

Resumen

En este Trabajo Fin de Grado se analizan las características acústicas del Aula Magna de la Escuela Politécnica Superior de Gandia de la UPV (EPSG) en su estado actual y se proponen acciones de mejora para su acondicionamiento acústico, adaptándolo al uso al que está destinado. La caracterización incluye mediciones "In situ" del tiempo de reverberación, así como un análisis de los resultados obtenidos. Además, se llevará a cabo el diseño del recinto virtual mediante un programa de simulación acústica (CATT Acoustics), comparando los resultados de la simulación con las medidas reales del sitio.

Se presentarán propuestas de mejora basadas en criterios de calidad acústica para el uso del Aula Magna, en base a las medidas analizadas. El fin último es mejorar la calidad acústica del Aula Magna y garantizar un acondicionamiento acústico adecuado para las diferentes actividades que se realizan en ella.

Palabras clave:

Acústica, Acondicionamiento Acústico, Aula Magna, Acústica de salas, Diseño acústico.

Abstract

In this final degree project, the acoustic characteristics of the Aula Magna at the Escuela Politécnica Superior de Gandia (EPSG) of the UPV in its current state are analyzed, and actions for improvement are proposed to adapt the room's acoustic conditioning to its intended use. The characterization includes "in situ" measurements of reverberation time, as well as an analysis of the obtained results. Furthermore, the design of a virtual model of the space will be carried out using an acoustic simulation program (CATT Acoustics), comparing the simulation results with the actual measurements taken on site.

Proposals for improvement will be presented based on acoustic quality criteria for the use of the Aula Magna, based on the analyzed measurements. The ultimate goal is to improve the acoustic quality of the Aula Magna and ensure proper acoustic conditioning for the various activities conducted in the space.

Key Words:

Acoustics, Conditioning, Aula Magna, Room Acoustics, Acoustic Design.

Índice de contenido

1.Introducción	8
1.1Objetivos	8
1.1.1 Objetivo Principal	8
1.1.2 Objetivos Secundarios.....	8
1.2 Estructura.....	9
2. Marco teórico.....	10
2.1 Conceptos básicos	10
2.1.1 Fundamentos del sonido y la acústica:	10
2.1.2 Coeficiente de absorción acústica	11
2.1.3 El área de absorción equivalente.....	12
2.2 Parámetros acústicos	14
2.2.1 Parámetros relevantes	14
2.3 Normativa	18
2.3.1 Respecto a las fuentes acústicas:.....	18
2.3.2 Respecto a los micrófonos y filtros:.....	19
2.3.3 Respecto al equipo de procesado:.....	19
2.3.4 Respecto al tiempo de reverberación.....	19
2.3.5 Medidas y Plano Aula Magna	20
2.3.6 recomendaciones específicas.....	20
2.4 Software	22
3. Desarrollo del estudio.....	23
3.1. Estructura del Aula Magna	23
3.2 Toma de medidas.....	24
3.2.1 Instrumentación y materiales	24
3.2.2 Procedimiento a seguir.....	26
3.2.3 Cálculo y resultados	28
3.3 Simulación.....	32
3.3.1. Estructura del Aula Magna	32
4. Propuestas de mejora.....	51
4.1 Diagnóstico basado en resultados	51

4.2 Propuestas de Mejora	51
5. Conclusiones.....	53
Bibliografía	54
Anexo I: Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030	
Anexo II: Cálculos de tiempo de reverberación	
Anexo III: Archivos CATT-AcousticsV9	
Anexo IV: Annex IX Coeficientes absorción	
Anexo V: Cálculo de parámetros. Acústica de salas	
Anexo VI: Capturas graficas simulación	

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Reflexión de la onda de sonido hacia un objeto [5]	11
Ilustración 2: Representación gráfica de la difracción de la onda [6]	11
Ilustración 3: Coeficiente de absorción [9].....	12
Ilustración 4: Tiempo de reverberación T60 [17]	15
Ilustración 5 : tiempo de reverberación T30 y T20 [18].....	16
Ilustración 6: plano del Aula Magna de la UPV campus Gandía (Imagen dada por el profesor Jesús Alba)	20
Ilustración 7: Aula Magna de la UPV campus Gandia	24
Ilustración 8: Sonómetro Bruel & kjaer. Hand-held Analyzer, Type 2270.....	25
Ilustración 9: Micrófono 4189	25
Ilustración 10: Anemómetro Testo 410-2.....	25
Ilustración 11: Fuente dodecaédrica Omni-Power, Modelo 4292-L	26
Ilustración 12: posición de un sonómetro	27
Ilustración 13: posición de la fuente	27
Ilustración 14: Parámetros de configuración de sonómetro para el tiempo de reverberación	27
Ilustración 15: Coordenadas de la sala, sonómetros y fuentes.....	28
Ilustración 16 : Aula Magna desde la parte posterior.....	33
Ilustración 17: Coordenadas de las esquinas	33
Ilustración 18: Materiales del suelo, techo y paredes del Aula Magna en CATT Acoustic ..	34
Ilustración 19: Imagen de la zona de suelo y butacas del Aula Magna.....	34
Ilustración 20: Coordenadas y materiales de los planos de los suelos, butacas, tarima techos, paredes, puertas y tabique del Aula Magna en CATT Acoustic.....	35
Ilustración 21: Coordenadas de las dos fuentes del Aula Magna en CATT Acoustic.....	35
Ilustración 22: Coordenadas de los 12 receptores del Aula Magna en CATT Acoustic.....	36
Ilustración 23: Diseño 2D del Aula Magna en CATT Acoustic	36
Ilustración 24: Diseño 3D del Aula Magna en CATT Acoustic fuente A0	36
Ilustración 25: Diseño 3D del Aula Magna en CATT Acoustic fuente A1	37
Ilustración 26: Configuración de la simulación	37
Ilustración 27: Gráfica de TR en el receptor 1 fuente 1	38
Ilustración 28: Gráfica de TR en el receptor 2 fuente 1	39
Ilustración 29: Gráfica de TR en el receptor 1 fuente 2	39
Ilustración 30: Gráfica de TR en el receptor 2 fuente 2	39
Ilustración 31: Gráfica de T30 en el receptor 1 fuente 1	41
Ilustración 32: Gráfica de T30 en el receptor 2 fuente 1	41

Ilustración 33: Gráfica de T30 en el receptor 7 fuente 2	41
Ilustración 34: Gráfica de T30 en el receptor 8 fuente 2	42
Ilustración 35: Gráfica de C50 en el receptor 1 fuente 1	44
Ilustración 36: Gráfica de C50 en el receptor 2 fuente 1	44
Ilustración 37: Gráfica de C50 en el receptor 1 fuente 2	44
Ilustración 38: Gráfica de C50 en el receptor 2 fuente 2	44
Ilustración 39: Gráfica de D50 en el receptor 1 fuente 1	46
Ilustración 40: Gráfica de D50 en el receptor 2 fuente 1	46
Ilustración 41: Gráfica de STI en el receptor 1 fuente 1	48
Ilustración 42: Gráfica de STI en el receptor 2 fuente 1	48
Ilustración 43: Gráfica de STI en el receptor 1 fuente 2	49
Ilustración 44: Gráfica de STI en el receptor 2 fuente 2	49

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Coeficiente de absorción	11
Ecuación 2: Área de absorción equivalente	12
Ecuación 3: Área Total de absorción equivalente.....	12
Ecuación 4: Absorción del aire.....	12
Ecuación 5: Absorción del público.....	13
Ecuación 6: Cálculo T60	15
Ecuación 7: Cálculo TR.....	15
Ecuación 8: Cálculo Trmid	16
Ecuación 9: Cálculo de la calidez (BR)	18
Ecuación 10: Cálculo del brillo (Br)	18
Ecuación 11: Cálculo del TR con los datos de T30 obtenidos de las medidas in situ	30
Ecuación 12: Cálculo del brillo Br con los datos de T30 obtenidos de las medidas in situ ...	30
Ecuación 13: Cálculo de la calidez BR con los datos de T30 obtenidos de las medidas in situ	31
Ecuación 14: Cálculo de la Claridad C50 con los datos de T30 obtenidos de las medidas in situ	31
Ecuación 15: Cálculo de la Definición D50 con los datos de T30 obtenidos de las medidas in situ	31
Ecuación 16: ecuación del TRmid que se tendrá en cuenta.....	39
Ecuación 17: Cálculo del Trmid con los datos de la simulación en CATT acustics.....	40
Ecuación 18: Cálculo del Trmid con los datos de la simulación en CATT acustics del T30 .	43
Ecuación 19: Cálculo del brillo Br con los datos de T30 obtenidos de la simulación	43
Ecuación 20: Cálculo de la calidez BR con los datos de T30 obtenidos de la simulación....	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Coeficiente de absorción de butacas por cada banda de frecuencia en tercio de octava	13
Tabla 2: Valor de TRmid (s) adecuado a cada tipo de local	17
Tabla 3: Valor de TRmid (s) adecuado a cada tipo de local	17
Tabla 4 Significado de cada valor de claridad C50.....	17
Tabla 5 Significado de cada valor de Inteligibilidad STI.....	18
Tabla 6 Normativa sobre cómo sacar el tiempo de reverberación modo ingeniería.....	19
Tabla 7: Normativa sobre el TR recomendado para espacios de menos de 350m3.....	21
Tabla 8 Normativa sobre el TR recomendado para espacios de más de 350m3.....	21
Tabla 9 Datos del T30 obtenidos del sonómetro bandas 100 Hz-500HZ y su media entre las dos fuentes	29
Tabla 10 :Datos del T30 obtenidos del sonómetro bandas 630 Hz-5000HZ y su media entre las dos fuentes.....	30
Tabla 11: Datos del c50 obtenidos de cálculos	31
Tabla 12: Parámetros acústicos con sus valores recomendados para la acústica de salas	38
Tabla 13 Tabla de valores de TR Fuente 1	40
Tabla 14 Tabla de valores de TR Fuente 2	40
Tabla 15 Tabla de valores promedios de ambas fuentes	40
Tabla 16 Tabla de valores de T30 Fuente 1	42
Tabla 17 Tabla de valores de T30 Fuente 2.....	42
Tabla 18 Tabla de valores medios de T30	43
Tabla 19: Tabla de valores medidos y su promedio C50 fuente 1	45
Tabla 20 : Tabla de valores medidos y su promedio C50 fuente 2	45
Tabla 21: Tabla de media por banda y media global C50 fuente 1 y 2.....	45
Tabla 22: Tabla de valores por banda de frecuencia y su promedio del D 50 fuente 1.....	47
Tabla 23: Tabla de valores por banda de frecuencia y su promedio del D 50 fuente 2.....	47
Tabla 24: Tabla de la media de los valores por bandas de tercio de octava D50	47
Tabla 25: Tabla Valor global medio de D50	47
Tabla 26: Valores y promedio STI Fuente 1 simulación	49
Tabla 27: Valores y promedio STI Fuente 2 simulación	50
Tabla 28 : Valores promedio STI Fuente 1y 2 simulación	50
Tabla 29: media global STI	50

