es de 1,40 seg.

En toda la zona de audiencia resulta sensiblemente elevado en bajas frecuencias. En medias y altas frecuencias, el tiempo de reverberación está por encima de 1,2 seg y por debajo de 1,6 seg. (sala vacía), con lo cual se puede considerar aceptable aunque no óptima para el uso de la comunicación oral (como charlas, conferencias, teatro,...) e incluso para el uso de la música, aunque en este último caso no se requieran tiempos de reverberación demasiado bajos por el hecho de que al oyente le gusta recibir una cola reverberante del instrumento musical.

En la zona del escenario el Tr puede resultar adecuado, en particular, dentro de este espacio más personas pueden hablar sin que el entendimiento de la palabra resulte comprometido.

Inteligibilidad de la palabra en la sala, STI;



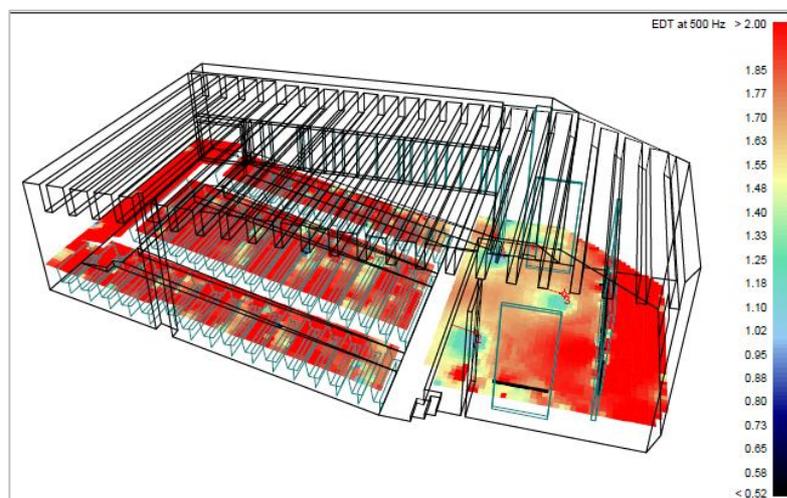
Gráfica 22: Se representa la inteligibilidad de la palabra en la sala en las condiciones iniciales.

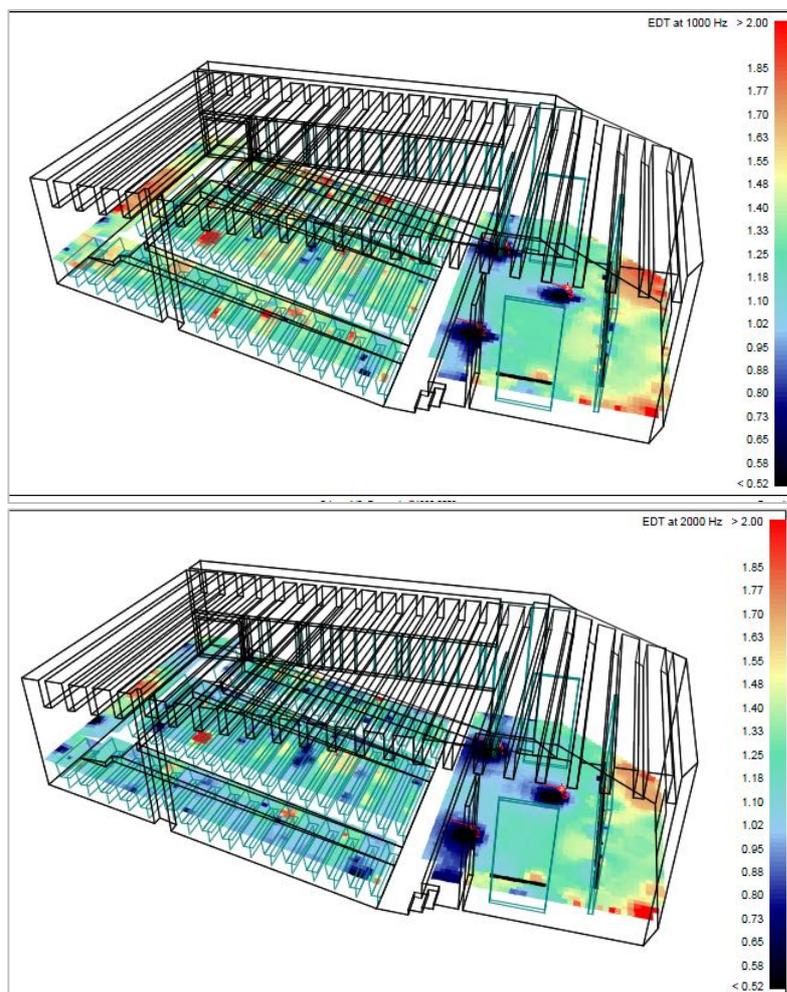
La inteligibilidad, STI, tiene valores bastante uniformes en la zona de audiencia, pero son bastante bajos, calificándose de inteligibilidad aceptable o pobre. En zonas muy concretas de la zona de butacas tiene buena inteligibilidad, pero el resto no alcanzan valores por encima de 0,55 y por lo tanto es una inteligibilidad pobre, sobre todo si se pretende el uso de la palabra.

Resulta necesario mejorar su valor para que no existan problemas de entendimiento.

En la zona del escenario el valor de inteligibilidad resulta bueno debido a la proximidad de la fuente, salvo en la zona posterior del mismo.

Tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;



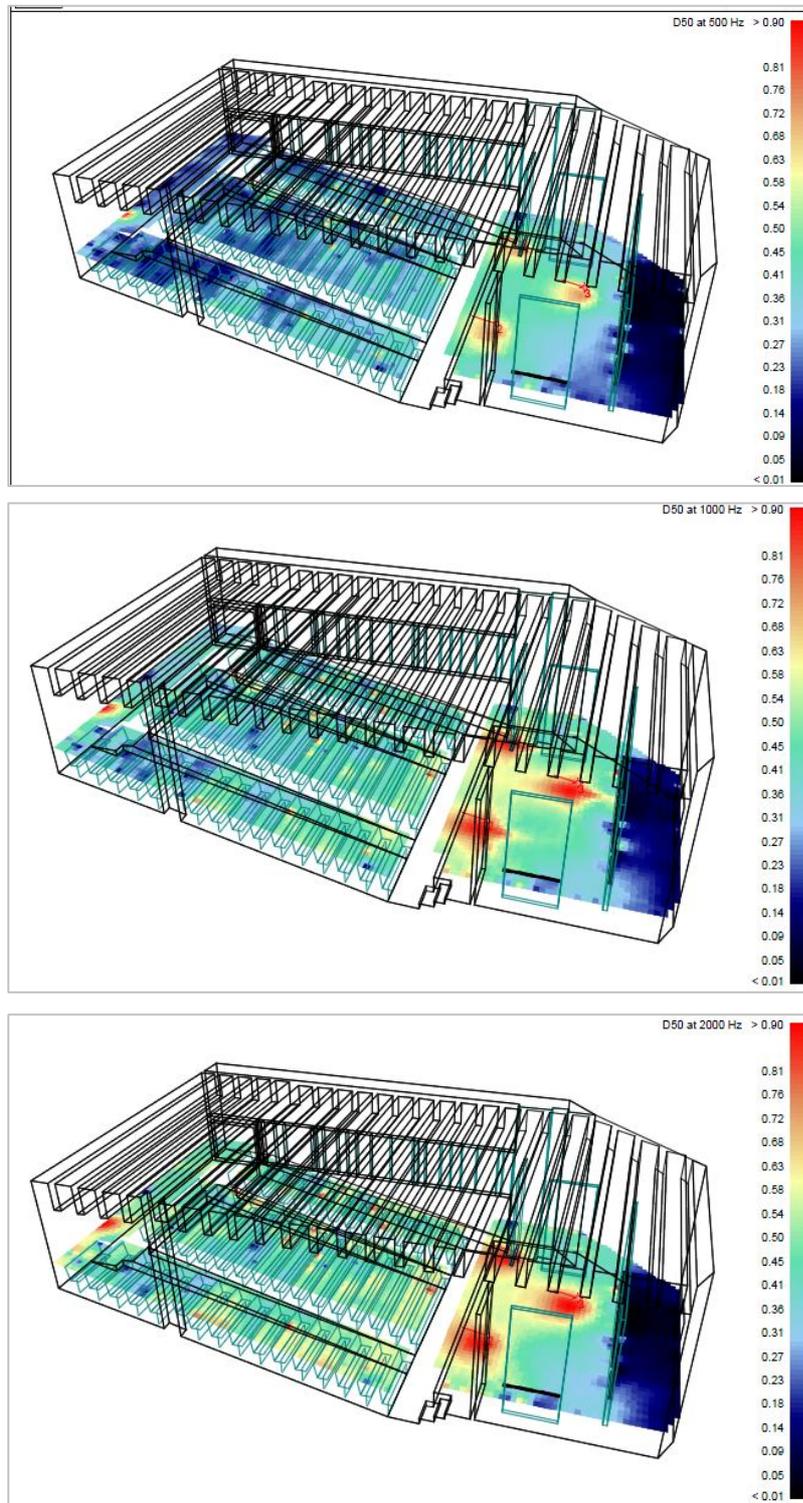


Gráfica 23: Se representa el tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en la sala en las condiciones iniciales.

El tiempo de reverberación subjetivo, EDT (s), aproximadamente a 500 Hz es de 1,95 seg, a 1000 Hz es de 1,40 seg, y a 2000 Hz es de 1,20 seg. Tiene valores similares al Tr_{30} . Esto significa que la sala no se percibe como apagada sino que tiene viveza, con lo cual resulta adecuada para la escucha de música y resulta menos indicada para la palabra, al percibirse una cola reverberante elevada provocada por la cantidad de los rayos tardíos.

En la zona de escenario los valores de EDT también son similares el Tr_{30} , con lo cual la sensación de reverberación no es alta y no existirá dificultad de entendimiento, principalmente porque la distancia respecto a la fuente es corta.

Definición, D_{50} , en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;



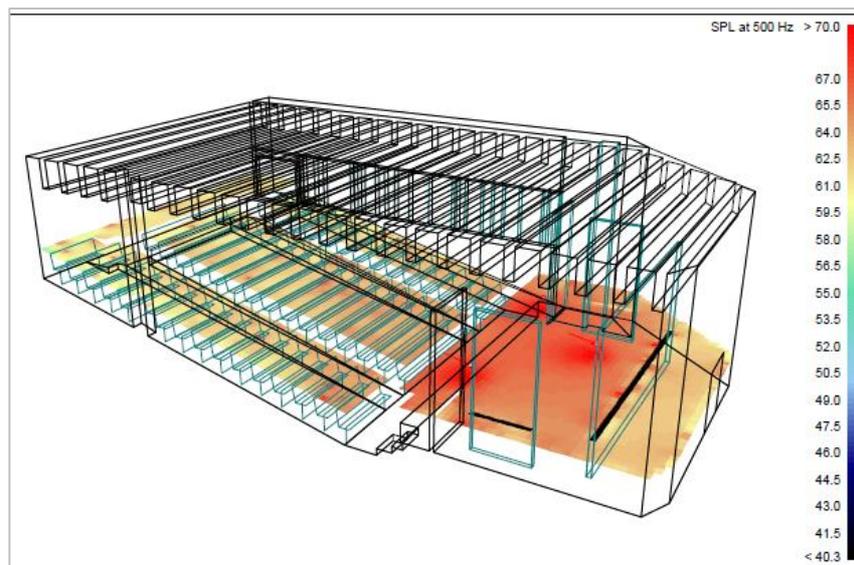
Gráfica 24: Se representa la definición, D_{50} , en la sala en las condiciones iniciales.

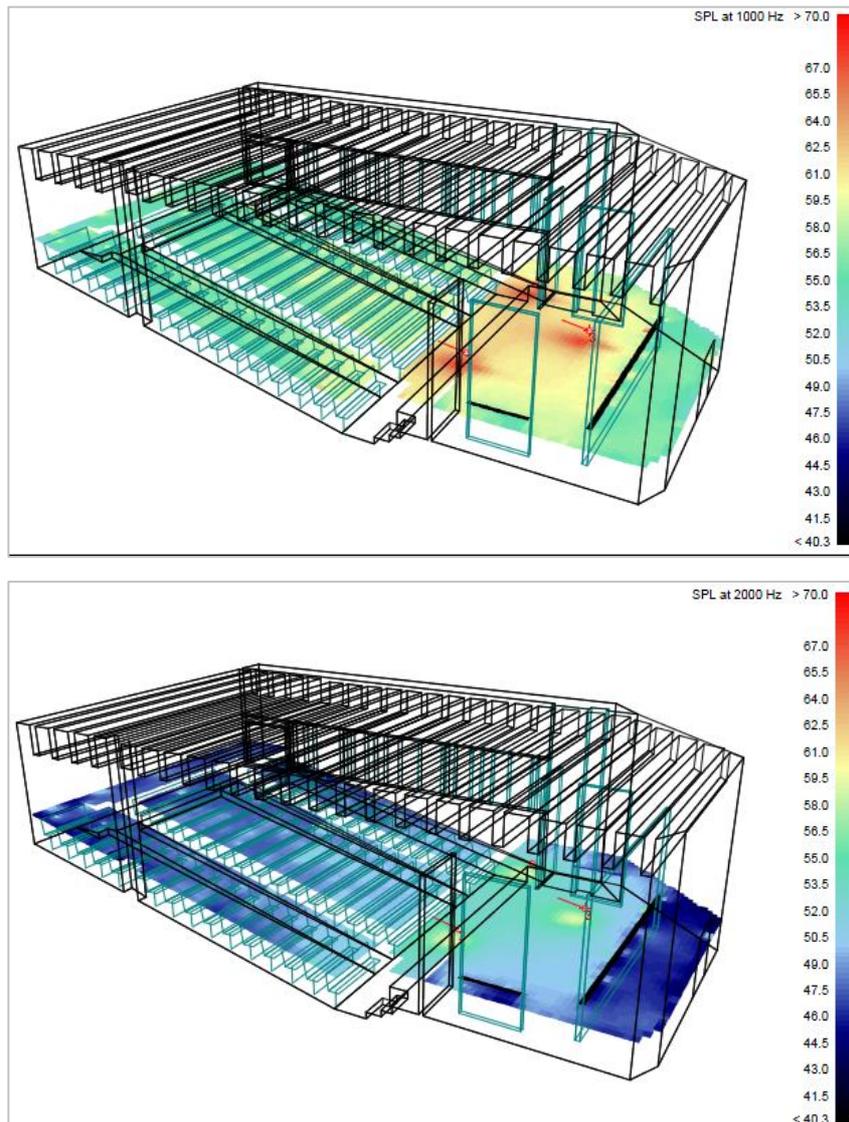
La definición, D_{50} , como se ha comentado en el apdo 3, tiene que ser lo más próximo posible a 1 para que se obtenga un sonido claro. En la gráfica se observa que los valores resultan bastante bajos incluso en altas frecuencias. En la zona de las butacas no superan 0,6, salvo en zonas muy puntuales o en la parte delantera cercana a las fuentes sonoras.

Se concluye que la D_{50} no es la adecuada al llegar en la mayoría de la zona de butacas más energía tardía que sonido directo.

En bajas frecuencias, a medida que nos alejamos hacia la parte trasera del escenario, los valores son excesivamente bajos, entre 0,15 - 0,25, pero es una zona que apenas nos interesa al no necesitarse buen entendimiento ni inteligibilidad, ya que no estarán espectadores.

Distribución sonora en el recinto: SPL (dBA), en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz.





Gráfica 25: Se representa la distribución sonora, SPL, en la sala en las condiciones iniciales.

La distribución sonora, SPL (dBA), no varía más de 4 dB en la misma frecuencia. Por eso, puede ser considerada bastante buena y uniforme en toda la zona de audiencia.

Los niveles sonoros son superiores en las zonas próximas a las fuentes sonoras y disminuyen a medida que nos alejamos de las mismas, pero gracias a la geometría de la sala y al uso de reflexiones no se aprecian variaciones significativas en la distribución del SPL.

En la zona del escenario también existe una buena distribución sonora, aunque nos interese únicamente la zona delantera del mismo, que será la zona destinada a la interpretación, discursos o actividades.

Evaluación de cumplimiento de objetivo y conclusiones preliminares

A continuación se evalúa el resultado en función del objetivo que se quiere alcanzar:

Método (Aula vacía)	Resultados	Objetivo (sala ocupada)	Evaluación de cumplimiento
Odeón Tr ₃₀ (estimado)**	1,7 seg (media)	1 – 1,5 seg	CUMPLE
Odeón Tr Sabine	1,22 seg (media)	*	-
Odeón Tr Eyring	1,16 seg (media)	*	-
Odeón Tr Arau-Puchades	1,26 seg (media)	*	-
Odeón Tr ₃₀ (simulado)**	≈1,65 seg (media)	1 – 1,5 seg	CUMPLE

En la tabla anterior los resultados del Tr se corresponden con la media aritmética del tiempo de reverberación en las bandas de octava centradas en 500, 1000 y 2000 Hz.

* Los valores encontrados con las fórmulas teóricas de Sabine, Eyring y Arau-Pachades no se pueden considerar muy fiables. La condición indispensable para que tengan validez es que las propiedades de absorción de los materiales sean parecidas y que tengan valores inferiores a 0,2.

** Como se ha comentado en el apdo 3, el Tr₃₀ estimado utiliza el método “Late ray reflection” y el Tr₃₀ simulado combina los métodos “Early Ray Reflection” y “Late Ray Reflection”.

- La solución prevista inicialmente para el acondicionamiento acústico de la sala polivalente cumple con los objetivos establecidos en el caso bajo estudio según el método de evaluación empleado pero es posible mejorar la inteligibilidad, el EDT y la definición.

4.4. Propuestas de mejora y optimización del acondicionamiento

A continuación, dado que las soluciones iniciales previstas para las aulas no garantizan el cumplimiento de los requisitos del DB-HR y en el caso de la sala polivalente es posible ajustar ciertos parámetros para obtener una mejora acústica en la sala, se van a proponer y evaluar una serie de mejoras para cada caso, con el objeto de optimizar la solución a llevar a cabo.

4.4.1. Aula 1

Propuestas de mejoras del acondicionamiento acústico (CTE, Placo, Odeón)

A continuación se indican unas características generales de esta aula comunes a todas las propuestas de mejora:

- Superficie del suelo y del techo: 48 m².
- Superficie de las paredes: 76 m².
- Volumen: 129 m³ y una altura de 2,68 m (la altura inicial era de 2,95 m).

Además, cabe señalar que:

- Para el cálculo del tiempo de reverberación en la mejora 1 se ha utilizado el método general y el método simplificado. Se tiene en cuenta la presencia de puertas y ventanas.
- Para el cálculo del tiempo de reverberación en la mejora 2 se ha utilizado el método general, el método simplificado, los métodos dados por el programa Placo Tr y el programa Odeón de modelización predictiva.
- Para el cálculo del tiempo de reverberación en la mejora 3 se ha utilizado el Odeón que permite estimar 8 parámetros y, como se ha explicado en el apdo 3, permite simular el comportamiento acústico de la sala utilizando un método híbrido de trazado de rayos que tiene en cuenta la ley de Snell y la ley de Lambert. En este caso, se tiene en cuenta la presencia de puertas y ventanas y se añaden las butacas para ver como varía el comportamiento acústico de la sala respecto a la mejora 2.

Mejora 1: Instalación de un **techo absorbente** y modificación del material de paredes y suelo, cubriendo toda la superficie del aula. El **techo** está compuesto por placas de yeso laminado perforadas con lana mineral y cámara de aire, las **paredes** por placa de yeso laminado y el **suelo** está cubierto con tarima. En este caso se utiliza solamente el α_m porque la herramienta no utiliza datos en frecuencia, siendo α_m el promedio de los coeficientes de absorción a 500 1000 y 2000 Hz.

Pared	α_m de PYL	0.06	CEC
Suelo	α_m de Tarima	0.09	CEC
Techo	α_m de PYL 15 [10≤p<20] + MW + C [≥150]	0.57	CEC
Ventana	α_m de Vidrio	0.04	CEC
Puerta	α_m de Metal	0.02	CEC

Mejora 2: Instalación de un **techo absorbente** y modificación del material de **paredes** y **suelo**, cubriendo toda la superficie del aula. El **techo** está compuesto por placas de yeso laminado perforadas gyptone big quattro 41 con plenum de 200 mm, las paredes por un trasdosado autoportante de placas de yeso laminado con cámara de aire y el suelo está cubierto con madera de tarima barnizada.

	Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Pared	α de PYL BA 15 trasdosado autoportante con cámara de 100mm y perfil	0.30	0.30	0.12	0.08	0.06	0.06	0.05	0.05
Techo	α de Gyptone big quattro 41 con plenum de 200 mm	0.50	0.50	0.70	0.80	0.70	0.60	0.55	0.55
Suelo	α de Madera de tarima barnizada	0.15	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07	0.07

Mejora 3: Instalación de un **techo absorbente** y modificación del material de **paredes y suelo**, cubriendo toda la superficie del aula. El techo está compuesto por placas de yeso laminado perforadas gyptone big quattro 41 con plenum de 100mm y LM de 75 mm, las paredes por placas de yeso laminado con cámara de aire y el suelo está cubierto con madera de tarima barnizada. Además, se tienen en consideración los materiales empleados en la ventana, las puertas y se añaden las **butacas tapizadas** de plástico.

	Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Pared	α de PYL	0.25	0.23	0.10	0.06	0.05	0.04	0.04	0.04
Techo	α de Gyptone big quattro 41 con plenum de 100mm y LM de 75 mm	0.51	0.51	0.89	0.85	0.70	0.65	0.56	0.56
Suelo	α de Madera de tarima barnizada	0.15	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07	0.07
Ventana	α de Vidrio	0.035	0.035	0.04	0.027	0.03	0.02	0.02	0.02
Puerta	α de Acero	0.015	0.015	0.015	0.015	0.02	0.02	0.03	0.03
Butaca	α de butacas de plástico	0.2	0.2	0.2	0.25	0.3	0.3	0.3	0.3

Resultados propuesta de mejora 1. Aula 1

Resultado empleando el método general con la herramienta del CTE

El resultado del tiempo de reverberación obtenido, para el aula vacía, con estas características,

	Paramentos	$\alpha_{m,i}$	S_i (m ²)	$\alpha_{m,i} S_i$
Pared	Placa de yeso laminado (PYL)	0,06	65,0864	3,9
Techo	YL 15 [10≤p<20] + MW + C [≥150]	0,57	48,22	27,5
Suelo	Tarima	0,09	48,22	4,3
Ventana	Vidrio	0,04	5,92	0,2
Puerta	Metales	0,02	5,32	0,1

y calculado según esta fórmula
$$T = \frac{0,16 \cdot V}{A}$$

Siendo:

V=129 m³ el volumen de la sala

A=36,07 m² el area equivalente definida como
$$A = \sum_{i=1}^m \alpha_{m,i} \cdot S_i$$

Donde:

$\alpha_{m,i}$ es el coeficiente de absorción medio de cada material

S_i es la superficie de cada elemento constructivo

ha sido el siguiente:

Tiempo de reverberación Tr_{60} (s)	0,57	<0,7 seg	CUMPLE
---------------------------------------	------	----------	--------

Resultado empleando el método simplificado con la herramienta del CTE

Considerando solamente un techo acústico en los cálculos realizados, el resultado obtenido del coeficiente de absorción medio del techo $\alpha_{m,t}$, para el aula de volumen hasta 350 m³ sin butacas tapizadas, y calculado según esta fórmula

$$\alpha_{m,t} = h \cdot \left(0,23 - \frac{0,12}{\sqrt{S_t}} \right) = 0,57$$

Siendo:

h=2,68 m la altura inicial de la sala

S_t = 48,22 m² la superficie del techo

ha sido el siguiente:

El coeficiente de absorción acústica medio del techo ha de ser igual o superior a: 0,57
La absorción adicional es suficiente

El área de absorción equivalente del techo es $A_t = \alpha_{m,t} \cdot S_t = 27,49 \text{ m}^2$
 inferior al area equivalente total de $A=36,07 \text{ m}^2$.

En el apartado 4.4.1, se da el valor del coeficiente de absorción medio del techo $\alpha_{m,t}$ que corresponde a 0,57. Siendo el valor propuesto, casualmente, igual a 0,57, la propuesta de mejora es acertada.

Resultados propuesta de mejora 2. Aula 1

Resultado empleando el método general con la herramienta del CTE

Considerando el aula vacía y los materiales que se detallan a continuación

	Paramentos	$\alpha_{m,i}$	$S_i \text{ (m}^2\text{)}$	$\alpha_{m,i} S_i$
Pared	PYL BA 15 trasdosado autoportante con cámara de 100mm	0,07	76,3264	5,1
Techo	Gyptone big quattro 41 con plenum de 200 mm	0,70	48,22	33,8
Suelo	Madera de tarima barnizada	0,08	48,22	3,7

se calcula el tiempo de reverberación según la fórmula $T = \frac{0,16 \cdot V}{A}$

Siendo:

$V=129 \text{ m}^3$ el volumen de la sala

$A=42,54 \text{ m}^2$ el area equivalente definida como $A = \sum_{i=1}^m \alpha_{m,i} \cdot S_i$

Donde:

$\alpha_{m,i}$ es el coeficiente de absorción medio de cada material

S_i es la superficie de cada elemento constructivo

El resultado ha sido el siguiente:

Tiempo de reverberación Tr_{60} (s)	0,49	<0,7 seg	CUMPLE
---------------------------------------	------	----------	--------

Resultado empleando el método simplificado con la herramienta del CTE

Como se observa en el apdo 4.4.1 en la propuesta de mejora 1, el método simplificado, con los nuevos materiales propuestos para el resto de los elementos constructivos, establece que el $\alpha_{m,t}$ del techo debería ser 0,57 con un área de absorción equivalente de

$$A = \alpha_{m,t} \cdot S_t = 27,49 \text{ m}^2$$

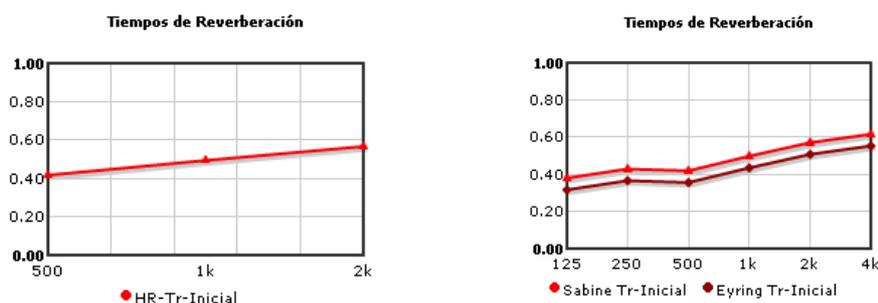
Siendo $S_t = 48,22 \text{ m}^2$ la superficie del techo

En esta segunda propuesta de mejora el valor del coeficiente de absorción medio del techo acústico $\alpha_{m,t}$ es de 0,70, dejando el área equivalente total en $A=42,54 \text{ m}^2$.

Se concluye que la propuesta cumple con los objetivos requeridos.

Resultados empleando el método placo Tr

Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes gráficas 26 y 27:



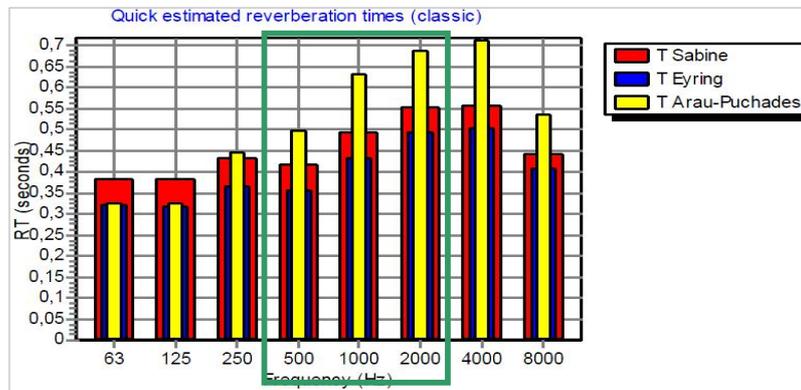
Gráficas 26 y 27: Valores del Tr_{60} en el aula 1 calculados con el método general y con las fórmulas teóricas para la mejora 2.

Método general <0,7 seg	Método simplificado Valor min exigido: 0,57	Método Sabine	Método Eyring
0,48 s	$\alpha_{m,t}=0,7$	0,48 s	0,41 s

Resultados empleando el Odeón

Como ya se ha comentado el programa permite llevar a cabo una modelización del comportamiento acústico del aula y permite calcular los tiempos de reverberación en las bandas de octava desde 63 Hz hasta 8000 Hz, para las aproximaciones de Sabine, Eyring y Arau-Puchades (s) y sus modificaciones que tienen en cuenta la forma de la sala.

Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
TEyring	0.32	0.32	0.37	0.35	0.43	0.49	0.50	0.41
TEyring (modified)	0.32	0.32	0.36	0.35	0.43	0.49	0.50	0.41
TSabine	0.38	0.38	0.43	0.42	0.49	0.55	0.55	0.44
TSabine (modified)	0.38	0.38	0.43	0.41	0.49	0.55	0.55	0.44
T Arau-Puchades	0.32	0.32	0.44	0.50	0.63	0.69	0.71	0.53
T Arau-Puchades (modified)	0.32	0.32	0.44	0.49	0.63	0.68	0.71	0.53



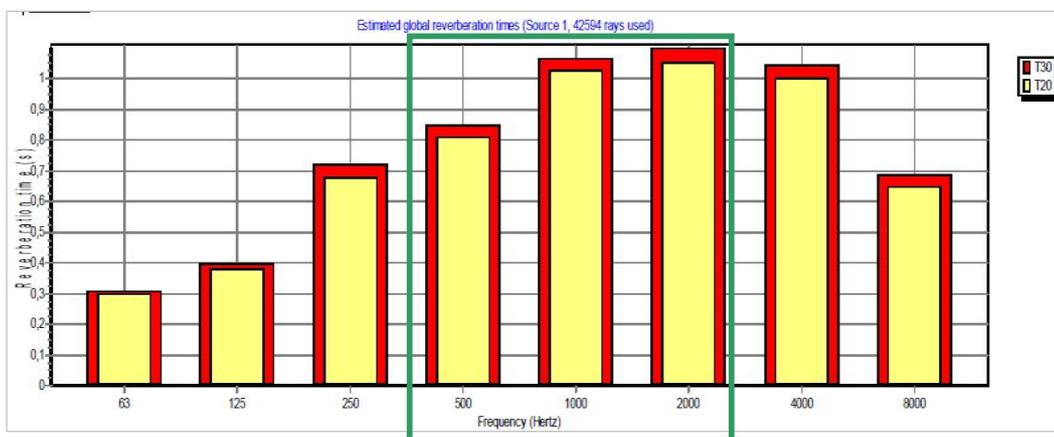
Gráfica 29: Se representa el Tr en el aula 1 mediante las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades, incluyendo la influencia del aire en la mejora 2.

El Tr medio para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz según la fórmula de Eyring es de 0,42 seg y según la fórmula de Sabine es de 0,48 seg.

Se aproximan a los valores encontrados con el CTE y con el método Placo Tr, pero teniendo las superficies distintas propiedades de absorción y teniendo el techo un $\alpha_{m,t}$ por encima de $\alpha=0,2$ los valores calculados a través de las fórmulas teóricas no son tan fiables.

Además, permite sacar los tiempos de reverberación globales estimados, Tr_{20} (s) y Tr_{30} (s), tal y como se representan en la gráfica a continuación.

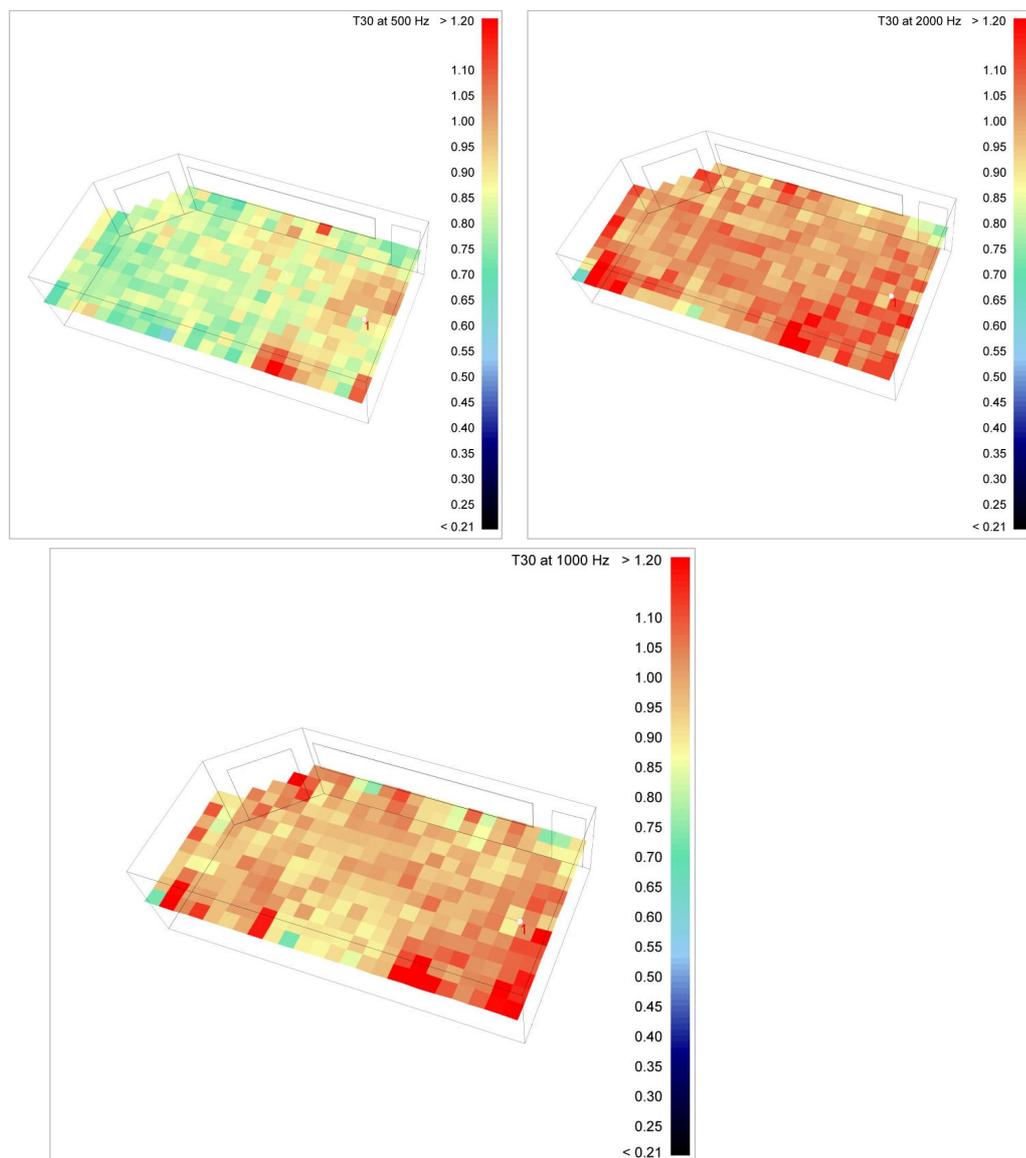
Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T20	0.30	0.38	0.68	0.81	1.03	1.05	1.00	0.65
T30	0.31	0.40	0.72	0.85	1.06	1.10	1.04	0.68



Gráfica 28: Se representa el tiempo de reverberación global estimado en el aula 1 con el método **Late ray reflection para la mejora 2.**

El Tr_{20} medio para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz es de 0,96 seg y el Tr_{30} medio es de 1 seg. Tras la simulación, se representan gráficamente los resultados de los parámetros acústicos definidos más relevantes para este estudio.

Tiempo de reverberación, Tr_{30} , en 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz;



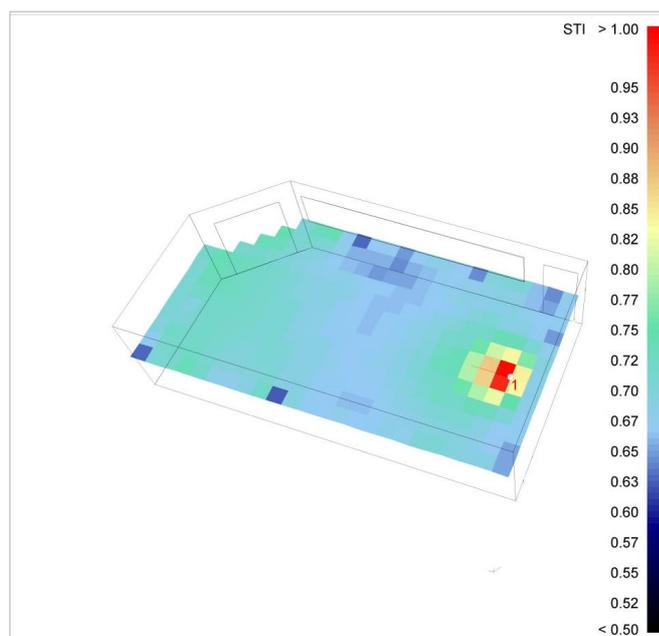
Gráfica 30: Se representa el tiempo de reverberación estimado en el aula 1 en la mejora 2 combinando los métodos **Early Ray Reflection y Late Ray Reflection.**

El Tr_{30} aproximado que se obtiene a 500 Hz es de 0,85 seg, a 1000 Hz es de 0,90 seg y a 2000 Hz es de 0,95 seg. Resulta igualmente distribuido en toda el aula y ha disminuido considerablemente respecto al caso inicial sin tratamiento.

Como se observa, los valores encontrados mediante las fórmulas teóricas y el método de trazado de rayos difieren considerablemente. Esto puede ser debido, como se ha comentado, a la diferente forma de calcular dichos valores.

Parece razonable pensar que los valores más precisos son los que se obtienen con el método de trazado de rayos ya que no se cumplen completamente las hipótesis en las que se basaban las fórmulas teóricas.

Inteligibilidad de la palabra en la sala, STI;

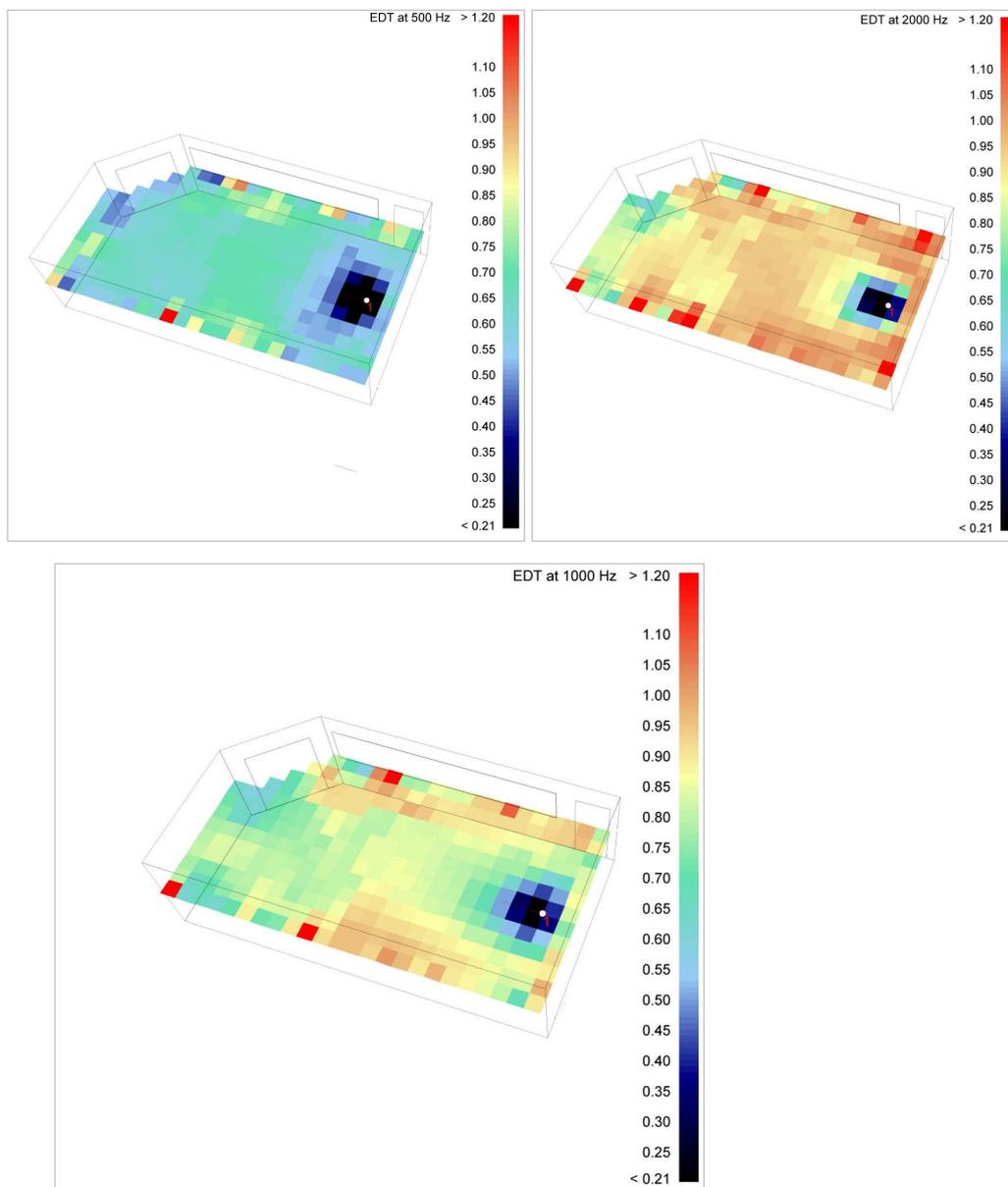


Gráfica 31: Se representa la inteligibilidad de la palabra en el aula 1 con la mejora 2.

La inteligibilidad, STI, tiene valores uniformes en casi toda el aula y ha mejorado sustancialmente respecto al caso sin tratamiento. En cualquier punto del recinto está por encima de 0,66 calificándose de inteligibilidad buena.

En la zona cercana al hablante existe un valor de inteligibilidad un poco más elevado por la cercanía de la fuente.