1.Introducción

1.1Objetivos

La finalidad de este estudio es analizar las características acústicas del Aula Magna de la Escuela Politécnica Superior Gandía de la UPV (EPSG) actualmente y proponer acciones de mejora para su acondicionamiento acústico, adaptándolo al uso al que está destinado. La caracterización incluye mediciones in situ del tiempo de reverberación y la simulación en el software CATT Acoustics, un software específico para el diseño del acondicionamiento acústico de recintos, así como un análisis de los resultados obtenidos, comparando los resultados de la simulación con las medidas reales del sitio.

Debo mencionar que este trabajo forma parte de un proyecto más amplio que incluye otros dos proyectos relacionados. Entre ellos destacan los TFG realizados por Ferruz, P. (2024), titulado *“Diseño e implementación de un sistema electroacústico de varias vías para la reproducción de cortos en el Aula Magna de la Escuela Politécnica Superior de Gandía”*, y Lozano, P. (2024), *“Estudio del aislamiento acústico del Aula Magna de la Escuela Politécnica Superior de Gandía”*, ambos también realizados en la Universitat Politècnica de València.

1.1.1 Objetivo Principal

El objetivo principal es investigar y evaluar el estado actual del acondicionamiento acústico en el Aula Magna de la EPSG, identificando posibles deficiencias y proponiendo soluciones para mejorar la calidad sonora del espacio.

1.1.2 Objetivos Secundarios

1. Realizar un análisis detallado de las características arquitectónicas y acústicas del Aula Magna de la EPSG.
2. Realizar mediciones objetivas de parámetros acústicos relevantes, como el tiempo de reverberación, la claridad de la palabra y la inteligibilidad del habla en el Aula Magna.
3. Identificar posibles fuentes de ruido externas e internas que puedan afectar negativamente la calidad acústica del Aula Magna.
4. Comparar los resultados obtenidos con los estándares y recomendaciones encontrados en la legislación sobre el acondicionamiento acústico para auditorios y espacios de conferencias.

5. Proponer soluciones y estrategias de diseño acústico para mejorar la calidad sonora del Aula Magna, considerando aspectos como la absorción acústica, la difusión sonora y el control del ruido.
6. Presentar conclusiones y recomendaciones finales para el acondicionamiento acústico efectivo del Aula Magna de la EPSG, destacando la importancia de considerar el confort acústico en el diseño y la gestión de espacios educativos y de conferencias.

Para la realización de este trabajo se utilizarán conocimientos adquiridos en la asignatura de *Acústica Para la Edificación*, así como en la utilización de herramientas y software especializado en simulación acústica. Los objetivos secundarios incluyen aprender a usar el equipamiento y software necesario para realizar las medidas y simulaciones pertinentes, y analizar la respuesta acústica del Aula Magna en diferentes condiciones.

1.2 Estructura

La estructura que se seguirá en este Trabajo Fin de Grado será la siguiente:

Comenzaremos (Capítulo 2) con el marco teórico. En esta sección se explicarán los conceptos y definiciones esenciales para la comprensión de este TFG. Se abordarán temas como los fundamentos del sonido y la acústica, los parámetros acústicos relevantes, y la normativa aplicable para la toma de las mediciones y los estándares utilizados en el análisis. También se hará una breve presentación del Aula Magna de la Escuela Politécnica Superior de Gandía.

En la siguiente sección (Capítulo 3), se presentará la metodología del estudio. Aquí se detallará el procedimiento realizado para las mediciones *in situ*, incluyendo la instrumentación y materiales utilizados, así como el procedimiento seguido para medir el tiempo de reverberación y otros parámetros acústicos.

Posteriormente (Capítulo 3.3), se presentarán los resultados obtenidos de las mediciones y simulaciones, comparando los datos reales con los resultados de la simulación en CATT Acoustics. Se analizarán los parámetros de calidad siguientes: tiempo de reverberación, brillo, calidez, claridad y definición del sonido. Con ellos se evaluará si el Aula Magna cumple con los estándares acústicos requeridos, para las condiciones de uso más relevantes.

A continuación (Capítulo 4), se expondrá una propuesta de mejora basada en ajustar los parámetros acústicos analizados. Finalmente, se presentarán las conclusiones del estudio (Capítulo 5).

2. Marco teórico

En esta parte se presentarán los conceptos fundamentales necesarios para comprender el estudio del acondicionamiento acústico. Se centrará en las teorías y parámetros claves para evaluar y mejorar la acústica de un espacio, incluyendo aspectos como el tiempo de reverberación, la absorción y la difusión del sonido. Además, abordaremos los fundamentos del acondicionamiento acústico, explicando su importancia para optimizar la calidad sonora. Finalmente, se describirán las normativas aplicadas para la toma de las mediciones y los estándares utilizados en este análisis.

2.1 Conceptos básicos

2.1.1 Fundamentos del sonido y la acústica:

2.1.1.1 El sonido y su propagación

“El sonido es la consecuencia del movimiento vibratorio de un cuerpo, que al vibrar genera variaciones de presión que se propagan a través de un medio elástico, como lo es el aire, por ejemplo. Debe quedar en claro que en la producción de sonido hay transporte de energía, sin movimiento alguno de materia.” (Leskow, 2021) [1].

Aunque el aire es un medio común para la transmisión del sonido, esta propagación es más eficiente en medios sólidos y líquidos. El sonido está conformado por varias magnitudes importantes, como son la frecuencia, la amplitud, la longitud de onda y la velocidad de propagación [2].

Otro fundamento importante es la propagación del sonido en el espacio, debido a que cuando las ondas sonoras encuentran una superficie u obstáculos pueden ocurrir los siguientes fenómenos: Reflexión, absorción y transmisión. Estos mecanismos son fundamentales para poder entender el acondicionamiento acústico de un espacio [3].

Reflexión: La reflexión acústica ocurre cuando parte de la energía sonora rebota en una superficie. La reflexión es crucial en la acústica arquitectónica, ya que afecta cómo percibimos el sonido en un espacio cerrado [4].

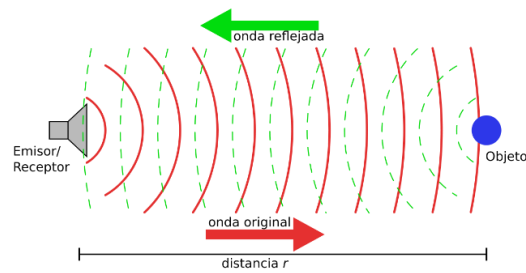


Ilustración 1: Reflexión de la onda de sonido hacia un objeto [5]

Difracción: La difracción es el fenómeno por el cual las ondas sonoras pueden rodear obstáculos o propagarse a través de aberturas. Este fenómeno explica por qué podemos escuchar sonidos provenientes de otra habitación a través de una puerta entreabierta [4].

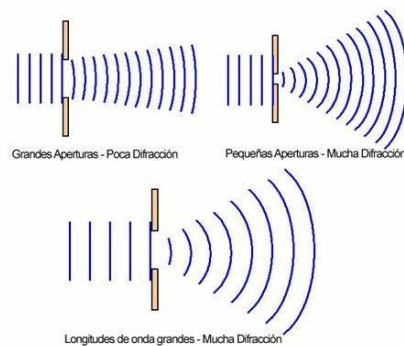


Ilustración 2: Representación gráfica de la difracción de la onda [6]

Absorción: La absorción acústica ocurre cuando parte de la energía sonora es convertida en calor al interactuar con un material. La absorción es importante para el control del ruido y el acondicionamiento acústico de espacios [4].

2.1.2 Coeficiente de absorción acústica

El coeficiente de absorción (α) de un material indica qué fracción de la energía incidente es absorbida. Es el cociente entre la energía acústica absorbida (E_a) y la energía incidente (E_i) sobre una superficie.

Los valores deben estar comprendidos entre 0 y 1; siendo 0 un material completamente reflectante y la unidad un material totalmente absorbente. Esta es su ecuación [7][8]:

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i}$$

Ecuación 1: Coeficiente de absorción

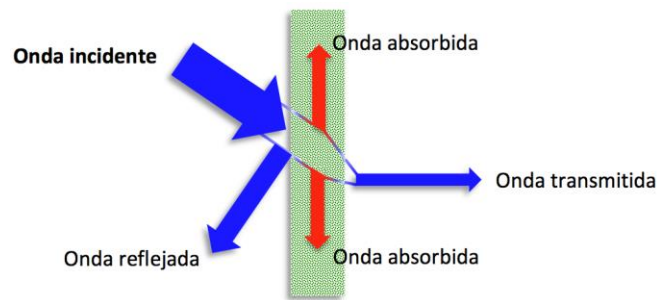


Ilustración 3: Coeficiente de absorción [9]

Es importante destacar que el coeficiente de absorción depende de la frecuencia del sonido incidente. Por lo tanto, se suele especificar para diferentes bandas de frecuencia, típicamente en octavas o tercios de octava.

2.1.3 El área de absorción equivalente

El área de absorción, A , se define como la superficie total, medida en metros cuadrados, donde hay absorción perfecta ($\alpha=1$). Se calcula como la suma de los productos de las superficies por sus respectivos coeficientes de absorción [10]:

$$A = \alpha * S$$

Ecuación 2: Área de absorción equivalente

Para un recinto con superficies heterogéneas, se suman los productos de cada superficie por su correspondiente coeficiente de absorción:

$$A = \sum (\alpha_i \cdot S_i)$$

Ecuación 3: Área Total de absorción equivalente

Donde:

A = Área de absorción equivalente (m^2).

S_i = Superficie del material i (m^2).

α_i = Coeficiente de absorción del material i .

2.1.3.1 Absorción del aire

En recintos de gran volumen o para frecuencias altas, la absorción del aire (A_{aire}) puede ser significativa. Se calcula mediante la fórmula:

$$A_{aire} = 4m = 4 \cdot 1.89 \cdot 10^{-11} \cdot f^2 \cdot V$$

Ecuación 4: Absorción del aire

Donde:

- V es el volumen de la sala en m^3 .
- m es el coeficiente de atenuación del sonido en m^{-1} .
- f es la frecuencia en Hz.

El coeficiente m depende de la frecuencia, la temperatura y la humedad relativa del aire. Para un volumen de $5000 m^3$, la absorción del aire es significativa sólo a partir de 2 kHz.

2.1.3.2 Absorción del público y audiencia

La presencia de público también afecta significativamente las propiedades acústicas. La absorción del público se expresa en términos de área de absorción por persona, que varía según la vestimenta y su posición en el área a considerar. Las personas son altamente absorbentes, especialmente en las frecuencias medias y altas.

Para calcular la absorción total debida a la audiencia, se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$A_{publico} = N \cdot A_{personas}$$

Ecuación 5: Absorción del público

Donde:

- $A_{publico}$ es la absorción total del público.
- N es el número de personas.
- $A_{persona}$ es la absorción acústica promedio de una persona, que puede variar entre 0.3 y $0.5 m^2$ aproximadamente.

2.1.3.3 Absorción de las butacas

Las butacas contribuyen a la absorción acústica del recinto, incluso cuando están desocupadas. Su absorción depende del tipo de butaca, los materiales de construcción y el grado de tapizado. Los coeficientes de absorción típicos son:

Frecuencias (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Coeficiente	0.56	0.64	0.70	0.72	0.68	0.62

Tabla 1: Coeficiente de absorción de butacas por cada banda de frecuencia en tercio de octava

Es importante considerar la inclinación del suelo donde se ubican las butacas, ya que ángulos de incidencia mayores a 15 grados ayudan a evitar el efecto "seat deep", que puede aumentar la absorción en bajas frecuencias [11].

2.2 Parámetros acústicos

Antes de definir los parámetros acústicos relevantes para este trabajo, se debe comprender qué es la acústica de la sala.

Una rama de la acústica arquitectónica es la acústica de salas, que busca maximizar las condiciones sonoras dentro de un recinto cerrado. Busca que el sonido proveniente de una o más fuentes sea irradiado por igual en todas direcciones, obteniendo así un campo sonoro difuso ideal.

Se emplean principalmente los métodos de absorción (o atenuación), apantallamiento y difusión del sonido. Para ello, se considera un rango de frecuencias que va desde 125 Hz hasta 4.000 Hz. El objetivo es lograr que todas las condiciones acústicas de la sala se mantengan en un nivel agradable en todas las frecuencias [12].

“El diseño acústico debe ser diferente para cada caso, pues existen multitud de espacios con distintas finalidades como auditorios, salas de concierto sinfónico, etc.” (“Acústica de salas – AACUSTICA,2022”) [13].

Los elementos claves para tener en cuenta para tener una buena acústica en la sala son: El volumen del recinto, la forma y los materiales de revestimiento interior.

2.2.1 Parámetros relevantes

2.2.1.1 Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación (TR o RT60) Se define como el tiempo que transcurre desde que para la emisión de una fuente sonora hasta que el nivel de presión sonora en el espacio disminuye 60 decibelios (dB). Este fenómeno acústico se produce cuando un sonido se propaga en un espacio cerrado, interactuando con las superficies y objetos del entorno, lo que genera reflexiones que contribuyen a la percepción del sonido [14][15].

Un TR adecuado puede mejorar la inteligibilidad del habla y la experiencia auditiva en general, mientras que un tiempo de reverberación excesivo puede causar confusión y dificultad para entender el sonido [16].

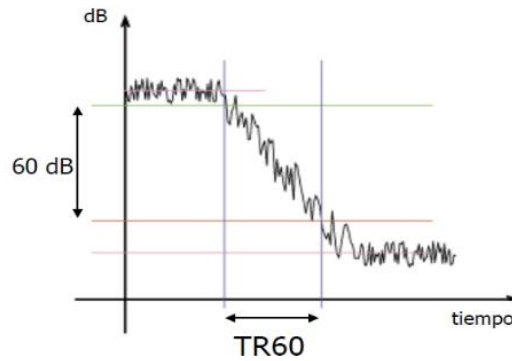


Ilustración 4: Tiempo de reverberación T60 [17]

Para calcular el TR hay varias ecuaciones y fórmulas, pero usaremos la Fórmula de Sabine

$$T_{60} = 0.161 \cdot \frac{V}{A}$$

Ecuación 6: Cálculo T60

Alternativamente, se puede expresar como:

$$TR = \frac{0.161 \cdot V}{S_T \cdot \alpha_m}$$

Ecuación 7: Cálculo TR

Donde:

- T60 es el tiempo de reverberación en segundos.
- V es el volumen de la sala en metros cúbicos.
- A es la absorción total de la sala en metros cuadrados de absorción perfecta.
- S_t es la superficie del recinto en metros cuadrados.
- A_m es el coeficiente de absorción medio (no tiene dimensiones).

Esta ecuación supone una distribución uniforme del sonido en la sala y es más precisa para recintos con absorción moderada. Sin embargo, la medición directa de TR60 puede requerir equipos de alta precisión, lo que a menudo requiere por lo tanto métodos de extrapolación para obtener resultados confiables.

Cuando TR60 no se puede medir directamente, se pueden utilizar métodos alternativos para estimar de forma fiable este valor. Las principales alternativas en estos casos son:

- ❖ T20: Se mide la caída de 20 dB (de -5 dB a -25 dB) y se multiplica por 3.
- ❖ T30: Se mide la caída de 30 dB (de -5 dB a -35 dB) y se multiplica por 2.

Estas mediciones comienzan después de una caída inicial de 5 dB para evitar efectos de transición

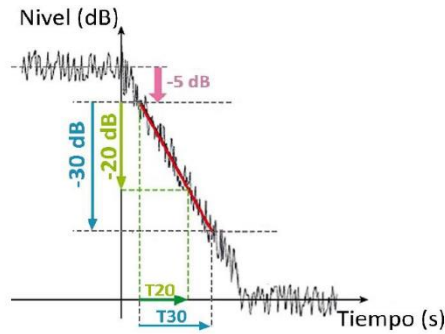


Ilustración 5 : tiempo de reverberación T30 y T20 [18]

Es importante destacar que la fórmula de Sabine no es aplicable en todos los casos, ya que presenta limitaciones en ciertos tipos de recintos, debido a que se utiliza para salas con absorción moderada (coeficiente de absorción medio $\alpha < 0.3$).

Existen situaciones específicas en las que es preferible utilizar otras fórmulas de cálculo del tiempo de reverberación. Por ejemplo, en recintos grandes, donde el aire juega un papel relevante en la absorción sonora, es recomendable ajustar la fórmula de Sabine incorporando la absorción del aire, especialmente para frecuencias altas ($V > 5000\text{m}^3$ y/o $f(\text{Hz}) > 2000\text{Hz}$).

2.2.1.2 Tiempo de Reverberación medio

El TRmid se define como el Tiempo de Reverberación medio y se calcula como el promedio de los tiempos de reverberación en las frecuencias de 500 Hz y 1000 Hz. Se mide en segundos y su expresión matemática es:

$$TR_{mid} = \frac{TR_{500\text{Hz}} + TR_{1000\text{Hz}}}{2}$$

Ecuación 8: Cálculo Trmid

Los valores óptimos de TRmid varían según el tipo y tamaño del recinto. Por ejemplo, cuando se usan salas para conferencias, se recomienda un valor TR más bajo para lograr una buena inteligibilidad, y en una sala de conciertos, se recomienda utilizar valores más altos para escuchar la música.[19]

La siguiente tabla muestra el rango de valores recomendados de TRmid para diferentes tipos de recintos según el **Código Técnico de la Edificación (CTE)** [20].