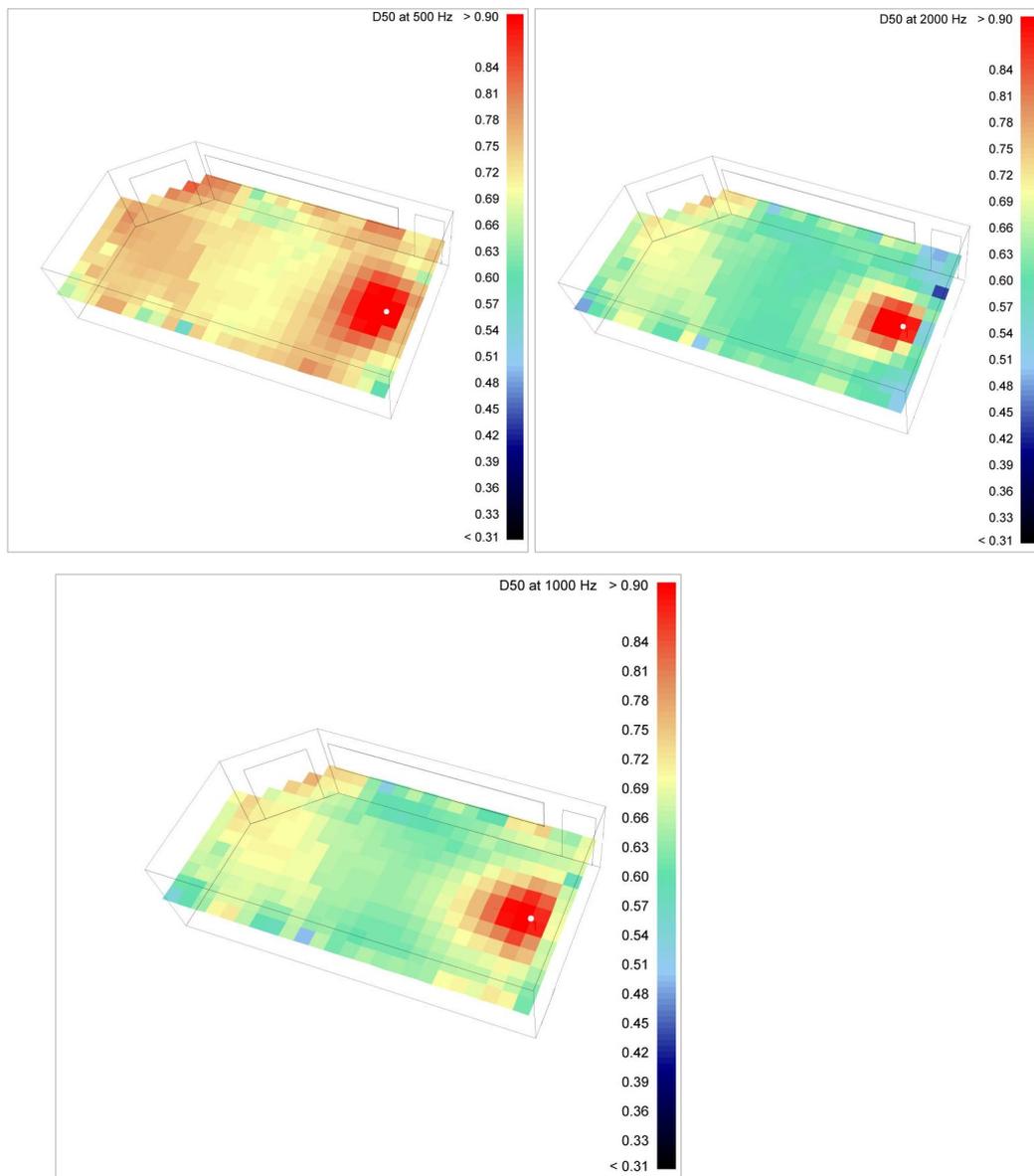
Tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;



Gráfica 32: Se representa el tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en el aula 1 con la mejora 2.

El tiempo de reverberación subjetivo, EDT (s), aproximadamente a 500 Hz es de 0,70 seg, a 1000 Hz es de 0,85 seg, y a 2000 Hz es de 0,90 seg. Tiene valores ligeramente por debajo del Tr_{30} . Esto implica que el aula se percibirá un poco más apagada y resulta adecuada para la palabra.

Definición, D_{50} , en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;

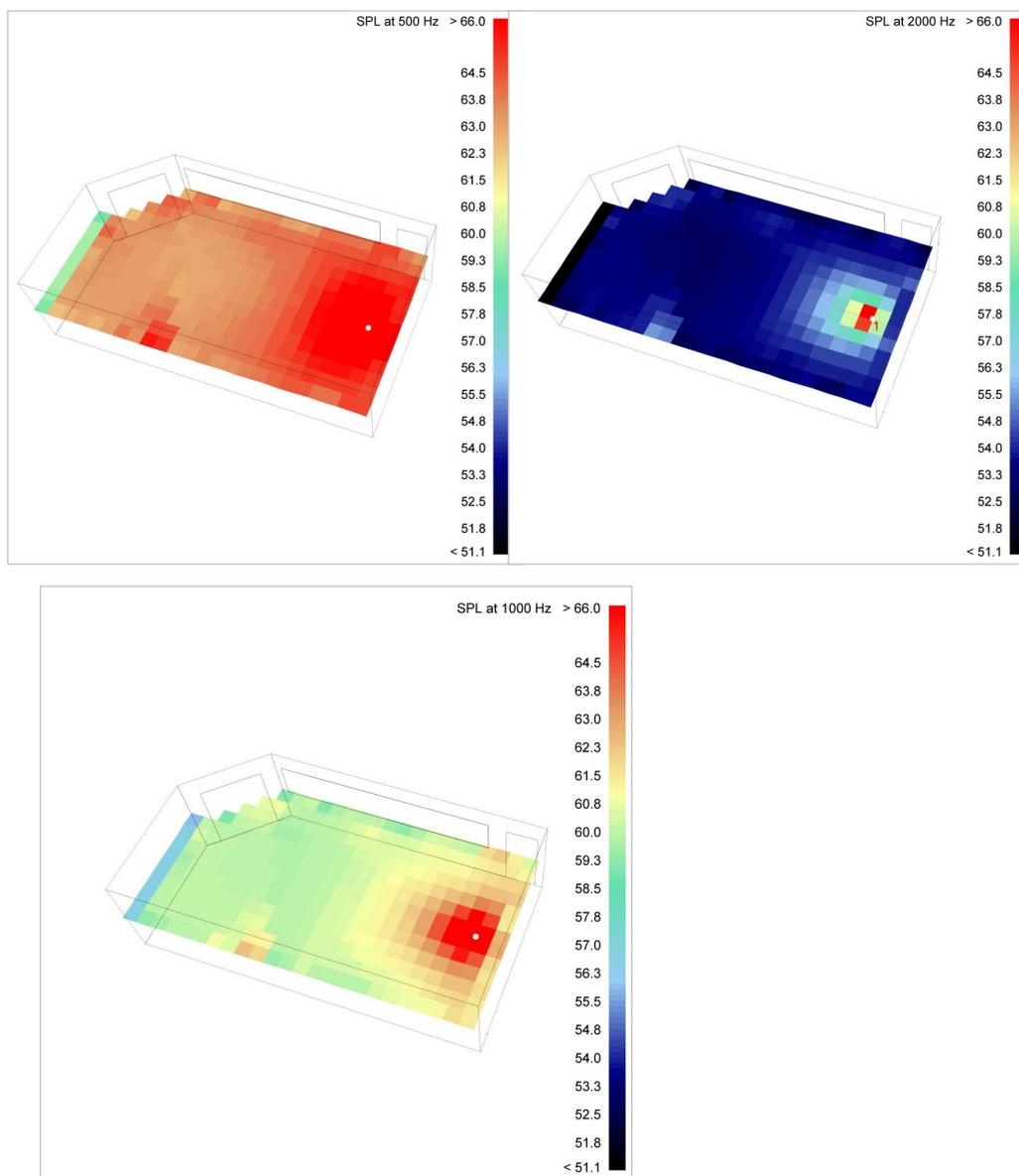


Gráfica 33: Se representa la definición, D_{50} , en el aula 1 con la mejora 2.

La definición, D_{50} , valora la claridad auditiva y como se ha dicho en el apdo 3 depende de la posición del oyente respecto a la fuente sonora.

Los valores son más elevados que en el caso sin tratamiento acústico y están por encima de 0,55 en bajas, medias y altas frecuencias, salvo en la zona cercana a la fuente. Esto significa que la energía del sonido directo es mayor que la del sonido reflejado, por tanto llega con claridad a los oyentes.

Distribución sonora en el recinto: SPL (dBA), en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;



Gráfica 34: Se representa la distribución sonora, SPL, en el aula 1 con la mejora 2.

En cuanto a la distribución sonora, SPL (dBA), sigue siendo bastante buena y uniforme en todo el aula, no variando más de 4 dB en la misma frecuencia.

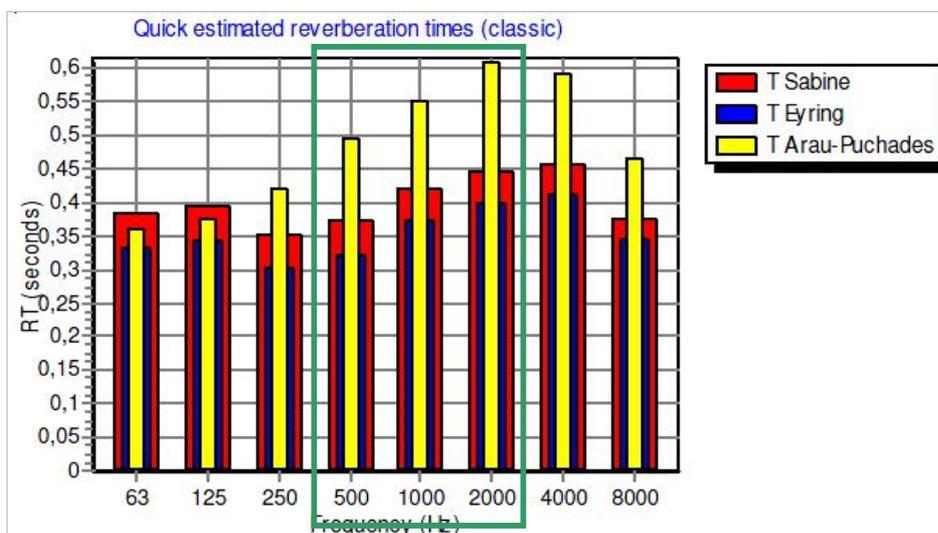
Resultados propuesta de mejora 3. Aula 1

Se ha utilizado solamente el programa Odeón para hallar los resultados del tiempo de reverberación y poderlos contrastar con los valores encontrados con la propuesta 2. En este caso, se tienen en cuenta las puertas, las ventanas y las butacas de plástico (apdo 4.4.1) para ver como podría influir su presencia en el caso bajo estudio.

Calculando el tiempo de reverberación según las aproximaciones de Sabine, Eyring y Arau-Puchades se obtienen los resultados representados a continuación:

Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
TEyring	0.33	0.34	0.30	0.32	0.37	0.40	0.41	0.35
TEyring (modified)	0.32	0.33	0.28	0.30	0.35	0.37	0.39	0.33
TSabine	0.38	0.39	0.35	0.37	0.42	0.45	0.46	0.38
TSabine (modified)	0.37	0.38	0.33	0.35	0.40	0.42	0.43	0.36
TArau-Puchades	0.36	0.38	0.42	0.50	0.55	0.61	0.59	0.47
TArau-Puchades (modified)	0.35	0.36	0.41	0.49	0.55	0.61	0.59	0.46

Junto a estas tres expresiones aparecen otras tres que son modificaciones de las primeras y que tienen en cuenta la forma de la sala, también representadas en las bandas de octava que van de 63 Hz a 8000 Hz.

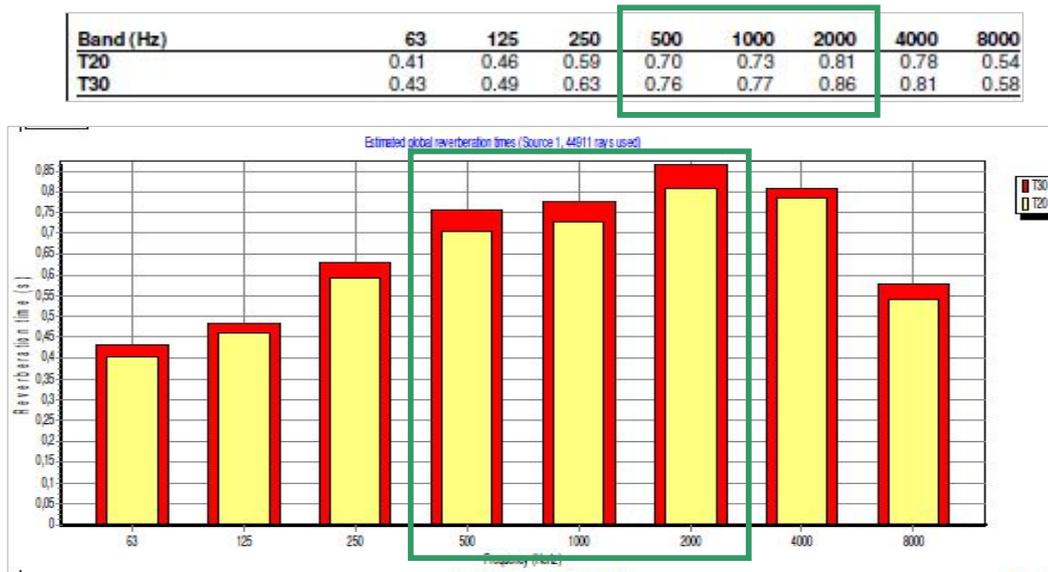


Gráfica 36: Se representa el Tr en el aula 1 mediante las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades, incluyendo la influencia del aire en la mejora 3.

El Tr medio para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz según la fórmula de Eyring es de 0,36 seg y según la fórmula de Sabine es de 0,41 seg.

Los valores hallados no tienen validez por las distintas propiedades de absorción de los materiales del recinto, además, hay valores que están por encima de $\alpha=0,2$.

Tras la simulación, se representan los tiempos de reverberación globales estimados, Tr_{20} (s) y Tr_{30} (s), en las distintas bandas de frecuencia de octava desde 63 Hz hasta 8000 Hz. La gráfica tiene en cuenta la caída (de 20 o 30 dB, según el caso) de los primeros rayos desde la fuente.

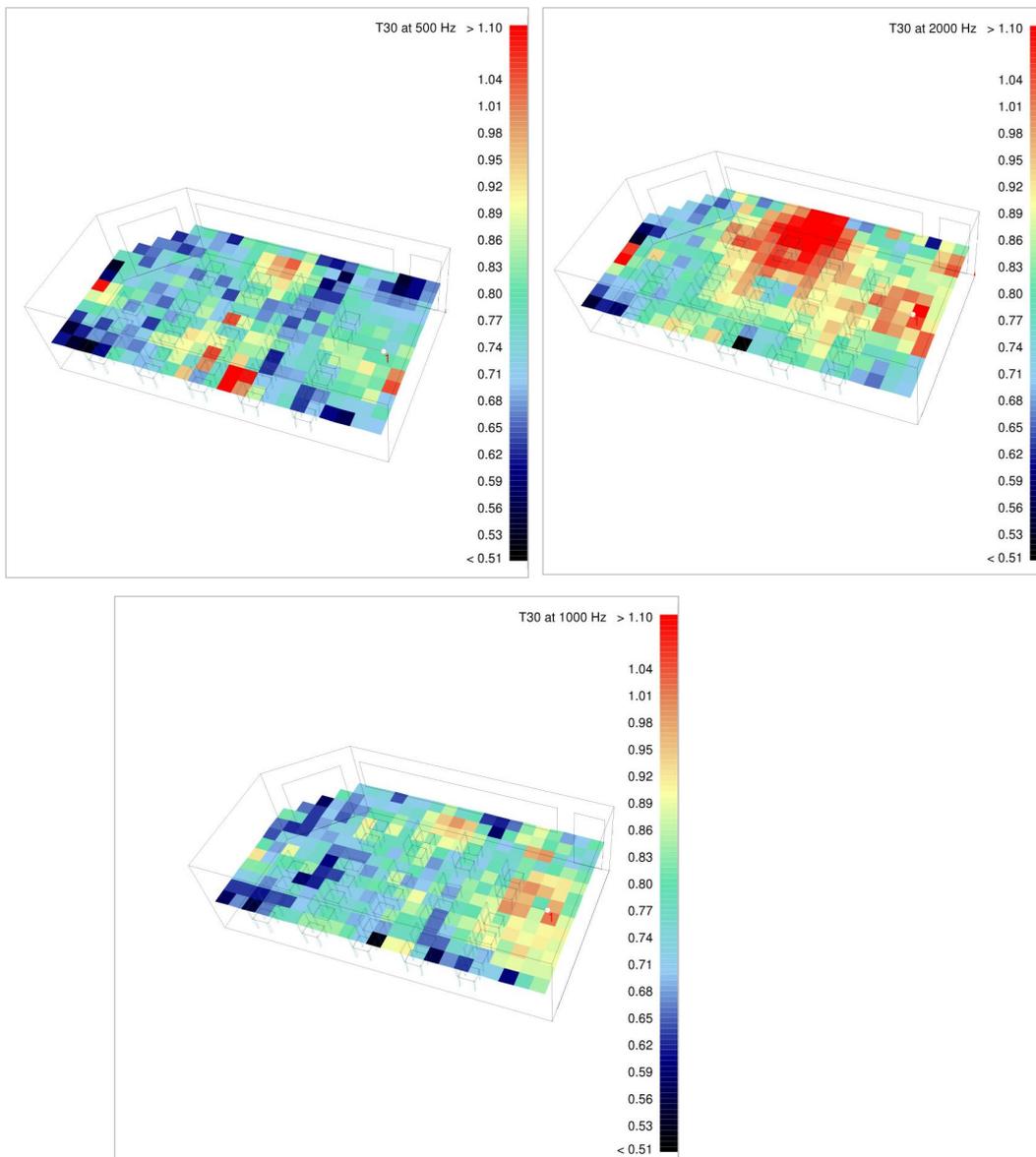


Gráfica 35: Se representa el tiempo de reverberación global estimado en el aula 1 con el método Late ray reflection para la mejora 3.

El Tr_{20} medio para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz es de 0,74 seg y el Tr_{30} medio es de 0,80 seg.

Tras la simulación, se representan los resultados, de forma gráfica, de los parámetros acústicos definidos más relevantes para este estudio.

Tiempo de reverberación, Tr_{30} , en 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz;

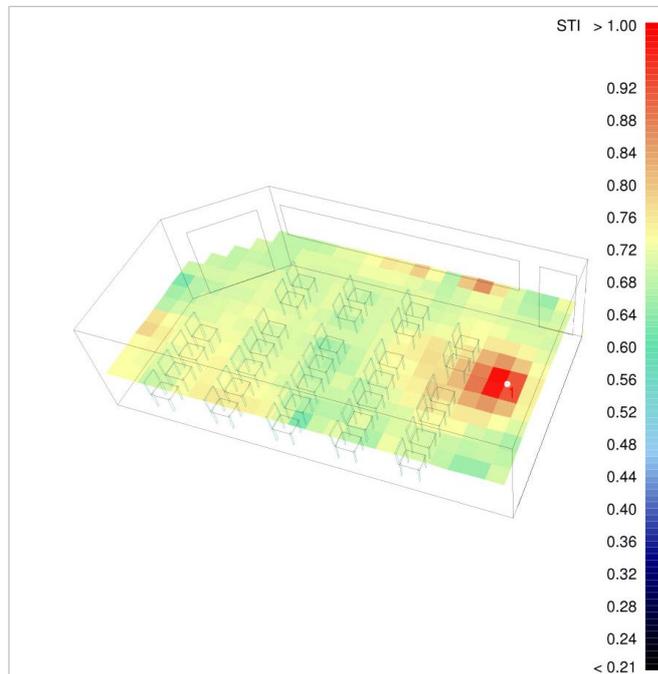


Gráfica 37: Se representa el tiempo de reverberación estimado en el aula 1 en la mejora 3 combinando los métodos Early Ray Reflection y Late Ray Reflection.

El Tr_{30} aproximado que se obtiene a 500 Hz es de 0,77 seg, a 1000 Hz es de 0,80 seg y a 2000 Hz es de 0,89 seg. Resulta distribuido uniformemente en toda el aula, excepto a 2000 Hz donde se nota un ligero aumento del Tr_{30} en una zona concreta del recinto. En general, ha disminuido considerablemente respecto al caso inicial.

Ha de observar que, como en la propuesta 2, los valores hallados con el método de trazado de rayos no se parecen a los encontrados utilizando las fórmulas teóricas.

Inteligibilidad de la palabra en la sala, STI;

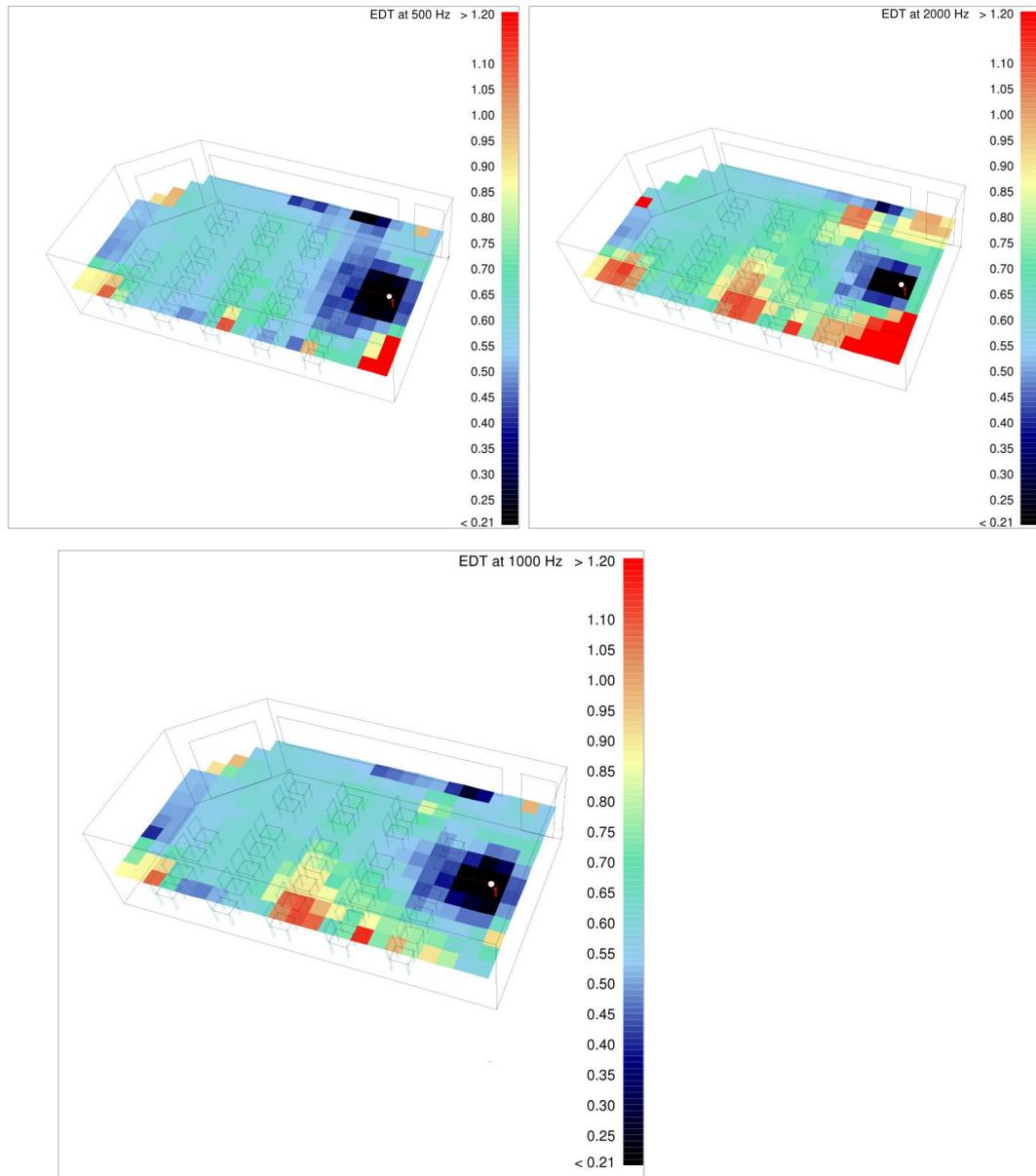


Gráfica 38: Se representa la inteligibilidad de la palabra en el aula 1 con la mejora 3.

La inteligibilidad, STI, tiene valores uniformes en casi toda el aula y ha mejorado sustancialmente respecto al caso sin tratamiento. En cualquier punto del recinto está por encima de 0,66 calificándose de inteligibilidad buena.

En la zona cercana al hablante existe un valor de inteligibilidad un poco más elevado por la proximidad de la fuente.

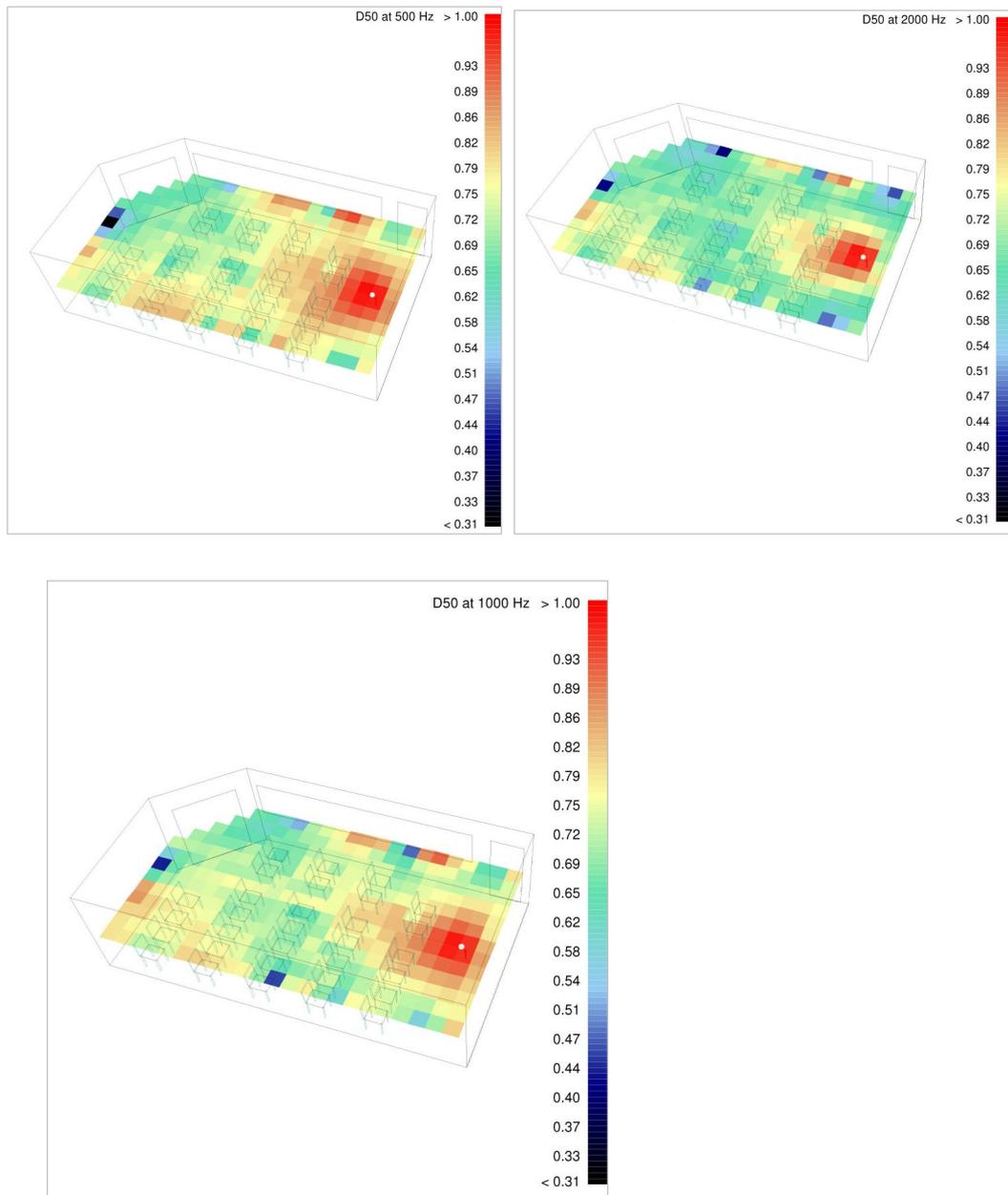
Tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;



Gráfica 39: Se representa el tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en el aula 1 con la mejora 3.

El tiempo de reverberación subjetivo, EDT (s), aproximadamente a 500 Hz es de 0,60 seg, a 1000 Hz es de 0,65 seg, y a 2000 Hz es de 0,77 seg. Tiene valores ligeramente por debajo del Tr_{30} . por lo tanto se percibirá un poco más apagada resultando adecuado para la palabra.

Definición, D_{50} , en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;

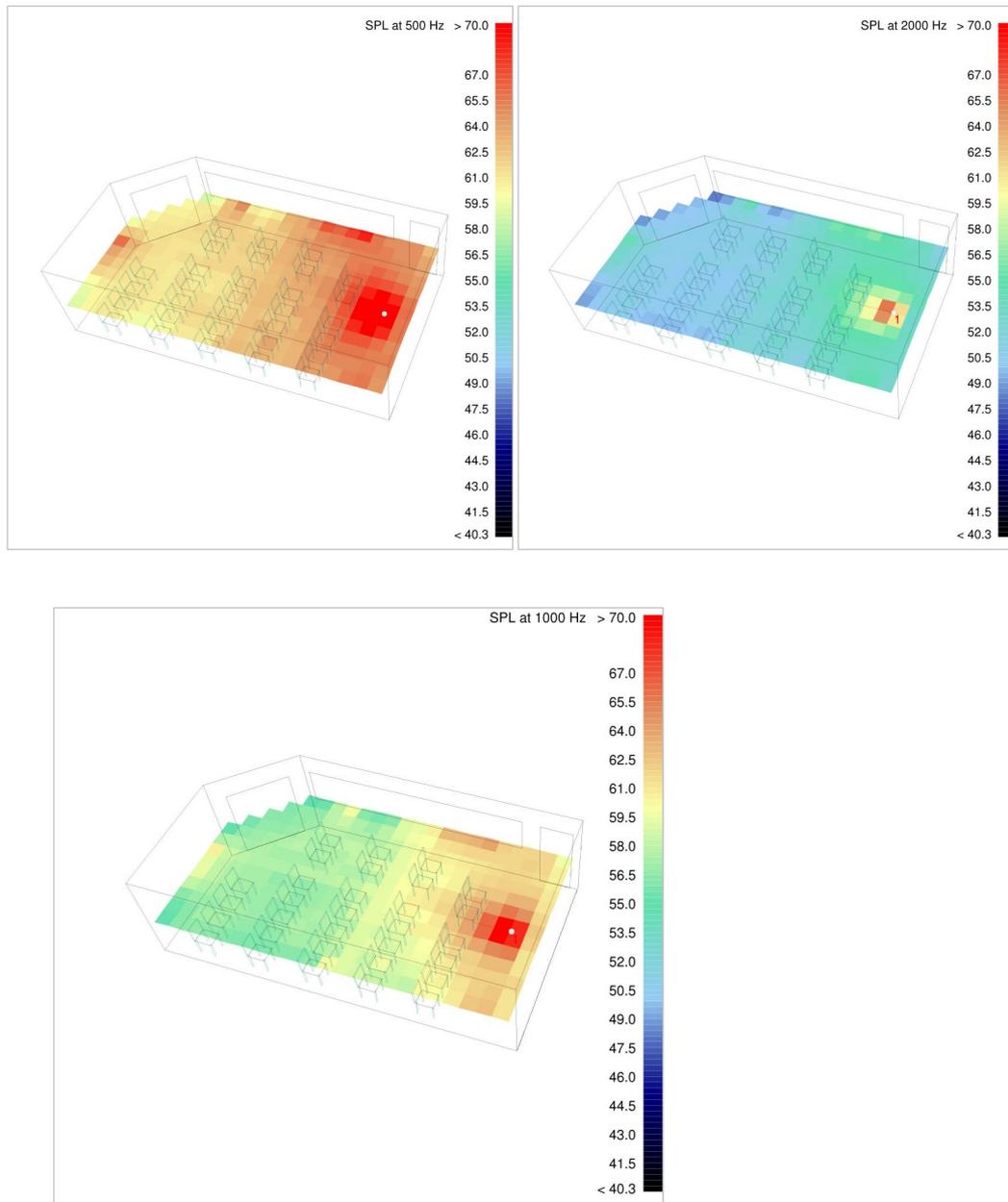


Gráfica 40: Se representa la definición, D_{50} , en el aula 1 con la mejora 3.

La definición, D_{50} , valora la claridad auditiva y como se ha comentado ya en el apdo 3 depende de la posición del oyente respecto a la fuente sonora.

Los valores son más elevados que en el caso sin tratamiento acústico y están por encima de 0,55 en bajas, medias y altas frecuencias, salvo en la zona cercana a la fuente. Esto significa que la energía del sonido directo es mayor que la del sonido reflejado, por tanto llega con claridad a los oyentes.

Distribución sonora en el recinto: SPL (dBA), en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;



Gráfica 41: Se representa la d Distribución sonora, SPL, en el aula 1 con la mejora 3.

En cuanto a la distribución sonora, SPL (dBA), sigue siendo bastante buena y uniforme en todo el aula, no variando más de 4 dB en la misma frecuencia.

Evaluación de cumplimiento de objetivo y conclusiones AULA 1

A continuación se muestra una tabla resumen con los resultados para las distintas propuestas de mejora en el aula 1.

Mejoras	Método	Resultados (seg)	Objetivo
1	General	0,57	≤ 0.7 seg
2	General	0,49	≤ 0.7 seg
	Placo General	0,48	≤ 0.7 seg
	Placo Tr Sabine	0,48	≤ 0.7 seg
	Placo Tr Eyring	0,41	≤ 0.7 seg -
	Odeón Tr₃₀ estimado**	1	≤ 0.7 seg
	Odeón Tr Eyring	0,42	*
	Odeón Tr Sabine	0,48	*
	Odeón Tr Arau-Puchades	0,61	*
	Odeón Tr ₃₀ simulado**	≈0,90	≤ 0.7 seg
3	Odeón Tr₃₀ estimado**	0,80	≤ 0.7 seg
	Odeón Tr Eyring	0,36	*
	Odeón Tr Sabine	0,41	*
	Odeón Tr Arau-Puchades	0,55	*c
	Odeón Tr ₃₀ simulado**	≈0,82	≤ 0.7 seg -

En la tabla anterior los resultados del Tr se corresponden con la media aritmética del tiempo de reverberación en las bandas de octava centradas en 500, 1000 y 2000 Hz.

* Los valores encontrados con las fórmulas teóricas de Sabine, Eyring y Arau-Pachades no se pueden considerar muy fiables. La condición indispensable para que tengan validez es que las propiedades de absorción de los materiales sean parecidas y que tengan valores inferiores a 0,2.

** Como se ha comentado en el apdo 3, el Tr₃₀ estimado utiliza el método “Late ray reflection” y el Tr₃₀ simulado combina los métodos “Early Ray Reflection” y “Late Ray Reflection”.

La discrepancia entre ambos métodos de simulación es significativa y digna de tenerse en cuenta a la hora de abordar estudios de acondicionamiento en los que intervengan materiales altamente absorbentes o materiales con muy distintas propiedades de absorción.

En el caso real, detallado en el ensayo recogido en el anexo B, no se optó por ninguna de las soluciones descritas. Se instaló un techo de placa de yeso perforada (de valor de absorción aproximado de 0,55), pavimento cerámico y paredes revestidas de enlucido de yeso. El Tr medio medido fue de 1 seg. Tras la mejora ejecutada el Tr obtenido no cumple con los objetivos establecidos por el DB-HR .

Tras este estudio se puede concluir:

- Los valores proporcionados por el programa Placo son muy parecidos a los encontrados utilizando la herramienta del DB-HR. La limitación que tiene el programa Placo es que da por defecto los materiales con sus relativos coeficientes de absorción y no permite insertar otros distintos.
- Los valores de tiempo de reverberación proporcionados por las fórmulas teóricas calculadas con el Odeón y el Placo son parecidos a los encontrados con la hoja de cálculo del DB-HR. Este método de cálculo empleado permite obtener resultados rápidos y con un buen grado de aproximación. Es útil en una etapa inicial de estudio y propuesta de acondicionamiento acústico de una sala. La desventaja es que las fórmulas de Sabine y de Eyring, son de aplicación sólo cuando los coeficientes de absorción son parecidos y de valores inferiores a 0,2.
- Se ha de tener en cuenta que la simulación con el programa Odeón considera los valores de la absorción por bandas de octava desde 63 Hz hasta 8000 Hz, mientras que el método general considera el coeficiente de absorción medio entre 500, 1000 y 2000 Hz. Ambos métodos estiman los valores del tiempo de reverberación para un recinto sin oyentes.
- Haciendo una simulación con el programa Odeón se ha comprobado que la presencia de mobiliario en el interior del recinto también influye en el comportamiento acústico del aula. En este caso se ha optado por unas butacas de plástico (Mejora 3).

Además:

- Insertando en el programa de cálculo de modelización predictiva Odeón la superficie de los cristales y de las puertas de metal presentes en el aula con el coeficiente de absorción correspondiente se ha comprobado que, siendo el coeficiente de absorción muy bajo y dado que la superficie es poco significativa respecto a su totalidad, no influyen en el cálculo del tiempo de reverberación.
- El programa de modelización acústica predictiva, Odeón, ha devuelto un tiempo de reverberación distinto respecto a los demás programas, a pesar de que las soluciones de partida eran las mismas. Esto se debe al hecho que el método de trazado de rayos tiene en cuenta otros parámetros tales como las reflexiones especulares, el fenómeno de la dispersión, las pérdidas por difracción, la atenuación debida a la distancia y la absorción del aire.
- En relación a las propuestas de mejora, utilizando la herramienta proporcionada por el DB-HR, cualquiera de ellas cumpliría con los requisitos establecidos por ley.
- A la hora de adoptar medidas correctoras en aulas con estas características, es suficiente con realizar un tratamiento de absorción acústica en el techo, creando un falso techo con placas perforadas absorbente, y un trasdosado autoportante quedando a criterio del promotor, por motivos económicos o de utilidad, el tipo de material absorbente a emplear.
- Entre la **placa de yeso de 15 mm con perforaciones del 10-20% con lana de roca y cámara de aire de 150 mm y la placa de yeso de 15 mm con perforaciones del 16%, lana de roca y cámara de aire de 200 mm**, presenta mejores prestaciones la placa de yeso perforada con plenum de 200 y lana de roca, por lo tanto se considera la solución óptima, aunque cualquiera de las otras propuestas también sería válida.
- A la hora de realizar una selección de la solución a adoptar se puede tener en cuenta esta información y, además, otros factores como pueden ser:
 - Precio.
 - Durabilidad.
 - Limpieza.
 - Resistencia.

4.4.2. Aula 2

Propuestas de mejoras del acondicionamiento acústico (CTE, Placo, Odeón)

A continuación se indican unas características generales de esta aula comunes a todas las propuestas de mejora:

- Superficie del suelo y del techo: 42 m².
- Superficie de las paredes: 72 m².
- Volumen: 114 m³ y una altura de 2,68 m (la altura inicial era de 2,95 m).

Las propuesta de mejora y los métodos utilizados en las distintas propuestas son iguales a los indicados para el aula 1 en el apdo 4.4.1.

Resultados propuesta de mejora 1. Aula 2

Resultado empleando el método general con la herramienta del CTE

El resultado del tiempo de reverberación obtenido, según las características del aula vacía indicadas a continuación:

	Paramentos	$\alpha_{m,i}$	S_i (m ²)	$\alpha_{m,i} S_i$
Pared	Placa de yeso laminado (PYL)	0,06	58,3692	3,5
Techo	YL 15 [10≤p<20] + MW + C [≥150]	0,57	42,54	24,2
Suelo	Tarima	0,09	42,54	3,8
	Vidrio	0,04	7,96	0,3
	Metales	0,02	5,334	0,1

y utilizando la siguiente fórmula $T = \frac{0,16 \cdot V}{A}$

Siendo:

V=114 m³ el volumen de la sala

A=32,00 m² el area equivalente definida como $A = \sum_{i=1}^m \alpha_{m,i} \cdot S_i$

Donde:

$\alpha_{m,i}$ es el coeficiente de absorción medio de cada material

S_i es la superficie de cada elemento constructivo

ha sido el siguiente:

Tiempo de reverberación Tr_{60} (s)	0,57	<0,7 seg	CUMPLE
---------------------------------------	------	----------	--------

Resultado empleando el método simplificado con la herramienta del CTE

El valor mínimo del coeficiente de absorción medio del material del que está constituido el techo $\alpha_{m,t}$ proporcionado por el método simplificado y calculado según esta fórmula

$$\alpha_{m,t} = h \cdot \left(0,23 - \frac{0,12}{\sqrt{S_t}} \right) = 0,57$$

Siendo:

$h=2,68$ m la altura inicial de la sala

$S_t= 42,54$ m² la superficie del techo

ha sido el siguiente:

El coeficiente de absorción acústica medio del techo ha de ser igual o superior a: 0,57
La absorción adicional es suficiente

El área de absorción equivalente del techo es

$$A_t = \alpha_{m,t} \cdot S_t = 24,12$$

inferior al area equivalente total de $A=32,00$ m².

El método simplificado establece que el $\alpha_{m,t}$ debería ser 0,57 lo cual coincide, casualmente, con el valor que tiene el material en la propuesta indicada.

Resultados propuesta de mejora 2. Aula 2

Resultado empleando el método general con la herramienta del CTE

El tiempo de reverberación obtenido considerando el aula vacía con estas características

	Paramentos	$\alpha_{m,i}$	S_i (m ²)	$\alpha_{m,i} S_i$
Pared	PYL BA 15 trasdosado autoportante con cámara de 100mm	0,07	71,6632	4,8
Techo	Gyptone big quattro 41 con plenum de 200 mm	0,70	42,54	29,8
Suelo	Madera de tarima barnizada	0,08	42,54	3,3

y calculado según esta fórmula

Siendo:

$$T = \frac{0,16 \cdot V}{A}$$

$V=114$ m³ el volumen de la sala

$A=37,82$ m² el area equivalente definida como $A = \sum_{i=1}^m \alpha_{m,i} \cdot S_i$

Donde:

$\alpha_{m,i}$ es el coeficiente de absorción medio de cada material

S_i es la superficie de cada elemento constructivo

ha sido el siguiente:

Tiempo de reverberación Tr_{60} (s)	0,48	<0,7 seg	CUMPLE
---	-------------	--------------------	---------------

Resultado empleando el método simplificado con la herramienta del CTE

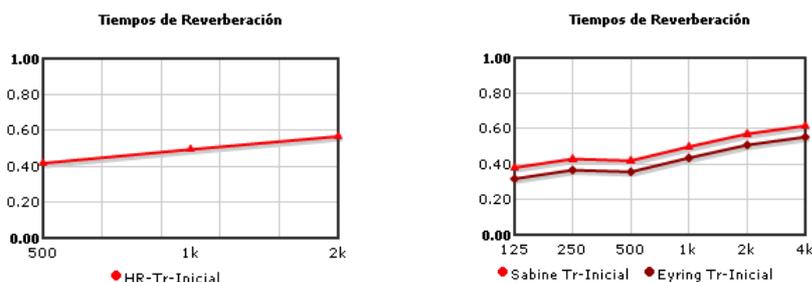
Se ha probado en la propuesta anterior que, según el método simplificado, el valor mínimo del coeficiente de absorción medio que tendría que tener el material del que está constituido el techo en un aula sin butacas tapizadas con un volumen de $V=114 \text{ m}^3$ debería ser de 0,57.

En esta segunda propuesta de mejora el $\alpha_{m,t}$ del techo es de 0,70 obteniendo el área equivalente total igual a $A=37,82 \text{ m}^2$.

Utilizando la fórmula de Sabine se comprueba que el Tr_{60} resulta igual a 0,49 seg con lo cual dicha propuesta es acertada.

Resultados empleando el método placo Tr

Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes gráficas 42 y 43:



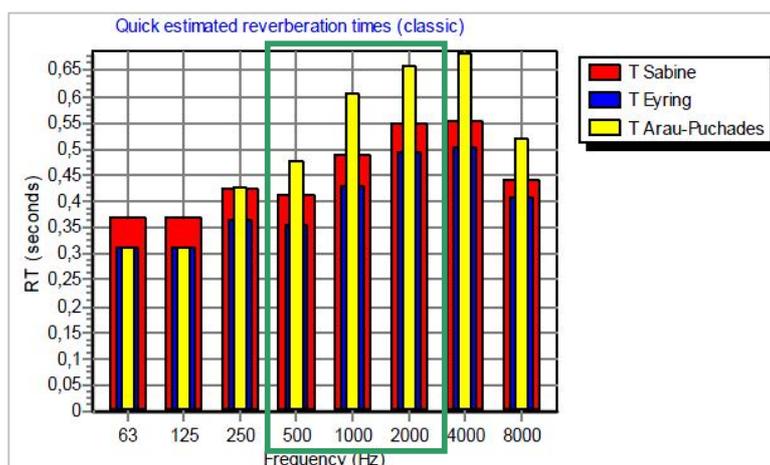
Gráficas 42 y 43: Valores del Tr_{60} en el aula 2 calculados con el método general y con las fórmulas teóricas para la mejora 2.