Tipo de local	TRmid (s)
Aulas y salas de conferencia vacías (sin ocupación y sin mobiliario), cuyo volumen sea menor de 350 m^3	$TR \leq 0.7$
Aulas y salas de conferencia vacías, pero incluyendo el total de las butacas, cuyo volumen sea menor de 350 m^3	$TR \leq 0.5$
Restaurantes vacíos y comedores	$TR \leq 0.9$

Tabla 2: Valor de TRmid (s) adecuado a cada tipo de local

Tipo de local	TRmid (s)
Sala de conferencias	$0.7 \leq TR \leq 1$
Cine	$1.0 \leq TR \leq 1.2$
Sala polivalente	$1.2 \leq TR \leq 1.5$
Teatro	$1.2 \leq TR \leq 1.5$
Sala de conciertos	$1.3 \leq TR \leq 1.7$
Iglesia o catedral	$2.0 \leq TR \leq 3.0$
Estudio radiofónico	$0.2 \leq TR \leq 0.4$

Tabla 3: Valor de TRmid (s) adecuado a cada tipo de local

2.2.1.3 Claridad

La claridad C50 es un parámetro que mide la relación entre la energía sonora temprana y la energía sonora tardía. Este parámetro está relacionado con la nitidez percibida del sonido y varía según el tipo de recinto y su uso previsto. Se mide en los primeros 50ms y se calcula como la media ponderada de las bandas de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz, con factores de ponderación de 15%, 25%, 35% y 25% respectivamente [21].

Valor de C50 (dB)	Significado
< 2 dB	Insuficiente claridad de la voz. La inteligibilidad de la palabra y la sonoridad en el aula son pobres
2 dB - 12 dB	Rango recomendado. Buena inteligibilidad de la palabra y sonoridad adecuada en el aula
> 12-15 dB	Condiciones acústicas muy secas. Falta de confort acústico

Tabla 4 Significado de cada valor de claridad C50

2.2.1.4 Calidez

La calidez acústica BR se refiere a la riqueza de bajas frecuencias en un recinto. Este parámetro es especialmente importante en salas de conciertos y auditorios, donde se busca un equilibrio adecuado entre las frecuencias bajas (125 Hz-250Hz) y medias (500Hz-1000Hz). Se recomienda que este parámetro esté entre 1.1 y 1.45 [22].

$$BR = \frac{TR_{125Hz} + TR_{250Hz}}{TR_{500Hz} + TR_{1000Hz}}$$

Ecuación 9: Cálculo de la calidez (BR)

2.2.1.5 Brillo

El brillo acústico Br está relacionado con la presencia de altas frecuencias en el sonido. Un recinto con buen brillo proporciona una sensación de vivacidad y claridad en el sonido, especialmente importante para la percepción de instrumentos agudos y la inteligibilidad del habla. Se centra sobre todo en el tiempo de reverberación de las franjas 500Hz-1KHz y 2KHz-4KHz. Se recomienda que este parámetro sea mayor a 0.87 con el recinto lleno.

$$Br = \frac{TR_{2k\ Hz} + TR_{4k\ Hz}}{TR_{500Hz} + TR_{1k\ Hz}}$$

Ecuación 10: Cálculo del brillo (Br)

2.2.1.6 Inteligibilidad de la voz

La inteligibilidad de la voz STI es un parámetro crucial en espacios destinados al habla, como aulas o salas de conferencias. Mide la facilidad con la que se pueden entender las palabras habladas en un recinto. Se expresa en una escala de 0 a 1, donde valores más altos indican mejor inteligibilidad [23].

STI	Valoración
$0.75 \leq STI \leq 1$	Excelente
$0.6 \leq STI \leq 0.75$	Buena
$0.45 \leq STI \leq 0.6$	Aceptable
$0.3 \leq STI \leq 0.45$	Pobre
$0 \leq STI \leq 0.3$	Inaceptable

Tabla 5 Significado de cada valor de Inteligibilidad STI

2.3 Normativa

Para la realización de este estudio se ha tenido en cuenta la normativa UNE-EN ISO 3382-1:2008, Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios [24], en concreto, los siguientes artículos:

2.3.1 Respecto a las fuentes acústicas:

- ❖ En las mediciones de control e ingeniería, no se establecen requisitos específicos sobre la directividad.

- ❖ Las fuentes deben generar un nivel de presión suficiente para permitir la obtención de curvas de decrecimiento con el rango dinámico mínimo requerido, evitando la contaminación por ruido de fondo.

2.3.2 Respetto a los micrófonos y filtros:

- ❖ Se requieren micrófonos omnidireccionales que sean lo más pequeños posible, con un diámetro máximo de 14 mm.
- ❖ En algunos casos se permiten diámetros mayores.
- ❖ Los filtros de banda de octava o de tercio de octava deben cumplir la Norma IEC 61260 [25].

2.3.3 Respetto al equipo de procesado:

- ❖ El equipo de procesamiento debe mostrar o evaluar el decrecimiento de nivel y puede promediar las curvas de caída de forma exponencial o lineal.
- ❖ Se definen diferentes tiempos de promediado según el tipo de promedio utilizado: T/30 para el promediado exponencial y T/12 para el promediado lineal, siendo T el tiempo de reverberación que se mide.

2.3.4 Respetto al tiempo de reverberación

	Control	Ingeniería ^a	Precisión
Combinaciones fuente-micrófono	2	6	12
Posiciones de la fuente ^b	≥ 1	≥ 2	≥ 2
Posiciones de micrófono ^c	≥ 2	≥ 2	≥ 3
Número de decrecimientos en cada posición (método del ruido interrumpido)	1	2	3
^a Cuando el resultado se utiliza para un término de corrección en otras mediciones del nivel de ingeniería, solo se requiere una posición de la fuente y tres posiciones de micrófono. ^b Para el método del ruido interrumpido, se pueden utilizar simultáneamente fuentes no correlativas. ^c Para el método del ruido interrumpido y cuando el resultado se utiliza para un término de corrección, se puede utilizar una percha de micrófono rotativo en lugar de múltiples posiciones de micrófono.			

Tabla 6 Normativa sobre cómo sacar el tiempo de reverberación modo ingeniería

Además, se cumple con la altura requerida para realizar la medición, es decir, a 1.2 o más metros del suelo, y todas las posiciones del sonómetro se mantuvieron a más de un metro de distancia de la pared y entre ellos.

Por último, siguiendo la normativa sobre la evaluación del aislamiento acústico en edificios y elementos de construcción (UNE-EN ISO 717-2:2021, Evaluación del aislamiento acústico en

los edificios y de los elementos de construcción. Parte 2: Aislamiento a ruido de impactos.[26]), se obtendrá el nivel estandarizado ponderado $L'_{nT,w}$.

2.3.5 Medidas y Plano Aula Magna

En este apartado se muestra el plano del Aula Magna con sus respectivas medidas de largo, ancho y alto, además de establecer el valor del volumen total de la sala.



Ilustración 6: plano del Aula Magna de la UPV campus Gandía (Imagen dada por el profesor Jesús Alba)

- ❖ Altura= 8.7m.
- ❖ Ancho = 12.5 m.
- ❖ Largo = 24.4 m.
- ❖ Volumen = 2.653,5 m³.

2.3.6 recomendaciones específicas

En el contexto de la protección frente al ruido y el diseño acústico de recintos, es esencial considerar el tiempo de reverberación (TR), definido como el tiempo que tarda en disiparse el sonido en un espacio cerrado después de que la fuente de sonido ha cesado. El Documento Básico de Protección frente al Ruido (DB-HR) [27] establece recomendaciones específicas para distintos tipos de recintos en función de su volumen y uso.

2.3.6.1 Valores de Tiempo de reverberación para recintos menores de 350 m³

Para espacios con un volumen inferior a 350 m³, el DB-HR proporciona los siguientes criterios:

Tipo de recinto	TR recomendado
Aulas y salas de conferencias vacías, sin ocupación ni mobiliario	$T \leq 0,7$ s
Aulas y salas de conferencias vacías, incluyendo butacas	$T \leq 0,5$ s
Restaurantes y comedores vacíos	$T \leq 0,9$ s

Tabla 7: Normativa sobre el TR recomendado para espacios de menos de 350m³

Estos valores ayudan a garantizar que el entorno mantenga una calidad acústica adecuada, controlando la persistencia del sonido y evitando ecos molestos que podrían dificultar la comunicación.

2.3.6.2 TR para recintos mayores de 350 m³

Para recintos de mayor volumen, es crucial consultar una tabla más amplia que contemple el TR adecuado en espacios ocupados:

Tipo de sala	TR (s), sala ocupada
Sala de conferencias	0,7 - 1,0
Cine	1,0 - 1,2
Sala polivalente	1,2 - 1,5
Teatro de ópera	1,2 - 1,5
Sala de conciertos (música de cámara)	1,3 - 1,7
Sala de conciertos (música sinfónica)	1,7 - 2,0
Iglesia/catedral (órgano y canto coral)	2,0 - 3,0
Locutorio de radio	0,2 - 0,4

Tabla 8 Normativa sobre el TR recomendado para espacios de más de 350m³

2.3.6.3 Importancia de los valores de TR

El ajuste adecuado del TR es fundamental para la funcionalidad y el confort auditivo de un espacio. Por ejemplo, un locutorio de radio debe tener un TR bajo (0,2-0,4 s) para asegurar la claridad y evitar la resonancia que pueda distorsionar la voz. En contraste, un teatro de ópera o una sala de conciertos requieren tiempos de reverberación más prolongados (de 1,2 a 2,0 s) para que el sonido sea rico y envolvente, favoreciendo una experiencia auditiva inmersiva.

2.4 Software

La instrumentación utilizada en este proyecto fue el software CATT Acoustic v9.1 f [30] que se encarga de la predicción y auralización de la acústica de la sala simulada: mono, estéreo, binaural y formato B. Auralización en tiempo real a través del módulo CATT-Walker™.

La geometría de la sala se describe utilizando un formato de texto jerárquico estructurado creado manualmente, a través de AutoCAD u otros complementos de CAD:

- ❖ Las declaraciones INCLUDE permiten una estructura jerárquica con partes de la sala definidas en archivos separados.
- ❖ Expresiones/funciones matemáticas (por ejemplo, $\sin()$, $\cos()$).
- ❖ Constantes numéricas simbólicas locales y globales (por ejemplo, GLOBAL `ceil_height = stage_height 10`).
- ❖ Constantes de cadena simbólicas (por ejemplo, LOCAL `wup = "pared de yeso desconocido"`), por ejemplo, nombres de accesos directos.
- ❖ Entrada interactiva de constantes con verificación de límites (por ejemplo, GETLOCAL `h = 8 INFO = "Altura del techo en metros" MIN = 5 MAX = 18`).

3. Desarrollo del estudio

En el estudio analizado, se diseña virtualmente la sala en la que se va a trabajar, para posteriormente, poder calcular los parámetros necesarios y ajustarla para la correcta palabra.

3.1. Estructura del Aula Magna

En este apartado, se llevará a cabo un análisis detallado del Aula Magna del Campus de Gandia la Universitat Politècnica de València. Esta instalación se caracteriza por su versatilidad, albergando una amplia gama de eventos, tales como representaciones teatrales, proyecciones cinematográficas, conciertos y conferencias.

El Aula Magna presenta un suelo recubierto de moqueta, lo que contribuye a la acústica del espacio. Las paredes laterales, así como la que envuelve el centro de control, están fabricadas en madera, material que aporta calidez al ambiente y favorece la calidad sonora. En contraposición, la pared posterior está construida de hormigón, lo que proporciona una estructura robusta. La sala cuenta también con una tarima, cuyos laterales son de madera, y está equipada con dos tabiques móviles.

El primer tabique móvil se encuentra en la entrada que conecta el Aula Magna con el salón de grados, también de moqueta, mientras que el segundo se ubica en el escenario, de madera. Para los fines de este estudio, se asumirá que el tabique que da acceso al salón de grados y el del escenario se encuentran cerrados.

A continuación, se presentará un plano del Aula Magna con sus respectivas dimensiones. Es fundamental destacar que, dada la magnitud del aula y la diversidad de actividades que alberga, es esencial que los oyentes situados en las últimas filas puedan percibir con claridad tanto el sonido emitido por los altavoces como las voces no amplificadas, como ocurre en el contexto de una representación teatral.

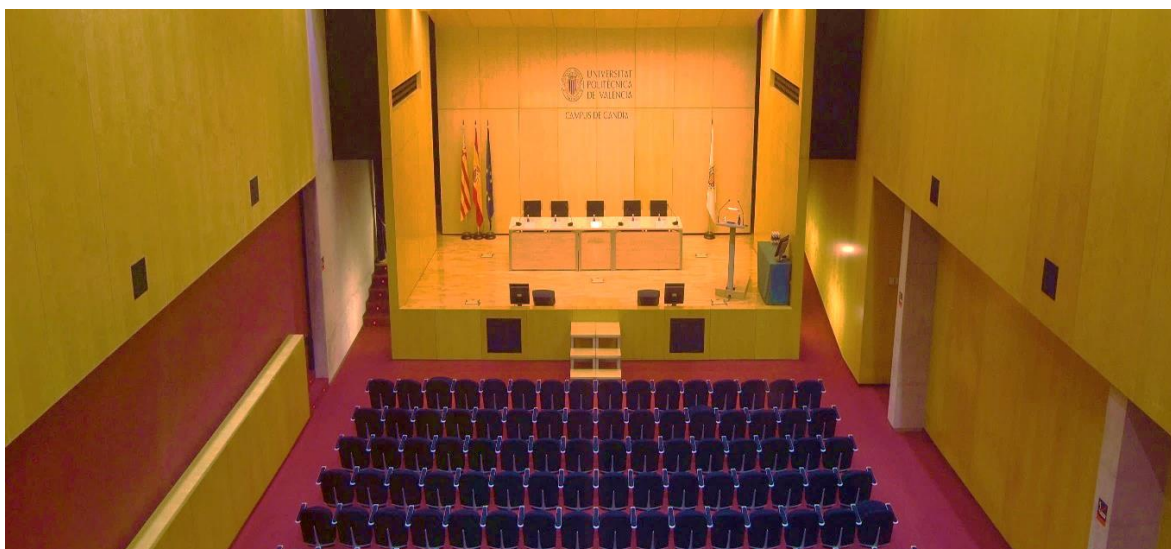


Ilustración 7: Aula Magna de la UPV campus Gandia

Hay que tener en cuenta que el plano que se muestra en la ilustración 6 está incompleto, por lo que para este trabajo y el de otras compañeras tuvimos que ir a medir las partes que no están indicadas en ese plano y ampliar la información.

3.2 Toma de medidas

Para estudiar el acondicionamiento acústico del aula magna se realizó una serie de medidas para compararlas con los datos que arrojó la simulación y posteriormente analizar los resultados para dar una conclusión precisa y si es necesario sugerir las recomendaciones pertinentes para cumplir las condiciones esperadas de una sala de este tipo. Dicha toma de medida se hizo el día 6 de junio de 2024.

Las condiciones de la sala tomadas por un anemómetro en el momento de la medición fueron:

- ❖ Humedad: 61.4%
- ❖ Temperatura: 23, 9º C

3.2.1 Instrumentación y materiales

- ❖ Sonómetro Bruel & kjaer. Hand-held Analyzer, Type 2270.



Ilustración 8: Sonómetro Bruel & Kjaer. Hand-held Analyzer, Type 2270.

- ❖ Micrófono 4189.



Ilustración 9: Micrófono 4189

- ❖ Anemómetro Testo 410-2.



Ilustración 10: Anemómetro Testo 410-2.

- ❖ Metro láser Bosch Professional GLM 40
- ❖ Fuente dodecaédrica Omni-Power, Modelo 4292-L.



Ilustración 11: Fuente dodecaédrica Omni-Power, Modelo 4292-L

3.2.2 Procedimiento a seguir

Primero se realizaron las mediciones correspondientes para completar el plano y los datos del Aula Magna que se proporcionaron. Posteriormente se realizó las mediciones que explicaremos para así compararlas con los valores simulados y observar si los datos cumplen las normativas y los valores explicados en otros apartados

Se tuvo en cuenta que el recinto tiene un volumen de más de 25m^3 , por lo que se implementó el método de ruido interrumpido.

3.2.2.1 Tiempo de reverberación

Para medir el tiempo de reverberación en la sala, se utilizó una fuente dodecaédrica desde la cual se emitía ruido rosa, registrado con un sonómetro y su micrófono correspondiente. El sonómetro se configuró según los parámetros establecidos, y las mediciones siguieron la norma UNE-EN ISO 3382-1:2010 [31], que especifica la cantidad de posiciones recomendadas de micrófono y fuente en función de la finalidad del estudio.

Al tratarse de un análisis en ingeniería, se recomienda usar un mínimo de dos posiciones de fuente, en este caso de salas amabas en el escenario y dos posiciones de micrófono por cada ubicación de la fuente, distribuidas para cubrir toda la sala y así obtener una media fiable



Ilustración 12: posición de un sonómetro



Ilustración 13: posición de la fuente

El sonómetro se configurará en el modo de tiempo de reverberación de la siguiente manera:

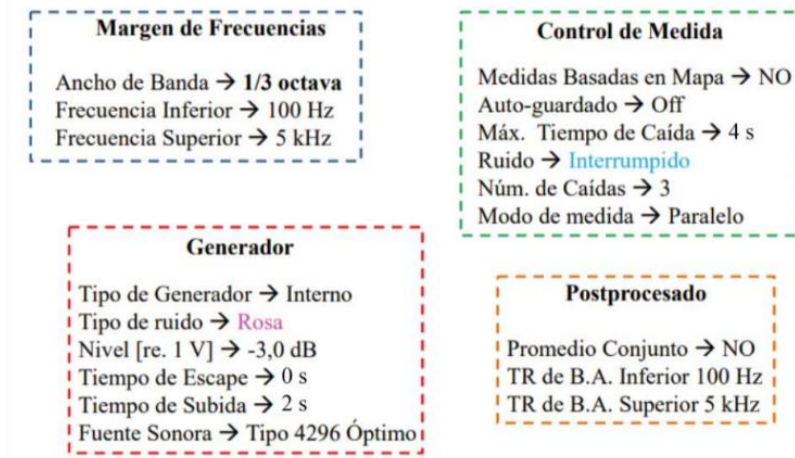


Ilustración 14: Parámetros de configuración de sonómetro para el tiempo de reverberación

Para la primera posición de la fuente (A0), se tomaron seis mediciones con el sonómetro, y para la segunda posición de la fuente (A1), otras seis. Con el fin de optimizar las mediciones, el ruido rosa transmitido no fue continuo, sino que se realizaron tres pausas, siendo la última el final de la grabación, para poder calcular adecuadamente el tiempo de caída.

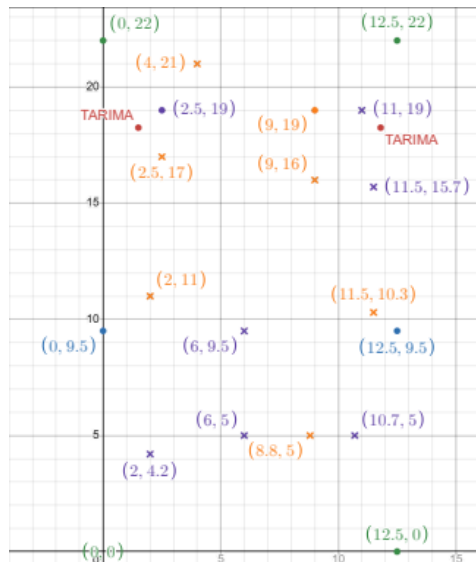


Ilustración 15: Coordenadas de la sala, sonómetros y fuentes

El sonómetro inicia la toma de datos cuando el sonido decae 5 dB respecto al estado estacionario; al haber seleccionado un T30, el tiempo resultante corresponde al tiempo de caída entre 5 y 35 dB, multiplicado por 2. Este proceso se repite tres veces, ya que el instrumento acústico debe calcular la media de las tres mediciones captadas para obtener un único resultado para cada banda de tercio de octava.