Método general <0,7 seg	Método simplificado Valor min exigido: 0,57	Método Sabine	Método Eyring
0,48	$\alpha_{m,t}=0,7$	0,47s	0,41 s

Resultados empleando el Odeón

Tras haber introducido los parámetros requeridos por el programa, entre los cuales la geometría, las fuentes, los receptores y los materiales, se obtiene una representación gráfica de los tiempos de reverberación estimados en las bandas de octava desde 63 Hz hasta 8000 Hz para las aproximaciones de Sabine, Eyring y Arau-Puchades (s), en función de ciertos parámetros entre los cuales el área de absorción equivalente de los materiales y del volumen del aula. Las modificaciones de los primeros valores tienen en cuenta la forma de la sala.

Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
TEyring	0.31	0.31	0.36	0.35	0.43	0.49	0.50	0.41
TEyring (modified)	0.31	0.31	0.36	0.35	0.42	0.49	0.50	0.40
TSabine	0.37	0.37	0.42	0.41	0.49	0.55	0.55	0.44
TSabine (modified)	0.37	0.37	0.42	0.41	0.48	0.54	0.55	0.44
T Arau-Puchades	0.31	0.31	0.43	0.48	0.61	0.66	0.68	0.52
T Arau-Puchades (modified)	0.31	0.31	0.42	0.47	0.60	0.65	0.68	0.52

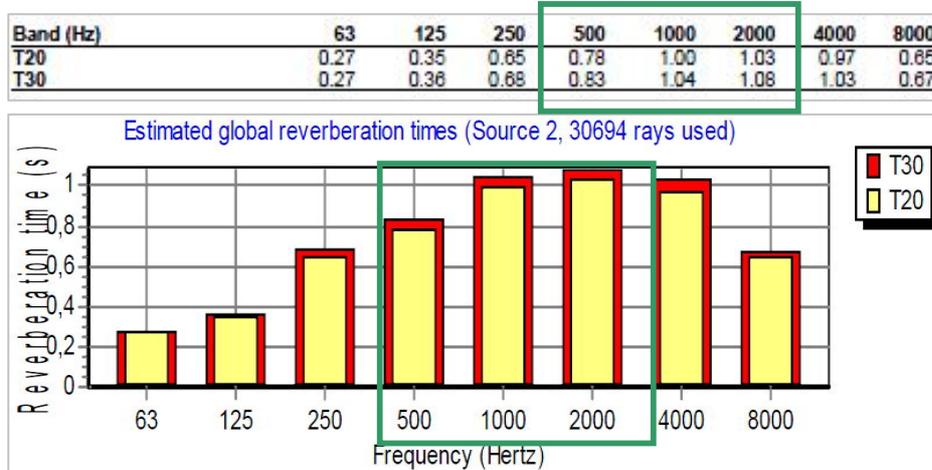


Gráfica 45: Se representa el Tr en el aula 2 mediante las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades, incluyendo la influencia del aire en mejora 2.

El Tr medio para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz según la fórmula de Eyring es de 0,42 seg y según la fórmula de Sabine es de 0,48 seg.

Los valores encontrados con las fórmulas teóricas probablemente sean menos precisos por que los α_m de los materiales no son homogéneos.

Además, es posible obtener los tiempos de reverberación globales estimados, Tr_{20} (s) y Tr_{30} (s), considerando la caída de los primeros rayos desde la fuente.

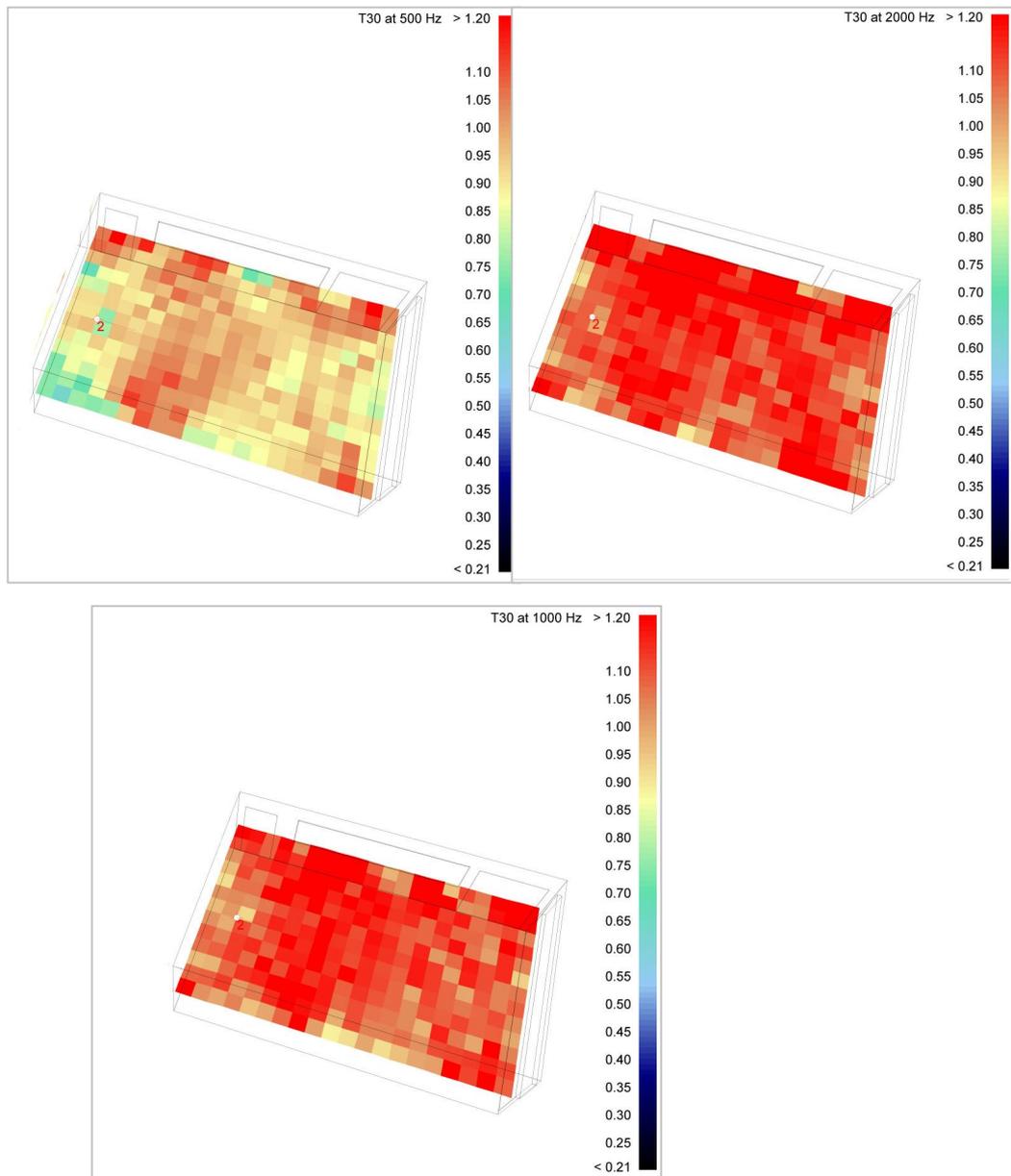


Gráfica 44: Se representa el tiempo de reverberación global estimado en el aula 2 con el método Late ray reflection para la mejora 2.

El Tr_{20} medio para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz es de 0,94 seg y el Tr_{30} medio es de 0.98 seg.

A continuación, se exponen los resultados hallados, tras la simulación, de los parámetros acústicos más relevantes para este estudio.

Tiempo de reverberación, Tr_{30} , en 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz;

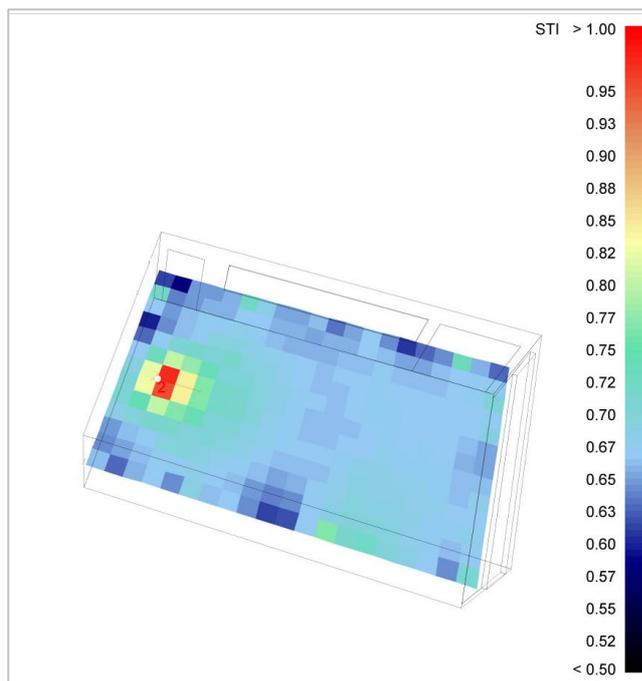


Gráfica 46: Se representa el tiempo de reverberación estimado en el aula 2 en la mejora 2 combinando los métodos Early Ray Reflection y Late Ray Reflection.

El Tr_{30} aproximado que se obtiene a 500 Hz es de 0,90 seg, a 1000 Hz es de 1,00 seg y a 2000 Hz es de 1,05 seg. Resulta igualmente distribuido en toda el aula y ha disminuido considerablemente respecto al caso sin tratamiento previo.

Hay una discrepancia entre los valores encontrados mediante las fórmulas teóricas y el método de trazado de rayos. Como ya se ha comentado para el aula 1, no cumpliéndose las condiciones para que las fórmulas teóricas tengan validez, es presumible pensar que el método de trazado de rayos otorgue valores más precisos.

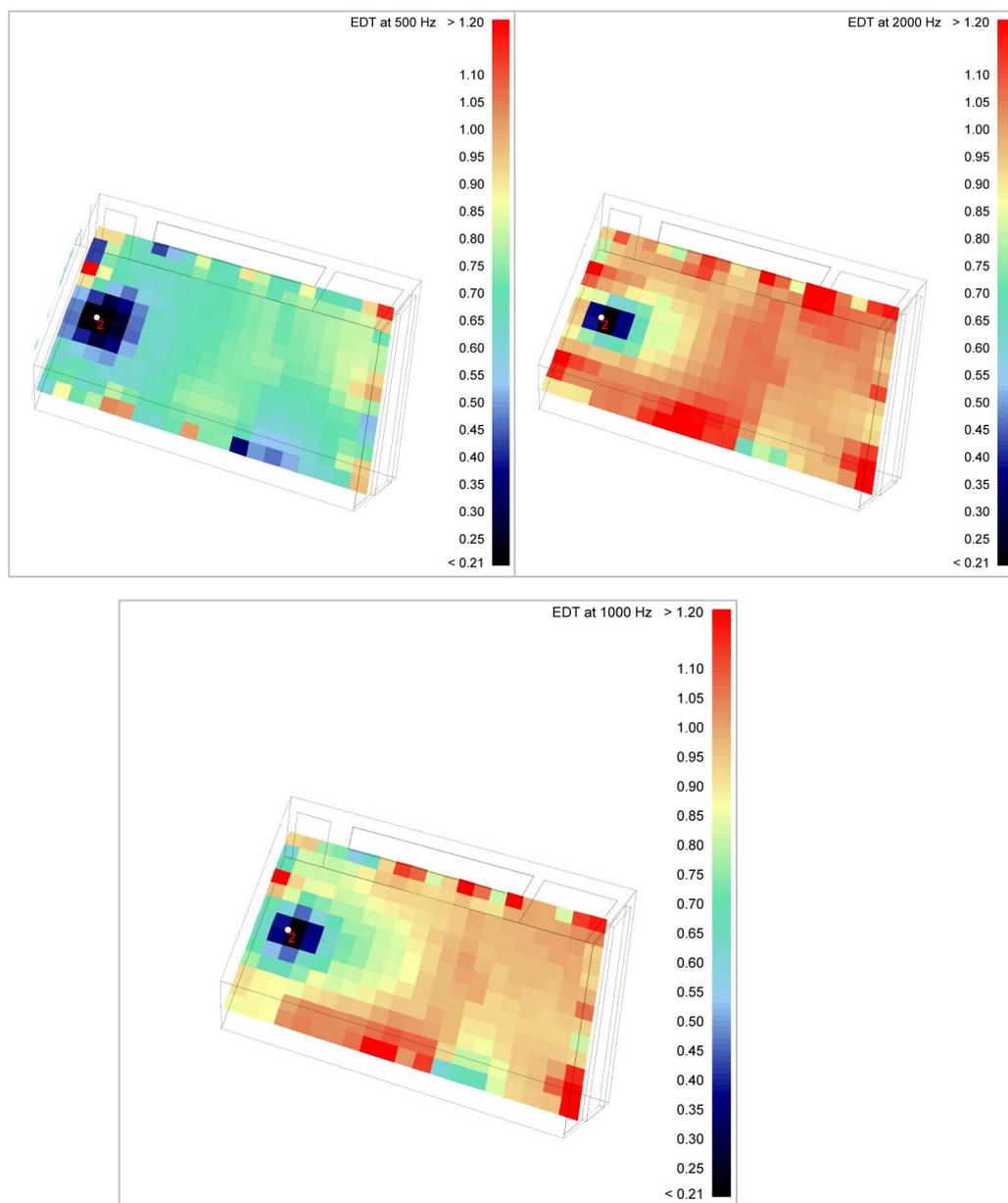
Inteligibilidad de la palabra en la sala, STI;



Gráfica 47: Se representa la inteligibilidad de la palabra en el aula 2 con la mejora 2.

La inteligibilidad, STI, como en el caso del aula 1, tiene valores uniformes en casi toda el aula y ha mejorado notablemente. En cualquier punto del recinto la inteligibilidad es buena quedándose por encima de 0,65. La única zona en la que los valores resultan más elevados es la próxima a la fuente.

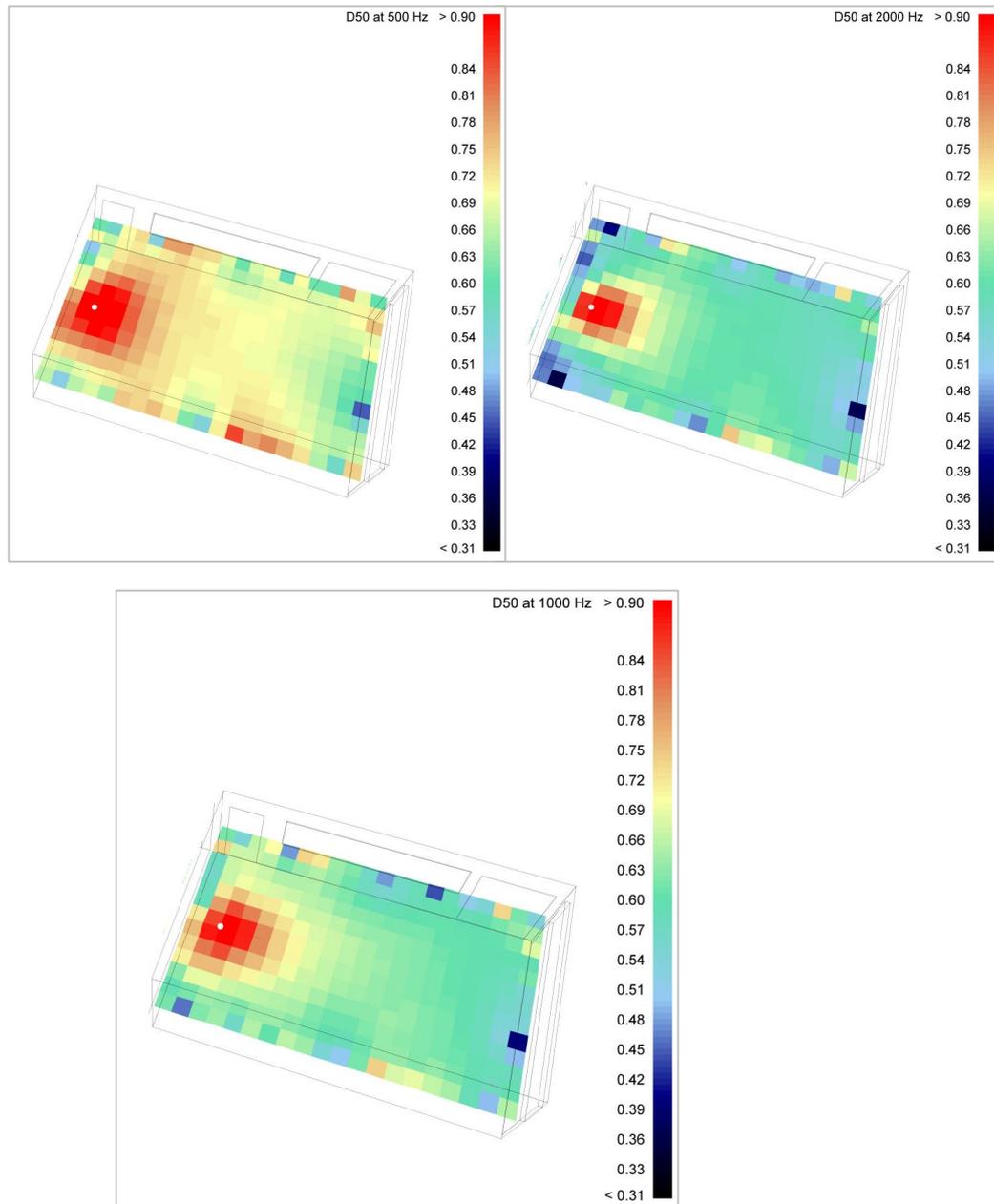
Tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;



Gráfica 48: Se representa el tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en el aula 2 con la mejora 2.

El tiempo de reverberación subjetivo, EDT (s), aproximadamente a 500 Hz es de 0,80 seg, a 1000 Hz es de 0,90 seg, y a 2000 Hz es de 0,95 seg. Resulta adecuado para la palabra por que tiene valores ligeramente por debajo del Tr_{30} . Por este motivo el aula se percibirá un poco más apagada.

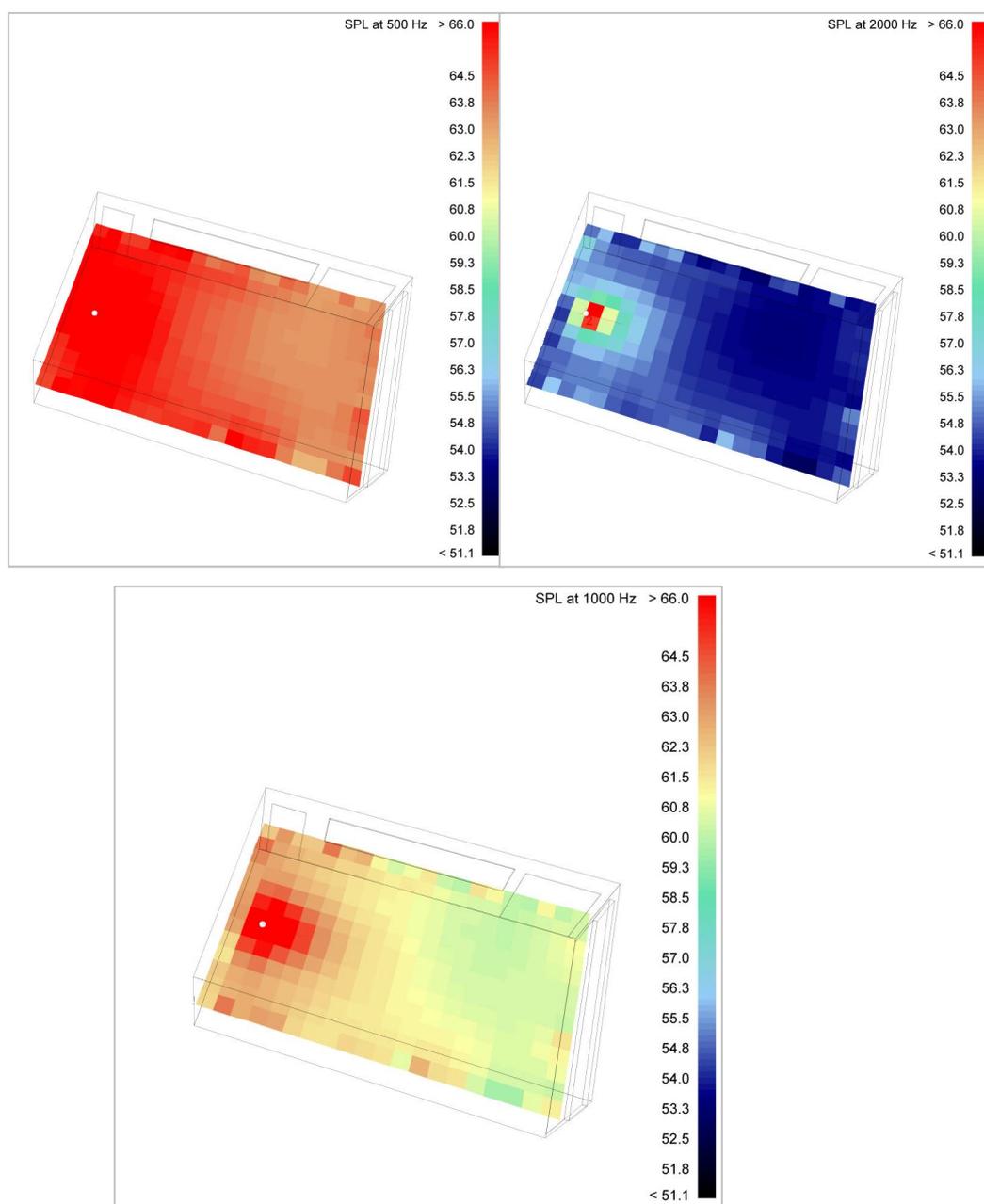
Definición, D_{50} , en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;



Gráfica 49: Se representa la definición, D_{50} , en el aula 2 con la mejora 2.

La definición, D_{50} , mejora respecto al caso sin tratamiento acústico y tiene valores por encima de 0,54 en bajas, medias y altas frecuencias, salvo en las proximidades de la fuente. El sonido llega con mayor claridad a los oyentes por que la energía del sonido directo es mayor que la del sonido reflejado.

Distribución sonora en el recinto: SPL (dBA), en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;



Gráfica 50: Se representa la distribución sonora, SPL, en el aula 2 con la mejora 2.

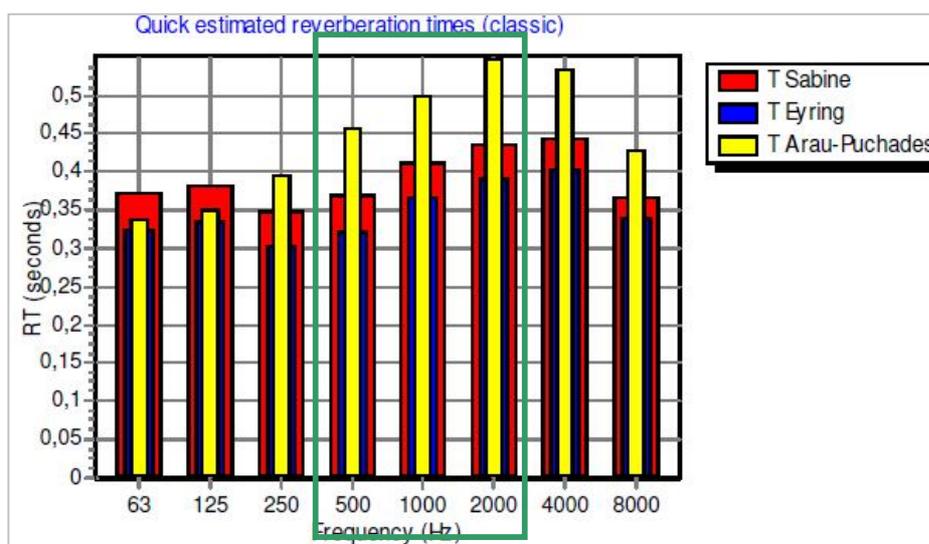
En cuanto a la distribución sonora, SPL (dBA), sigue siendo bastante buena y uniforme en todo el aula, no variando más de 4 dB en la misma frecuencia.

Resultados propuesta de mejora 3. Aula 2

Como para el aula 1, se ha empleado solamente el programa Odeón y, en la simulación, se tiene en cuenta la presencia de puertas, ventanas y butacas de plástico con sus correspondientes coeficientes de absorción, evidenciados en el apdo 4.4.1 y para ver cómo podrían influir.

En primer lugar se representa una gráfica con los tiempos de reverberación calculados según las aproximaciones de Sabine, Eyring y Arau-Puchades (s), aunque, en este caso, los valores no pueden ser considerados fiable por la homogeneidad de los α de cada superficie

Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
TEyring	0.32	0.33	0.30	0.32	0.37	0.39	0.40	0.34
TEyring (modified)	0.30	0.31	0.27	0.29	0.33	0.36	0.37	0.32
TSabine	0.37	0.38	0.35	0.37	0.41	0.43	0.44	0.37
TSabine (modified)	0.35	0.36	0.32	0.33	0.38	0.40	0.41	0.35
T Arau-Puchades	0.34	0.35	0.40	0.46	0.50	0.55	0.53	0.43
T Arau-Puchades (modified)	0.32	0.34	0.38	0.44	0.48	0.53	0.52	0.42

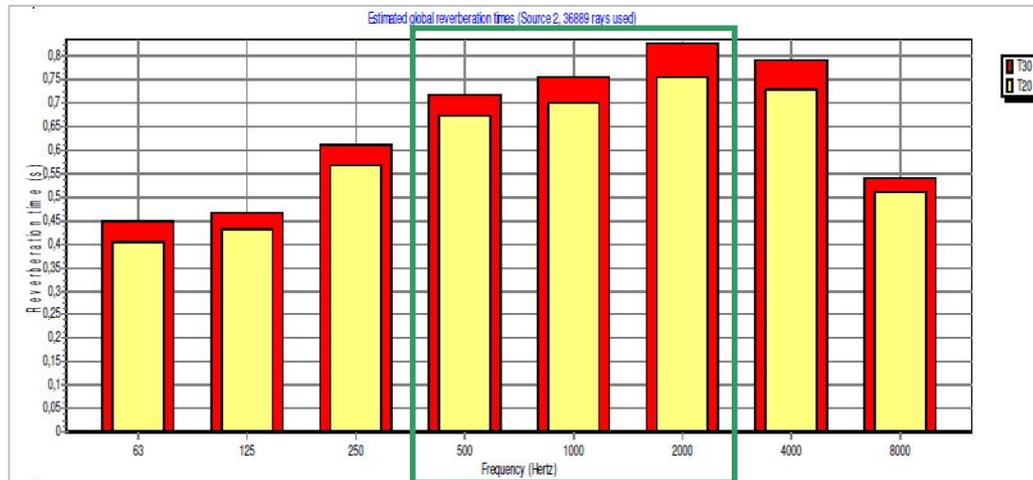


Gráfica 52: Se representa el Tr en el aula 2 mediante las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades, incluyendo la influencia del aire en la mejora 3.

El Tr medio para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz según la fórmula de Eyring es de 0,36 seg y según la fórmula de Sabine es de 0,40 seg.

Posteriormente se representan los tiempos de reverberación globales estimados, Tr_{20} (s) y Tr_{30} (s).

Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T20	0.41	0.43	0.57	0.68	0.70	0.76	0.73	0.51
T30	0.45	0.47	0.61	0.72	0.76	0.83	0.79	0.54

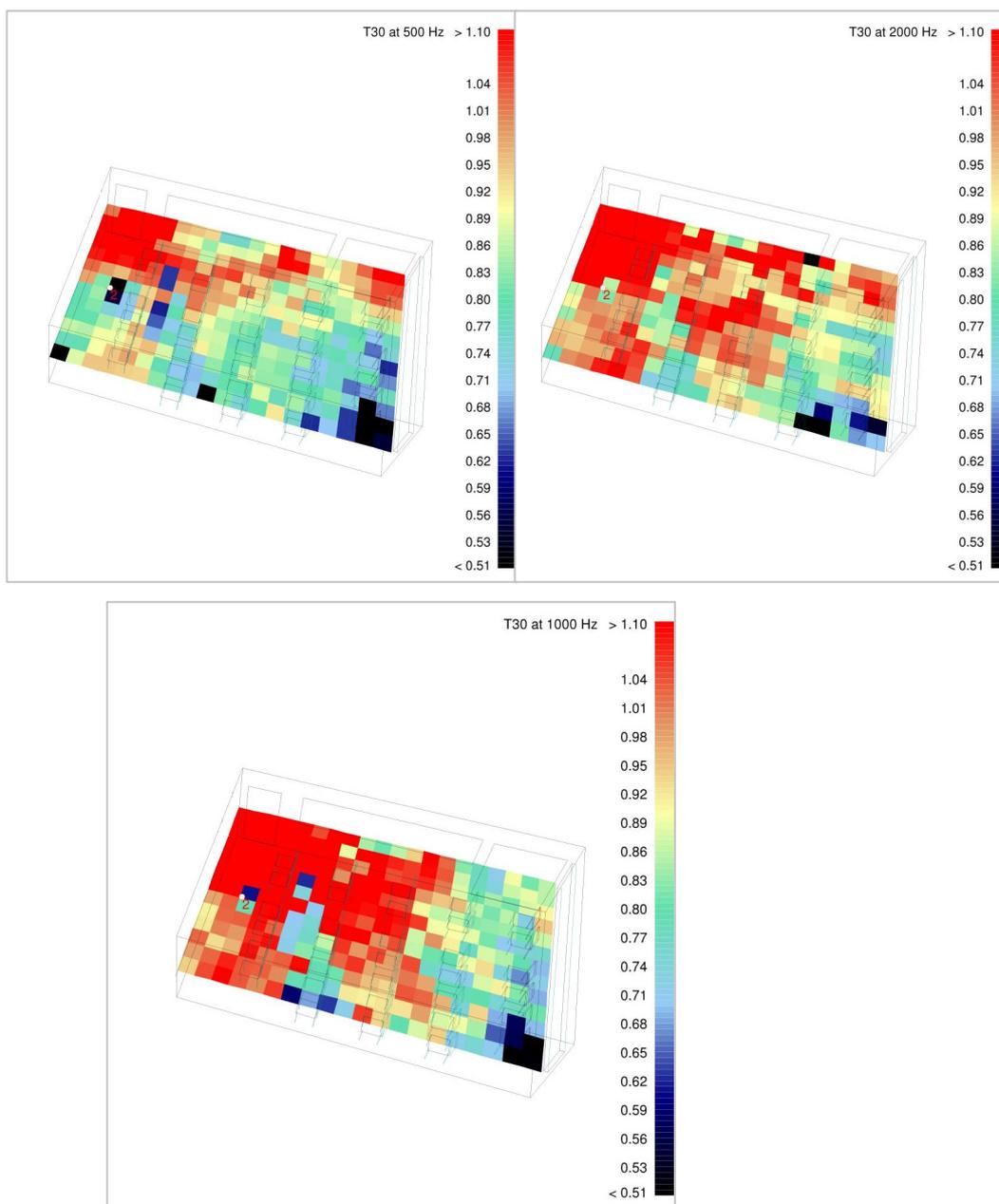


Gráfica 51: Se representa el tiempo de reverberación global estimado en el aula 2 con el método Late ray reflection para la mejora 3.

El Tr_{20} medio para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz es de 0,71 seg y el Tr_{30} medio es de 0,77 seg.

Se han obtenido los parámetros acústicos más relevantes a través de un simulación y se representan los resultados a continuación:

Tiempo de reverberación, Tr_{30} , en 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz;

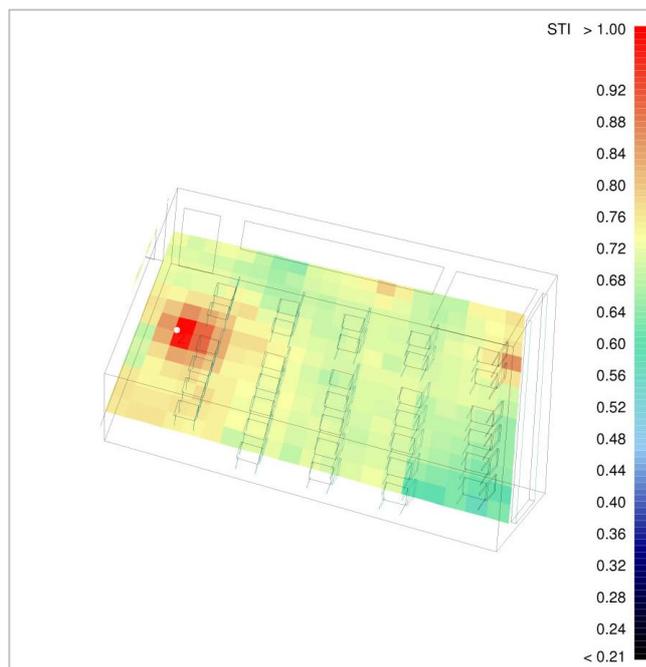


Gráfica 53: Se representa el tiempo de reverberación estimado en el aula 2 en la mejora 3 combinando los métodos Early Ray Reflection y Late Ray Reflection.

El Tr_{30} aproximado que se obtiene a 500 Hz es de 0,89 seg, a 1000 Hz es de 0,98 seg y a 2000 Hz es de 0,95 seg. Ha disminuido respecto al caso inicial pero no está uniformemente distribuido en el recinto variando entre 0,80 y 1 seg.

También en este caso, los valores hallados con los distintos métodos no guardan semejanza. Como se ha señalado anteriormente, el resultado obtenido mediante las fórmulas teóricas puede resultar dudoso como consecuencia de que los coeficientes de absorción de los materiales son muy distintos entre si y que algunos de ellos resultan tener valores muy absorbente. Por este motivo, se puede considerar más fiable el resultado encontrado a través del método de trazado de rayos.

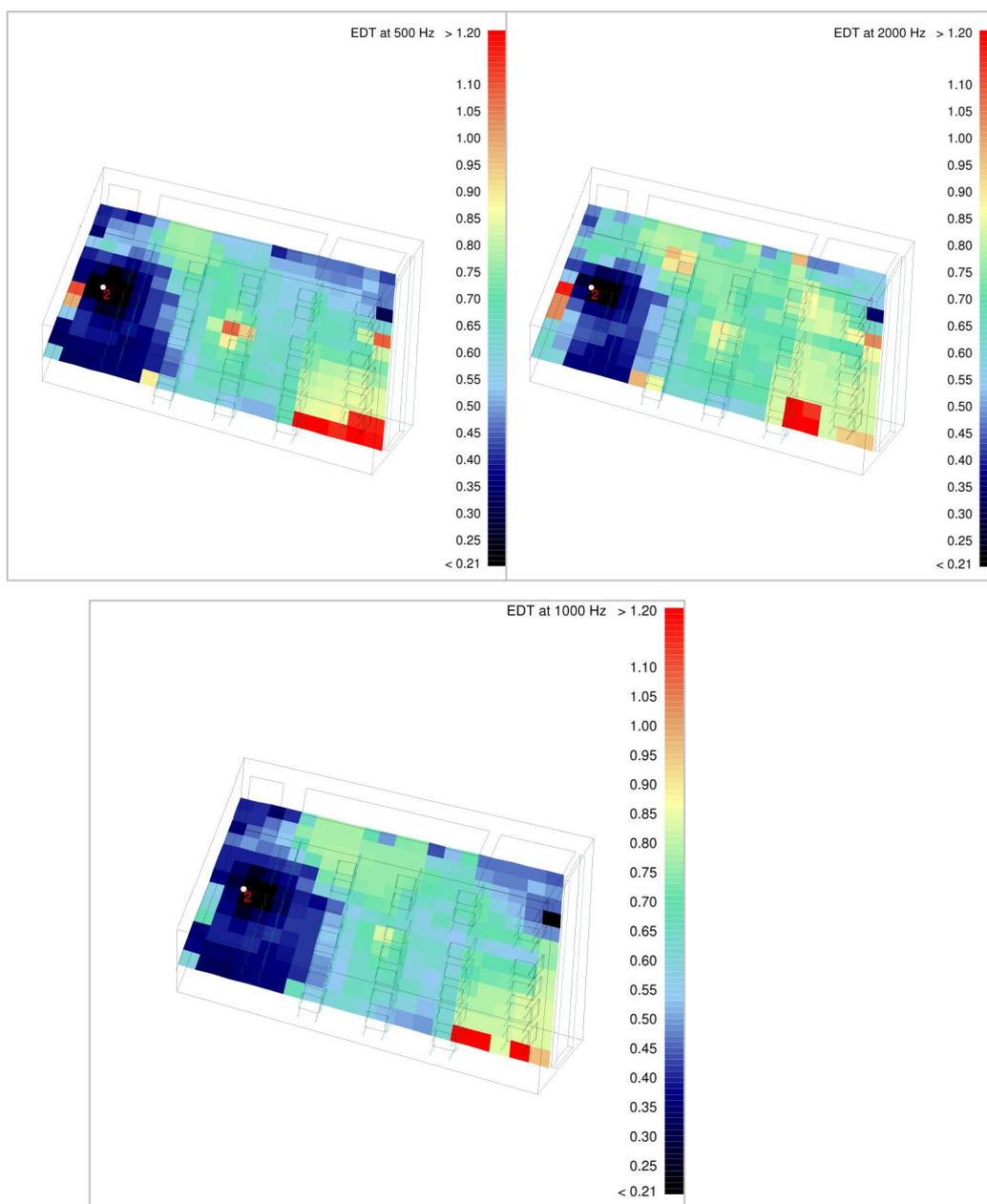
Inteligibilidad de la palabra en la sala, STI;



Gráfica 54: Se representa la inteligibilidad de la palabra en el aula 2 con la mejora 3.

La inteligibilidad, STI, tiene valores uniformes en casi toda el aula manteniéndose por encima de 0,72 en cualquier punto del recinto. La inteligibilidad es buena. El valor de inteligibilidad resulta un poco más elevado en la zona próxima al hablante por la cercanía de la fuente.

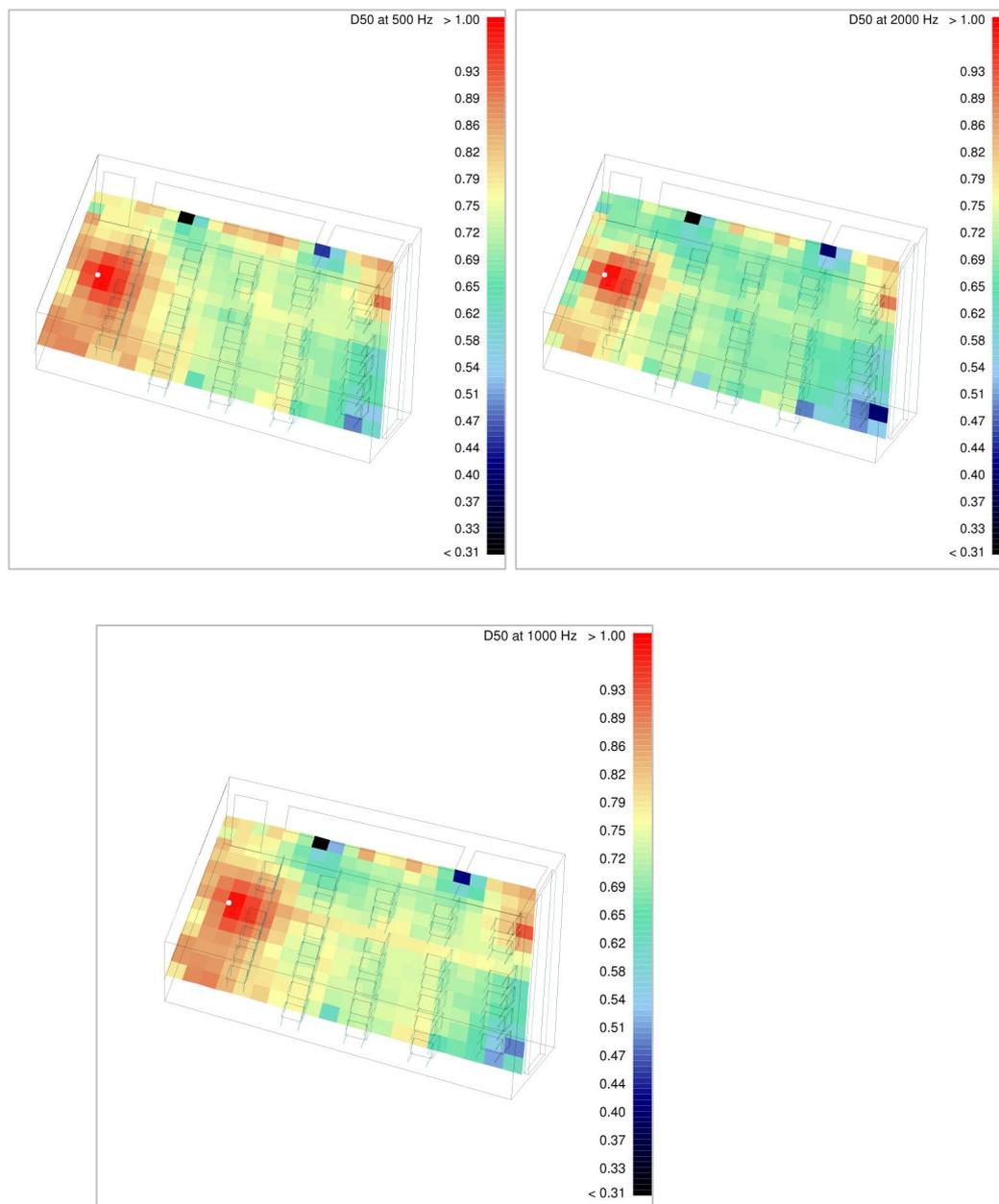
Tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;



Gráfica 55: Se representa el tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en el aula 2 con la mejora 3.

El tiempo de reverberación subjetivo, EDT (s), aproximadamente a 500 Hz es de 0,66 seg, a 1000 Hz es de 0,70 seg, y a 2000 Hz es de 0.75 seg. Tiene valores ligeramente por debajo del Tr_{30} . Esto implica que resulta adecuado para la palabra por la percepción más apagada que se tendrá en el aula.