Se tiene que comprobar que al finalizar la medida del TR no aparece ningún indicador de baja calidad (👁️), que indicaría que en esa banda de frecuencia no se ha podido medir bien el TR.

Las mediciones se realizaron en frecuencias de 100 Hz a 5 kHz. Una vez obtenidos todos los datos, se volcaron en una hoja de cálculo de Excel, donde se calculó el promedio de las mediciones en bandas de frecuencia específicas: 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz, agrupando estos valores para su análisis.

3.2.3 Cálculo y resultados

Después de tomar medidas, se volcó los datos en el ordenador del aula y se extrajeron los datos en formato excel necesarios para calcular los datos a analizar.

3.2.3.1 Tiempo de reverberación y Tiempo medio

De los datos que se obtuvieron del sonómetro se hizo un promedio por banda de frecuencia de la medida T30 posteriormente se sacó el TR con el promedio de la fuente 1 y la fuente 2 entre la cantidad de fuentes (**Anexo II**)

		100Hz	125Hz	160Hz	200Hz	250Hz	315Hz	400Hz	500Hz
T30	Fuente N°1								
TR001	Pues 01	1,17	1,46	1,22	1,18	1,09	1,13	1,2	1,19
TR001	Pos 02	1,49	1,43	1,44	1,31	1,36	1,28	1,15	1,34
TR001	Pos 03	1,06	1,44	1,37	1,29	1,18	1,17	1,35	1,22
TR001	Pos 04	1,36	1,72	1,22	1,25	1,15	1,19	1,17	1,23
TR001	Pos 05	1,37	1,09	1,37	1,24	1,19	1,27	1,21	1,26
TR001	Pos 06	1,57	1,23	1,53	1,23	1,29	1,16	1,35	1,2
Promedios		1,34	1,40	1,36	1,25	1,21	1,20	1,24	1,24
T30	Fuente N°2								
TR001	Pos 07	1,21	1,53	1,4	1,4	1,18	1,28	1,22	1,13
TR001	Pos 08	1,2	1,42	1,44	1,34	1,3	1,35	1,25	1,31
TR001	Pos 09	1,26	1,59	1,27	1,29	1,27	1,18	1,2	1,13
TR001	Pos 10	1,22	1,35	1,19	1,44	1,26	1,2	1,31	1,25
TR001	Pos 11	1,3	1,53	1,38	1,46	1,21	1,25	1,25	1,33
TR001	Pos 12	1,75	1,5	1,36	1,22	1,49	1,31	1,22	1,24
Promedios		1,33	1,49	1,34	1,36	1,29	1,26	1,24	1,23
TR (s)		1,33	1,44	1,35	1,31	1,25	1,23	1,24	1,24

Tabla 9 Datos del T30 obtenidos del sonómetro bandas 100 Hz-500Hz y su media entre las dos fuentes

630Hz	800Hz	1kHz	1.25kHz	1.6kHz	2kHz	2.5kHz	3.15kHz	4kHz	5kHz
1,23	1,27	1,28	1,28	1,22	1,28	1,24	1,29	1,21	1,17
1,21	1,33	1,34	1,43	1,41	1,47	1,28	1,36	1,28	1,23
1,22	1,31	1,24	1,3	1,39	1,37	1,36	1,4	1,29	1,2
1,16	1,26	1,2	1,25	1,33	1,4	1,4	1,36	1,34	1,32
1,24	1,29	1,26	1,3	1,37	1,31	1,38	1,38	1,35	1,28
1,26	1,28	1,23	1,38	1,39	1,39	1,34	1,46	1,29	1,24
1,22	1,29	1,26	1,32	1,35	1,37	1,33	1,38	1,29	1,24
1,05	1,15	1,21	1,29	1,24	1,33	1,39	1,41	1,21	1,15
1,14	1,24	1,28	1,24	1,21	1,32	1,3	1,32	1,3	1,14
1,12	1,25	1,3	1,25	1,24	1,28	1,29	1,33	1,28	1,16
1,25	1,22	1,21	1,3	1,29	1,28	1,4	1,34	1,31	1,2
1,21	1,17	1,22	1,24	1,17	1,22	1,28	1,28	1,24	1,15
1,32	1,27	1,25	1,31	1,3	1,33	1,36	1,4	1,29	1,16
1,18	1,22	1,25	1,27	1,24	1,29	1,34	1,35	1,27	1,16
1,20	1,25	1,25	1,30	1,30	1,33	1,34	1,36	1,28	1,20

Tabla 10 :Datos del T30 obtenidos del sonómetro bandas 630 Hz-5000HZ y su media entre las dos fuentes

Con la siguiente ecuación calcular el Trmid

$$TR_{mid} = \frac{TR_{500Hz} + TR_{1000Hz}}{2} = \frac{1.24 + 1.25}{2} = 1.25 \approx 1.3 (s)$$

Ecuación 11: Cálculo del TR con los datos de T30 obtenidos de las medidas in situ

Al cotejar el valor de TRmid con los datos de la Tabla 8 se observa una concordancia con los parámetros característicos de salas polivalentes o teatros. Dado que nuestra Aula Magna se clasifica como sala polivalente, se puede afirmar que cumple con este requisito específico.

3.2.3.2 Brillo y Calidez

Se calculan dos parámetros importantes que también se comparan con los datos que arrojó la simulación.

$$Br = \frac{TR_{2KHz} + TR_{4KHz}}{TR_{500Hz} + TR_{1KHz}} = \frac{1.33 + 1.28}{1.24 + 1.25} = 1.04 \approx 1$$

Ecuación 12: Cálculo del brillo Br con los datos de T30 obtenidos de las medidas in situ

$$BR = \frac{TR_{125Hz} + TR_{250Hz}}{TR_{500Hz} + TR_{1KHz}} = \frac{1.44 + 1.21}{1.24 + 1.25} = 1.06 \approx 1.1$$

Ecuación 13: Cálculo de la calidez BR con los datos de T30 obtenidos de las medidas in situ

Como se puede observar en la sección de marco teórico ambos datos están dentro de lo deseado para que el sonido de la voz sea óptimo en este tipo de salas.

3.2.3.3 Claridad de la palabra y definición

Para calcular este parámetro se realizaron las siguientes ecuaciones y tener en cuenta las ponderaciones estándar.

$$C_{50} = 10 * \left(e^{\left(\frac{0.69}{TR} - 1 \right)} \right)$$

Ecuación 14: Cálculo de la Claridad C50 con los datos de T30 obtenidos de las medidas in situ

Para obtener el C50 global se multiplican los valores por las ponderaciones estándar 15%, 25%, 35% y 25% y se suman los valores resultantes.

C50		ponderación	C50 GLOBAL
500 Hz	-1,22	0,15	-0,18
1000Hz	-1,41	0,25	-0,35
2000Hz	-1,64	0,35	-0,57
4000Hz	-1,47	0,25	-0,37
			-1,48

Tabla 11: Datos del c50 obtenidos de cálculos

Como se observa el valor es menor que 2 por lo que no hay suficiente claridad de la voz. La inteligibilidad de la palabra y la sonoridad en el aula son pobres.

El C50 está relacionado con la Definición (D50). Se puede calcular uno a partir del otro usando la siguiente fórmula.

$$D_{50} = \frac{1}{\left(1 + 10^{\left(-\frac{C50}{10} \right)} \right)} = 0.42 = 42\%$$

Ecuación 15: Cálculo de la Definición D50 con los datos de T30 obtenidos de las medidas in situ

Una definición de alrededor de 40% indica que la energía sonora total llega al oyente en los primeros 50 más este valor debe ser mayor a 50%, por lo que la interpretación y claridad acústicas son deficientes.

3.3 Simulación

En esta sección se describe el proceso de simulación del Aula Magna. Este diseño permitirá calcular los parámetros acústicos necesarios para posteriormente compararlos con los valores medidos *in situ*.

3.3.1. Estructura del Aula Magna

El espacio objeto de estudio es el Aula Magna del Campus de Gandia de la Universitat Politècnica de València. Se trata de una sala polivalente destinada a una gran variedad de eventos, como obras de teatro, proyecciones cinematográficas, conciertos y otras actividades culturales.

La estructura del aula presenta las siguientes características principales:

- **Pavimento:** suelo cubierto de moqueta.
- **Paredes laterales:** revestidas de madera, al igual que las paredes del centro de control.
- **Pared posterior:** construida con hormigón.
- **Tarima del escenario:** incluye paredes laterales de madera.
- **Tabiques móviles:** dos elementos divisorios móviles, uno situado entre el Aula Magna y el Salón de Grados (también con suelo de moqueta) y otro en el escenario (de madera).

Para este estudio, se consideró que ambos tabiques móviles están desplegados, es decir, bloqueando el acceso al Salón de Grados y delimitando la tarima del escenario.

En un espacio de estas dimensiones y destinado a actividades tan diversas, resulta esencial garantizar una correcta audibilidad, especialmente para los oyentes ubicados en las últimas filas de butacas. Esto implica asegurar que tanto las señales amplificadas, como las voces no amplificadas, sean claramente perceptibles en todos los puntos de la sala.



Ilustración 16 : Aula Magna desde la parte posterior

El plano se traslada al software CATT Acoustic [30] para ser simulado y observar las mediciones pertinentes.

El presente estudio se fundamenta en la simulación de la acústica geométrica, que proporciona una descripción simplificada del campo sonoro dentro del recinto. Para ello, la propagación del sonido se modela mediante un número considerable de rayos primarios; a mayor cantidad de rayos, mayor será la precisión alcanzada por el programa. De esta forma, se logra un análisis detallado de la respuesta acústica de la sala.

Inicialmente, se modifica el archivo que contiene toda la información referente a la configuración del aula magna del Campus UPV de Gandía (**Anexo III**), denominado “*master.geo*”, que viene de la adaptación de otro archivo previo dibujado en ACAD. En este archivo se incluyen las coordenadas de las esquinas del suelo y del techo del aula. Cabe destacar que el programa opera a partir de un sistema de puntos definidos mediante coordenadas específicas. Las coordenadas empleadas en este estudio son las siguientes:

CORNERS							
1	0	0	0.83	48	18.35	-1.5	4.93
2	2.6	0	0.83	49	22.1	-1.5	4.02
3	16.6	0	0	50	16.6	0	2.41
4	22.1	0	0	51	2.6	0	8.7
5	22.1	3	0	52	2.6	-12.5	8.7
6	24.4	3	0	53	22.1	0	8.7
7	25.85	-12.5	0	54	22.1	-12.5	8.7
8	0	-12.5	0.83	55	0	-10.75	0.83
9	22.1	-12.5	0	56	0	-1.75	0.83
10	22.1	-10.8	0	57	0	-1.75	3.24
11	18.35	-10.8	0	58	0	-10.75	3.24
12	18.35	-1.5	0	59	22.1	-10.8	4.02
13	22.1	-1.5	0	60	22.1	-1.5	4.02
14	2.6	-1.75	0.83	61	20.2	-1.5	0
15	16.6	-1.75	0.02	62	20.2	0	0
16	16.6	-10.75	0.02	63	20.2	-10.8	0
17	2.6	-10.75	0.85	64	20.2	-12.5	0
18	18.35	-1.5	0.83	65	20.2	-1.5	0.83
19	22.1	-1.5	0.83	66	20.2	0	0.83
20	22.1	0	0.83	67	20.2	-10.8	0.83
21	22.1	3	0.83	68	20.2	-12.5	0.83
22	24.4	3	0.83	69	20.2	-1.5	4.93
23	25.85	-12.5	0.83	70	20.2	-10.8	4.93
24	22.1	-12.5	0.83	73	16.6	-12.5	0
25	22.1	-10.8	0.83	74	2.6	-12.5	0.83
26	18.35	-10.8	0.83				
27	18.35	0	0				
28	18.35	-12.5	0				
29	18.35	0	4.93				
30	22.1	0	4.02				
31	22.1	-12.5	4.02				
32	18.35	-12.5	4.93				
33	22.1	3	10.17				
34	24.4	3	10.17				
35	25.85	-12.5	10.17				
36	22.1	-12.5	10.17				
37	22.1	0	10.17				
38	0	0	3.24				
39	2.6	0	3.24				
40	2.6	-12.5	3.24				
41	0	-12.5	3.24				
42	0	0	8.7				
43	18.35	0	8.7				
44	18.35	-12.5	8.7				
45	0	-12.5	8.7				
46	18.35	-10.8	4.93				

Ilustración 17: Coordenadas de las esquinas

A continuación, se procede a incorporar los materiales que componen el suelo, las paredes, el techo, la tarima y el tabique móvil, especificando sus respectivos coeficientes de absorción expresados en porcentaje.

Tal como se ha mencionado previamente, se emplean diversos tipos de materiales: para las paredes se utilizan madera, madera perforada, hormigón y moqueta; para el suelo, moqueta, tarima y audiencia; y para el techo, madera. Además, se asigna a cada elemento el color correspondiente en formato *bitmap*.

```
*CATT-Edit - master.geo
File Edit Search Character Template Help
( / / );CATT-Acoustic v9.1 Manual Shoebox Example
;MASTER.GEO
|
;constant declarations
LOCAL h = 8 ;hall height
LOCAL w = 10 ;hall width
GLOBAL d = 24 ;hall depth

;absorption and scattering coefficients 125Hz to 4kHz [%], RGB-color
ABS audience = <40 50 60 70 80 80> { 255 0 0 }
ABS wood = <25 34 18 10 10 7> { 255 255 115 }
ABS moqueta = <11 14 37 43 27 27> {131 12 12}
ABS hormigon = <1 1 2 2 2 5> {250 239 237}
ABS tarima = <9 9 8 9 10 7> {101 67 16}
ABS perforado = <25 40 75 85 80 75> {255 220 162}
ABS puerta = <15 10 6 8 10 5> {131 96 161}
```

Ilustración 18: Materiales del suelo, techo y paredes del Aula Magna en CATT Acoustic

Estos datos se obtienen de un catálogo de materiales **Anexo IV**.

Una vez esto, ya se pueden establecer los planos que van a constituir la habitación mediante la estructura que representa cada uno de ellos, con sus coordenadas y el material del que está hecho. En este caso el espacio está compuesto por 26 planos: Primero se definió el suelo general de toda el aula y delimitamos la zona donde se encuentran las butacas, se puede ver que se colocó el material moqueta para el suelo y audiencia para las butacas.



Ilustración 19: Imagen de la zona de suelo y butacas del Aula Magna

En ese paso ya se pueden establecer los planos que van a constituir la habitación. La estructura que representa cada uno de ellos, con sus coordenadas y el material del que está hecho. En este caso el espacio está compuesto por 31 planos:

Una vez definido el suelo general de toda el aula, se delimitó la zona donde se encuentran las butacas, aquí se encuentra la elección del material moqueta para el suelo y la audiencia para las butacas. Después está definida la tarima, con sus respectivos materiales, la posición y material del techo y la concha acústica existente sobre el escenario y las paredes del recinto. Por último, se encuentran las puertas y el tabique móvil que está en la tarima.

```
PLANES
[1 suelo base / 8 74 2 1 / moqueta ]
[30 suelo base / 74 73 3 2 / moqueta ]
[31 suelo base / 73 28 7 6 5 4 27 3 / moqueta ]

[2 butacas / 17 16 15 14 / audience]

[4 tarima / 67 68 23 22 21 20 66 65 18 26 / tarima ]
[5 tarima rampa izqda / 12 65 66 27 / moqueta ]
[6 tarima rampa dcha / 28 68 67 11 / moqueta ]
[24 tarima pared dcha / 63 11 46 70 / wood]
[25 tarima pared izqda / 61 12 48 69 / wood]
[7 pared tarima 1 / 13 12 18 19 / tarima ]
[8 pared tarima 2 / 12 11 26 18 / tarima ]
[9 pared tarima 3 / 11 10 25 26 / tarima ]

[10 concha / 29 30 31 32 / wood]
[11 techo alto / 33 34 35 36 37 / hormigon]
[12 pared concha-techoalto / 31 30 37 36 / hormigon]
[13 techo control / 38 39 40 41 / moqueta]
[14 techo central / 42 53 54 45 / wood]

[15 pared concha / 29 32 44 43 / wood]
[16 pared control / 40 39 51 52 / perforado]
[17 pared 1 / 1 2 39 50 3 4 53 42 / wood]
[18 pared 2 / 4 5 33 37 / hormigon]
[19 pared 3 / 5 6 34 33 / hormigon]
[20 pared 4 / 6 7 35 34 / hormigon]
[21 pared 5 / 7 9 36 35 / hormigon]
[22 pared 6 / 9 73 74 8 45 54 / wood]
[23 pared entrada / 8 1 42 45 / moqueta]
[26 pared movil / 2 3 50 39 / moqueta]

[28 puertader / 8 55 58 41 / puerta]
[29 puertaizq / 56 1 38 57 / puerta]

[27 tabique / 19 25 59 60 / wood]
```

Ilustración 20: Coordenadas y materiales de los planos de los suelos, butacas, tarima techos, paredes, puertas y tabique del Aula Magna en CATT Acoustic

Ahora se modificó el archivo de los emisores, es decir las dos fuentes que utilizaremos en este estudio. Dicho archivo se llama SRC.LOC (**Anexo III**), las dos fuentes omnidireccionales se colocaron en la tarima como se realizó en las medidas *in situ*.

```
CATT-Edit - srcloc
File Edit Search Character Template Help

;SRC.LOC
;CATT-Acoustic v9.1 Manual Shoebox Example

;SRC.LOC
LOCAL src_z = 3.1

SOURCE A0
DIRECTIVITY = "omni" ;pre-defined ideal natural omni-directional source
POS = 19 -2.5 src_z ;position
AIMANGLES = 0 0 ;aiming angles (does no matter with an omni)
Lp1m_a = <90 90 90 90 90 90> ;SPL @ 1m on the axis of the source (pink)
END

SOURCE A1
DIRECTIVITY = "omni" ;pre-defined ideal natural omni-directional source
POS = 19 -9 src_z ;position
AIMANGLES = 0 0 ;aiming angles (does no matter with an omni)
Lp1m_a = <90 90 90 90 90 90> ;SPL @ 1m on the axis of the source (pink)
END
```

Ilustración 21: Coordenadas de las dos fuentes del Aula Magna en CATT Acoustic

Se hizo lo mismo con el archivo de los receptores, es decir la posición de los sonómetros (6 por cada fuente) es decir 12 en total, la configuración de las coordenadas será el siguiente:

```

CATT-Edit - rec.loc
File Edit Search Character Template Help
;REC.LOC
;CATT-Acoustic v9.1 Manual Shoebox Example

RECEIVERS
1 20 -9.7 2.13
2 15.7 -11.5 1.3
3 9.5 -6 1.3
4 4.2 -2 1.3
5 6 -6 1.3
6 6 -10.7 1.3
7 5 -8.8 1.3
8 11 -2 1.3
9 17 -2.5 1.3
10 16 -9 1.3
11 21 -4 2.13
12 10.3 -11.3 1.3

```

Ilustración 22: Coordenadas de los 12 receptores del Aula Magna en CATT Acoustic

Así pues, tras configurar todos los parámetros debidamente, se crea el diseño virtual del recinto detallado (**Anexo III**).