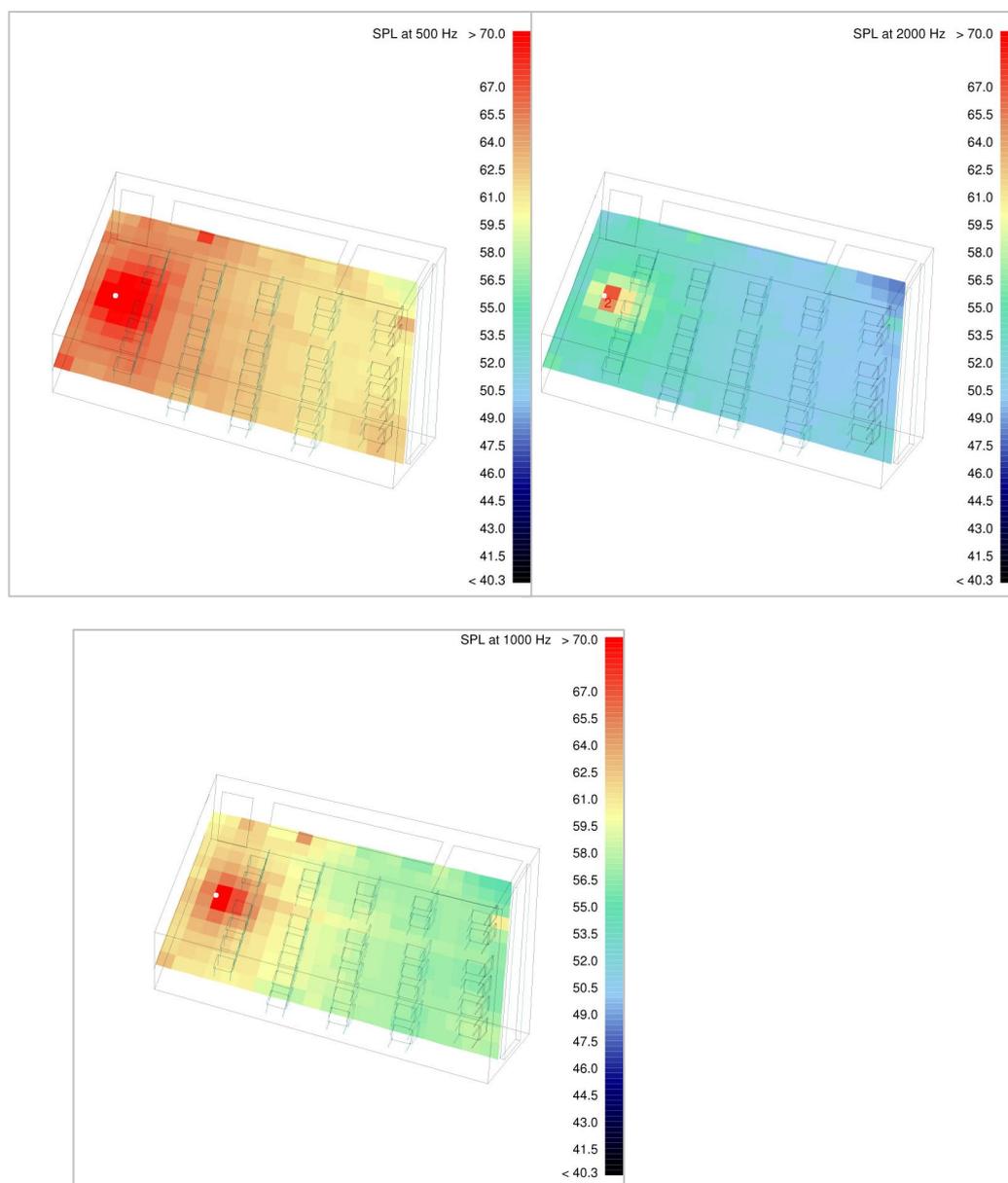
Definición, D_{50} , en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;



Gráfica 56: Se representa la definición, D_{50} , en el aula 2 con la mejora 3.

La definición, D_{50} , están por encima de 0,54 en bajas, medias y altas frecuencias, salvo en la zona próxima a la fuente. La energía del sonido reflejado es menor que la del sonido directo, por lo tanto llega con mayor claridad a los oyentes.

Distribución sonora en el recinto: SPL (dBA), en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz.



Gráfica 57: Se representa la d Distribución sonora, SPL, en el aula 2 con la mejora 3.

En cuanto a la distribución sonora, SPL (dBA), sigue siendo bastante buena y uniforme en todo el aula, no variando más de 4 dB en la misma frecuencia.

Evaluación de cumplimiento de objetivo y conclusiones AULA 2

A continuación se muestra una tabla resumen con los resultados para las distintas propuestas de mejora en el aula 2.

Mejoras	Método	Resultados (seg)	Objetivo
1	General	0,53	≤ 0.7 seg
2	General	0,45	≤ 0.7 seg
	Placo General	0,48	≤ 0.7 seg
	Placo Tr Sabine	0,47	≤ 0.7 seg
	Placo Tr Eyring	0,41	≤ 0.7 seg
	Odeón Tr₃₀ estimado**	0,98	≤ 0.7 seg
	Odeón Tr Eyring	0,42	*
	Odeón Tr Sabine	0,48	*
	Odeón Tr Arau-Puchades	0,58	*
	Odeón Tr ₃₀ simulado**	$\approx 0,98$	≤ 0.7 seg
3	Odeón Tr₃₀ estimado**	0,77	≤ 0.7 seg
	Odeón Tr Eyring	0,36	*
	Odeón Tr Sabine	0,40	*
	Odeón Tr Arau-Puchades	0,50	*
	Odeón Tr ₃₀ simulado**	$\approx 0,94$	≤ 0.7 seg

* Los valores encontrados con las fórmulas teóricas de Sabine, Eyring y Arau-Pachades no se pueden considerar muy fiables. La condición indispensable para que tengan validez es que las propiedades de absorción de los materiales sean parecidas y que tengan valores inferiores a 0,2.

** Como se ha comentado en el apdo 3, el Tr₃₀ estimado utiliza el método “Late ray reflection” y el Tr₃₀ simulado combina los métodos “Early Ray Reflection” y “Late Ray Reflection”.

- El aula 2 tiene un volumen sólo muy ligeramente inferior respecto al aula 1, por este motivo los valores encontrados a través del método general y el simplificado son iguales. Lo que varía es la geometría de la sala y la disposición de puertas y ventanas por eso se ha querido evaluar igualmente su comportamiento. Lo que se ha notado, a través del programa Odeón, ha sido una

ligera variación de los valores del tiempo de reverberación. En este caso la diferencia resulta despreciable, lo que supone que para acondicionar aulas con características parecida, cuyo volumen sea inferior a 350 m^3 , es posible estudiar solamente el recinto más grande (condición más desfavorable).

- Por lo tanto, siendo las características del aula 2 parecidas a las del aula 1 se ofrecen las mismas conclusiones dadas para el caso del aula 1 en el apartado 4.4.1 y, como en el caso anterior, es suficiente realizar un tratamiento de absorción acústica en el techo y en las paredes para cumplir con los requisitos del DB-HR.
- Como se ha señalado anteriormente, a la hora de elegir la solución a adoptar, se pueden tener en cuenta otros factores como pueden ser:
 - Precio.
 - Durabilidad.
 - Limpieza.
 - Resistencia.

4.4.3. Sala polivalente

Tal y como se vio en el apdo 4.3.3 las características acústicas de la sala no son excesivamente inadecuadas aunque tanto el EDT como el STI y la definición pueden mejorarse.

Cabe señalar que el diseño original cuenta con un techo acústico posiblemente pensado para reducir el Tr que, como se ha observado anteriormente, es adecuado. No obstante se propone un techo alternativo diseñado con el fin de mejorar la distribución del campo sonoro en la sala.

Propuestas de mejoras del acondicionamiento acústico (Odeón)

A continuación se indican unas características generales de la sala polivalente después del acondicionamiento:

En las primeras dos propuestas se mantienen las dimensiones y el volumen iniciales

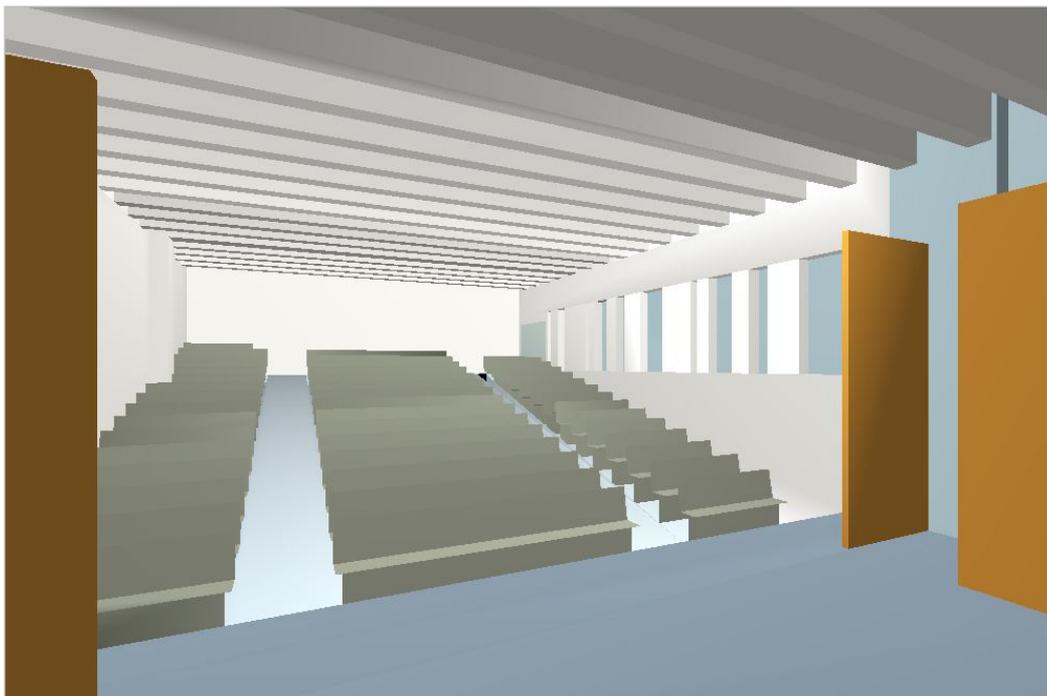


Fig. 7: Vista delantera de la sala polivalente

- ❑ Superficie de la platea: 192,80 m².
- ❑ Superficie del escenario: 57,45 m².
- ❑ Superficie del techo de la sala: 610 m² (862 m² incluidas la superficie en la parte trasera del escenario).

- ❑ Superficie de las paredes de la sala: 374 m².
- ❑ Volumen: 1420 m³ aproximadamente y una altura inicial de 6,3 metros en la zona del escenario hasta 4,8 metros en la zona trasera de acceso al auditorio;

Para las mejoras 3 y 4, se propone como alternativa el diseño de un techo equipotencial (u ortofónico), tal que el nivel sonoro (tomado como suma del sonido directo y el reflejado) en cualquier punto de la zona de audiencia sea aproximadamente constante. Tratándose de reflexiones especulares (ángulo de incidencia = ángulo de reflexión), las zonas traseras de público reciben mayor sonido reflejado que las zonas delanteras, de tal manera que el nivel sonoro global sea constante, ante cualquier fuente sonora existente en el escenario.

El trazado del techo se convierte en un factor determinante del buen comportamiento del sonido en su camino hacia el oyente.

En la mejora 4, además de plantear una posible modificación del diseño de las superficies de lo inicialmente propuesto, se actúa sobre los posibles materiales a utilizar.

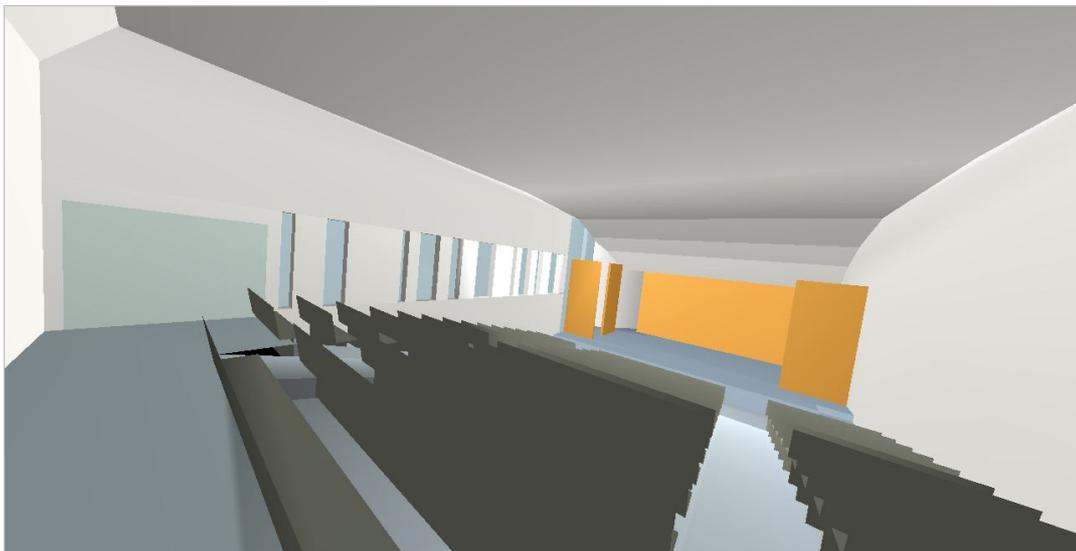


Fig. 8: Vista trasera de la sala polivalente con techo ortofónico

En las últimas dos propuestas las dimensiones y volumen de la sala se ven modificados

- ❑ Superficie de la platea: 192,80 m².
- ❑ Superficie del escenario: 57,45 m².
- ❑ Superficie del techo de la sala: 335 m².

- Superficie de las paredes de la sala: 330 m² (no se incluye la parte trasera del escenario).
 - Volumen: 1200 m³ aproximadamente y la altura respecto al techo del recinto, varía por zonas, estando los valores entre 2,65 m y 6,3 m en las zonas más altas aproximadamente.
- Como se ha comentado en el apdo. 2.2, en el DB-HR se indica que en las salas con más de 350 m³ debe llevarse a cabo un estudio específico, no existiendo a priori ningún valor límite.

Por eso, para el cálculo del tiempo de reverberación, se utiliza el programa Odeón de modelización predictiva que considera como datos de partida³:

- la geometría del recinto cerrado y vacío, sin oyentes o espectadores, en 3D (con grid a la altura aproximada de los oyentes);
- la absorción acústica α de los materiales de las distintas superficies.
- las distintas fuentes y receptores.

El programa Odeón permite estimar 8 parámetros y, como se ha comentado en el apdo 3, permite simular el comportamiento acústico de la sala utilizando un método híbrido de trazado de rayos que tiene en cuenta la ley de Snell y la ley de Lambert.

³ Para configurar el modelo de cálculo se tienen en cuenta los distintos fenómenos acústicos que intervienen en el camino de propagación del sonido en el interior de la sala, como son:

La **absorción** (depende principalmente de los materiales de que se compone la sala).

La **atenuación** (depende de la distancia al foco emisor).

La **reflexión** (depende de la dispersión, puede ser especular o difusa, según el tipo de superficie del material con el que entra en contacto el sonido).

La **difracción** (depende de las aberturas u obstáculos que haya en el interior de la sala, según la longitud de la onda sonora λ).

Las **interferencias** (dependen de la coincidencia en un mismo punto de dos ondas, pudiendo ser interferencia constructiva, se refuerza la onda sonora, o destructiva, se atenúa la onda, en función de su relación de fase).

Mejora 1: Se actúa sobre las paredes y el techo del pasillo, la pared del fondo del auditorio, la pared contigua al pasillo y las superficies que forman los huecos.

Se emplean los siguientes materiales:

- Paredes interiores del pasillo, pared lateral del auditorio contigua al pasillo y superficies que forman los huecos entre el interior del auditorio y el pasillo (por un total aproximado de 335 m²): Panel acústico de revestimiento de madera perforada IDEACUSTIC, de 16 con plenum de 50 mm y lana de roca de 40 mm.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de panel IDEACUSTIC de 16	0.450	0.450	0.690	0.900	0.880	0.740	0.580	0.580

- Pared del fondo del auditorio (≈60 m²): Panel acústico de revestimiento de madera perforada IDEACUSTIC, de 32 con plenum de 50 mm y lana de roca de 40 mm.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de panel IDEACUSTIC de 32	0.500	0.500	0.640	0.630	0.610	0.610	0.530	0.530

- Paredes en la zona del escenario: hormigón liso con enlucido de yeso.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de enlucido de yeso	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04

- Techo del pasillo (≈23 m²): Paneles ECOPHON.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de panel ECOPHON	0.580	0.580	0.690	0.960	0.970	0.990	0.910	0.910

- Techo de la sala: hormigón liso con enlucido de yeso.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de enlucido de yeso	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04

- Suelo: en la zona del escenario es de tarima de madera, en la zona de audiencia y del pasillo es linoleum sobre cemento, en la zona trasera elevada reservada para personas con movilidad reducida es entablado de madera.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de tarima de madera	0.19	0.19	0.16	0.13	0.10	0.06	0.06	0.06
α de linoleum	0.15	0.15	0.12	0.11	0.10	0.07	0.08	0.08
α de entablado de madera	0.19	0.19	0.16	0.13	0.10	0.06	0.06	0.06

- Butacas distribuidas en la zona de audiencia: tapizadas con fieltro o terciopelo.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de butacas con terciopelo	0.30	0.30	0.32	0.27	0.30	0.33	0.33	0.36

- Escaleras: tarima de madera.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de tarima de madera	0.19	0.19	0.16	0.13	0.10	0.06	0.06	0.06

- Puerta de acceso: madera convencional.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de la madera convencional	0.14	0.14	0.10	0.06	0.08	0.10	0.10	0.10

- Paneles en el escenario que separan la zona de actuación: panel de fibra de madera.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de panel de fibra de madera	0.06	0.06	0.09	0.17	0.35	0.52	0.56	0.56

Mejora 2: Se actúa sobre las paredes y el techo del pasillo, la pared del fondo del auditorio, la pared contigua al pasillo, las superficies que forman los huecos y una parte del techo del auditorio que se encuentra casi al final, en la zona destinada al público. Se emplean los siguientes materiales:

- Pared del fondo del auditorio ($\approx 60 \text{ m}^2$), paredes interiores del pasillo, pared lateral del auditorio contigua al pasillo y superficies que forman los huecos entre el interior del auditorio y el pasillo (por un total aproximado de 335 m^2): Panel acústico de revestimiento de madera perforada IDEACUSTIC, de 16 con plenum de 50 mm y lana de roca de 40 mm.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de panel IDEACUSTIC de 16	0.450	0.450	0.690	0.900	0.880	0.740	0.580	0.580

- Paredes en la zona del escenario: hormigón liso con enlucido de yeso.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de enlucido de yeso	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04

- Techo del pasillo ($\approx 23 \text{ m}^2$): Paneles ECOPHON.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de panel ECOPHON	0.580	0.580	0.690	0.960	0.970	0.990	0.910	0.910

- Techo en una zona determinada de la parte central del auditorio ($\approx 90 \text{ m}^2$): Paneles acústicos HERADESIGN FINE de 35 mm de espesor con lana de roca de 40 mm.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de HERADESIGN FINE de 35	0.100	0.350	0.850	0.950	0.650	0.800	0.850	0.850

- Techo de la sala: hormigón liso con enlucido de yeso.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de enlucido de yeso	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04

- Suelo: en la zona del escenario es de tarima de madera, en la zona de audiencia y del pasillo es linoleum sobre cemento, en la zona trasera elevada reservada para personas con movilidad reducida es entablado de madera.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de tarima de madera	0.19	0.19	0.16	0.13	0.10	0.06	0.06	0.06
α de linoleum	0.15	0.15	0.12	0.11	0.10	0.07	0.08	0.08
α de entablado de madera	0.19	0.19	0.16	0.13	0.10	0.06	0.06	0.06

- Butacas distribuidas en la zona de audiencia: tapizadas con fieltro o terciopelo.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de butacas con terciopelo	0.30	0.30	0.32	0.27	0.30	0.33	0.33	0.36

- Escaleras: tarima de madera.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de tarima de madera	0.19	0.19	0.16	0.13	0.10	0.06	0.06	0.06

- Puerta de acceso: madera convencional.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de la madera convencional	0.14	0.14	0.10	0.06	0.08	0.10	0.10	0.10

- Paneles en el escenario que separan la zona de actuación: panel de fibra de madera.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de panel de fibra de madera	0.06	0.06	0.09	0.17	0.35	0.52	0.56	0.56

Mejora 3: Se actúa sobre la geometría de la sala, en lo específico se diseña un **techo equipotencial**, reduciendo la superficie total del techo desde los 610 m² iniciales (excluyendo la parte trasera el escenario) hasta los 335 m² de la propuesta. Los materiales utilizados son los mismos que en la propuesta inicial:

- Paredes: tanto en el escenario como en la zona de audiencia y en un lado del pasillo son de hormigón liso con enlucido de yeso, el otro lado del pasillo es placa de madera perforada.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de enlucido de yeso	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04
α de placa de madera perforada	0.18	0.18	0.12	0.10	0.09	0.08	0.07	0.07

- Techo de la sala: Hormigón liso con enlucido de yeso.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de enlucido de yeso	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04

- Suelo: en la zona del escenario es de tarima de madera, en la zona de audiencia y del pasillo es linoleum sobre cemento, en la zona trasera elevada reservada para personas con movilidad reducida es entablado de madera.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de tarima de madera	0.19	0.19	0.16	0.13	0.10	0.06	0.06	0.06
α de linoleum	0.15	0.15	0.12	0.11	0.10	0.07	0.08	0.08
α de entablado de madera	0.19	0.19	0.16	0.13	0.10	0.06	0.06	0.06

- Butacas distribuidas en la zona de audiencia: tapizadas con fieltro o terciopelo.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de butacas con terciopelo	0.30	0.30	0.32	0.27	0.30	0.33	0.33	0.36

- Escaleras: Tarima de madera.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de tarima de madera	0.19	0.19	0.16	0.13	0.10	0.06	0.06	0.06

- Puerta de acceso: madera convencional.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de la madera convencional	0.14	0.14	0.10	0.06	0.08	0.10	0.10	0.10

- Paneles en el escenario que separan la zona de actuación: panel de fibra de madera.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de panel de fibra de madera	0.06	0.06	0.09	0.17	0.35	0.52	0.56	0.56

Mejora 4: Se actúa sobre la geometría de la sala, diseñando un **techo equipotencial** y se modifican los materiales de **las paredes y del techo del pasillo, de la pared del fondo del auditorio, de la pared contigua al pasillo y de las superficies que forman los huecos**. Los materiales empleados son como los utilizados para la mejora 1:

- Paredes interiores del pasillo, pared lateral del auditorio contigua al pasillo y superficies que forman los huecos entre el interior del auditorio y el pasillo (por un total aproximado de 345 m²): Panel acústico de revestimiento de madera perforada IDEACUSTIC, de 16 con plenum de 50 mm y lana de roca de 40 mm.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de panel IDEACUSTIC de 16	0.450	0.450	0.690	0.900	0.880	0.740	0.580	0.580

- Pared del fondo del auditorio (≈53 m²): Panel acústico de revestimiento de madera perforada IDEACUSTIC, de 32 con plenum de 50 mm y lana de roca de 40 mm.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de panel IDEACUSTIC de 32	0.500	0.500	0.640	0.630	0.610	0.610	0.530	0.530

- Paredes en la zona del escenario: hormigón liso con enlucido de yeso.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de enlucido de yeso	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04

- Techo del pasillo (≈23 m²): Paneles ECOPHON.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de panel ECOPHON	0.580	0.580	0.690	0.960	0.970	0.990	0.910	0.910

- Techo: hormigón liso con enlucido de yeso.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de enlucido de yeso	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04

- Suelo: en la zona del escenario es de tarima de madera, en la zona de audiencia y del pasillo es linoleum sobre cemento, en la zona trasera elevada reservada para personas con movilidad reducida es entablado de madera.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de tarima de madera	0.19	0.19	0.16	0.13	0.10	0.06	0.06	0.06
α de linoleum	0.15	0.15	0.12	0.11	0.10	0.07	0.08	0.08
α de entablado de madera	0.19	0.19	0.16	0.13	0.10	0.06	0.06	0.06

- Butacas distribuidas en la zona de audiencia: tapizadas con fieltro o terciopelo.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de butacas con terciopelo	0.30	0.30	0.32	0.27	0.30	0.33	0.33	0.36

- Escaleras: tarima de madera.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de tarima de madera	0.19	0.19	0.16	0.13	0.10	0.06	0.06	0.06

- Puerta de acceso: madera convencional.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de la madera convencional	0.14	0.14	0.10	0.06	0.08	0.10	0.10	0.10

- Paneles en el escenario que separan la zona de actuación: panel de fibra de madera.

Frecuencia	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α de panel de fibra de madera	0.06	0.06	0.09	0.17	0.35	0.52	0.56	0.56

Resultados propuesta de mejora 1. Sala polivalente

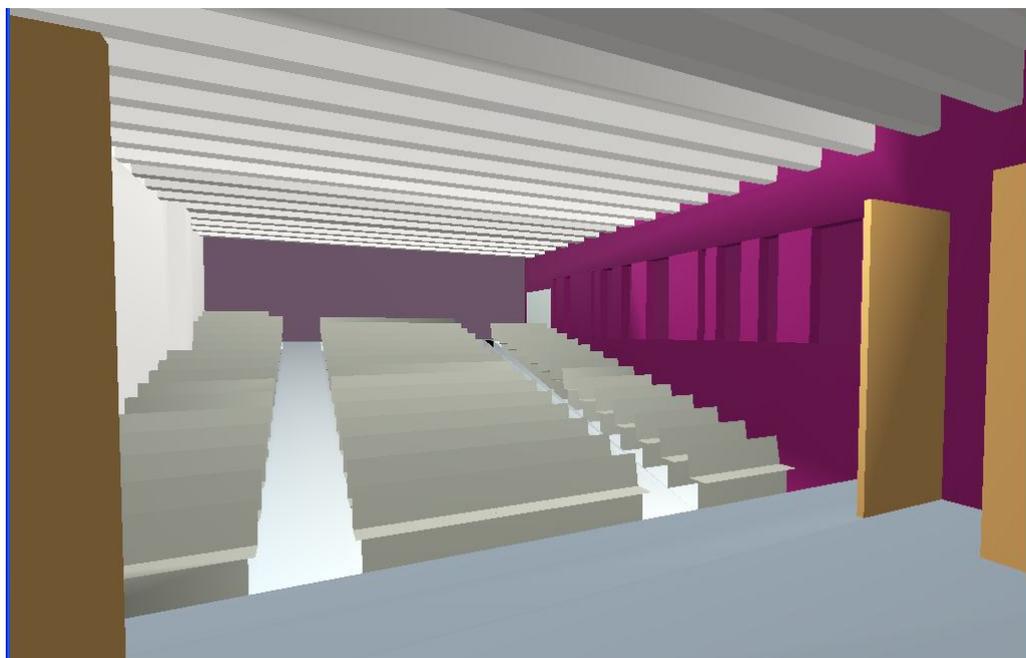


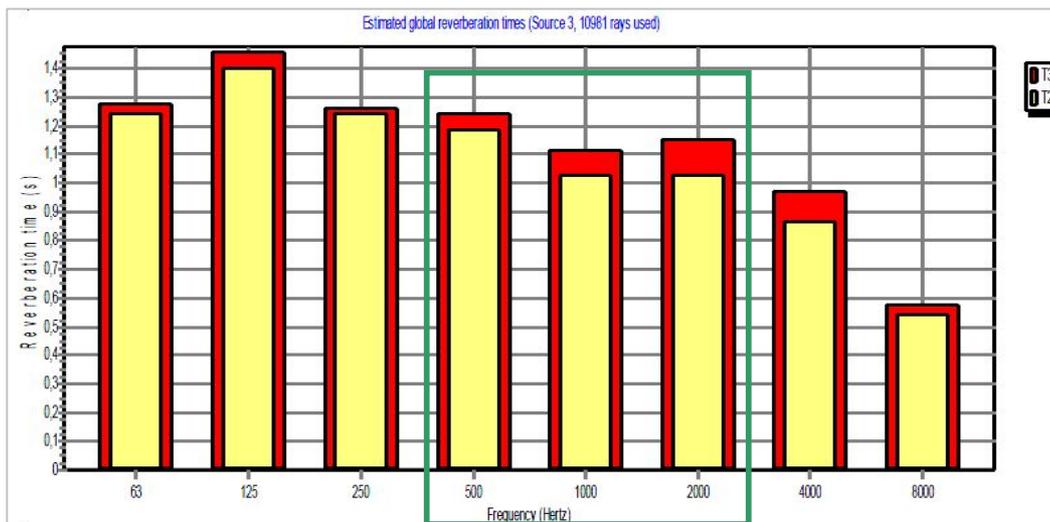
Fig.9: Vista delantera de la sala en la mejora 1



Fig.10: Vista trasera de la sala en la mejora 1

Se representan los tiempos de reverberación globales estimados, Tr_{20} (s) y Tr_{30} (s), en las distintas bandas de frecuencia de octava desde 63 Hz hasta 8000 Hz. La gráfica se realiza simulando y teniendo en cuenta la caída (de 20 o 30 dB, según el caso) de los primeros rayos desde la fuente.

Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T20	1.24	1.40	1.24	1.19	1.03	1.03	0.86	0.54
T30	1.28	1.46	1.26	1.24	1.12	1.15	0.97	0.58



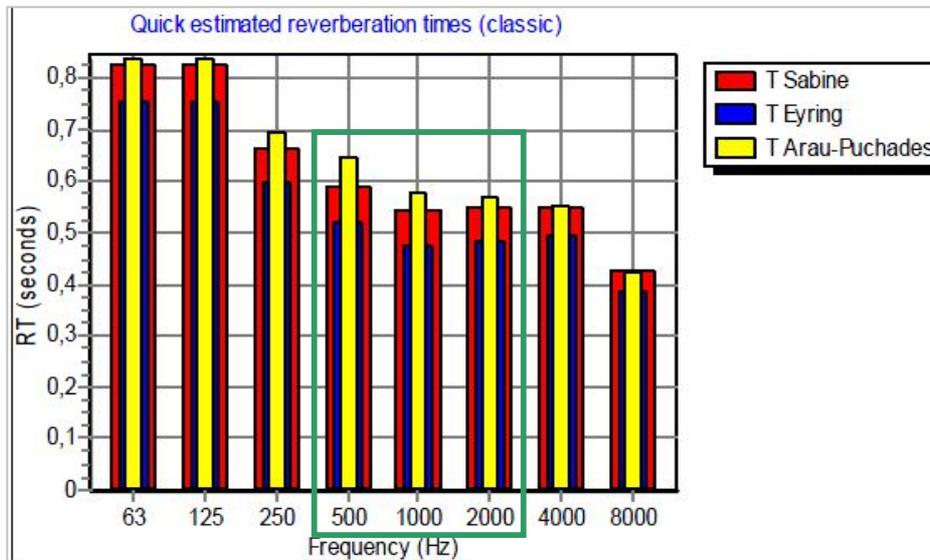
Gráfica 58: Se representa el tiempo de reverberación global estimado en la sala con el método **Late ray reflection para la mejora 1.**

El Tr_{20} medio para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz es de 1,08 seg y el Tr_{30} medio es de 1,17 seg.

Posteriormente se representa un gráfico con los tiempos de reverberación calculados en las bandas de octava desde 63 Hz hasta 8000 Hz, para las aproximaciones de Sabine, Eyring y Arau-Puchades (s).

Tal y como se ha explicado en el apdo 3, junto a estas tres expresiones aparecen otras tres que son modificaciones de las primeras y que tienen en cuenta la forma de la sala.

Quick Estimate Reverberation								
Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
TEyring	0.76	0.76	0.60	0.52	0.48	0.48	0.49	0.39
TEyring (modified)	0.98	0.98	0.81	0.74	0.63	0.60	0.57	0.43
TSabine	0.82	0.82	0.66	0.59	0.54	0.55	0.55	0.42
TSabine (modified)	1.05	1.05	0.88	0.80	0.70	0.66	0.62	0.47
T Arau-Puchades	0.84	0.84	0.70	0.65	0.58	0.57	0.55	0.42
T Arau-Puchades (modified)	1.05	1.04	0.89	0.85	0.72	0.67	0.62	0.46



Gráfica 59: Se representa el Tr en la sala mediante las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades, incluyendo la influencia del aire en la mejora 1.

Esta gráfica se obtiene teniendo en cuenta cálculos teóricos a partir del área de absorción equivalente de cada superficie, según los materiales y coeficientes de absorción de cada una de ellas, y teniendo en cuenta el volumen total del recinto, entre otros parámetros.

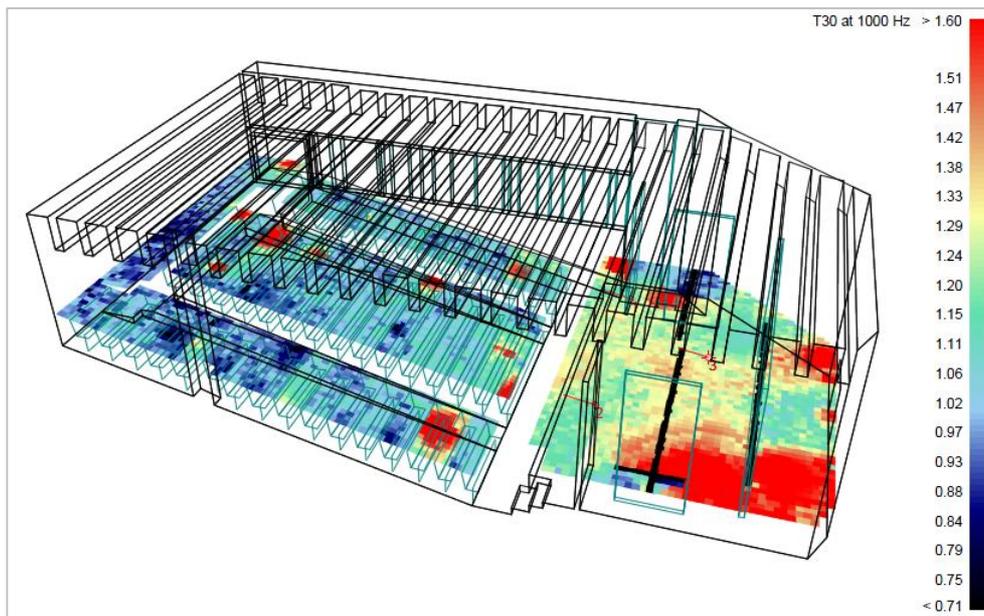
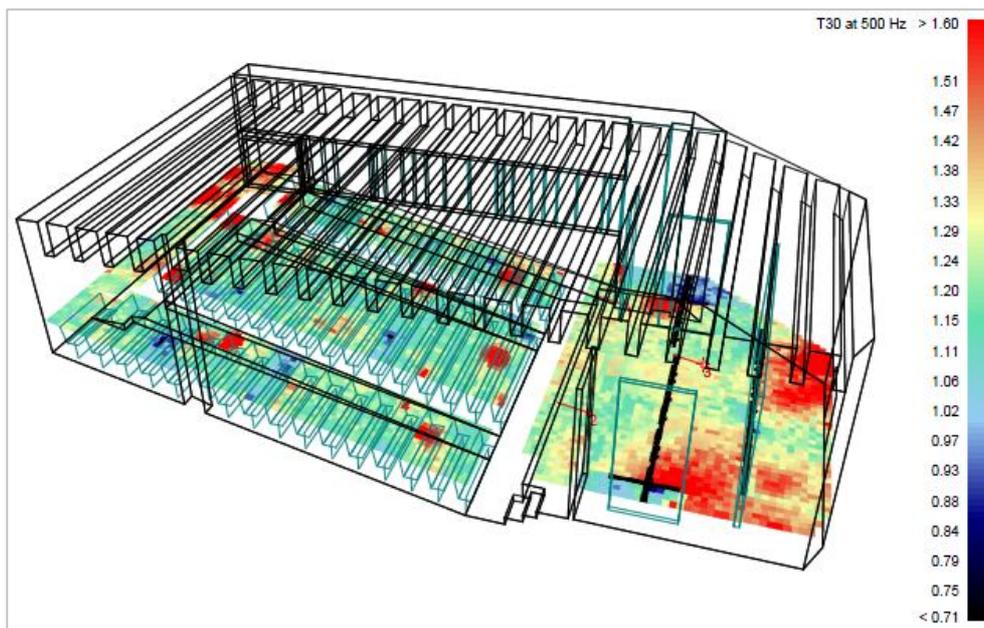
El Tr medio para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz según la fórmula de Eyring es de 0,49 seg y según la fórmula de Sabine es de 0,56 seg.

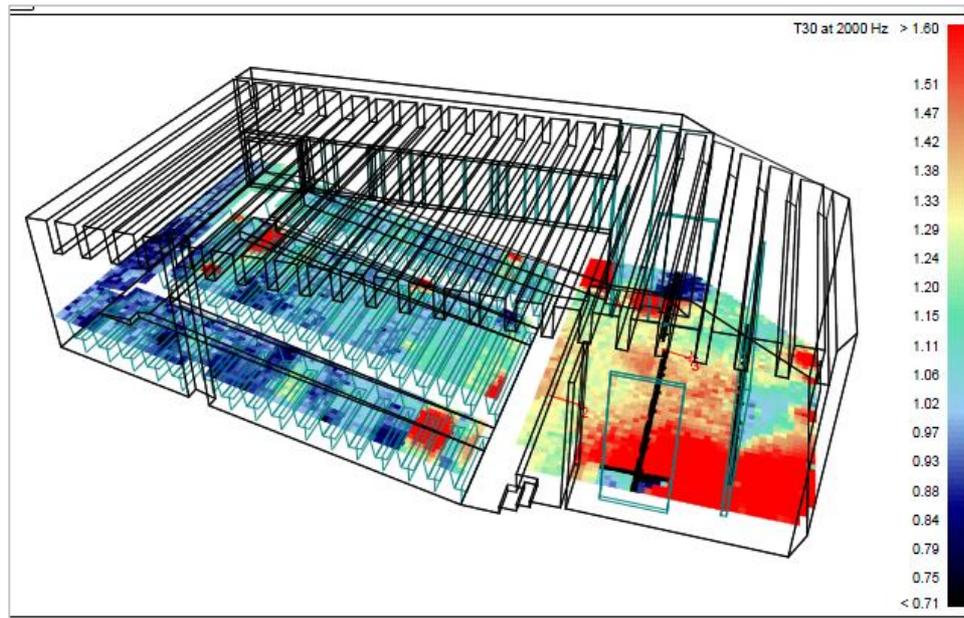
Estos valores no pueden corresponder con los valores estimados por que las superficies tienen distintas propiedades de absorción y están por encima de $\alpha=0,2$ entonces no son fiable.

A continuación, tras la simulación, se representan los resultados, de forma gráfica, de los parámetros acústicos definidos más relevantes para este estudio⁴:

⁴ Se realiza la simulación para la situación considerada, modificando las escalas de la ventana dinámica en la que se mueven los distintos parámetros acústicos en cada caso para una representación más visual dentro del rango de colores de cada uno de ellos.

Tiempo de reverberación, Tr_{30} , en 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz;





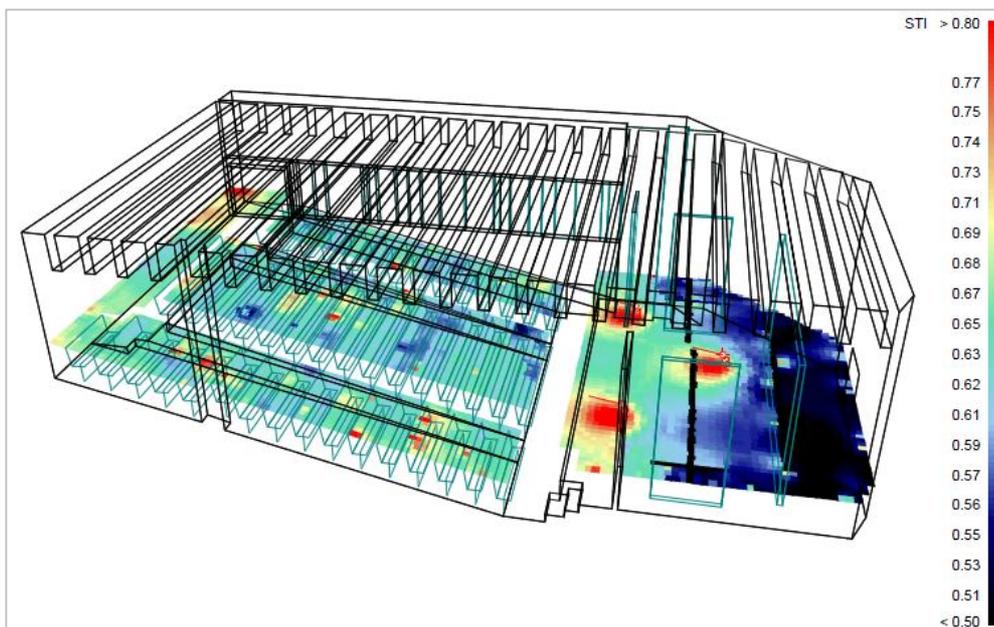
Gráfica 60: Se representa el tiempo de reverberación estimado en la sala en la mejora 1 combinando los métodos Early Ray Reflection y Late Ray Reflection.

El Tr_{30} aproximado que se obtiene a 500 Hz es de 1,12 seg, a 1000 Hz es de 1,06 seg y a 2000 Hz es de 1,02 seg.

Ha disminuido respecto al caso inicial sin tratamiento, con lo cual habrá una mejora en la claridad auditiva y la inteligibilidad en toda la zona de audiencia. Solamente en partes puntuales de dicha zona se llega a tener 1,5 segundos, principalmente en bajas frecuencias. La zona del fondo de audiencia y la reservada para personas con minusvalía tiene buenas características de tiempos de reverberación, moviéndose alrededor de 1 segundo, lo cual se puede considerar muy bueno si los usos a los que va a ser destinado el recinto (multiusos), principalmente, es el uso de la palabra (conferencias, representaciones teatrales) y también para música.

En la zona del escenario los resultados son peores debido a que no se ha realizado ningún tratamiento.

Inteligibilidad de la palabra en la sala, STI;



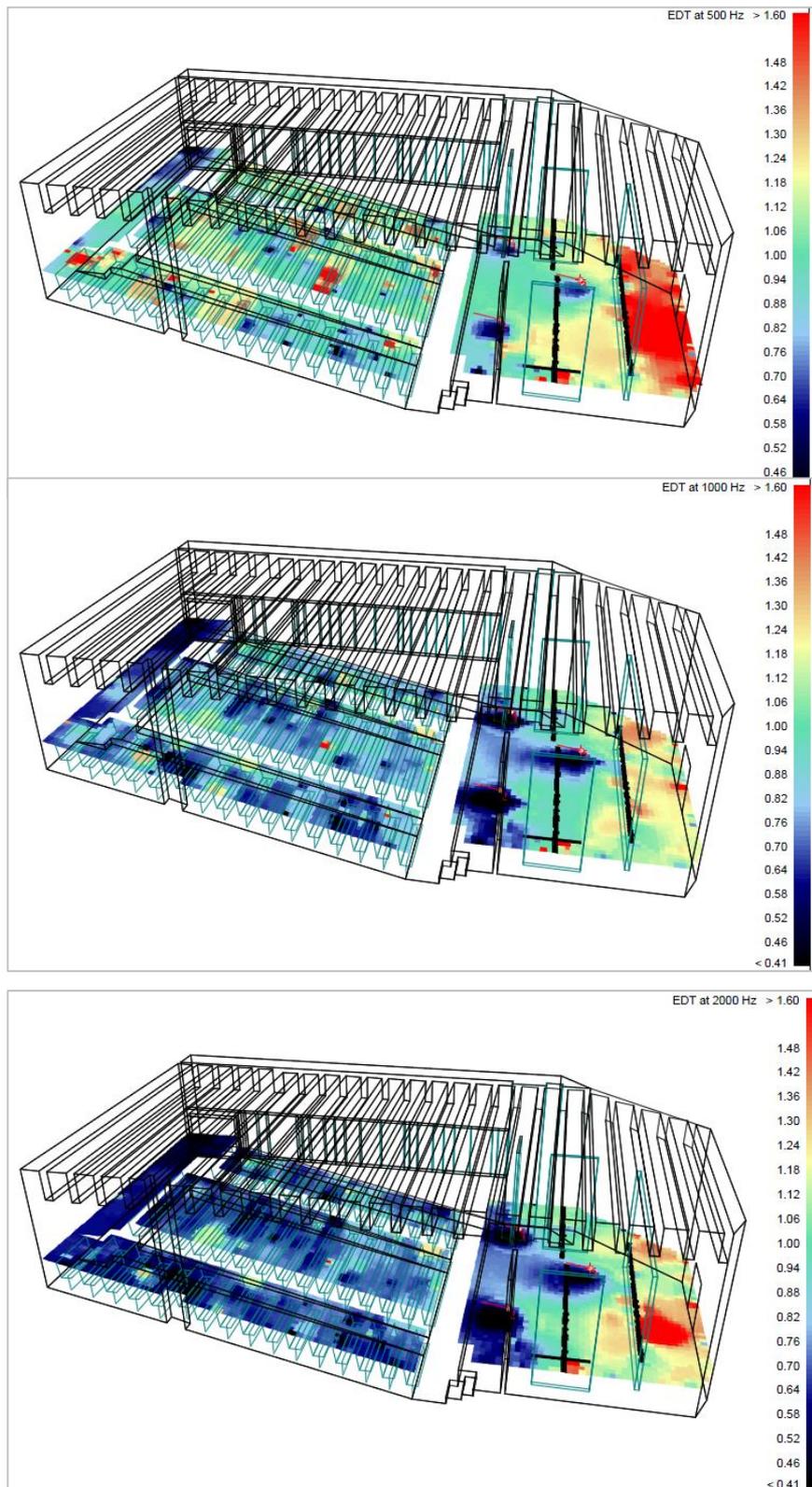
Gráfica 61: Se representa la inteligibilidad de la palabra en la sala con la mejora 1.

La inteligibilidad de la sala, STI, ha mejorado respecto al caso sin tratamiento acústico, no estando en ningún momento por debajo de 0,60 en la zona de audiencia. Hay zonas muy puntuales en la que se alcanzan valores de STI próximos o por encima a 0,7. En general los resultados son aceptables, con una distribución bastante uniforme en toda la zona de espectadores.

En la zona del escenario, la inteligibilidad es aceptable, aunque empeora a medida que nos acercamos a la zona trasera del mismo al aumentar la reverberación.

Estos resultados podrían ser mejorables, principalmente si el uso principal va a ser el de la comunicación oral (teatro, conferencias, discursos, charlas...) pero existen limitaciones en cuanto a poder modificar la geometría o no poder actuar con tratamiento acústico sobre determinadas superficies.

Tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;



Gráfica 62: Se representa el tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en la sala con la mejora 1.

El tiempo de reverberación subjetivo, EDT (s), aproximadamente a 500 Hz es de 1 seg, a 1000 Hz es de 0,78 seg, y a 2000 Hz es de 0,75 seg.

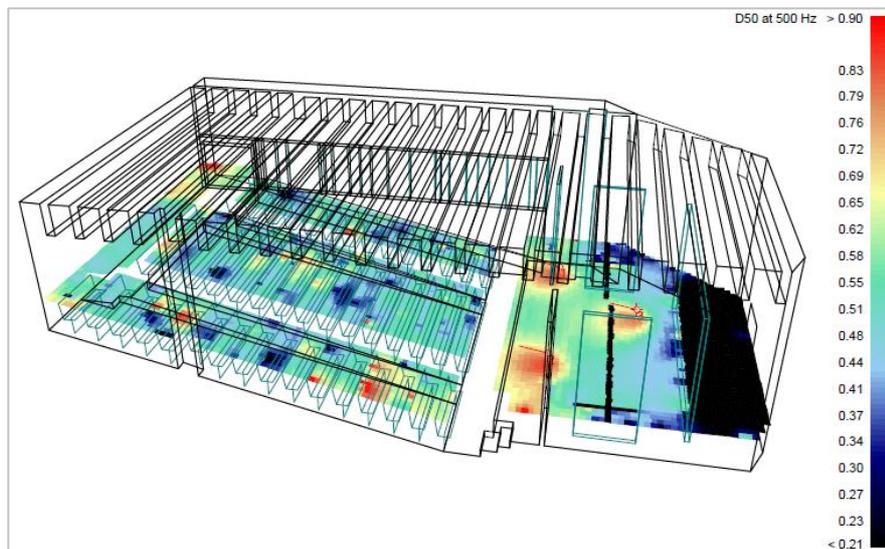
El EDT (seg), tiene valores por debajo del Tr_{30} en la zona de audiencia con lo cual, debido a los distintos usos de la sala, resulta de valores adecuados. Incluso en bajas frecuencias tiene valores sensiblemente más bajos que el Tr_{30} . Eso implica que la sala sonará un poco más apagada para la música aunque se tendrá un mejor entendimiento de la voz, sobretodo en la zona de butacas del fondo.

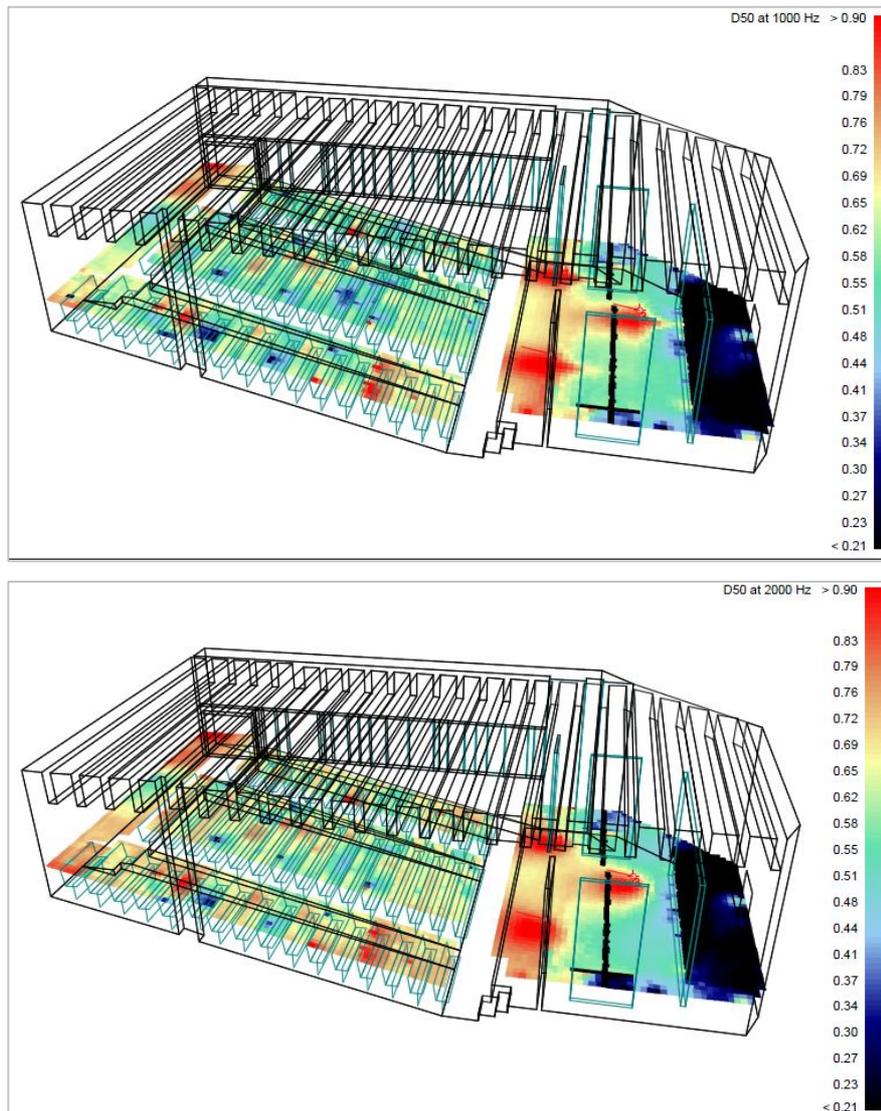
Aún así podría considerarse de valores adecuados para los dos tipos de usos debido al volumen de la sala.

En la parte delantera del escenario los valores son menores que el Tr_{30} por la presencia de las fuentes.

En la parte trasera del escenario el entendimiento sería peor al igual que la inteligibilidad, pero no resulta de interés al no existir oyentes o espectadores.

Definición, D_{50} , en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;





Gráfica 63: Se representa la definición, D_{50} , en la sala con la mejora 1.

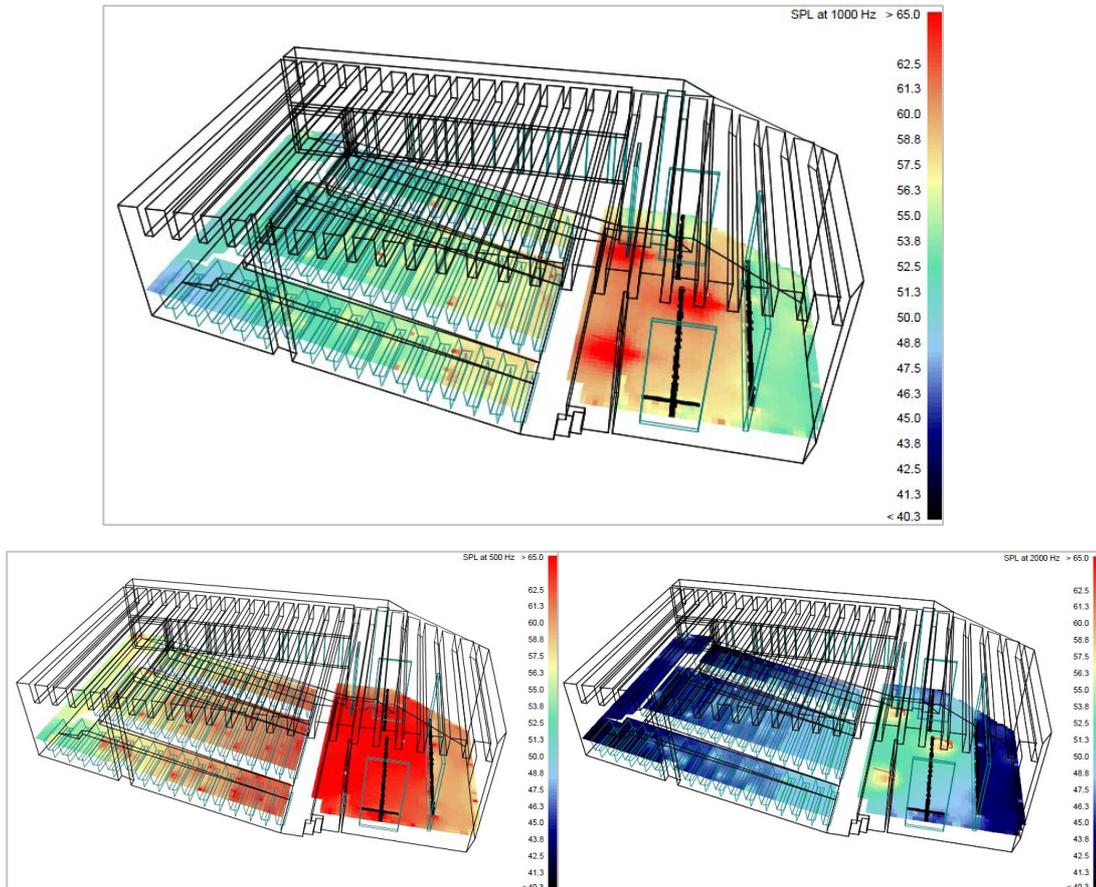
La definición, D_{50} , valora la claridad auditiva y como se ha dicho en el apdo 3 depende de la posición del oyente respecto a la fuente sonora.

No existe una distribución muy uniforme en la zona de audiencia, pero, en general, los valores son más elevados que en el caso sin tratamiento acústico y, en la mayoría de las zonas, la definición se encuentra por encima de 0,50-0,60, lo cual significa que la energía del sonido directo es mayor que la del sonido reflejado y por tanto llega con claridad a los oyentes.

En la zona delantera del escenario la definición es elevada con lo cual hay una buena claridad auditiva que permite un buen entendimiento.

Podrían obtenerse valores más altos de definición, obteniendo una muy buena claridad auditiva para el entendimiento de la voz humana pero eso iría en detrimento de la escucha de la música que necesita la llegada de cierta cola reverberante.

Distribución sonora en el recinto: SPL (dBA), en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz,;



Gráfica 64: Se representa la distribución sonora, SPL, en la sala con la mejora 1.

En cuanto a la distribución sonora, SPL (dBA), sigue siendo bastante buena en la zona de audiencia no variando más de 4 dB en la misma frecuencia, aunque es peor que en el caso inicial, debido a la mayor absorción de los materiales colocados principalmente en la pared del fondo del auditorio. Esto hace que en la zona trasera haya una disminución del nivel sonoro.

En la zona delantera del escenario la distribución sonora, es la adecuada para un buen entendimiento.

Resultados propuesta de mejora 2. Sala polivalente

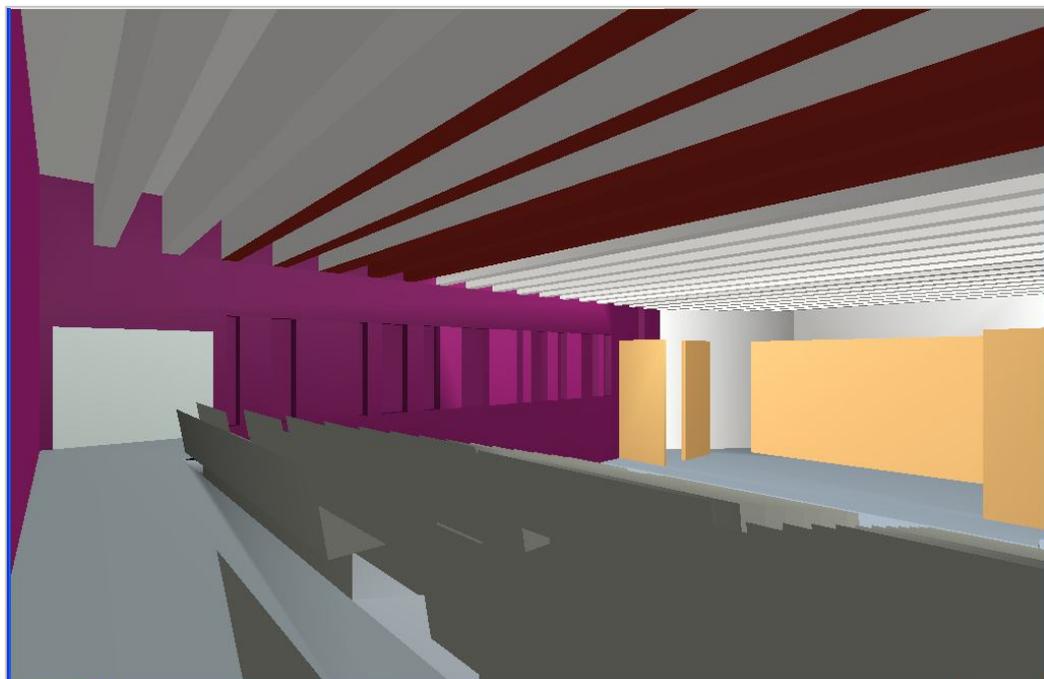


Fig.11: Vista trasera de la sala con techo parcialmente acondicionado

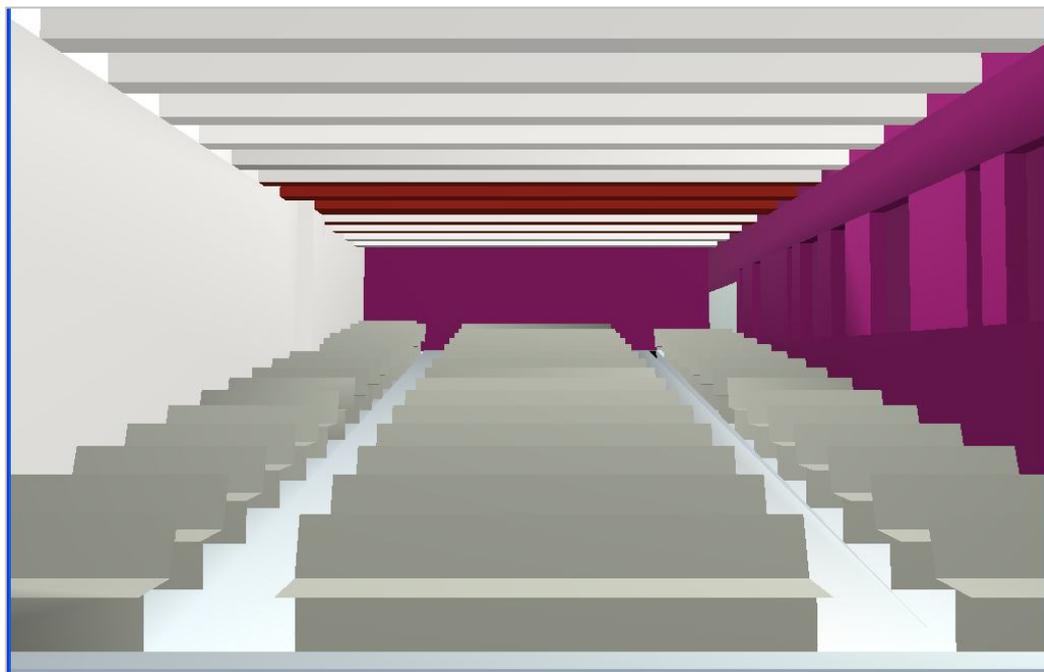
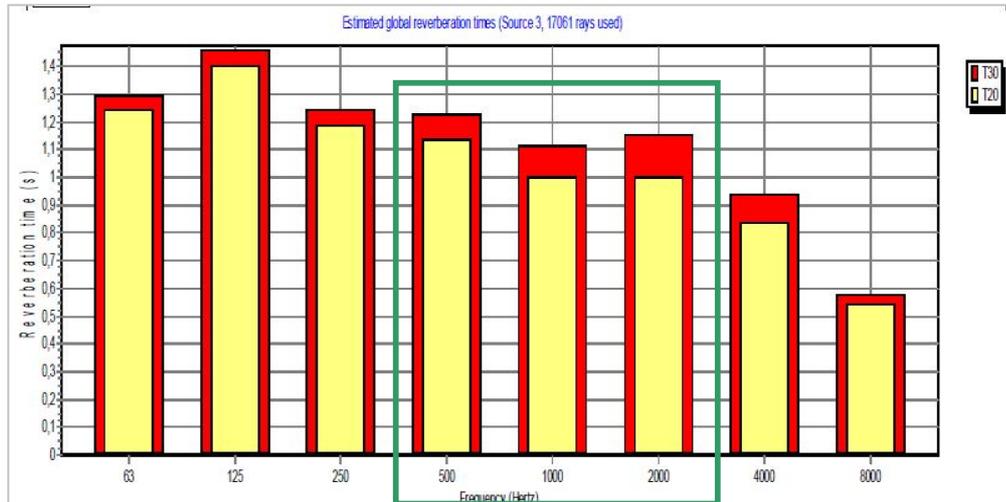


Fig.12: Vista delantera de la sala con techo parcialmente acondicionado

Como se ha hecho para la propuesta 1, una vez introducidos los parámetros necesarios en el programa, se obtienen los valores de los tiempos de reverberación globales estimados, Tr_{20} (s) y Tr_{30} (s), en bandas de octava.

Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T20	1.24	1.40	1.19	1.13	1.00	1.00	0.84	0.54
T30	1.30	1.46	1.24	1.22	1.12	1.15	0.94	0.58



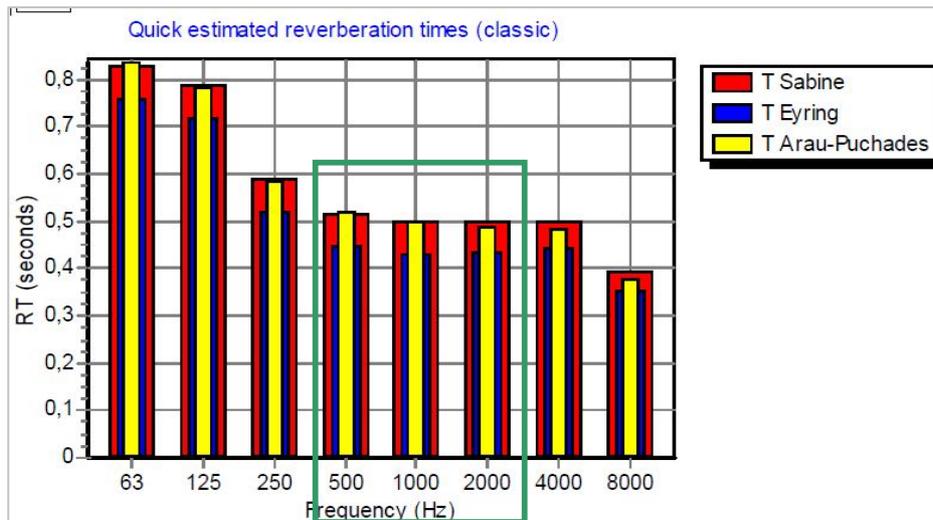
Gráfica 65: Se representa el tiempo de reverberación global estimado en la sala con el método **Late ray reflection** para la mejora 2.

El Tr_{20} medio para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz es de 1,04 seg y el Tr_{30} medio es de 1,16 seg.

A partir del área de absorción equivalente de cada superficie y del volumen total del recinto se han calculado los tiempos de reverberación en las bandas de octava que van de 63 Hz a 8000 Hz, según las aproximaciones de Sabine, Eyring y Arau-Puchades (s).

Las otra tres expresiones que aparecen tienen en cuenta la forma de la sala.

Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
TEyring	0.76	0.72	0.52	0.44	0.43	0.43	0.44	0.35
TEyring (modified)	0.99	0.94	0.71	0.63	0.57	0.54	0.52	0.40
TSabine	0.83	0.79	0.59	0.51	0.50	0.50	0.50	0.39
TSabine (modified)	1.06	1.01	0.78	0.69	0.64	0.60	0.57	0.44
TArau-Puchades	0.84	0.78	0.58	0.52	0.50	0.49	0.48	0.38
TArau-Puchades (modified)	1.06	1.00	0.76	0.69	0.63	0.59	0.55	0.42



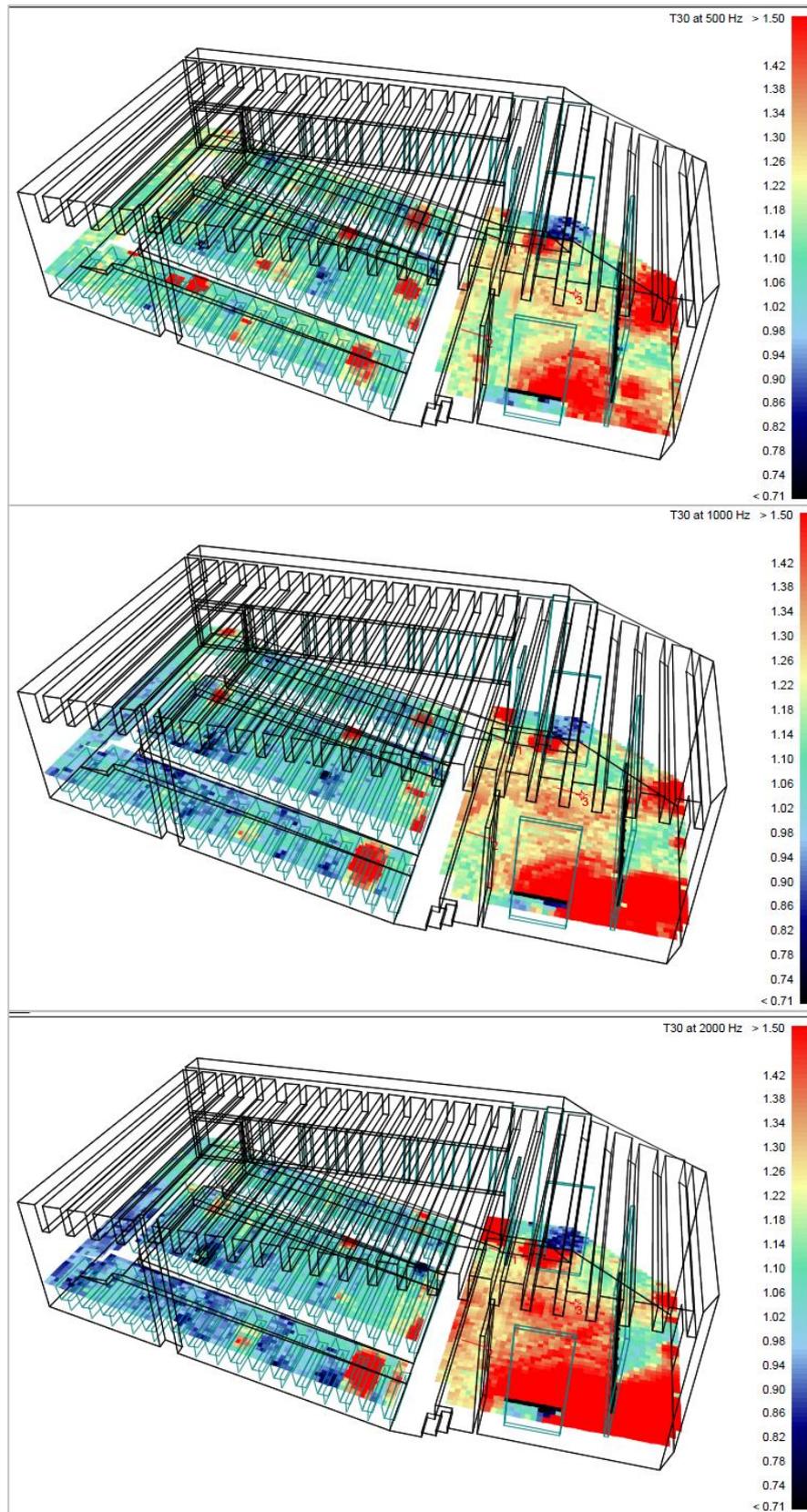
Gráfica 66: Se representa el Tr en la sala mediante las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades, incluyendo la influencia del aire en la mejora 2.

El Tr medio para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz según la fórmula de Eyring es de 0,43 seg y según la fórmula de Sabine es de 0,50 seg.

Estos valores no son fiable por que las superficies tienen distintas propiedades de absorción y están por encima de $\alpha=0,2$ y por este motivo no pueden corresponder con los valores estimados.

Tras la simulación, se obtiene una representación gráfica de los parámetros acústicos que se han considerado más relevantes para este estudio:

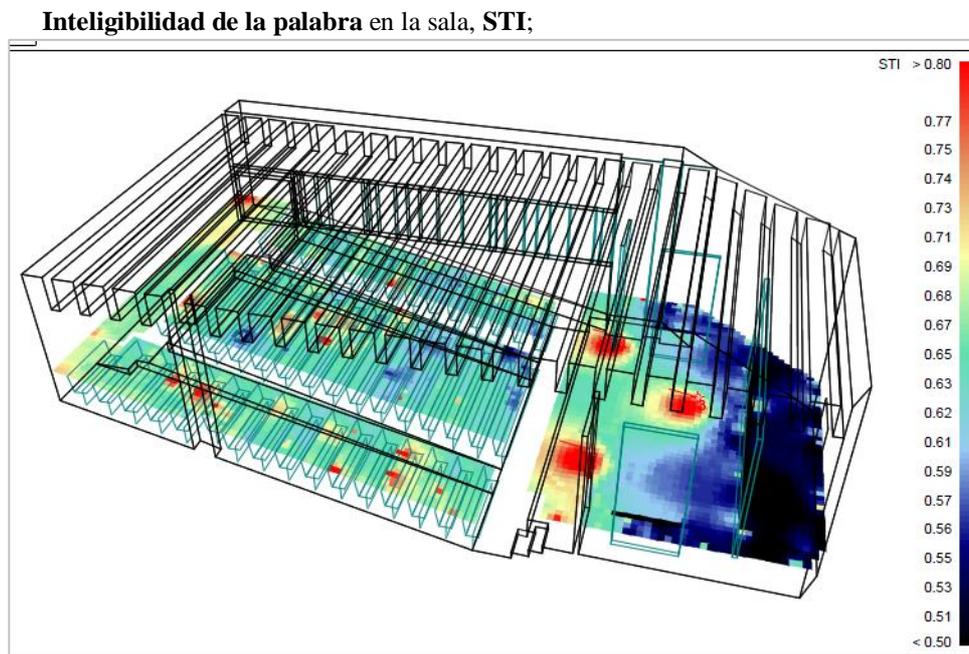
Tiempo de reverberación, Tr_{30} , en 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz;



Gráfica 67: Se representa el tiempo de reverberación estimado en la sala en la mejora 2 combinando los métodos Early Ray Reflection y Late Ray Reflection.

El Tr_{30} aproximado que se obtiene a 500 Hz es de 1,14seg, a 1000 Hz es de 1,02 seg y a 2000 Hz es de 0,98 seg.

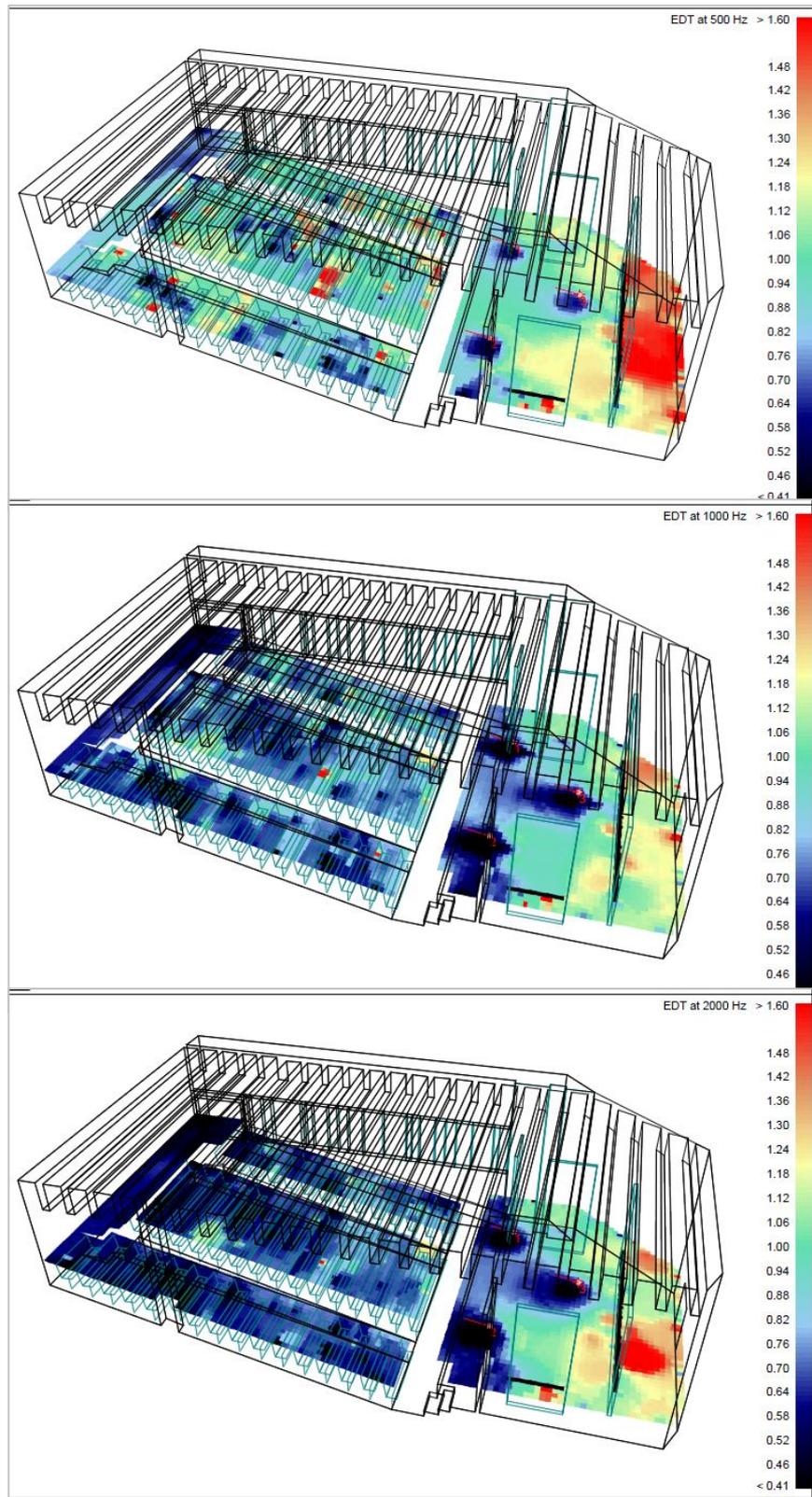
El tiempo de reverberación, Tr_{30} , en este caso es similar al obtenido en la propuesta de mejora 1. Los valores obtenidos están dentro de los márgenes recomendados para este tipo de recintos multiusos.



Gráfica 68: Se representa la inteligibilidad de la palabra en la sala con la mejora 2.

La inteligibilidad de la sala, STI, tiene valores muy similares a los de la solución propuesta anteriormente. La diferencia es inapreciable. Sigue manteniéndose una inteligibilidad buena, estando los valores de STI, en general, por encima de 0,6 en la zona de audiencia.

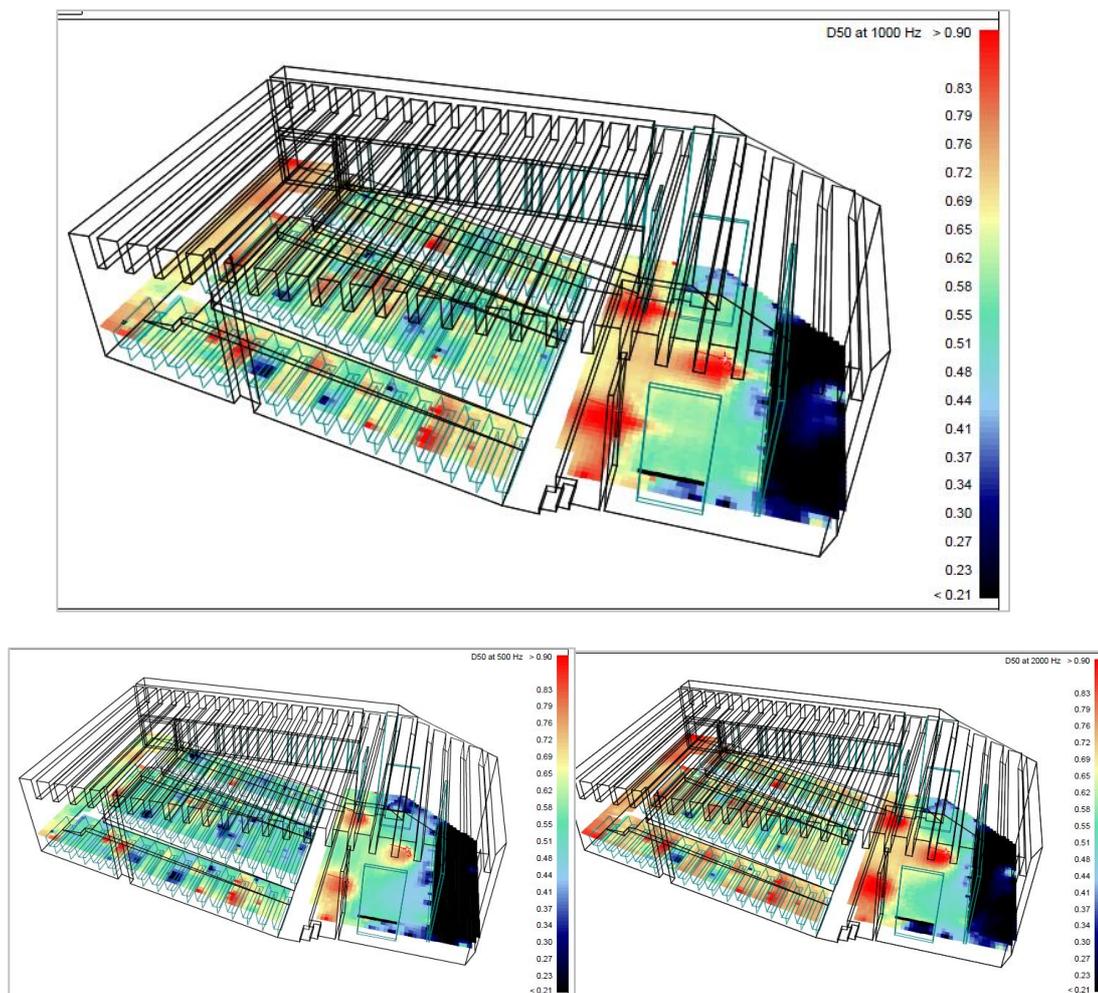
Tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;



Gráfica 69: Se representa el tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en la sala con la mejora 2.

El tiempo de reverberación subjetivo, EDT (s), aproximadamente a 500 Hz es de 0,94 seg, a 1000 Hz es de 0,75 seg, y a 2000 Hz es de 0,70 seg. Los valores obtenidos son ligeramente inferiores a los de la propuesta 1 y ligeramente inferiores a los del tiempo de reverberación, con lo cual serían más apropiados para el uso de la palabra y menos para la música.

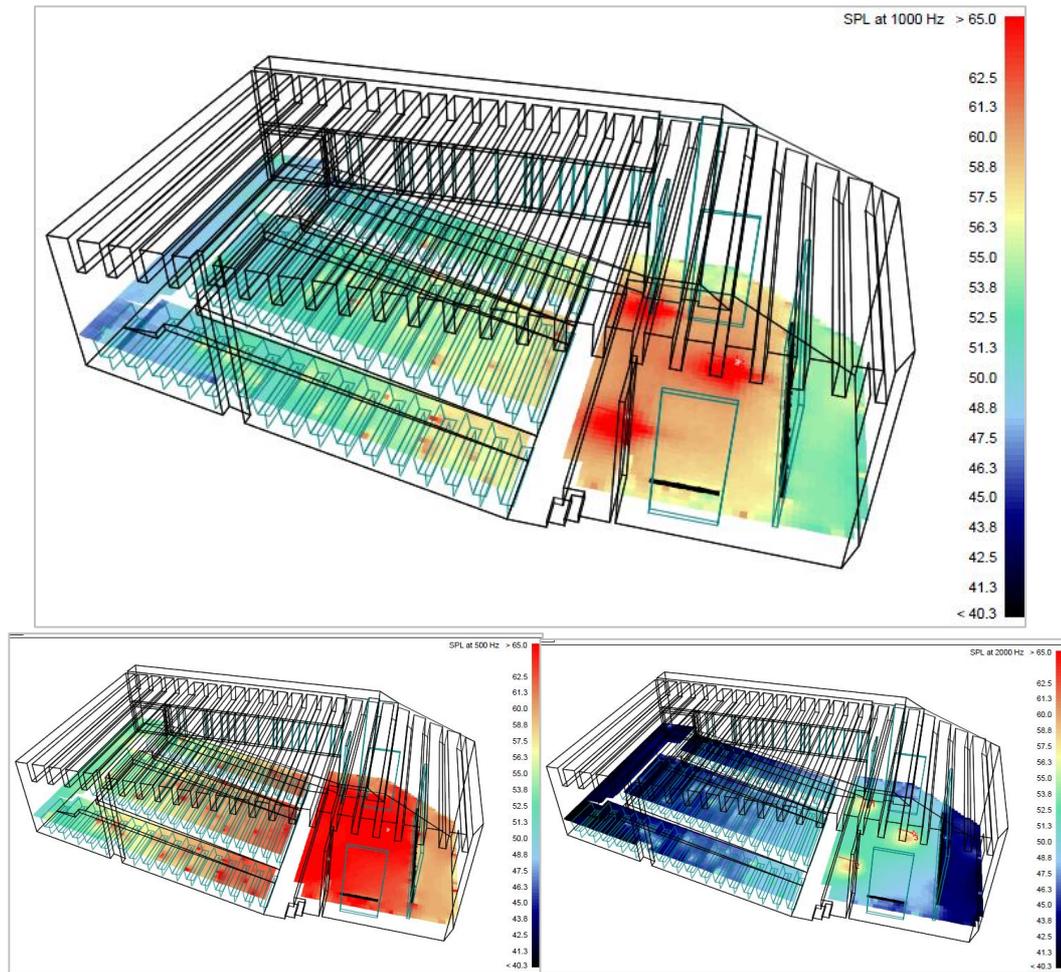
Definición, D_{50} , en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;



Gráfica 70: Se representa la definición, D_{50} , en la sala con la mejora 2.

La definición, D_{50} , tiene valores similares a los obtenidos en la propuesta anterior, observándose ligeras mejoras por la zona de audiencia. Siguen siendo adecuados y se nota una discreta mejora respecto a la solución de partida.

Distribución sonora en el recinto: SPL (dBA), en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;.



Gráfica 71: Se representa la distribución sonora, SPL, en la sala con la mejora 2.

Los valores son ligeramente peores que en el caso inicial, debido a la mayor absorción de los materiales colocados en una zona de la parte central del techo y en la pared del fondo del auditorio, y no se aprecia ninguna mejora respecto a los de la propuesta anterior.

Resultados propuesta de mejora 3. Sala polivalente

En esta propuesta se mantienen los materiales utilizados en el caso inicial.

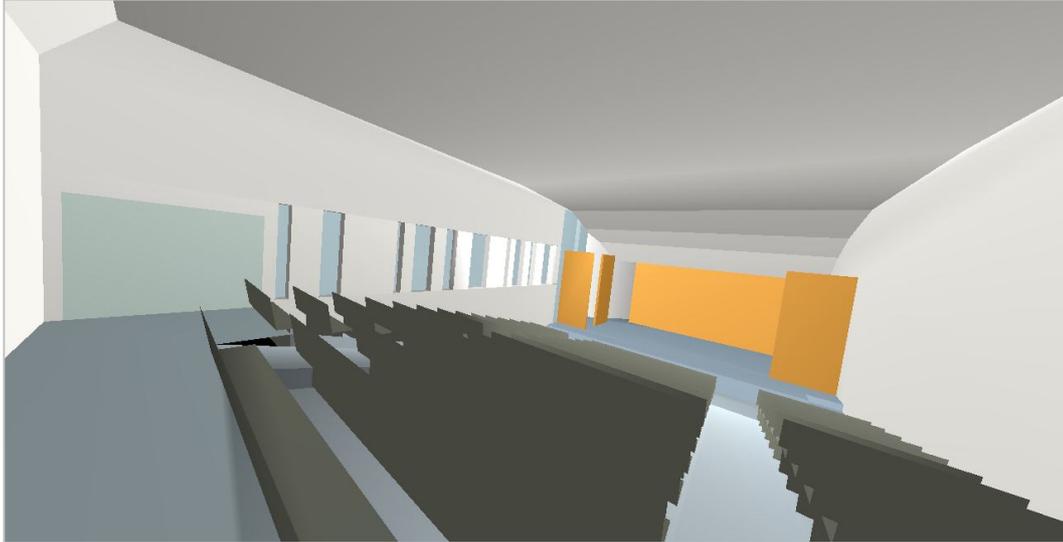
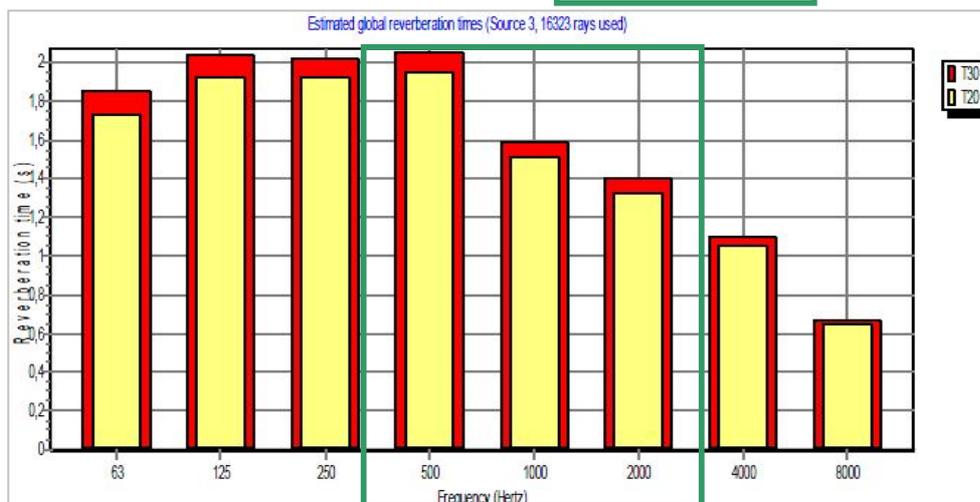


Fig.13: Vista trasera de la sala con techo ortofónico.

Teniendo en cuenta la caída (de 20 o 30 dB, según el caso) de los primeros rayos desde la fuente se obtiene la estimación de los tiempos de reverberación globales, Tr_{20} (s) y Tr_{30} (s), en las bandas de octava que van de 63 Hz hasta 8000 Hz. La simulación devuelve graficamente los resultados.

Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T20	1.73	1.92	1.92	1.94	1.51	1.32	1.05	0.85
T30	1.85	2.03	2.02	2.05	1.58	1.40	1.10	0.87

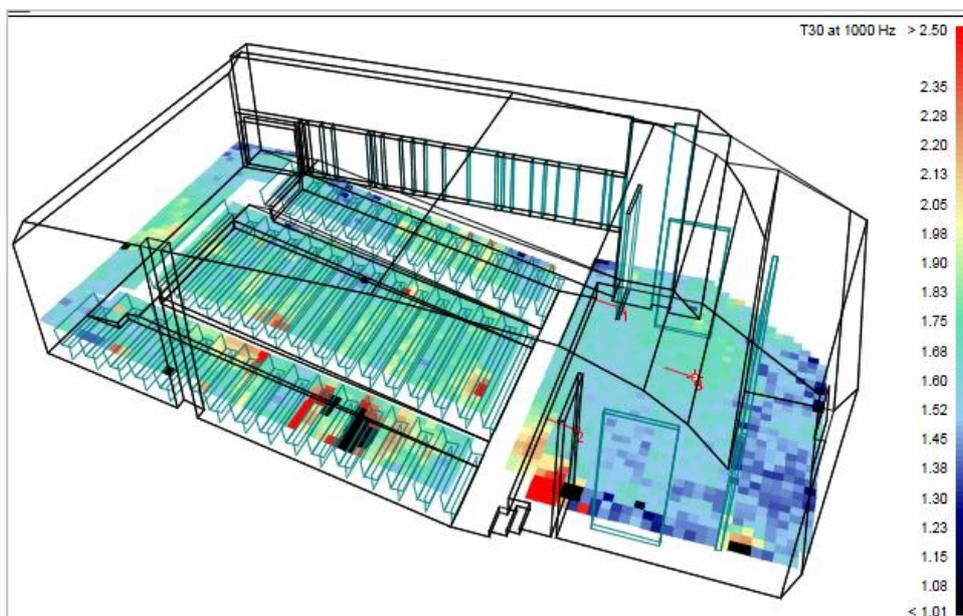
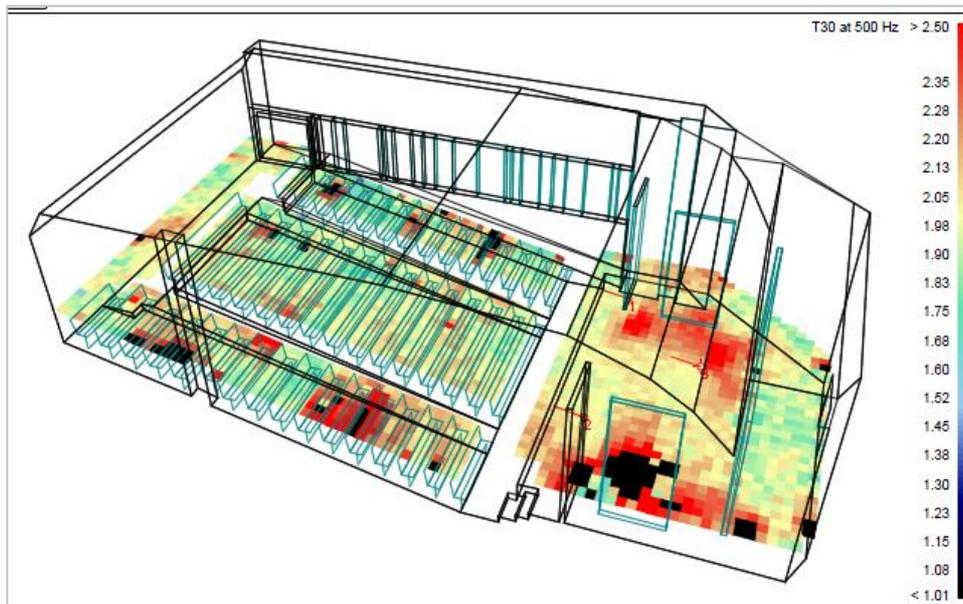


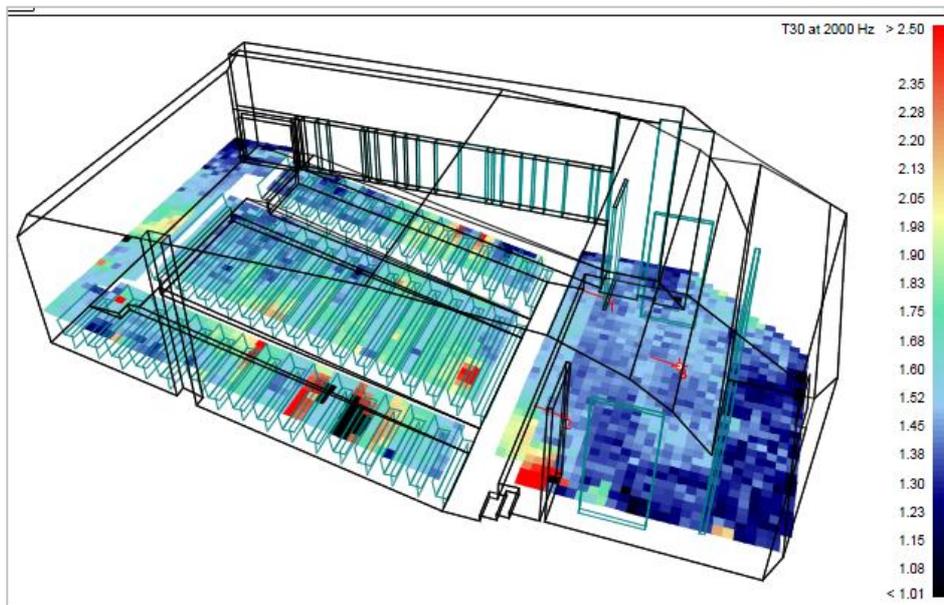
Gráfica 72: Se representa el tiempo de reverberación global estimado en la sala con el método Late ray reflection para la mejora 3.

El Tr_{20} medio para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz es de 1,59 seg y el Tr_{30} medio es de 1,68 seg.

A continuación, se muestran los resultados de Tr_{30} , STI , EDT , D_{50} , SPL , después de la simulación:

Tiempo de reverberación, Tr_{30} , en 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz;





Gráfica 73: Se representa el tiempo de reverberación estimado en la sala en la mejora 3 combinando los métodos Early Ray Reflection y Late Ray Reflection.

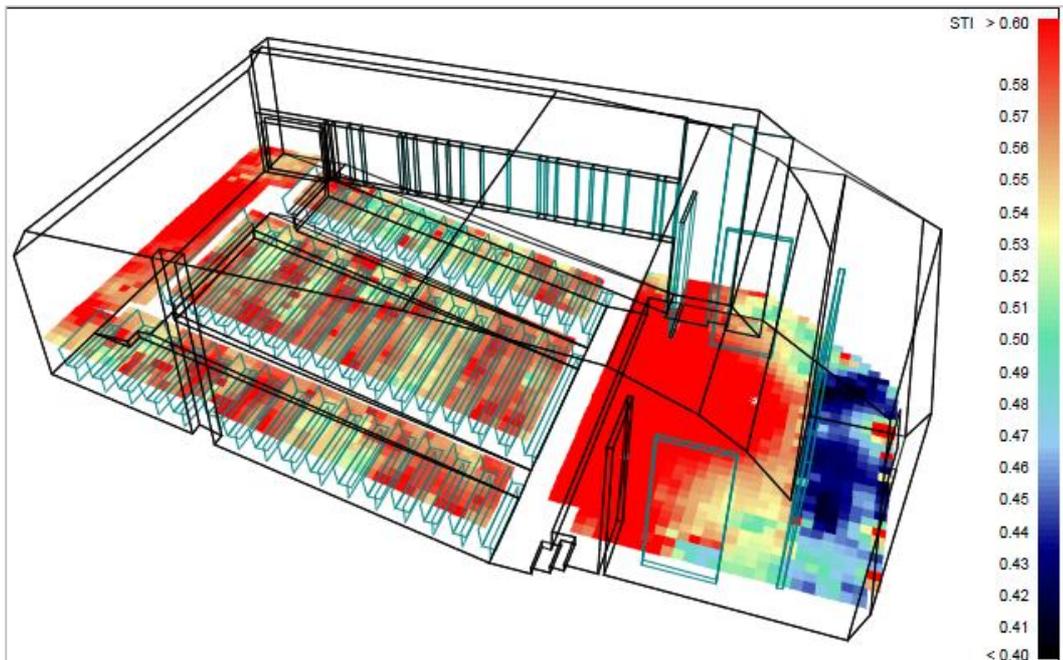
El Tr_{30} aproximado que se obtiene a 500 Hz es de 1,95 seg, a 1000 Hz es de 1,65 seg y a 2000 Hz es de 1,52 seg.

Los valores de Tr_{30} que se obtienen son muy parecido al caso inicial sin tratamiento. En la zona de audiencia resulta sensiblemente elevado en bajas frecuencias, en medias y altas frecuencias está por encima de 1,2 seg y por debajo de 1,6 seg y en la zona del escenario los valores son ligeramente más bajos. Se concluye que el resultado es bueno para el uso de la comunicación oral (como charlas, conferencias, teatro,...) e para el uso de la música.

Resulta interesante notar que, a pesar de que se haya introducido un techo equipotencial, no se observan cambios apreciables en el comportamiento acústico de la sala.

En el caso inicial, se nota una tentativa de mejorar este comportamiento. El techo tiene casi el doble de superficie respecto a la propuesta presentada, sin embargo, la solución no resulta eficaz debido a la utilización de un material inadecuado para tal fin.

Inteligibilidad de la palabra en la sala, STI;



Gráfica 74: Se representa la inteligibilidad de la palabra en la sala con la mejora 3.

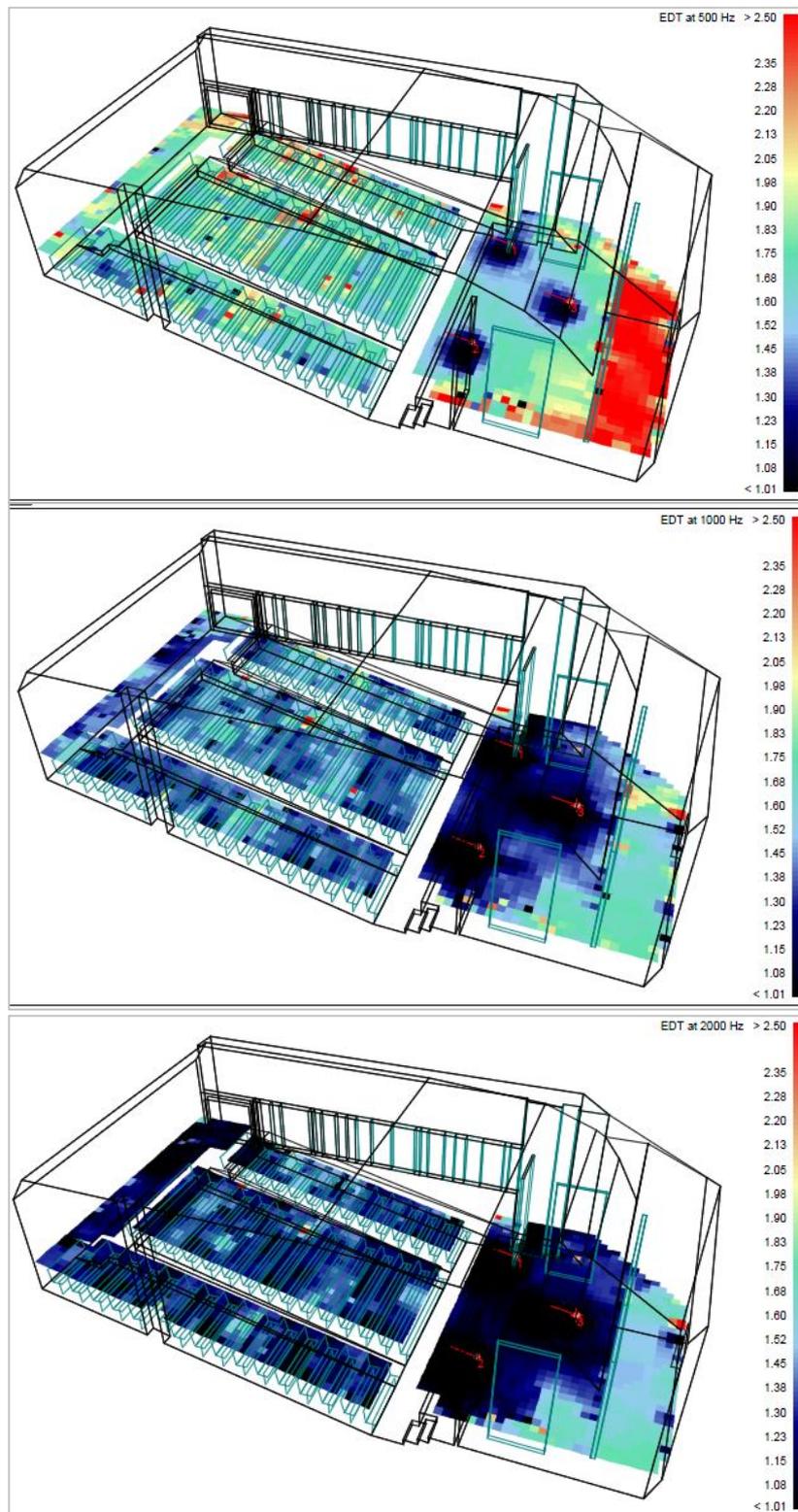
La inteligibilidad de la sala, STI, ha mejorado respecto al caso inicial.

En ningún momento está por debajo de 0,55 en la zona de audiencia. En general, los resultados son aceptables, con una distribución bastante uniforme en toda la zona de espectadores.

En la zona del escenario, se obtienen valores que están por encima de 0,6, empeora solamente en la parte trasera al aumentar la reverberación, por lo tanto, se puede considerar buena.

Se observa que, con la correcta construcción de un techo ortofónico en la sala, el campo sonoro resulta aproximadamente constante en la zona de audiencia, permitiendo mejorar la distribución del sonido respecto al caso inicial.

Tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;



Gráfica 75: Se representa el tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en la sala con la mejora 3.

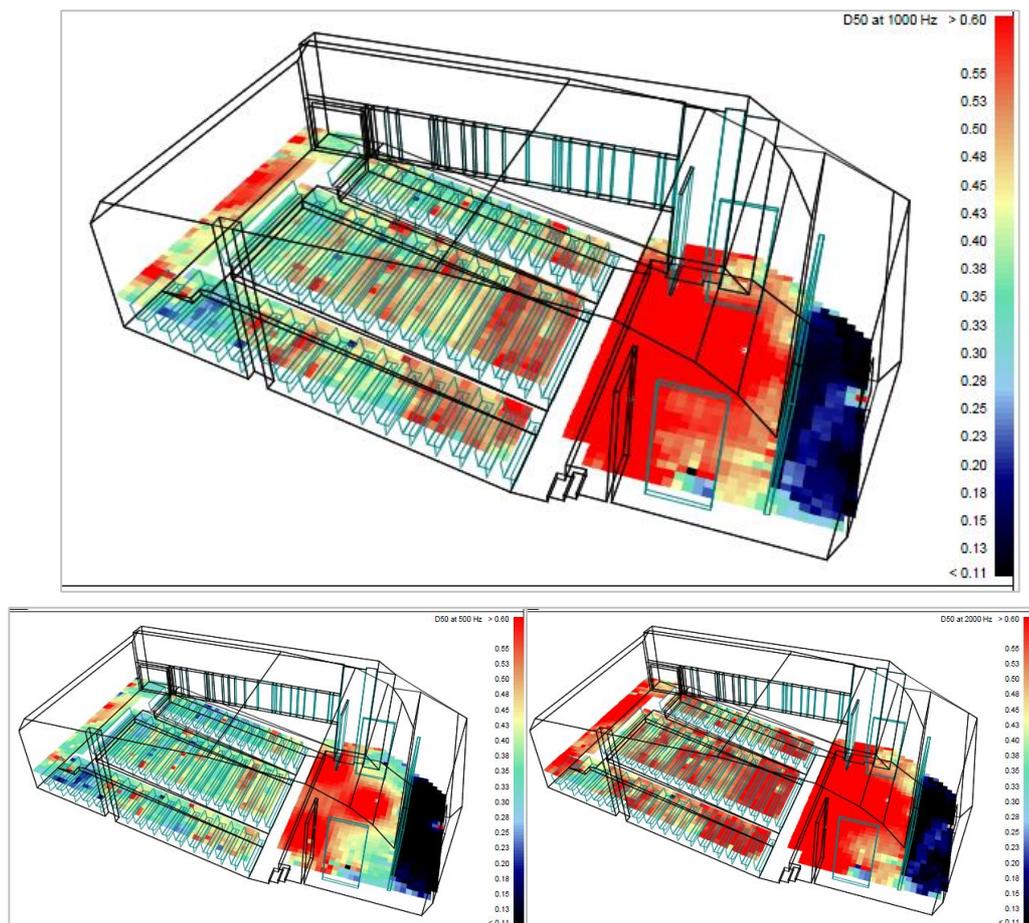
El tiempo de reverberación subjetivo, EDT (s), aproximadamente a 500 Hz es de 1,75 seg, a 1000 Hz es de 1,45 seg, y a 2000 Hz es de 1,30 seg.

El EDT (seg), tiene valores ligeramente por debajo del Tr_{30} en la zona de audiencia con lo cual, debido a los distintos usos de la sala, resulta de valores adecuados. Eso implica que la sala sonará un poco más apagada. Sin embargo, siendo una sala polivalente, resulta adecuada para el uso de la palabra y para la escucha de la música.

En altas frecuencias se tendrá un mayor entendimiento de la voz, sobretodo en la zona de butacas del fondo.

En la zona del escenario los valores son menores que el Tr_{30} por la proximidad de las fuentes.

Definición, D_{50} , en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;

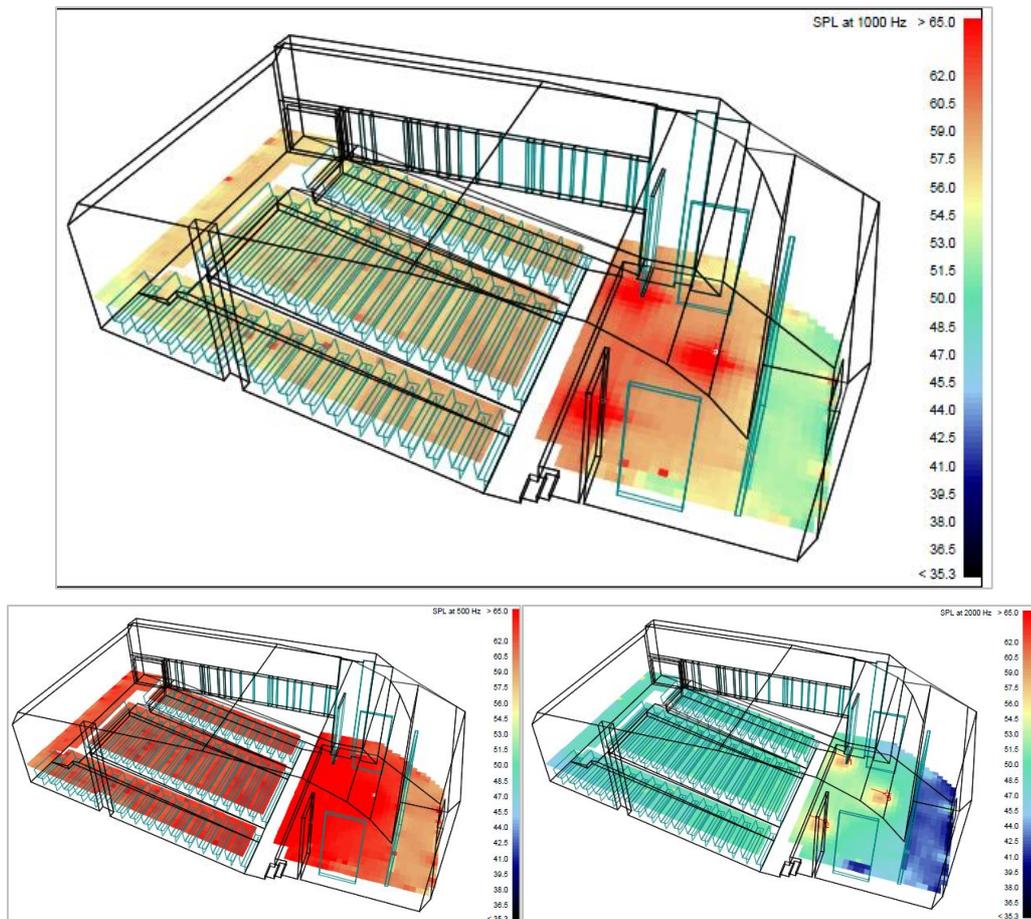


Gráfica 76: Se representa la definición, D_{50} , en la sala con la mejora 3.

En la zona de audiencia no existe una distribución muy uniforme, además, no se introduce ninguna mejora significativa respecto al caso original. Se concluye que en la mayoría de las zonas la definición no es la adecuada, la energía del sonido directo es menor que la del sonido reflejado, por tanto no llega con claridad a los oyentes.

Solamente en la zona delantera del escenario la definición supera 0,5.

Distribución sonora en el recinto: SPL (dBA), en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;



Gráfica 77: Se representa la distribución sonora, SPL, en la sala con la mejora 3.

La distribución sonora, SPL (dBA), es buena y uniforme en la zona de audiencia no variando más de 4 dB en la misma frecuencia.

Como para el caso inicial, los niveles sonoros son superiores en la zona donde se encuentran las fuentes sonoras y disminuyen a medida que nos alejamos de las mismas, pero no se aprecian variaciones significativas.

Resultados propuesta de mejora 4. Sala polivalente

En esta propuesta se utilizan los mismos materiales utilizados para la propuesta 1.

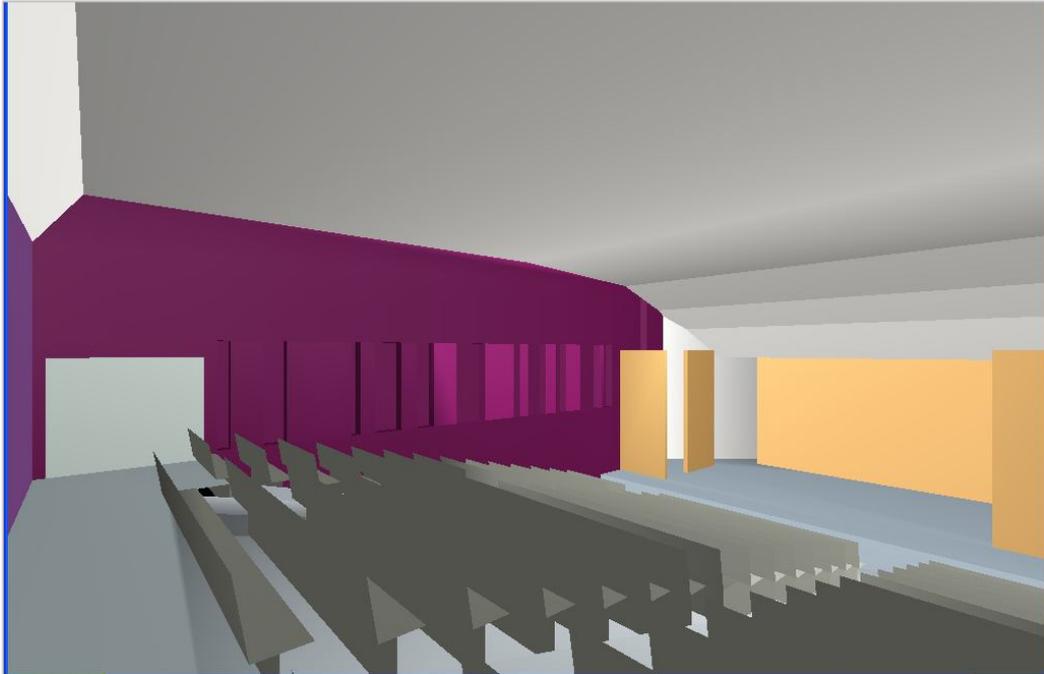
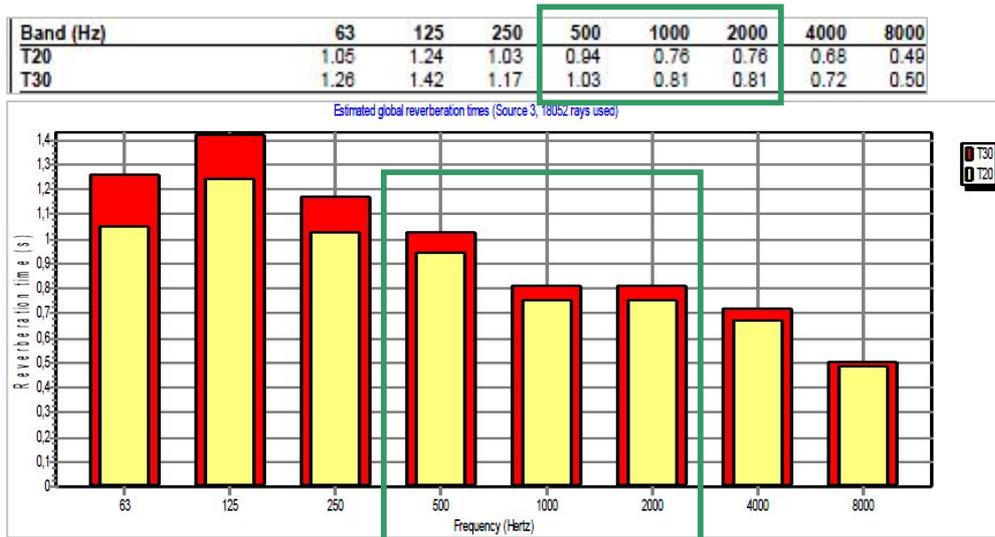


Fig.14: Vista trasera de la sala parcialmente acondicionada con techo ortofónico.

Tal y como se ha hecho en las propuestas anteriores, se detallan gráficamente los tiempos de reverberación globales estimados, Tr_{20} y Tr_{30} , en las bandas de octava desde 63 Hz hasta 8000 Hz.

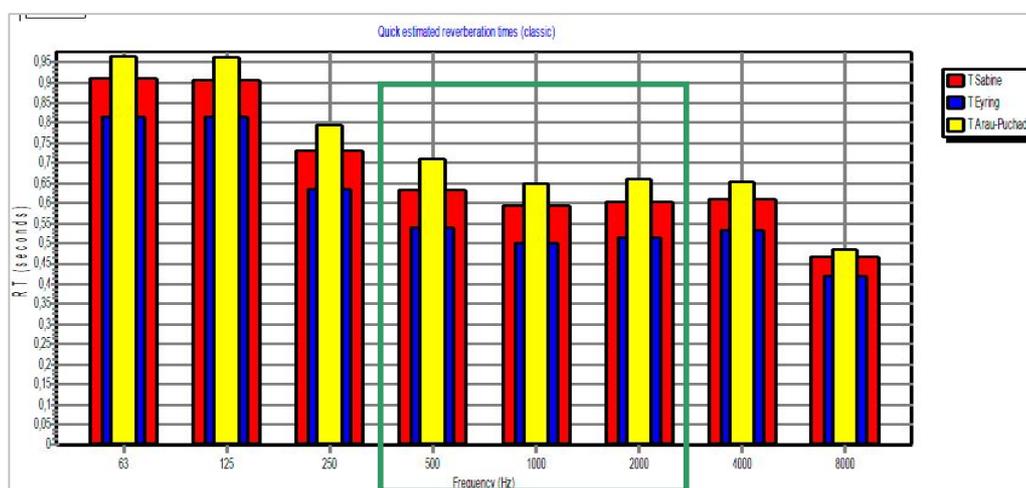


Gráfica 78: Se representa el tiempo de reverberación global estimado en la sala con el método Late ray reflection para la mejora 4.

El Tr_{20} medio para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz es de 0,82 seg y el Tr_{30} medio es de 0,88 seg.

Los valores de los tiempos de reverberación calculados según las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades (s) y las modificaciones que tienen en cuenta la forma de la sala se representan en la gráfica a continuación.

Band (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
TEyring	0.82	0.81	0.84	0.54	0.50	0.52	0.53	0.42
TEyring (modified)	0.98	0.97	0.80	0.71	0.63	0.61	0.60	0.45
TSabine	0.91	0.91	0.73	0.63	0.59	0.61	0.61	0.47
TSabine (modified)	1.07	1.07	0.90	0.80	0.72	0.70	0.67	0.50
TArau-Puchades	0.97	0.96	0.79	0.71	0.65	0.66	0.65	0.48
TArau-Puchades (modified)	1.13	1.13	0.95	0.89	0.78	0.77	0.72	0.52



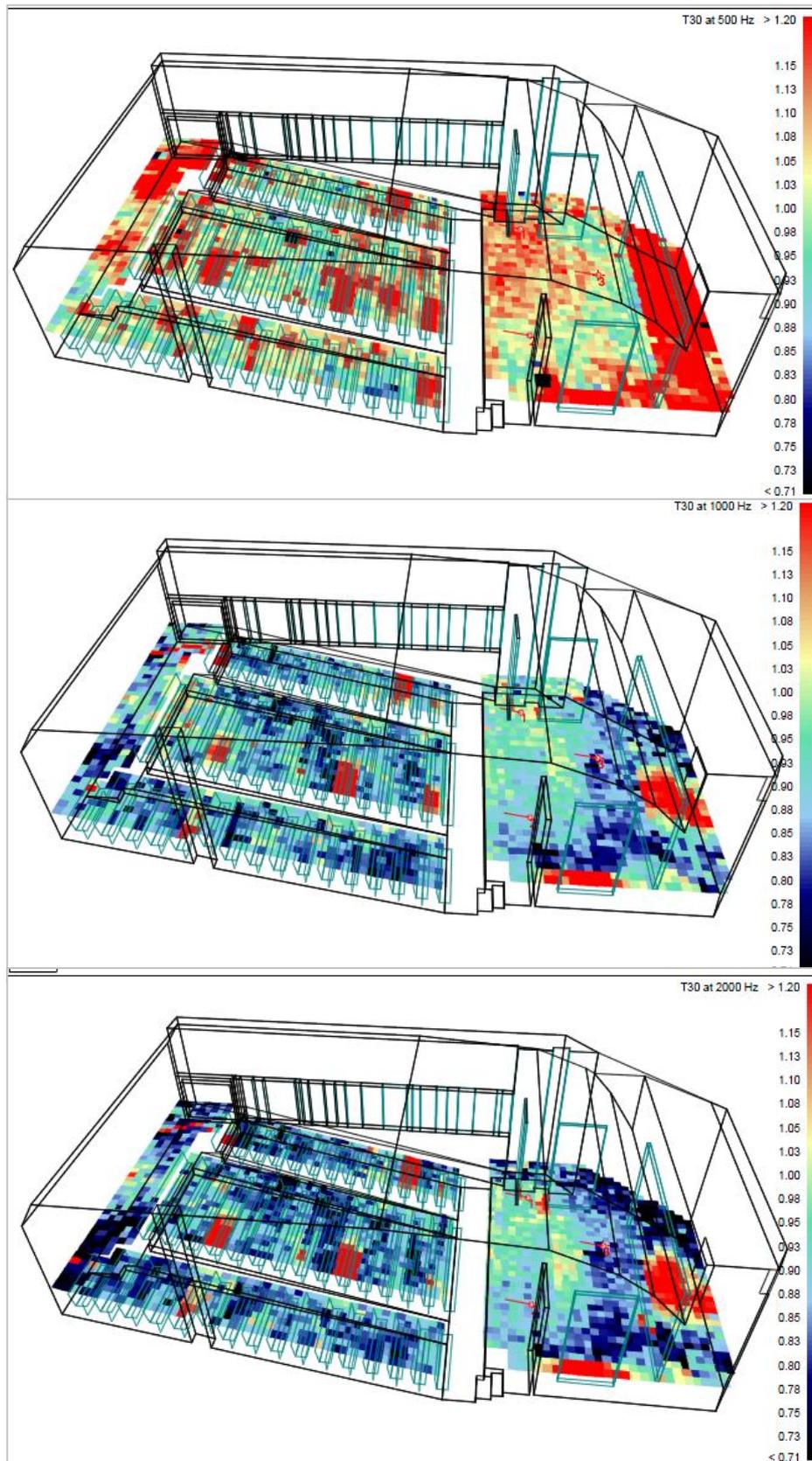
Gráfica 79: Se representa el Tr en la sala mediante las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades, incluyendo la influencia del aire en la mejora 4.

El Tr medio para las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz según la fórmula de Eyring es de 0,52 seg y según la fórmula de Sabine es de 0,61 seg.

Estos valores se indican a efecto meramente informativo por que, estando por encima de $\alpha=0,2$ y teniendo las superficies distintas propiedades de absorción, no son fiables.

A seguir se indican los resultados obtenidos, tras la simulación, de los parámetros acústicos definidos más relevantes.

Tiempo de reverberación, Tr_{30} , en 500 Hz, 1000 Hz y 2000 Hz;



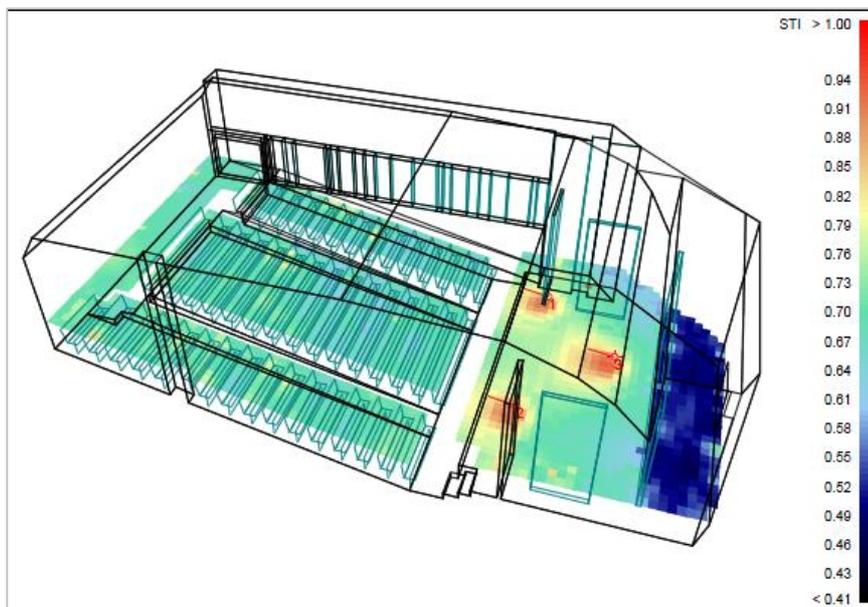
Gráfica 80: Se representa el tiempo de reverberación estimado en la sala en la mejora 4 combinando los métodos Early Ray Reflection y Late Ray Reflection.

El Tr_{30} aproximado que se obtiene a 500 Hz es de 1,05 seg, a 1000 Hz es de 0,88 seg y a 2000 Hz es de 0,83 seg. Estos valores son algo bajos salvo en el caso de que el uso predominante del recinto fuera para la comunicación oral (conferencias, charlas, representaciones teatrales)

Los valores de Tr en toda la zona de audiencia se han reducido considerablemente respecto al caso inicial sin tratamiento en beneficio de la claridad auditiva y la inteligibilidad.

En la zona delantera del escenario los valores son ligeramente más elevados.

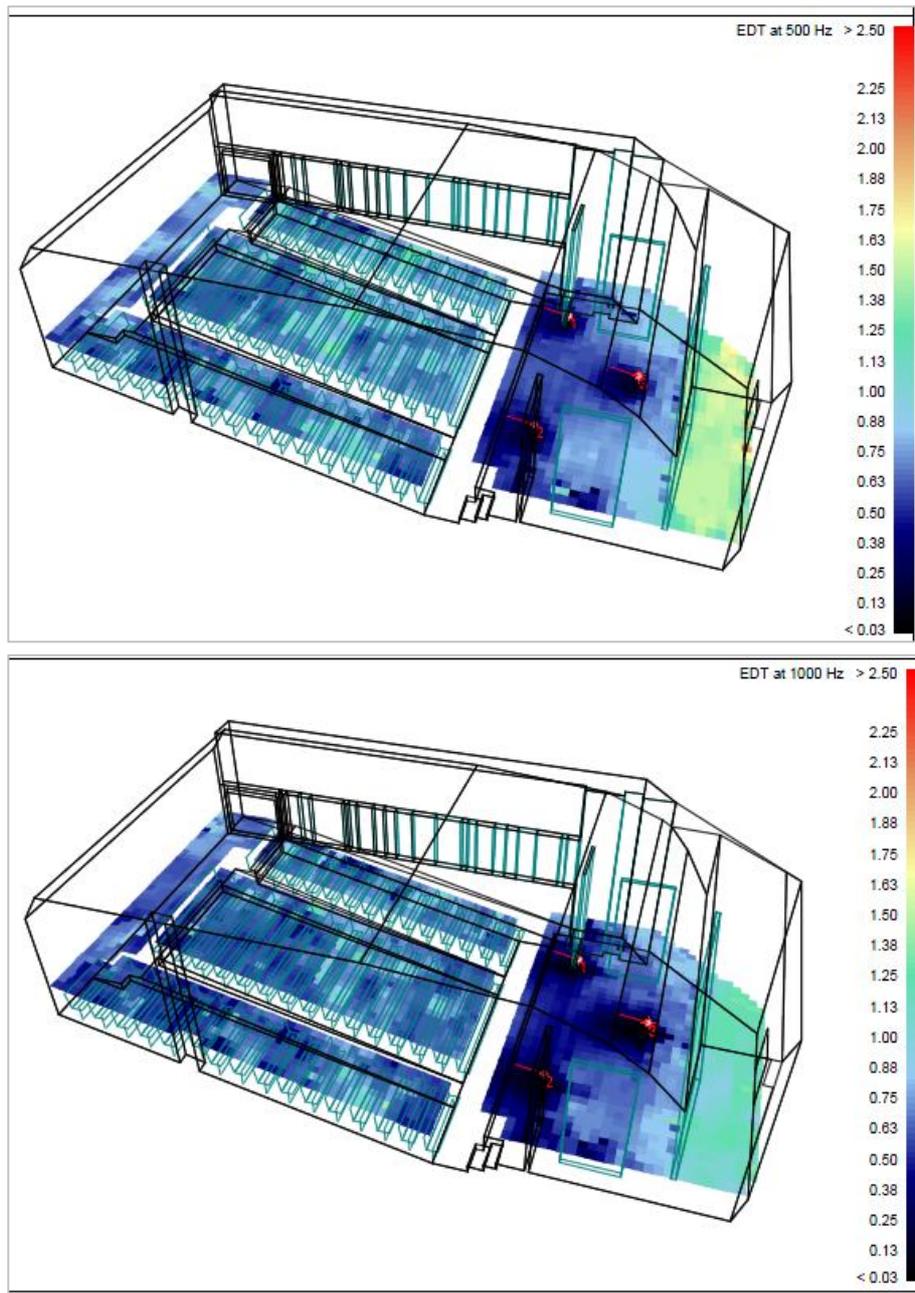
Inteligibilidad de la palabra en la sala, STI;

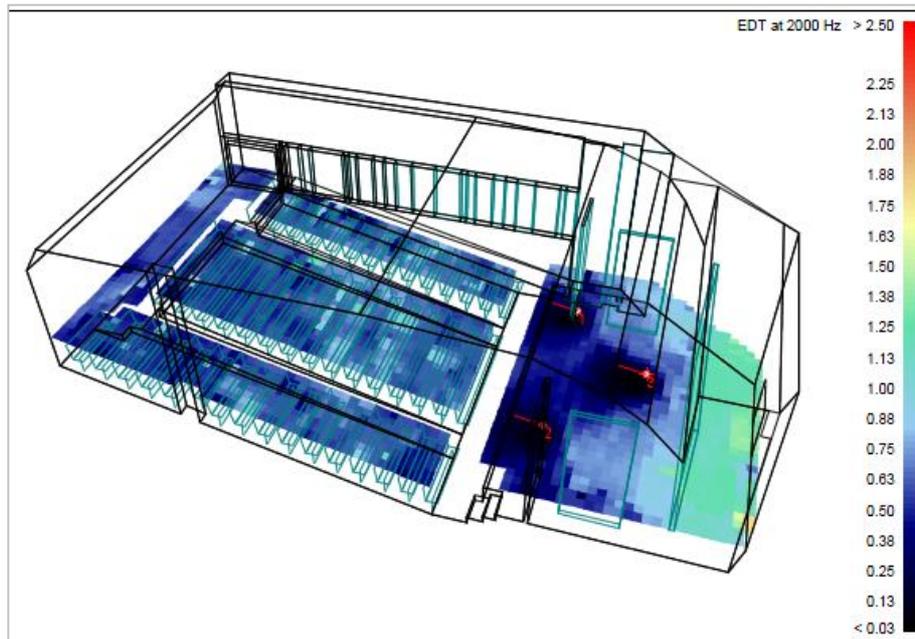


Gráfica 81: Se representa la inteligibilidad de la palabra en la sala con la mejora 4.

La inteligibilidad de la sala, STI, ha mejorado llegando a alcanzar el valor de 0,75 uniformemente en toda la zona de audiencia. Los resultados son buenos. También en la zona delantera del escenario la inteligibilidad es buena teniendo valores que están por encima de 0,75.

Tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;





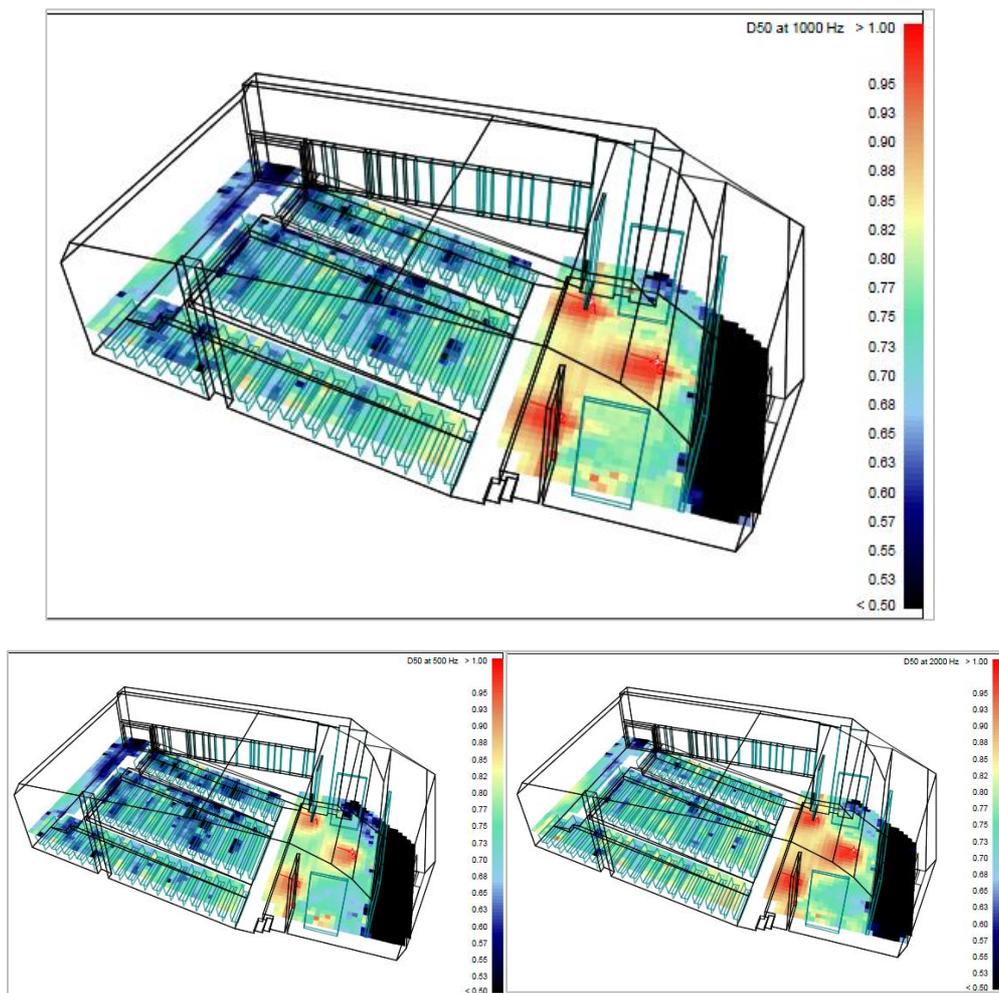
Gráfica 82: Se representa el tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en la sala con la mejora 4.

El tiempo de reverberación subjetivo, EDT (s), aproximadamente a 500 Hz, a 1000 Hz y a 2000 Hz es de 0,80 seg.

El EDT (seg), tiene valores bastante uniformes en toda la zona de audiencia, a diferencia del caso sin tratamiento acústico. Son valores similares al Tr_{30} y eso implica que la sala sonará más apagada para la música en beneficio de un mejor entendimiento de la voz, sobretodo en la zona de butacas del fondo. Sin embargo, debido al volumen de la sala, podría considerarse adecuada para la música y para la palabra.

En toda la zona del escenario los valores son menores que el Tr_{30} por la proximidad de las fuentes.

Definición, D_{50} , en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;

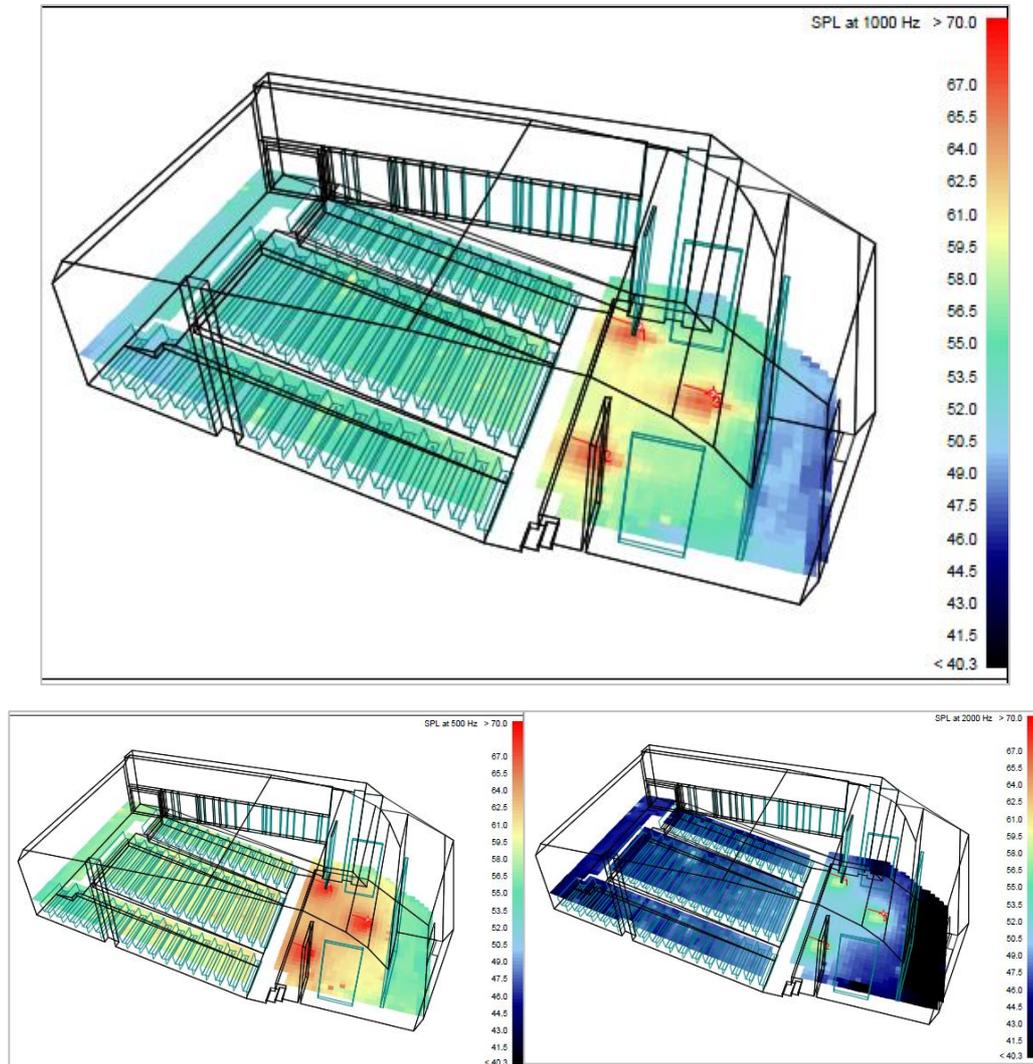


Gráfica 83: Se representa la definición, D_{50} , en la sala con la mejora 4.

La definición, D_{50} , en buena parte de la zona de audiencia, está por encima de 0,70, lo cual significa que la energía del sonido directo es mayor que la del sonido reflejado y por tanto llega con claridad a los oyentes. En la zona delantera del escenario la definición es muy elevada, con lo cual hay una óptima claridad auditiva que permite un buen entendimiento de la voz.

Considerando que el EDT es menor que Tr_{30} y que el valor de D_{50} es bastante bueno, no habría mucha cola reverberante y eso influiría sobre la escucha de la música.

Distribución sonora en el recinto: SPL (dBA), en 500 Hz, en 1000 Hz, en 2000 Hz;.



Gráfica 84: Se representa la distribución sonora, SPL, en la sala con la mejora 4.

La distribución sonora, SPL (dBA), es uniforme en toda la zona de audiencia no variando más de 4 dB en la misma frecuencia. En general, no hay ninguna mejora respecto al caso sin tratamiento acústico.

Evaluación de cumplimiento de objetivo y conclusiones SALA POLIVALENTE

A continuación se muestra una tabla resumen con los resultados para las distintas propuestas de mejora.

Mejoras	Método	Resultados (seg)	Objetivo (sala ocupada)
1	Odeón Tr₃₀ estimado**	1,17	1 – 1,5 seg
	Odeón Tr Eyring	0,49	*
	Odeón Tr Sabine	0,56	*
	Odeón Tr Arau-Puchades	0,6	*
	Odeón Tr ₃₀ simulado**	≈1,06	1 – 1,5 seg
2	Odeón Tr₃₀ estimado**	1,16	1 – 1,5 seg
	Odeón Tr Eyring	0,43	*
	Odeón Tr Sabine	0,50	*
	Odeón Tr Arau-Puchades	0,5	*
	Odeón Tr ₃₀ simulado**	≈1,04	1 – 1,5 seg
3	Odeón Tr₃₀ estimado**	1,68	1 – 1,5 seg
	Odeón Tr ₃₀ simulado**	≈1,71	1 – 1,5 seg
4	Odeón Tr₃₀ estimado**	0,88	1 – 1,5 seg
	Odeón Tr Eyring	0,52	*
	Odeón Tr Sabine	0,61	*
	Odeón Tr Arau-Puchades	0,67	*
	Odeón Tr ₃₀ simulado**	≈0,92	1 – 1,5 seg

En la tabla anterior los resultados del Tr se corresponden con la media aritmética del tiempo de reverberación en las bandas de octava centradas en 500, 1000 y 2000 Hz.

* Los valores encontrados con las fórmulas teóricas de Sabine, Eyring y Arau-Pachades no se pueden considerar muy fiables. La condición indispensable para que tengan validez es que las propiedades de absorción de los materiales sean parecidas y que tengan valores inferiores a 0,2.

** Como se ha comentado en el apdo 3, el Tr₃₀ estimado utiliza el método “Late ray reflection” y el Tr₃₀ simulado combina los métodos “Early Ray Reflection” y “Late Ray Reflection”.

En el anexo B se recoge la medida del ensayo efectuado en la sala. No se optó por instalar ninguna de las propuestas de mejora. De hecho, en el caso real, el T_r medio medido fue de 0,7 seg y las soluciones instaladas fueron:

- En la zona de audiencia techo de hormigón y suelo de linóleo o PVC. En la parte central de la pared paneles de Heraklith, el zócalo es de paneles de madera lisa y la parte superior es de paneles de madera perforada. A la hora de la medición las butacas estaban tapadas con plástico.
- En la zona de escenario suelo de tarima y techo de hormigón. La pared del fondo tiene una parte en piedra y otra de placa de yeso laminado, la pared de la derecha y de la izquierda tienen una cortina desplegada.
- En la zona de pasillo techo de paneles autoportantes de lana mineral, suelo de linóleo o PVC, en la parte central de la pared paneles de Heraklith, en la parte alta paneles de madera perforada y en el zócalo paneles de madera lisa.

Si el objetivo es obtener una sala polivalente, el resultado de T_r que se obtiene es bastante bajo.

- En el caso bajo estudio, cualquiera de las propuestas de mejora cumpliría con los objetivos establecidos mejor que la solución finalmente adoptada.
- Incluso la propuesta de mejora 3 cumpliría con los objetivos establecidos, porque hay que considerar que el T_{r30} obtenido es el tiempo de reverberación que se obtendría en un recinto sin oyentes. La incorporación de un techo ortofónico, en este caso, no aporta ningún cambio significativo en el T_r ni en el EDT y ni en la claridad auditiva respecto al caso inicial, pero sí incrementa el valor de la inteligibilidad.
- En esta sala polivalente, entre las propuestas de mejora 1 y 2, a la hora de adecuar los tiempos de reverberación, la inteligibilidad y la obtención de una buena distribución sonora y claridad auditiva, resulta más efectivo actuar sobre la pared del fondo del auditorio y las paredes y el techo del pasillo. Se ha comprobado que el tratamiento parcial del techo en la parte central resulta ineficaz.

- En la propuesta 3, la sustitución del techo inicial por un techo ortofónico no mejora el comportamiento acústico de la sala. En el caso previsto inicialmente, la geometría del techo permite tener aproximadamente el doble de superficie respecto al techo de la propuesta 3, por lo tanto, a igualdad de material, el techo ortofónico diseñado sirve para mejorar el valor del STI pero no se observa una disminución del Tr.
- La propuesta en la que se percibe un cambio importante en todos los valores de los parámetros considerados es la cuarta. Con la incorporación de un techo equipotencial y la actuación sobre los materiales a utilizar en la pared del fondo del auditorio y en las paredes y el techo del pasillo, se obtiene una disminución significativa del Tr y del EDT, una mejora del D_{50} y una mayor uniformidad de la inteligibilidad y de la distribución sonora.
- Se concluye que las soluciones más efectivas resultan ser la primera, donde se actúa sobre los materiales de la pared del fondo del auditorio y de las paredes y el techo del pasillo, y la cuarta, donde, a esta solución, se implementa un techo ortofónico en la sala. La elección de la una o de la otra dependerá también si se prefiere dar más relevancia a una óptima comunicación oral o obtener una sala que permita disfrutar de una discreta representación teatral y que, a la vez, mantenga una cierta cola reverberante para una buena escucha de la música.
- Otros parámetros que habrá que considerar a la hora de elegir la solución a adoptar serán:
Precio, Durabilidad, Limpieza, Resistencia.

4.5. Estudio del aislamiento acústico inicial y evaluación del cumplimiento de objetivos

Estudio del aislamiento acústico entre las aulas (CTE)

Para el cálculo del aislamiento entre las dos aulas de conferencias se ha empleado el método general a través de la herramienta de cálculo del DB-HR. Se han insertado los datos geométricos de los recintos y se han asignado los materiales a las distintas soluciones constructivas.

ELEMENTO SEPARADOR	m'_i (kg/m ²)	$R_{i,A}$	S_s (m ²)
Enl 15 + LHD 115 + Enl 15 (valores mínimos)	127,0	40,0	14,5

Tipo de recinto como emisor	Tipo de recinto como receptor	Volumen V_1 (m ³)
Unidad de uso	Protegido	142,25

RECINTO 1	Soluciones constructivas	m (kg/m ²)	R_A	$L_{n,w}$	S_i (m ²)	l_f (m)
Elemento F1 (Suelo)	U_BC 250 mm	305,0	52,0	77,0	48,22	5,22
Elemento F2 (Techo)	U_BC 250 mm	305,0	52,0	77,0	48,22	5,22
Elemento F3 (Pared)	Enl 15 + LHD 115 + Enl 15 (valores mínimos)	127,0	40,0	-	22,8	2,95
Elemento F4 (Pared)	Enl 15 + LHD 115 + Enl 15 (valores mínimos)	127,0	40,0	-	28,17	2,95

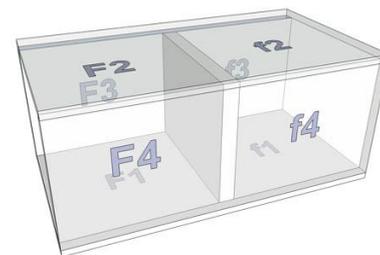
Tipo de recinto como emisor	Tipo de recinto como receptor	Volumen V_2 (m ³)
Unidad de uso	Protegido	125,50

RECINTO 2	Soluciones constructivas	m (kg/m ²)	R_A	$L_{n,w}$	S_i (m ²)	l_f (m)
Elemento F1 (Suelo)	U_BC 250 mm	305,0	52,0	77,0	42,54	5,2
Elemento F2 (Techo)	U_BC 250 mm	305,0	52,0	77,0	42,54	5,2
Elemento F3 (Pared)	Enl 15 + LHD 115 + Enl 15 (valores mínimos)	127,0	40,0	-	24,04	3,0
Elemento F4 (Pared)	Enl 15 + LHD 115 + Enl 15 (valores mínimos)	127,0	40,0	-	24,04	3,0

Donde Enl 15 + LHD 115 + Enl 15 es ladrillo hueco doble, enlucido con yeso por ambas caras y U_BC 250 mm es bovedilla cerámica unidireccional.

	Tipo de Unión	K_{Ff}	K_{Fd}	K_{Df}		
Arista 1 (Unión Elemento-Suelo)	Unión rígida en T de elementos homogéneos (orientación 2)	1,2	6,5	6,5		Vista en sección
Arista 2 (Unión Elemento-Techo)	Unión rígida en + de elementos homogéneos	1,2	6,5	6,5		Vista en sección
Arista 3 (Unión Elemento-Pared)	Unión rígida en T de elementos homogéneos (orientación 1)	5,7	5,7	5,7		Vista en planta
Arista 4 (Unión Elemento-Pared)	Unión rígida en T de elementos homogéneos (orientación 2)	5,7	5,7	5,7		Vista en planta

El aislamiento acústico entre las aulas es de $D_{nT,A} = 43\text{dBA}$, donde $D_{nT,A}$ es la diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, entre recintos interiores y el aislamiento a ruido de impactos es de $L'_{nT,w} = 63\text{ dB}$.



Los parámetros se han definido en el apdo 3.

Evaluación de cumplimiento de objetivos y conclusiones

A continuación se va a realizar una evaluación del grado de cumplimiento de los resultados obtenidos respecto a los objetivos previstos:

Método (entre aulas)	Resultados $D_{nT,A}$ (dBA)	Objetivo	Resultados $L'_{nT,w}$ (dB)	Objetivo	Evaluación de cumplimiento
General	43	$\geq 50\text{ dBA}$	63	$\leq 65\text{dBA}$	NO CUMPLE

La solución previstas inicialmente para el aislamiento acústico de aulas no cumple con los objetivos del DB-HR en el caso bajo estudio según el método de evaluación empleado.

4.6. Propuestas de mejora y optimización del aislamiento entre aulas

Como la solución inicial prevista para las aulas no garantiza el cumplimiento de los requisitos del DB-HR, se van a proponer y evaluar una serie de mejoras con el objeto de optimizar la solución a llevar a cabo.

Propuestas de mejoras del aislamiento acústico entre aulas

Mejora 1: Partición del cerramiento común entre aulas constituido por una doble capa de placa de yeso laminado en ambas caras y un aislante de lana mineral por dentro, paredes constituidas por ladrillo hueco doble con enlucido de yeso por ambas caras, trasdosado en los flancos de PYL, lana mineral y cámara de aire, forjado unidireccional en bovedilla cerámica. Por encima del forjado se va a poner una lámina anti-impacto y un acabado en madera.

Elemento separador	$R_{i,A}$ doble PYL + lana mineral 48mm + Doble PYL	52	CEC
Paredes (flanco)	$R_{i,A}$ enlucido de yeso + LHD + enlucido de yeso	40	CEC
Forjado (flanco)	$R_{i,A}$ bovedilla cerámica unidireccional 250mm	52	CEC
Acabado Forjado	ΔL_w espuma de polietileno y tarima de madera	15	CEC
Trasdosado (flanco)	$RL_{f,A}$ PYL + lana mineral 48mm + cámara 10mm	15	CEC

Mejora 2: Sustitución del cerramiento común entre aulas por una doble capa de placa de yeso laminado de .12,5mm, lana mineral de 48mm por los dos lados y cámara de aire en el medio. Por encima del forjado se va a poner una lámina anti-impacto y un suelo cerámico.

Elemento separador	$R_{i,A}$ doble PYL + lana mineral 48mm + cámara de aire 10mm + lana mineral 48mm + Doble PYL	55	CEC
Paredes (flanco)	$R_{i,A}$ doble PYL + lana mineral 48mm + Doble PYL	52	CEC
	$R_{i,A}$ ladrillo cerámico perforado revestido interiormente, aislante y PYL	53	CEC
Forjado (flanco)	$R_{i,A}$ bovedilla cerámica unidireccional 250mm	52	CEC
Acabado Forjado	ΔL_w espuma de polietileno, capa de mortero y pavimento cerámico	16	CEC

Según lo establecido por el Documento Básico de Protección frente al ruido, para satisfacer los valores límite del *aislamiento acústico* requeridos en aulas y salas de conferencias, se ha utilizado el método general a través de la herramienta de cálculo del DB-HR que figura a continuación:

Mejora 1

ELEMENTO SEPARADOR	m'_i (kg/m ²)	$R_{i,A}$	S_s (m ²)
YL 2x12,5+AT MW 48+ YL 2x12,5	44,0	52,0	14,5

Tipo de recinto como emisor	Tipo de recinto como receptor	Volumen V_1 (m ³)
Unidad de uso	Protegido	142,25

RECINTO 1	Soluciones constructivas	m (kg/m ²)	R_A	$L_{n,w}$	S_i (m ²)	l_f (m)
Elemento F1 (Suelo)	U_BC 250 mm	305,0	52,0	77,0	48,22	5,22
Elemento F2 (Techo)	U_BC 250 mm	305,0	52,0	77,0	48,22	5,22
Elemento F3 (Pared)	Enl 15 + LHD 115 + Enl 15 (valores mínimos)	127,0	40,0	-	22,8	2,95
Elemento F4 (Pared)	Enl 15 + LHD 115 + Enl 15 (valores mínimos)	127,0	40,0	-	28,17	2,95

Tipo de recinto como emisor	Tipo de recinto como receptor	Volumen V_2 (m ³)
Unidad de uso	Protegido	125,50

RECINTO 2	Soluciones constructivas	m (kg/m ²)	R_A	$L_{n,w}$	S_i (m ²)	l_f (m)
Elemento F1 (Suelo)	U_BC 250 mm	305,0	52,0	77,0	42,54	5,2
Elemento F2 (Techo)	U_BC 250 mm	305,0	52,0	77,0	42,54	5,2
Elemento F3 (Pared)	Enl 15 + LHD 115 + Enl 15 (valores mínimos)	127,0	40,0	-	24,04	3,0
Elemento F4 (Pared)	Enl 15 + LHD 115 + Enl 15 (valores mínimos)	127,0	40,0	-	24,04	3,0

Donde Enl 15 + LHD 115 + Enl 15 es ladrillo hueco doble, enlucido con yeso por ambas caras y

U_BC 250 mm es bovedilla cerámica unidireccional.

El forjado lleva un suelo flotante de tarima de madera con espuma de polietileno con estas características:

	Soluciones constructivas	$\Delta R_{F,A}$	ΔL_w
Suelo flotante	MD + AR PE ≥ 3	0	15

Donde: ΔL_w es la reducción del nivel global de presión de ruido de impactos

$\Delta R_{F,A}$ es la mejora del índice global de reducción acústica, ponderado A.

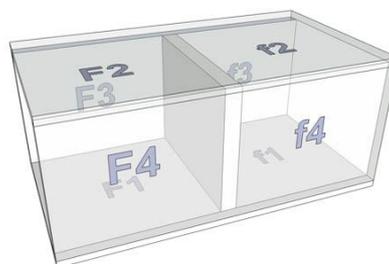
El trasdosado en los flancos está constituido por placa de yeso laminado de 15 mm, un aislante de lana mineral de 48 mm y cámara de aire de 10 mm:

	Soluciones constructivas	$\Delta R_{F,A}$
Trasdosado	YL 15 + MW 48 + SP (100<m≤140kg/m2)	15

Las uniones se detallan a continuación:

	Tipo de Unión	K_{Ff}	K_{Fd}	K_{Df}		
Arista 1 (Unión Elemento-Suelo)	Unión rígida en T de elemento entramado autoportante y elemento homogéneo (orientación 2)	-4,8	18,4	18,4		Vista en sección
Arista 2 (Unión Elemento-Techo)	Unión rígida en T de elemento entramado autoportante y elemento homogéneo (orientación 1)	-4,8	18,4	18,4		Vista en sección
Arista 3 (Unión Elemento-Pared)	Unión en T de elemento entramado autoportante y elemento homogéneo (orientación 1)	-2,3	14,6	14,6		Vista en planta
Arista 4 (Unión Elemento-Pared)	Unión rígida en T de elemento entramado autoportante y elemento homogéneo (orientación 2)	-2,3	14,6	14,6		Vista en planta

El aislamiento acústico entre las aulas es de $D_{nT,A} = 52$ dBA, donde $D_{nT,A}$ es la diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, entre recintos interiores y el aislamiento a ruido de impactos es de $L'_{nT,w} = 51$ dB.



Mejora 2

ELEMENTO SEPARADOR	m'_i (kg/m ²)	$R_{i,A}$	S_i (m ²)
YL 2x12,5+AT MW 48+SP+AT MW 48+ YL 2x12,5	45,0	55,0	14,5

Tipo de recinto como emisor	Tipo de recinto como receptor	Volumen V_1 (m ³)
Unidad de uso	Protegido	142,25

RECINTO 1	Soluciones constructivas	m (kg/m ²)	R_A	$L_{n,w}$	S_i (m ²)	l_f (m)
Elemento F1 (Suelo)	U_BC 250 mm	305,0	52,0	77,0	48,22	5,22
Elemento F2 (Techo)	U_BC 250 mm	305,0	52,0	77,0	48,22	5,22
Elemento F3 (Pared)	YL 2x12,5 + AT MW 48 + YL 2x12,5	44,0	52,0	-	22,8	2,95
Elemento F4 (Pared)	YL 2x12,5 + AT MW 48 + YL 2x12,5	44,0	52,0	-	28,17	2,95

Tipo de recinto como emisor	Tipo de recinto como receptor	Volumen V_1 (m ³)
Unidad de uso	Protegido	125,50

RECINTO 2	Soluciones constructivas	m (kg/m ²)	R_A	$L_{n,w}$	S_i (m ²)	l_f (m)
Elemento F1 (Suelo)	U_BC 250 mm	305,0	52,0	77,0	42,54	5,2
Elemento F2 (Techo)	U_BC 250 mm	305,0	52,0	77,0	42,54	5,2
Elemento F3 (Pared)	YL 2x12,5 + AT MW 48 + YL 2x12,5	44,0	52,0	-	24,04	3,0
Elemento F4 (Pared)	YL 2x12,5 + AT MW 48 + YL 2x12,5	44,0	52,0	-	24,04	3,0

Donde YL 2x12,5+AT MW 48+SP+AT MW 48+ YL 2x12,5 es un elemento constructivo de doble capa de placa de yeso laminado, lana mineral por los dos lados y cámara de aire en el medio, YL 2x12,5+AT MW 48+YL 2x12,5 es una solución constructiva constituida por una doble capa de placa de yeso laminado por ambas caras y un aislante de lana mineral por dentro y U_BC 250 mm es bovedilla cerámica unidireccional.

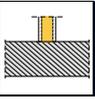
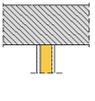
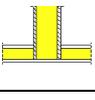
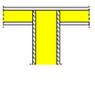
Las características del suelo flotante con acabado cerámico, capa de mortero de 50 mm y espuma de polietileno son las que siguen a continuación:

Revestimiento	$\Delta R_{F,A}$	ΔL_w
AC + M 50 + AR PE-E 3	4	16

Donde: ΔL_w es la reducción del nivel global de presión de ruido de impactos

ΔR_A es la mejora del índice global de reducción acústica, ponderado A.

Las uniones se detallan a continuación:

	Tipo de Unión	K_{Ff}	K_{Fd}	K_{Df}		
Arista 1 (Unión Elemento-Suelo)	Unión en T de elemento entramado autoportante y elemento homogéneo (orientación 2)	-4,8	18,3	18,3		Vista en sección
Arista 2 (Unión Elemento-Techo)	Unión en T de elemento entramado autoportante y elemento homogéneo (orientación 1)	-4,8	18,3	18,3		Vista en sección
Arista 3 (Unión Elemento-Pared)	Unión en T de elementos de entramado autoportante (orientación 1)	10,2	10,1	10,1		Vista en planta
Arista 4 (Unión Elemento-Pared)	Unión en T de elementos de entramado autoportante (orientación 2)	10,2	10,1	10,1		Vista en planta

El aislamiento acústico entre las aulas es de $D_{nT,A} = 54$ dBA, donde $D_{nT,A}$ es la diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, entre recintos interiores y el aislamiento a ruido de impactos es de $L'_{nT,w} = 46$ dB.

Evaluación de cumplimiento de objetivos y conclusiones

A continuación se muestra una tabla resumen con los resultados para las distintas propuestas de mejora.

Mejoras	Método (entre aulas)	Resultados D_{nTA} (dBA)	Objetivo	Resultados $L'_{nT,w}$ (dB)	Objetivo
1	General	52	≥ 50 dBA	51	≤ 65 dBA
2	General	54	≥ 50 dBA	46	≤ 65 dBA

En el anexo B se recoge el resultado obtenido para el aislamiento acústico a ruido aéreo. En el caso real no se instaló ninguna de las soluciones constructivas propuestas. El suelo de los recintos está fabricado con bovedilla cerámica y hormigón por encima, las paredes están revestidas de enlucido de yeso, el techo es de placa de yeso perforada y el elemento separador es ladrillo hueco doble revestido de enlucido de yeso. El D_{nTA} medido fue de 43 dBA.

- Cualquiera de las dos propuestas de mejora cumplirían con los requisitos del DB-HR.
- Como se presenta en la propuesta de mejora 1 para el caso bajo estudio, una posible solución a adoptar para que se cumplan los requisitos del DB-HR, por lo que afecta el aislamiento a ruido aéreo, sería modificar el tabique que hace de elemento separador entre las dos aulas por uno que tenga doble capa de placa de yeso laminado de 12,5 mm y lana mineral de 48 mm y, además, añadir, en ambos recintos, por encima de las paredes de ladrillo de los flancos un trasdosado constituido por una PYL de 15 mm, lana mineral de 48 mm y una cámara de aire de 10 mm entre trasdosado y pared.
- La segunda posible solución propuesta, con la que se obtendría mayor espacio a disposición, sería poner, como tabiques en los flancos de los recintos, una doble capa de PYL de 12,5 mm y lana mineral de 48 mm y colocar entre los dos recintos otro tabique constituido por una capa de PYL de 12,5 mm y lana mineral de 48 mm por los dos lados con una cámara de aire de 10 mm en el medio.
- Se observa que, para que el aislamiento a ruido de impacto cumpla con los requisitos del DB-HR, es buena práctica, en cualquier caso, poner entre el forjado y el acabado final, una lámina anti-

impacto. En la dos propuestas se opta por colocar una capa de espuma de polietileno por debajo del acabado final.

- A nivel acústico, es importante tener cuidado con las uniones entre los elementos constructivos para alcanzar un buen resultado final.
- Es importante tener en cuenta otros factores a la hora de elegir la solución a adoptar como el precio, la durabilidad, la limpieza y la resistencia.

5. VALORACIÓN DEL TRABAJO Y CONCLUSIONES

El TFM que se ha desarrollado quiere ser una forma para evidenciar los resultados que se obtendrían cambiando un poco la visión que se tiene sobre el uso de los materiales de construcción y de la forma de proyectar.

Como primera experiencia laboral en el sector he de manifestar que ha sido satisfactoria, además del hecho de que he podido ampliar los conocimientos adquiridos en el Master de Acústica y Vibraciones y que complementan mis estudios iniciados en la Universidad de Catania (Italia), razón por la cual quiero expresar mi agradecimiento a la empresa AUDIOTEC por la oportunidad brindada.

A modo de conclusiones al trabajo, cabe señalar los siguientes aspectos:

- A la hora de la proyección y de la ejecución de una obra, para que se cumplan las exigencias acústicas establecidas por ley y no se vea afectado el bienestar de las personas, es indispensable controlar y reducir el ruido. Por este motivo, resulta importante desarrollar un diseño acústico adecuado por parte de profesionales con el fin de obtener un buen resultado desde la fase inicial.
- Es evidente que actuar a posteriori, para obtener un adecuado nivel de aislamiento y acondicionamiento acústico en un recinto, resulta un sobrecoste para la obra y, a menudo, equivale a una reducción de espacio en los recintos. Por este motivo, para ahorrar costes y optimizar el espacio, resulta indispensable un estudio previo.
- En comercio hay software, como el que se ha utilizado para el cálculo del acondicionamiento acústico de la sala polivalente y de las aulas, que permiten elegir los materiales y prever con buena aproximación el comportamiento acústico de los recintos.
- Es siempre más clara la importancia que está adquiriendo formar profesionales en el sector de la acústica y concienciar a las personas sobre el ahorro vital y económico que supone aplicar buenas prácticas, desde la proyección, para el control del ruido. Sin embargo, proyectar un techo acústico sin asegurarse que tenga las características adecuadas para la sala para la que está pensada podría resultar totalmente ineficaz.

- Si el techo de la sala polivalente diseñado originalmente hubiera sido proyectado con otro material más absorbente, con seguridad las condiciones acusticas de la sala en su estado inicial habrían sido mucho mejores.
- Respecto al acondicionamiento resulta interesante notar que las fórmulas teóricas pueden ser útiles en una etapa inicial pero, cuando los materiales son muy absorbentes o los coeficiente de absorción difieren mucho entre si, es oportuno adoptar métodos que permitan obtener resultados más precisos. El método de trazado de rayos no tiene estas limitaciones, además, tiene en cuenta otros factores, como las reflexiones especulares, el fenómeno de la dispersión, las pérdidas por difracción, la atenuación debida a la distancia y la absorción del aire.
- Respecto al cumplimiento de las exigencias de aislameinto, es así mismo importante concienciar al proyectista y que se familiarice con el uso de las herramientas predictivas para igualmente ahorrar modificaciones a posteriori.

6. ÍNDICE DE TABLAS, FIGURAS Y GRÁFICOS

Tabla 1: Valores del Tr_{30} para distintos recintos.

Tabla 2: Valores del STI.

Fig 1: Sección del edificio.

Fig. 2: Planta baja con sala polivalente.

Fig. 3: Aulas de conferencias.

Fig. 4: Aula de conferencia 1 con mobiliario

Fig. 5: Aula de conferencia 2 con mobiliario

Fig. 6: Interior de la sala polivalente

Fig. 7: Vista delantera de la sala polivalente

Fig. 8: Vista trasera de la sala polivalente con techo ortofónico

Fig.9: Vista delantera de la sala en la mejora 1

Fig.10: Vista trasera de la sala en la mejora 1

Fig.11: Vista trasera de la sala con techo parcialmente acondicionado

Fig.12: Vista delantera de la sala con techo parcialmente acondicionado

Fig.13: Vista trasera de la sala con techo ortofónico.

Fig.14: Vista trasera de la sala parcialmente acondicionada con techo ortofónico.

Gráficas 1 y 2: Valores del TR_{60} en el aula 1 calculados con el método general y con las fórmulas teóricas en las condiciones iniciales.

Gráfica 3: Se representa el tiempo de reverberación global estimado en el aula 1 con el método Late ray reflection en las condiciones iniciales.

Gráfica 4: Se representa el Tr en el aula 1 mediante las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades, incluyendo la influencia del aire en las condiciones iniciales.

Gráfica 5: Se representa el tiempo de reverberación estimado en el aula 1 en las condiciones iniciales combinando los métodos Early Ray Reflection y Late Ray Reflection.

Gráfica 6: Se representa la inteligibilidad de la palabra en el aula 1 en las condiciones iniciales.

Gráfica 7: Se representa el tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en el aula 1 en las condiciones iniciales.

Gráfica 8: Se representa la definición, D_{50} , en el aula 1 en las condiciones iniciales.

Gráfica 9: Se representa la distribución sonora, SPL, en el aula 1 en las condiciones iniciales.

Gráficas 10 y 11: Valores del Tr_{60} en el aula 2 calculados con el método general y con las fórmulas teóricas en las condiciones iniciales.

Gráfica 12: Se representa el tiempo de reverberación global estimado en el aula 2 con el método Late ray reflection en las condiciones iniciales.

Gráfica 13: Se representa el T_r en el aula 2 mediante las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades, incluyendo la influencia del aire en las condiciones iniciales.

Gráfica 14: Se representa el tiempo de reverberación estimado en el aula 2 en las condiciones iniciales combinando los métodos Early Ray Reflection y Late Ray Reflection.

Gráfica 15: Se representa la inteligibilidad de la palabra en el aula 2 en las condiciones iniciales.

Gráfica 16: Se representa el tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en el aula 2 en las condiciones iniciales.

Gráfica 17: Se representa la definición, D_{50} , en el aula 2 en las condiciones iniciales.

Gráfica 18: Se representa la d Distribución sonora, SPL, en el aula 2 en las condiciones iniciales.

Gráfica 19: Se representa el tiempo de reverberación global estimado en la sala con el método Late ray reflection en las condiciones iniciales.

Gráfica 20: Se representa el T_r en la sala mediante las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades, incluyendo la influencia del aire en las condiciones iniciales.

Gráfica 21: Se representa el tiempo de reverberación estimado en la sala en las condiciones iniciales combinando los métodos Early Ray Reflection y Late Ray Reflection.

Gráfica 22: Se representa la inteligibilidad de la palabra en la sala en las condiciones iniciales.

Gráfica 23: Se representa el tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en la sala en las condiciones iniciales.

Gráfica 24: Se representa la definición, D_{50} , en la sala en las condiciones iniciales.

Gráfica 25: Se representa la d Distribución sonora, SPL, en la sala en las condiciones iniciales.

Gráficas 26 y 27: Valores del T_{r60} en el aula 1 calculados con el método general y con las fórmulas teóricas para la mejora 2.

Gráfica 28: Se representa el tiempo de reverberación global estimado en el aula 1 con el método Late ray reflection para la mejora 2.

Gráfica 29: Se representa el T_r en el aula 1 mediante las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades, incluyendo la influencia del aire en la mejora 2.

Gráfica 30: Se representa el tiempo de reverberación estimado en el aula 1 en la mejora 2 combinando los métodos Early Ray Reflection y Late Ray Reflection.

Gráfica 31: Se representa la inteligibilidad de la palabra en el aula 1 con la mejora 2.

Gráfica 32: Se representa el tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en el aula 2 con la mejora 2.

Gráfica 33: Se representa la definición, D_{50} , en el aula 1 con la mejora 2.

Gráfica 34: Se representa la d Distribución sonora, SPL, en el aula 1 con la mejora 2.

Gráfica 35: Se representa el tiempo de reverberación global estimado en el aula 1 con el método Late ray reflection para la mejora 3.

Gráfica 36: Se representa el T_r en el aula 1 mediante las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades, incluyendo la influencia del aire en la mejora 3.

Gráfica 37: Se representa el tiempo de reverberación estimado en el aula 1 en la mejora 3 combinando los métodos Early Ray Reflection y Late Ray Reflection.

Gráfica 38: Se representa la inteligibilidad de la palabra en el aula 1 con la mejora 3.

Gráfica 39: Se representa el tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en el aula 1 con la mejora 3.

Gráfica 40: Se representa la definición, D_{50} , en el aula 1 con la mejora 3.

Gráfica 41: Se representa la d Distribución sonora, SPL, en el aula 1 con la mejora 3.

Gráficas 42 y 43: Valores del Tr_{60} en el aula 2 calculados con el método general y con las fórmulas teóricas para la mejora 2.

Gráfica 44: Se representa el tiempo de reverberación global estimado en el aula 2 con el método Late ray reflection para la mejora 2.

Gráfica 45: Se representa el Tr en el aula 2 mediante las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades, incluyendo la influencia del aire en mejora 2.

Gráfica 46: Se representa el tiempo de reverberación estimado en el aula 2 en la mejora 2 combinando los métodos Early Ray Reflection y Late Ray Reflection.

Gráfica 47: Se representa la inteligibilidad de la palabra en el aula 2 con la mejora 2.

Gráfica 48: Se representa el tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en el aula 2 con la mejora 2.

Gráfica 49: Se representa la definición, D_{50} , en el aula 2 con la mejora 2.

Gráfica 50: Se representa la distribución sonora, SPL, en el aula 2 con la mejora 2.

Gráfica 51: Se representa el tiempo de reverberación global estimado en el aula 2 con el método Late ray reflection para la mejora 3.

Gráfica 52: Se representa el Tr en el aula 2 mediante las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades, incluyendo la influencia del aire en la mejora 3.

Gráfica 53: Se representa el tiempo de reverberación estimado en el aula 2 en la mejora 3 combinando los métodos Early Ray Reflection y Late Ray Reflection.

Gráfica 54: Se representa la inteligibilidad de la palabra en el aula 2 con la mejora 3.

Gráfica 55: Se representa el tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en el aula 2 con la mejora 3.

Gráfica 56: Se representa la definición, D_{50} , en el aula 2 con la mejora 3.

Gráfica 57: Se representa la d Distribución sonora, SPL, en el aula 2 con la mejora 3.

Gráfica 58: Se representa el tiempo de reverberación global estimado en la sala con el método Late ray reflection para la mejora 1.

Gráfica 59: Se representa el Tr en la sala mediante las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades, incluyendo la influencia del aire en la mejora 1.

Gráfica 60: Se representa el tiempo de reverberación estimado en la sala en la mejora 1 combinando los métodos Early Ray Reflection y Late Ray Reflection.

Gráfica 61: Se representa la inteligibilidad de la palabra en la sala con la mejora 1.

Gráfica 62: Se representa el tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en la sala con la mejora 1.

Gráfica 63: Se representa la definición, D_{50} , en la sala con la mejora 1.

Gráfica 64: Se representa la d Distribución sonora, SPL, en la sala con la mejora 1.

Gráfica 65: Se representa el tiempo de reverberación global estimado en la sala con el método Late ray reflection para la mejora 2.

Gráfica 66: Se representa el T_r en la sala mediante las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades, incluyendo la influencia del aire en la mejora 2.

Gráfica 67: Se representa el tiempo de reverberación estimado en la sala en la mejora 2 combinando los métodos Early Ray Reflection y Late Ray Reflection.

Gráfica 68: Se representa la inteligibilidad de la palabra en la sala con la mejora 2.

Gráfica 69: Se representa el tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en la sala con la mejora 2.

Gráfica 70: Se representa la definición, D_{50} , en la sala con la mejora 2.

Gráfica 71: Se representa la distribución sonora, SPL, en la sala con la mejora 2.

Gráfica 72: Se representa el tiempo de reverberación global estimado en la sala con el método Late ray reflection para la mejora 3.

Gráfica 73: Se representa el tiempo de reverberación estimado en la sala en la mejora 3 combinando los métodos Early Ray Reflection y Late Ray Reflection.

Gráfica 74: Se representa la inteligibilidad de la palabra en la sala con la mejora 3.

Gráfica 75: Se representa el tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en la sala con la mejora 3.

Gráfica 76: Se representa la definición, D_{50} , en la sala con la mejora 3.

Gráfica 77: Se representa la distribución sonora, SPL, en la sala con la mejora 3.

Gráfica 78: Se representa el tiempo de reverberación global estimado en la sala con el método Late ray reflection para la mejora 4.

Gráfica 79: Se representa el T_r en la sala mediante las fórmulas de Sabine, Eyring y Arau-Puchades, incluyendo la influencia del aire en la mejora 4.

Gráfica 80: Se representa el tiempo de reverberación estimado en la sala en la mejora 4 combinando los métodos Early Ray Reflection y Late Ray Reflection.

Gráfica 81: Se representa la inteligibilidad de la palabra en la sala con la mejora 4.

Gráfica 82: Se representa el tiempo de reverberación subjetivo, EDT, en la sala con la mejora 4.

Gráfica 83: Se representa la definición, D_{50} , en la sala con la mejora 4.

Gráfica 84: Se representa la distribución sonora, SPL, en la sala con la mejora 4.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Carrión Isbert, Antoni. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. 1ª Ed., Barcelona UPC, 1998.
2. Perez Miñana José, *Compendio práctico de acústica aplicada*. 1ª Ed., Editorial Labor, S.A. Barcelona, 1969.
3. Recuero López, Manuel. *Ingeniería Acústica*. 1ª Ed., Izquierdo S.A. Madrid, 1991.
4. Lyngge, Claus. *User Manual of Odeon*. Version 5.0. Industrial, Auditorium and Combined Editions.
5. *Documento Básico "HR Protección frente al ruido"*, Septiembre 2009.
6. *Ley 5/2009*, de 4 de junio, Ley del Ruido de Castilla y León.
7. *Real Decreto 1371/2007*, de 19 de octubre, por el que se aprueba el documento básico «DB-HR Protección frente al ruido» del Código Técnico de la Edificación.
8. Herramienta de cálculo del Documento Básico de protección frente al ruido
9. Páginas de Internet :
<http://www.placo.es/>
www.knaufinsulation.es
<http://www.rockwool.es/gu%C3%ADa+soluciones/productos>
<http://www.isover.es/>
<http://www.uralita.com/es-ES/Paginas/default.aspx>

ANEXO A

ANEXO B

Recopilación de datos obtenidos “in situ”

A continuación se presentan los resultados obtenidos in situ para el acondicionamiento del aula 1, de la sala polivalente y del aislamiento entre las dos aulas.

En la práctica no se ha aplicado ninguna de las soluciones propuesta en el caso bajo estudio.

Acondicionamiento acústico del aula 1

LUGAR DE ENSAYO: CENTRO CÍVICO DE UN PUEBLO DE BURGOS

ENSAYO: Medida del tiempo de reverberación en el aula 1.

CONTENIDO

- 1.- Objeto del informe.**
- 2.- Procedimiento de ensayo.**
 - 2.1.- Procedimientos y Normas empleadas.
 - 2.2.- Metodología y parámetros del ensayo.
 - 2.3.- Instrumentación empleada.
 - 2.4.- Características y dimensiones de la sala.
- 3.- Croquis de las posiciones de medida y del recinto**
- 4.- Desviaciones al método.**
- 5.- Resultados del tiempo de reverberación obtenidos.**

1.- OBJETO DEL INFORME.

El presente informe tiene como finalidad analizar y evaluar el tiempo de reverberación existente en el interior del aula 1 después de su acondicionamiento. Como parámetro de análisis acústico de la sala se evaluará el tiempo de reverberación del recinto el día del ensayo.

El citado recinto se encuentra en una ciudad de Castilla y León por lo que se aplicará lo establecido en la Ley 5/2009 del Ruido de Castilla y León.

La recinto donde se evaluará el tiempo de reverberación se corresponde con un aula empleado para desarrollar actividades como charlas y conferencias.

2.- PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.

2.1- Procedimientos y Normas empleadas.

El ensayo realizado y aquí presentado, se ha elaborado aplicando las disposiciones y requisitos establecidos en la Norma *UNE-EN ISO 3382-2:2008 (Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios)*.

Se ha seguido asimismo el procedimiento de medida y los cálculos expuestos en *el procedimiento específico PE-31 del Laboratorio de Acústica de AUDIOTEC*.

2.2- Metodología y parámetros del ensayo.

El aula 1 tiene una superficie de 48 m², un volumen de 129 m³ y una altura de 2,68 m. En el momento de las mediciones el aula permanecía vacía..La sala tiene dos puertas de acceso por las que se accede al aula y una ventana sellada a través de la cual se ve el pasillo colindante. El techo es de placa de yeso perforada el pavimento es cerámico y las paredes tienen enlucido de yeso.

Ensayo 1: Aula 1.

El grado de precisión o de exactitud elegido para el ensayo es el de ingeniería, en el que se han realizado mediciones del tiempo de reverberación para dos posiciones de fuente y para cada una de ellas cinco combinaciones de fuente-micrófono independientes.

El número de posiciones de medición elegido en el ensayo proporciona una cobertura adecuada en el recinto y permite verificar las prestaciones del mismo respecto al uso para el que ha sido diseñado. Se

ha elegido una distribución de posiciones de micrófono que tenga en cuenta las principales influencias susceptibles de ser el origen de las diferencias en el tiempo de reverberación a lo largo de todo el recinto.

Tanto las posiciones de fuente como las de micrófono, en el recinto de medida, se pueden observar en los croquis aproximados del apartado 3 del presente informe.

Se midió con un analizador B&K clase 1, modelo 2260, dos veces el tiempo de reverberación en cada uno de los puntos de medida, promediando las dos caídas obtenidas.

En el interior del recinto, la señal generada por la fuente sonora omnidireccional B&K 4296 fue ruido rosa a un nivel suficiente por encima del nivel de fondo para medir el Tr_{20} , y se empleó el método de medición de ruido interrumpido para la obtención de las curvas de caída.

Las distintas posiciones de micrófono se ubicaron al menos a 1,2 m de altura sobre el suelo y a más de 1 m de cualquier pared o superficie reflectante existente en el recinto, para evitar el efecto del campo próximo reverberante, debido a las ondas estacionarias o reflejadas. Entre las distintas posiciones de micrófono la distancia era de al menos 2 m.

La distancia entre cualquiera de las posiciones de micrófono y las distintas posiciones de fuente en la sala fue de:

- Aula 1 \rightarrow 1,5 m

De esta forma, se cumple con la distancia mínima, d_{\min} , en metros, entre cualquier posición de micrófono y la fuente sonora, evitando así una influencia demasiado fuerte del sonido directo procedente de la fuente por encontrarse en el campo próximo a la misma.

$$d_{\min} = 2 \sqrt{\frac{V}{c \hat{T}}}$$

Donde: V es el volumen, en m^3 ;

c es la velocidad del sonido, en m/s;

\hat{T} es una estimación del tiempo de reverberación esperado, en segundos.

En cada posición de micrófono se midió el tiempo de reverberación en las bandas de tercio de octava comprendidas entre 100 y 5000 Hz.

La cadena de medida se verificó antes y después de realizar las mediciones en el ensayo.

Para obtener los valores promediados espacialmente en todo el recinto del tiempo de reverberación medido, se utiliza un promediado aritmético de las dos caídas de nivel sonoro producido en cada interrupción de fuente.

2.3.- Instrumentación empleada.

- ♦ Fuente de ruido *Brüel & Kjaer* tipo 4296, con nº de serie 2364350 en cuyo espectro de emisión están incluidas las frecuencias correspondientes a las bandas entre 100 y 5000 Hz.
- ♦ Analizador de espectros *Brüel & Kjaer* tipo 2260, con nº de serie 2131659, previamente verificado.
- ♦ Calibrador/verificador *Brüel & Kjaer* tipo 4231, con nº de serie 2136530.
- ♦ Termoanemómetro Skymaster con nº de serie 9201283.
- ♦ Trípodes y equipos auxiliares para la toma de medidas.

Dichos equipos tienen en vigor el correspondiente certificado de verificación periódica emitido por la Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Junta de Castilla y León que certifica el cumplimiento de la “Orden Ministerial ITC/2845/2007, de 25 de septiembre, por la que se regula el control metrológico del Estado de los instrumentos destinados a la medición de sonido audible y de los calibradores acústicos (B.O.E. nº 237 del miércoles 3 de octubre de 2007).

2.4.- Características y dimensiones de la sala.

Características de los recintos de medida:

El aula 1 está ubicada en la segunda planta del edificio y tiene las siguientes características y dimensiones principales:

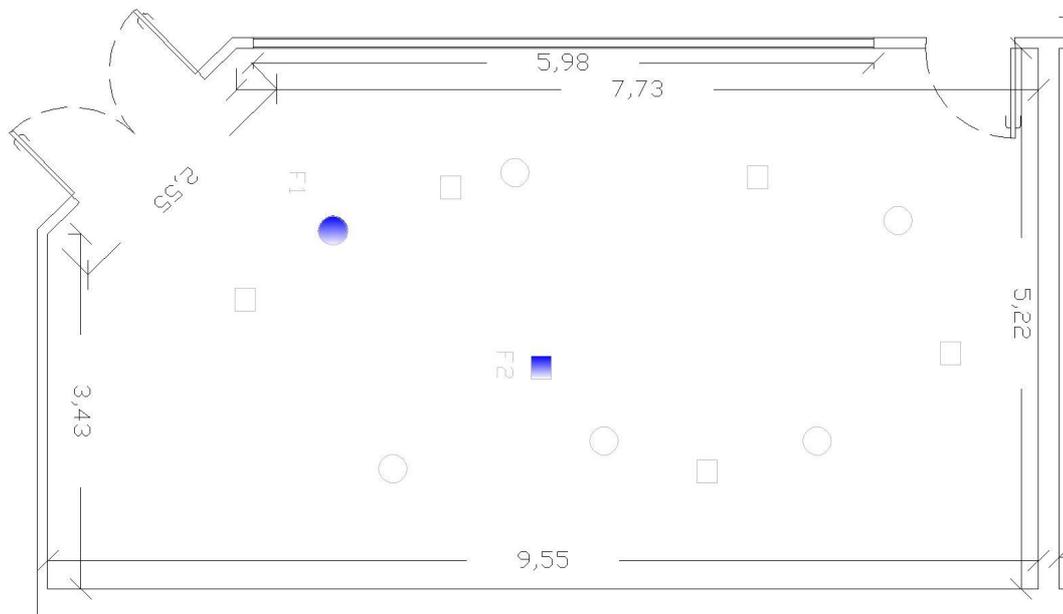
Su superficie es de aproximadamente 48 m², siendo su volumen aproximado de 129 m³. El suelo del recinto es cerámico, las paredes están revestidas de enlucido de yeso y el techo es de placa de yeso perforada. Las dos puertas por las que se accede son de metal. La ventana es de tipo climalit y a través de ella se ve el pasillo colindante.

Características ambientales:

Recinto	Temperatura °C	Humedad Relativa %
Aula 1	21,2	43,2

3.- CROQUIS DE LAS POSICIONES DE MEDIDA Y DEL RECINTO.

A continuación se presenta el croquis descriptivo aproximado del recinto evaluado, donde se detallan las diferentes posiciones de la fuente sonora y micrófonos distribuidas uniformemente en toda la superficie.



Aula 1

4.- DESVIACIONES AL MÉTODO.

No se han observado desviaciones al método durante la realización de las medidas.

5.- RESULTADOS DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN OBTENIDOS.

A continuación se presentan dos hojas con los resultados obtenidos para el recinto evaluado.

En la primera hoja se reflejan, en forma tabular, los tiempos de reverberación promedio, en cada banda de frecuencia estudiada, para cada una de las posiciones de fuente, además de los tiempos de reverberación promedio en todo el recinto. En la segunda hoja se presenta una gráfica con los valores promedio del T_r y el valor del tiempo de reverberación T_r (DB-HR) definido en el Anexo A del Documento Básico “HR protección frente al ruido”, obtenido como media de los valores de T_r a las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz.

El valor del tiempo de reverberación se ha calculado a partir del parámetro acústico T_{r20} .

DATOS DE LA MEDICIÓN

LUGAR: IXXX

FECHA: xxx

HORA: XX-XX h.

PETICIONARIO: xxx

INFORME: Medidas de tiempos de reverberación según UNE EN ISO 3382-2.

FICHERO: XXX.xls

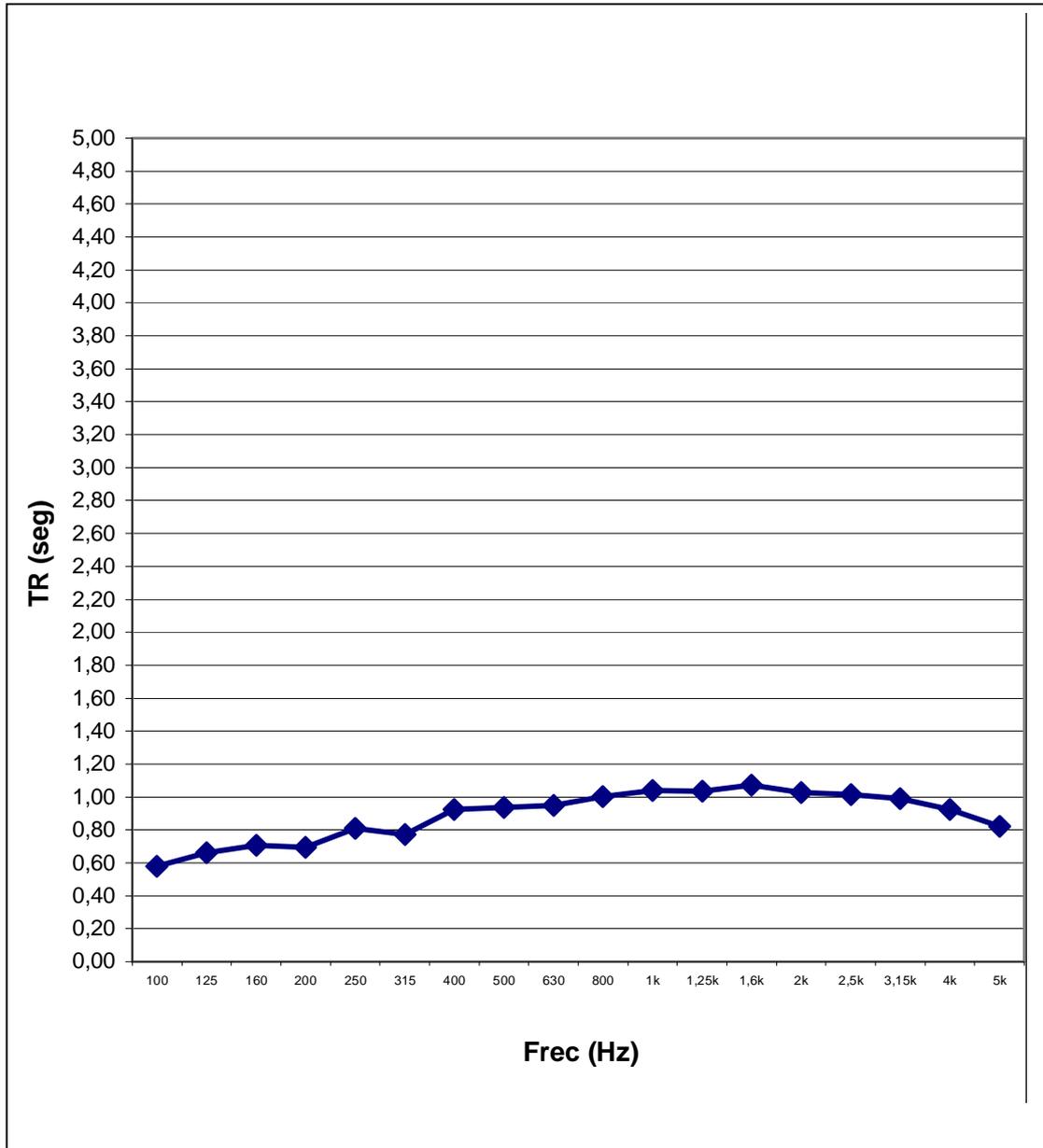
SOFTWARE: EXCEL 2000

ZONA DE MEDIDA: XXX.

RESULTADOS NUMÉRICOS

<i>Frec(Hz)</i>	<i>TR promF1</i>	<i>TR promF2</i>	<i>TR prom</i>
100	0,63	0,53	0,58
125	0,80	0,53	0,66
160	0,85	0,56	0,71
200	0,81	0,58	0,69
250	1,02	0,60	0,81
315	0,99	0,55	0,77
400	1,21	0,63	0,92
500	1,29	0,58	0,94
630	1,30	0,60	0,95
800	1,37	0,63	1,00
1k	1,47	0,61	1,04
1,25k	1,47	0,60	1,04
1,6k	1,51	0,64	1,07
2k	1,40	0,65	1,03
2,5k	1,37	0,67	1,02
3,15k	1,32	0,67	0,99
4k	1,20	0,65	0,92
5k	1,06	0,59	0,82

Resultados gráficos



El Tr medio a las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz es de 1 segundo.

Acondicionamiento acústico de la sala polivalente

LUGAR DE ENSAYO: CENTRO CÍVICO DE UN PUEBLO DE BURGOS

ENSAYO: Medida del tiempo de reverberación en recinto.

CONTENIDO

1.- Objeto del informe.

2.- Procedimiento de ensayo.

2.1.- Procedimientos y Normas empleadas.

2.2.- Metodología y parámetros del ensayo.

2.3.- Instrumentación empleada.

2.4.- Características de la sala.

3.- Croquis de las posiciones de medida.

4.- Resultados del tiempo de reverberación obtenidos.

1.- OBJETO DEL INFORME.

El presente informe tiene como finalidad analizar y evaluar el tiempo de reverberación existente en el interior de la sala del auditorio sito en Roa de Duero (Burgos), como parámetro de análisis acústico de la sala.

2.- PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.

2.1- Procedimientos y Normas empleadas.

El ensayo realizado y aquí presentado, se ha elaborado aplicando las disposiciones y requisitos establecidos en la Norma *UNE-EN ISO 3382-2:2008 (Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios)*.

Se ha seguido asimismo el procedimiento de medida y los cálculos expuestos en *el procedimiento específico PE-31 del Laboratorio de Acústica de AUDIOTEC*.

2.2- Metodología y parámetros del ensayo.

El ensayo se realizó en la sala-auditorio.

Dicha sala tiene forma rectangular y está compuesta por tres zonas, una zona de público en la que se encuentran las butacas, otra zona de escenario y otra zona de pasillo de acceso al escenario.

El grado de precisión o de exactitud elegido para los ensayos es el de precisión, en el que se han realizado mediciones del tiempo de reverberación para al menos dos posiciones de fuente y doce combinaciones de fuente-micrófono independientes.

El número de posiciones de medición elegido en el ensayo proporciona una cobertura adecuada en el recinto y permite verificar las prestaciones del mismo respecto al uso para el que ha sido diseñado. Se ha elegido una distribución de posiciones de micrófono que tenga en cuenta las principales influencias susceptibles de ser el origen de las diferencias en el tiempo de reverberación a lo largo de todo el recinto.

Para el ensayo, se ubicaron 3 posiciones de fuente en la zona de escenario, por tratarse de la zona destinada al orador. Para cada posición de fuente sonora se seleccionaron diez posiciones de micrófono distribuidas uniformemente en el recinto.

En el apartado 3 se presenta un croquis de la planta del interior del recinto con las distintas posiciones de micrófono y de fuente.

Se midió con un analizador B&K clase 1, modelo 2260, tres veces el tiempo de reverberación en cada una de ellas, promediando las tres caídas.

En el interior del recinto, la señal generada por la fuente sonora omnidireccional B&K 4296 fue ruido rosa a un nivel suficiente por encima del nivel de fondo para medir el Tr_{20} , y se empleó el método de medición de ruido interrumpido para la obtención de las curvas de caída.

Las distintas posiciones de micrófono se ubicaron a 1,2 m de altura sobre el suelo y a más de 1 m de cualquier pared o superficie reflectante existente en el recinto, para evitar el efecto del campo próximo reverberante, debido a las ondas estacionarias o reflejadas. Entre las distintas posiciones de micrófono la distancia era de al menos 2 m.

La distancia entre cualquiera de las posiciones de micrófono y las distintas posiciones de fuente fue mayor de 4,5 m. De esta forma, se cumple con la distancia mínima, $d_{\text{mín}}$, en metros, entre cualquier posición de micrófono y la fuente sonora, evitando así una influencia demasiado fuerte del sonido directo.

En cada posición de micrófono se midió el tiempo de reverberación en las bandas de tercio de octava comprendidas entre 100 y 5000 Hz.

La cadena de medida se verificó antes y después de realizar las mediciones en el ensayo.

Para obtener los valores promediados espacialmente en todo el recinto del tiempo de reverberación medido, se utiliza un promediado aritmético de los mismos.

2.3.- Instrumentación empleada.

- ♦ Fuente de ruido *Briuel & Kjaer* tipo 4296, con n° de serie 2364350 en cuyo espectro de emisión están incluidas las frecuencias correspondientes a las bandas entre 100 y 5000 Hz.

- ♦ Analizador de espectros *Briuel & Kjaer* tipo 2260, con nº de serie 2131645, previamente verificado.
- ♦ Calibrador/verificador *Briuel & Kjaer* tipo 4231, con nº de serie 2656311.
- ♦ Termoanemómetro Velocicalc Plus 8388 con nº de serie 97120035.

Estos equipos cuentan con su correspondiente certificado de verificación periódica emitido por la Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Junta de Castilla y León que certifica el cumplimiento de la “Orden Ministerial de 16 de diciembre de 1998, por la que se regula el control metrológico del estado para los instrumentos destinados a medir niveles de sonido audibles (B.O.E. nº 311 de 29/12/98)”.

2.4.- Características ambientales y de los lugares de medida.

Características de los lugares de medida:

La sala del auditorio tiene tres zonas, la zona de público de 200 m² de superficie en planta aproximadamente, la zona de escenario con una superficie en planta aproximada de 60 m² y el pasillo de acceso al escenario con una superficie aproximada de 20 m².

La zona de audiencia tiene una puerta de entrada de madera, techo de hormigón y suelo de linóleo o PVC. En la zona central de la pared se encuentran instalados paneles de Heraklith, el zócalo es de paneles de madera lisa y la parte superior es de paneles de madera perforada. La sala está amueblada con aproximadamente 300 butacas semi-absorbentes que estaban tapadas con plástico.

La zona de escenario tiene el suelo de tarima y el techo de hormigón. La pared del fondo con piedra y placa de yeso laminado, la pared de la derecha y de la izquierda tienen una cortina desplegada.

La zona de pasillo de acceso al escenario tiene un techo de paneles acústicos autoportantes de lana mineral, suelo de linóleo o PVC, y en la parte central de la pared tiene instalados Heraklith, en la parte alta paneles de madera perforada y en el zócalo paneles de madera lisa.

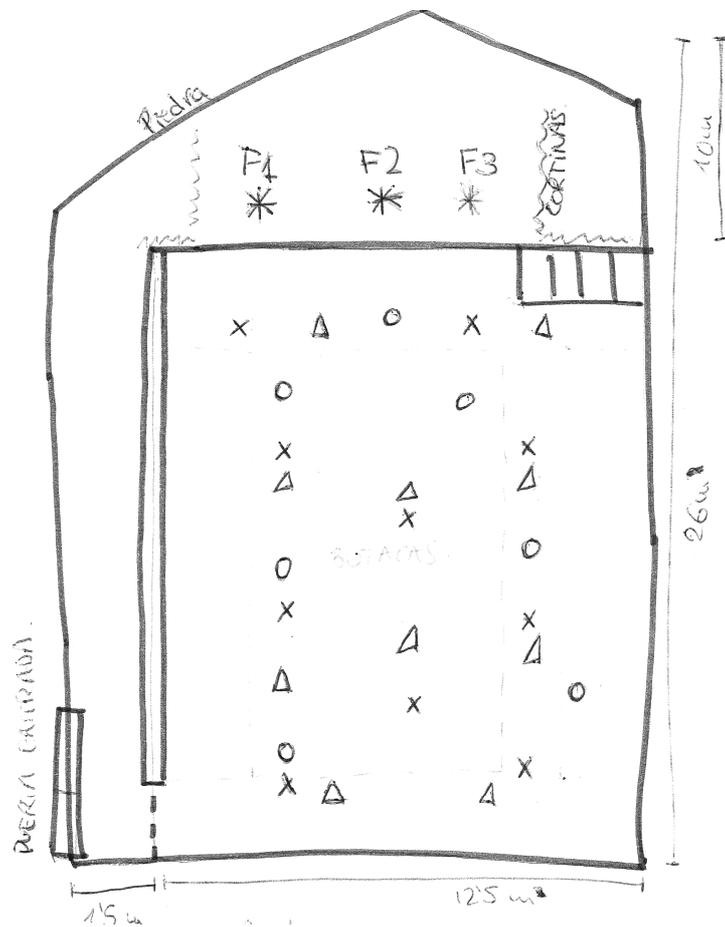
Características ambientales:

La temperatura existente en el interior del recinto durante las mediciones fue de 19 °C y la humedad relativa de 39 %.

3.- CROQUIS DE LAS POSICIONES DE MEDIDA.

A continuación se presenta una imagen escaneada del croquis descriptivo de la sala del auditorio donde se detallan las diferentes posiciones de la fuente y micrófonos distribuidas uniformemente en la superficie.

Los asteriscos representan las tres posiciones de fuente seleccionadas y los iconos en círculo, triángulo y cruz representan las 10 posiciones de micrófono por cada posición de fuente elegida, distribuidas uniformemente en la sala del Auditorio.



A continuación se presenta una imagen de la sala Auditorio.



4.- RESULTADOS DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN OBTENIDOS.

A seguir se presenta una hoja con los resultados obtenidos en el recinto. En ella se reflejan los tiempos de reverberación promedio para cada una de las posiciones de fuente, además de una gráfica con los valores promedio del T_r para todo el recinto. Se presenta además el valor del tiempo de reverberación T_r (DB HR) definido en el Anexo A del Documento Básico HR protección frente al ruido, obtenido como media de los valores de T_r a las frecuencias de 500, 1000 y 2000 Hz.

El valor del tiempo de reverberación se ha calculado a partir del parámetro acústico T_{r20} .

Aislamiento acústico entre aulas

LUGAR DE ENSAYO: CENTRO CÍVICO DE UN PUEBLO DE BURGOS

ENSAYO Aislamiento acústico a ruido aéreo entre dos aulas de conferencia.

CONTENIDO

1.- Objeto del informe.

2.- Procedimiento de ensayo.

2.1.- Procedimientos y Normas empleadas.

2.2.- Metodología y parámetros del ensayo.

2.3.- Instrumentación empleada.

2.4.- Características de los recintos y condiciones ambientales.

3.- Desviaciones al método.

4.- Resultados del aislamiento a ruido aéreo.

1.- OBJETO DEL INFORME.

Evaluación “in situ” del aislamiento acústico a ruido aéreo, diferencia de niveles estandarizada, D_{nT} , entre recintos en la segunda planta del centro civico de Roa de Duero (Burgos).

El aislamiento ensayado fue el siguiente:

- Ensayo nº 1:

Zona emisora: Aula 1.

Zona receptora: Aula 2.

2.- PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.

2.1- Procedimientos y Normas empleadas.

El ensayo realizado y aquí presentado, se ha elaborado aplicando las disposiciones establecidas en la Norma *UNE-EN ISO 140-4:1999 (Medida “In-Situ” del aislamiento acústico a ruido aéreo de los edificios y de los elementos constructivos)*.

Se ha seguido asimismo el procedimiento de medida y los cálculos expuestos en *el procedimiento específico PE-11 del Laboratorio de acústica de AUDIOTECH*.

2.2- Metodología y parámetros del ensayo.

Para el ensayo **entre recintos** se procedió de la siguiente manera:

- Se generó ruido rosa con 2 posiciones de fuente en la zona emisora, colocada sobre un trípode, y a más de 0,7 m de las paredes existentes, y 1 m. sobre el suelo.
- Para cada posición de fuente, en la zona emisora, se emplearon 5 posiciones de micrófono distribuidas uniformemente, alejadas más de 0,5 m de las paredes laterales, 0,7 m entre ellas, 1 m de la fuente sonora, 1 m del cerramiento de separación entre los dos recintos y a una altura entre 1,2 y 1,5 m, sobre el suelo.
- Para cada posición de fuente, en la zona receptora, se emplearon 5 posiciones de micrófono distribuidas uniformemente, alejadas más de 0,5 m de las paredes laterales, 0,7 m entre ellas, 1 m del cerramiento de separación entre los dos recintos, y a una altura entre 1,2 y 1,5 m sobre el suelo.

- En cada posición se ha medido durante el tiempo suficiente para que se estabilizara la señal (al menos durante 6 segundos).
- Las medidas se realizaron en cada una de las bandas de tercio de octava comprendidas entre 100 y 5000 Hz.
- Se midió el ruido de fondo en el recinto receptor empleando cinco posiciones de micrófono.
- Para medir el tiempo de reverberación en el recinto receptor se empleó una posición de fuente y se configuró el equipo para medir el Tr_{20} .
- Para cada posición de fuente, para la medida del Tr , se emplearon 3 posiciones de micrófono en el recinto receptor. Todas ellas estaban entre 1,2 y 1,5 m. de altura y alejadas más de 0,5 m de las paredes laterales, 0,7 m entre ellas y 1 m de la fuente sonora.
- Se realizaron 2 medidas en cada posición y se obtuvieron los respectivos promedios.

2.3.- Instrumentación empleada.

- ♦ Fuente de ruido *Brüel & Kjaer* tipo 4296, con nº de serie 2364350.
- ♦ Fuente de ruido *Brüel & Kjaer* tipo 4296, con nº de serie 2161787.
- ♦ Analizador de espectros clase 1 *Brüel & Kjaer* tipo 2260, con nº de serie 2131645, previamente verificado.
- ♦ Analizador de espectros clase 1 *Brüel & Kjaer* tipo 2260, con nº de serie 2131659, previamente verificado.
- ♦ Calibrador-verificador B&K tipo 4231, de clase 1, con nº de serie 2656311.
- ♦ Termoanemómetro Velocicalc Plus 8388 con nº de serie 97120035.

2.4.- Características de los recintos y condiciones ambientales.

Las características de los recintos eran las siguientes:

La aula 1 está ubicado en la planta segunda del edificio y tiene las siguientes características y dimensiones principales:

Su superficie es de aproximadamente 48 m^2 , siendo su volumen aproximado de 129 m^3 . La altura es de 2,68 m. El suelo del recinto está fabricado con bovedilla cerámica, las paredes están revestidas de enlucido de yeso y el techo es de placa de yeso perforada. Las dos puertas por las que se accede son de metal. La ventana es de tipo climalit y a través de ella se ve el pasillo colindante.

El elemento separador es ladrillo hueco doble revestido de enlucido de yeso.

El aula 2, colindante al aula 1, tiene una superficie aproximadamente de 42 m^2 , un volumen aproximado de 114 m^3 y su altura es de 2,68 m. El suelo del recinto está fabricado con bovedillas de cerámica, las paredes son de ladrillo con enlucido de yeso y el forjado es de bovedilla con falso techo de placa de yeso perforada. Las dos puertas por las que se accede son de metal. La ventana es de tipo climalit y a través de ella se ve el pasillo colindante.

3.- DESVIACIONES AL MÉTODO.

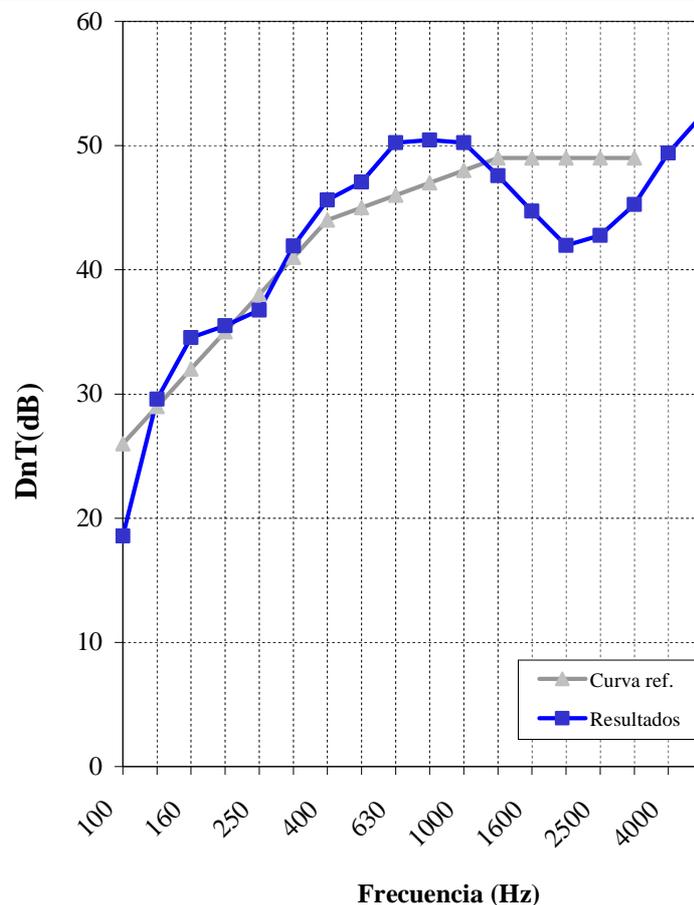
- A pesar de la existencia de difusores en el recinto emisor para conseguir un campo sonoro más difuso en el mismo, debido a las características geométricas y superficiales existentes en su interior no siempre se consiguió un espectro sonoro con diferencias menores de 6 dB entre bandas de tercio de octava adyacentes.

4.- RESULTADOS DEL AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO.

Para el ensayo se presenta una hoja en la que aparece una breve descripción de la muestra ensayada, una tabla con los valores de aislamiento obtenidos para cada banda de frecuencia en dB, así como su gráfica correspondiente. En ella, también, aparecen dos valores de aislamiento global, uno en dB calculado según la norma ISO 717-1:1996, y otro calculado en dBA entre 100 y 5000 Hz.

Lugar de medida:
Identificación del ensayo: Aislamiento acústico a ruido aéreo entre dos aulas de conferencia.
Zona emisora: Interior del aula 1
Zona receptora: Interior del aula 2
Notas:

<i>Frec.</i> <i>f</i> <i>Hz</i>	<i>DnT</i> <i>dB</i>
100	18,6
125	29,6
160	34,5
200	35,5
250	36,8
315	41,9
400	45,6
500	47,1
630	50,2
800	50,4
1000	50,2
1250	47,6
1600	44,7
2000	42,0
2500	42,8
3150	45,3
4000	49,4
5000	52,5



Aislamiento global calculado según el procedimiento de la Norma ISO 717-1:1996 :

$$DnT_w (C;Ctr) = 45 (-3 ; -8) \text{ dB}$$

Aislamiento global en dBA según el DB-HR:

$$DnT_A = 43 \text{ dBA}$$

ANEXO C

Además de los ensayos de acondicionamiento acústico del aula 1 y de la sala polivalente y del aislamiento entre las aulas de conferencias, en el anexo C, se recogen las mediciones de los niveles de inmisión de ruido en exteriores e interiores.

LUGAR DE ENSAYO: CENTRO CÍVICO DE UN PUEBLO DE BURGOS

ENSAYO: Medida de inmisión de ruidos en exteriores e interiores.

CONTENIDO

1.- Objeto del informe.

2.- Procedimiento de ensayo.

- 2.1.- Procedimientos y Normas empleadas.
- 2.2.- Definición de escenarios y ubicación de los puntos de medida.
- 2.3.- Metodología de evaluación y parámetros del ensayo.
- 2.4.- Instrumentación empleada.
- 2.5.- Características meteorológicas y de las zonas de medida.

3.- Resultados obtenidos.

1.- OBJETO DEL INFORME.

Evaluación “in situ” del máximo nivel de inmisión sonora en el interior y exterior de la vivienda sita en la C/ [REDACTED] situada enfrente al “Centro Cívico Roa” situado en Roa de Duero (Burgos), producidos por el funcionamiento de la máquinas climatizadoras situadas en la azotea del Centro Cívico. Dicha vivienda es el recinto de mayor sensibilidad acústica más cercano a la actividad.

2.- PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.

2.1- Procedimientos y Normas empleadas.

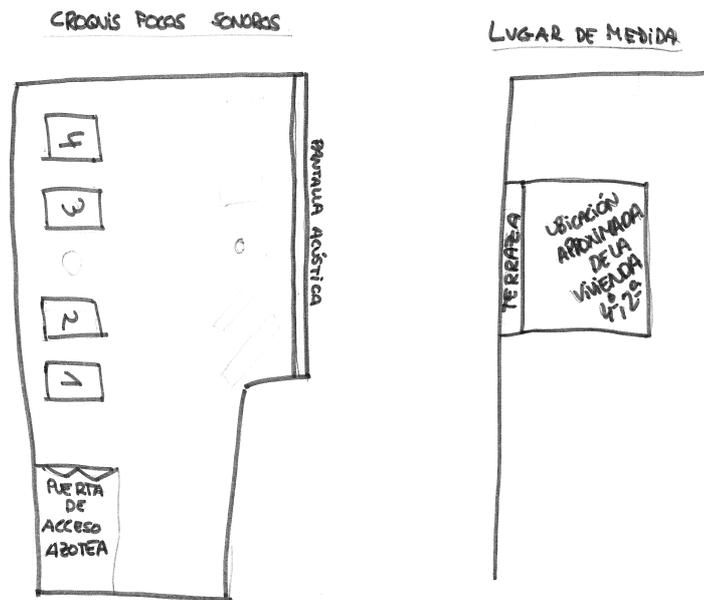
El ensayo realizado y aquí presentado, se ha elaborado aplicando el procedimiento y las disposiciones establecidas en la Norma *ISO 1996. Acústica. Descripción, medida y evaluación de ruido ambiental. Parte 1-2003 y Parte 2-2007*, así como lo establecido en la Ley 5/2009, de 4 de junio, del Ruido de Castilla y León.

Se ha seguido asimismo el procedimiento de medida y los cálculos expuestos en *el procedimiento específico PE-LE-28, para la medida y evaluación de ruido ambiental, del Laboratorio de Acústica de AUDIOTEC.*

2.2- Definición de escenarios y ubicación de los puntos de medida.

El lugar de medida fue el “Centro Cívico de Roa” ubicado en la C/ [REDACTED] (Burgos), la vivienda se encuentra situada enfrente del Centro Cívico en la misma calle en el [REDACTED].

La situación de los focos sonoros respecto al lugar de medida aparece representada en el siguiente croquis:



Los iconos representados con 1, 2, 3 y 4 son las 4 máquinas climatizadoras YORK, de la marca JOHNSON CONTROLS.

2.3- Metodología de evaluación y parámetros del ensayo.

Se realizaron medidas de los niveles sonoros en las siguientes zonas receptoras de evaluación:

- Interior del salón de la vivienda.
- Exterior del salón en terraza de la vivienda.

Los focos sonoros del Centro Cívico que se pusieron en funcionamiento fueron los siguientes:

- 4 máquinas Climatizadoras YORK de la marca JOHNSON CONTROLS. En funcionamiento simultáneo en modo calor.

Se midieron, previamente a la realización del ensayo, las condiciones ambientales en la zona de medida (temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y velocidad y dirección del viento) encontrándose dentro de los márgenes autorizados para el buen funcionamiento de la cadena de medida. No existían precipitaciones.

En el Centro Cívico se pusieron en funcionamiento todos los focos sonoros mencionados simultáneamente y a su máximo nivel y se procedió a medir en las distintas zonas receptoras consideradas.

Se procedió de la siguiente manera en cada punto de medición:

- Se midió el L_{Aeq} (dBA), como parámetro acústico de evaluación.
- Se midió durante 5 segundos ininterrumpidamente, tiempo suficiente para que se estabilizara la señal.
- Las medidas se espaciaron tres minutos entre ellas entre cada posición de medida.
- En cada zona, tanto en el interior como en el exterior se midió en tres puntos de evaluación distribuidos uniformemente en el recinto.

Para todos los puntos de medida, el equipo de medida se configuró para su funcionamiento en respuesta rápida (ponderación temporal “fast”), para ponderación frecuencial A en valores globales y para incidencia sonora aleatoria. Además se configuró para obtener los espectros en 1/3 de octava en ponderación lineal y para obtener los parámetros L_{CeqT} y L_{AeqT} , y L_{leqT} y L_{AeqT} , durante el periodo de medida.

Una vez analizados dichos parámetros se comprobó si existían componentes tonales, impulsivas, o de baja frecuencia con el objeto de realizar las penalizaciones oportunas en el caso de detectar su existencia.

Para la medida de los niveles de inmisión sonora en el interior, se guardó al menos 0,7 metros entre las distintas posiciones de micrófono y al menos 1 metro respecto a los distintos cerramientos. Se midió con un trípode a una distancia de 1,5 metros sobre el suelo.

Para la medida de los niveles de inmisión sonora en el exterior, el micrófono se posicionó a 1,5 m de la fachada de la vivienda. Se rechazaron todas las medidas en que se detectaron ruidos ajenos a los evaluados, especialmente en los casos en que pasaron vehículos por las vías cercanas.

Se realizaron las mediciones en el interior con las puertas y ventanas cerradas.

Posteriormente se realizaron tres medidas del nivel de ruido de fondo en cada zona de medida para poder hacer las correcciones oportunas.

Se empleó la pantalla antiviento para el micrófono en las mediciones en el exterior. La velocidad del viento fue, en todo momento inferior a 3 m/s y la dirección predominante era oeste.

La cadena de medida se verificó previamente y posteriormente de cada proceso de medida en cada zona de evaluación, con el calibrador acústico correspondiente, para comprobar el correcto funcionamiento de la misma.

Tras los resultados obtenidos en las verificaciones realizadas se comprobó que los equipos empleados cumplen las condiciones requeridas y la desviación obtenida se encuentra dentro de los requisitos establecidos por AUDIOTEC para el tipo de instrumental empleado.

2.4.- Instrumentación empleada.

- ♦ Analizador integrador clase 1 *Brüel & Kjaer* tipo 2260, con nº de serie 2131645, previamente verificado.
- ♦ Calibrador/verificador clase 1 *Brüel & Kjaer* tipo 4231, con nº de serie 2136311.
- ♦ Termoanemómetro *Velocicalc Plus* 8388 con nº de serie 97120035.

Estos equipos cuentan con su correspondiente certificado de verificación que certifica el cumplimiento de la “Orden Ministerial ITC/2845/2007, de 25 de septiembre de 2007, por la que se regula el control metrológico del Estado de los instrumentos destinados a la medición de sonido audibles y de los calibradores acústicos (B.O.E. nº 237 de 3/10/07)”.

2.5.- Características meteorológicas y de las salas.

Características meteorológicas

	Temperatura °C	Humedad %	Velocidad del viento m/s
Interior	23,6	25,8	--
Exterior	25,6	30,5	< 2

Características de las zonas de medida.

- Los focos sonoros bajo estudio se encuentran en la azotea del Centro Cívico. Están instalados al aire libre, y además se ha instalado una pantalla acústica en el borde de la azotea, en el lateral correspondiente a la C/ El Tinte.
- El salón de la vivienda tiene una superficie aproximada de 30 m² y un volumen aproximado de 75 m³. Tiene puerta de madera de acceso al salón y dos puertas de salida a terraza con cristal tipo climalit. El techo y suelo son de madera y paredes pintadas. Está amueblado.
- La terraza de la vivienda se encuentra enfrente del Centro Cívico, su superficie aproximada es de 15 m². El suelo es de terrazo.

3.- RESULTADOS OBTENIDOS.

A continuación se presenta, para cada zona de medida, una hoja en la cual se indican todas las mediciones realizadas en el interior y exterior. Dichas mediciones se encuentran corregidas por el ruido de fondo y por la aplicación de penalizaciones debidas a las correcciones realizadas por la presencia de componentes tonales, impulsivas y de baja frecuencia. De todos los valores obtenidos se da como resultado final (L_{keq_final}) el nivel equivalente máximo en dicha zona para las condiciones de focos sonoros evaluadas.

DATOS DE LA MEDICION

LUGAR: Centro Cívico.	
FECHA: XXX	HORA: Entre las XXXX y las XXXX Horas.
PETICIONARIO: XXXX	
INFORME: Niveles de inmisión sonora.	
FICHERO: XXXX	SOFTWARE: Excel 2000.

FUENTES SONORAS: 4 máquinas climatizadoras marca JOHNSON CONTROLS. Funcionando simultáneamente y en modo calor.

ZONA DE MEDIDA: Exterior en terraza de la vivienda sita en la C/ El Tinte Nº 28, 4º , 2º en Roa de Duero (Burgos).

RESULTADOS NUMÉRICOS

NIVEL SONORO EN EXTERIORES

INMISIÓN OBTENIDA

LUGAR DE MEDIDA	Resultados parciales						Resultado final
	LAeq, Ti (dBA)	LARF, Ti (dBA)	Kt (dB)	Kf (dB)	Ki (dB)	Lkeq, Ti (dBA)	Lkeq Ti_final (dBA)
Exterior en terraza	45,6	38,8	0	0	0	44,6	51 dBA
	46,1	37,8	0	6	0	51,4	
	45,9	35,8	0	3	0	48,9	

Nota:

INMISIÓN OBTENIDA.

LAeq, TI = Nivel equivalente en dB(A) en la zona de medición.
 LARF, Ti = Nivel de ruido de fondo en dB(A) en la zona de medición.
 Kt, Kf y Ki = Corrección por componentes tonales(Kt), impulsivas (Ki) y bajas frecuencias (Kf).
 Lkeq, Ti= Índice de ruido continuo equivalente corregido, en dB(A).
 Lkeq, Ti_final= Índice de ruido continuo equivalente corregido final, en dB(A).

DATOS DE LA MEDICION

LUGAR: Centro Cívico.	
FECHA: XXX	HORA: Entre las XXXX y las XXXX Horas
PETICIONARIO: XXXX	
INFORME: Niveles de inmisión sonora.	
FICHERO: XXXX	SOFTWARE: Excel 2000.

FUENTES SONORAS: 4 máquinas climatizadoras marca JOHNSON CONTROLS. Funcionando simultáneamente y en modo calor.

ZONA DE MEDIDA: Interior de la vivienda sita en XXXXXXXXXX.

RESULTADOS NUMÉRICOS

NIVEL SONORO EN INTERIORES

INMISIÓN OBTENIDA

LUGAR DE MEDIDA	Resultados parciales						Resultado final
	L _{Aeq, Ti} (dBA)	L _{ARF, Ti} (dBA)	K _t (dB)	K _f (dB)	K _i (dB)	L _{keq, Ti} (dBA)	L _{keq Ti_final} (dBA)
Interior salón de la vivienda	29,5	24,9	0	3	0	30,7	31 dBA
	29,7	23,6	0	3	0	31,5	
	29,6	27,6	0	0	0	< 26,6	

Nota:

INMISIÓN OBTENIDA.

L_{Aeq, Ti} = Nivel equivalente en dB(A) en la zona de medición.
L_{ARF, Ti} = Nivel de ruido de fondo en dB(A) en la zona de medición.
K_t, K_f y K_i = Corrección por componentes tonales (K_t), impulsivas (K_i) y bajas frecuencias (K_f).
L_{keq, Ti} = Índice de ruido continuo equivalente corregido, en dB(A).
L_{keq, Ti_final} = Índice de ruido continuo equivalente corregido final, en dB(A).