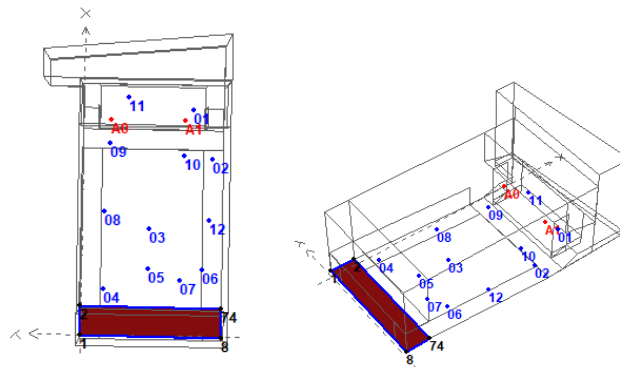


Ilustración 23: Diseño 2D del Aula Magna en CATT Acoustic

Después de rellenar todos los archivos con las coordenadas necesarias, se seleccionó la fuente A0 con los receptores (01-06) y se inició el programa para que simule dichos datos, primero arroja un diseño 3d de la sala más la fuente y los receptores.

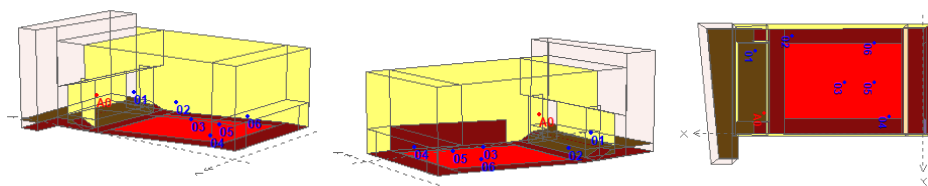


Ilustración 24: Diseño 3D del Aula Magna en CATT Acoustic fuente A0

Se realizó el mismo proceso con el A1 y los receptores (07-12). Cabe mencionar que en ambos casos después diseño 3D se obtuvieron los valores del T30, C50, D50 y STI.

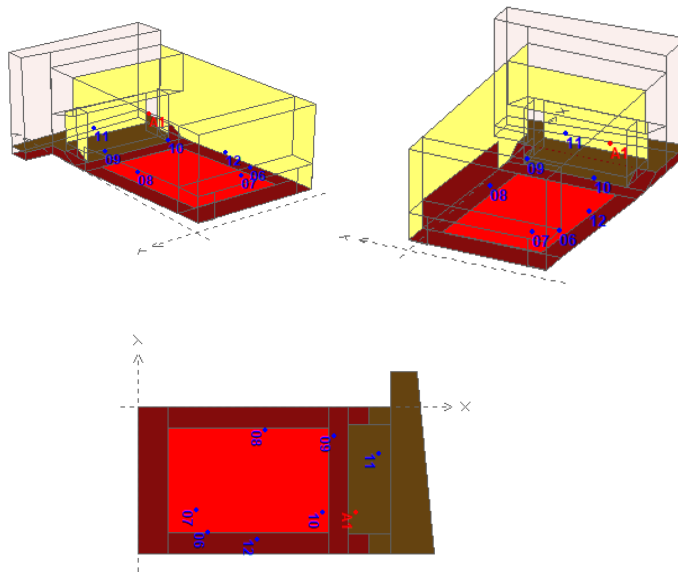


Ilustración 25: Diseño 3D del Aula Magna en CATT Acoustic fuente A1

Una vez se tuvo la representación 3D de la sala, se procede con la simulación, para ello se utilizó la siguiente configuración (ecograma con longitud 10000 ms y número de rayos igual 10000000).

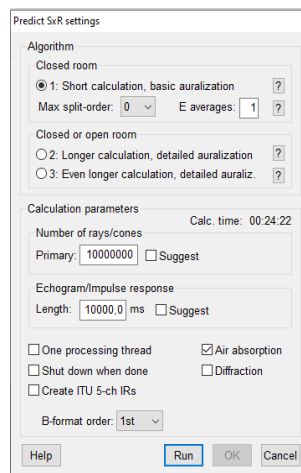


Ilustración 26: Configuración de la simulación

3.3.2 Resultados

A lo largo de esta parte se tiene en cuenta la siguiente tabla y los datos explicados en el marco teórico. Además, las tablas mostradas se extrajeron del Excel del **anexo V**

PARÁMETRO ACÚSTICO	VALOR RECOMENDADO
%Alcons. Sala ocupada.	%Alcons < 5%
STI. Sala ocupada.	STI/RASTI > 0,65
Sonoridad Media, S_{mid} (500 Hz- 2 KHz). Sala ocupada.	$4 \leq S_{mid} \leq 8$ dB (Para orientación frontal del actor) $2 \leq S_{mid} \leq 6$ dB (Para orientación lateral)
Tiempo de reverberación medio, RT_{mid} (500 Hz- 1 KHz). Sala ocupada.	$0,7 < RT_{mid} < 1,2$ s
Claridad de la voz, C_{50} . Sala ocupada.	$C_{50} > 2$ dB
Definición, D, (De 125 Hz a 4 kHz). Sala ocupada.	$D > 0,50$
Relación de primeras reflexiones, ERR. Sala vacía u ocupada.	$2 < ERR < 6$

Tabla 12: Parámetros acústicos con sus valores recomendados para la acústica de salas

Para la realización de todos los cálculos, se considera el trabajo en bandas de octava dentro del rango de frecuencias comprendido entre 125 Hz y 4 kHz.

Los parámetros relevantes que se obtienen de la simulación y que se presentan en la tabla correspondiente son los siguientes:

3.3.2.1 Tiempo de reverberación

En este apartado se analiza el valor para RT_{mid} obtenido. Este parámetro indica el tiempo de reverberación medio en sala ocupada desde los 500 Hz hasta 1 kHz. Como se puede ver en la tabla de arriba el valor debe ser mayor a 0.7 pero menor a 1,2 segundos. Aunque al ser una sala polivalente de más de 350m³ se toma la referencia de la tabla de la 8 es decir el valor debe estar entre 1,2 s y 1,5s.

3.3.2.1.1 Gráficas de simulación del Tiempo de reverberación

Fuente 1

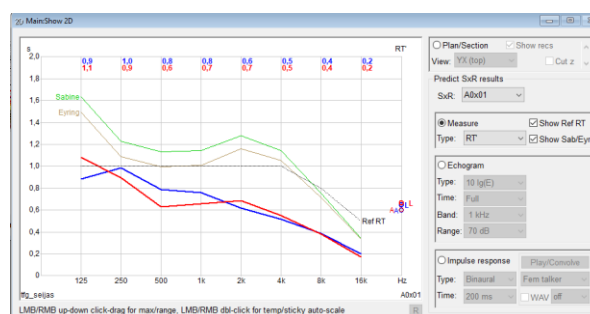


Ilustración 27: Gráfica de TR en el receptor 1 fuente 1

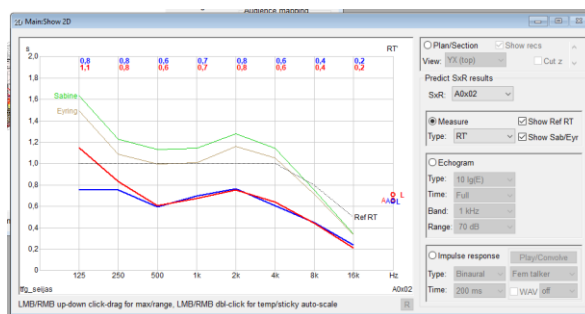


Ilustración 28: Gráfica de TR en el receptor 2 fuente 1

Fuente 2

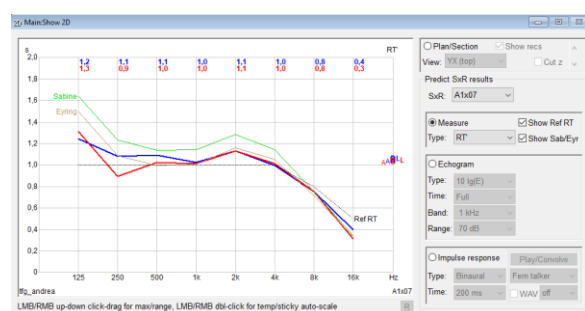


Ilustración 29: Gráfica de TR en el receptor 1 fuente 2

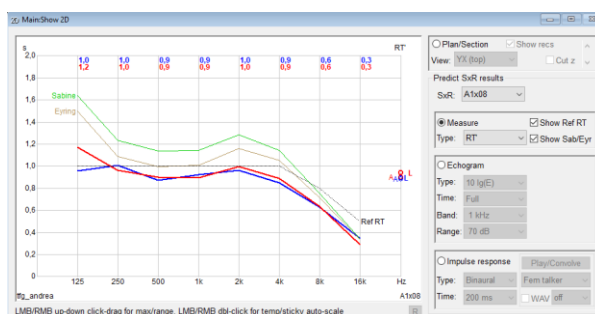


Ilustración 30: Gráfica de TR en el receptor 2 fuente 2

Las imágenes de los otros receptores (sonómetros) se muestran en el **anexo VI**.

3.3.2.1.2 Medición y toma de resultados del tiempo de reverberación

Para poder evaluar correctamente el valor de RT_{mid} se debe obtener el valor medio del tiempo de reverberación, para ello se hará la media de los valores obtenidos en la simulación de la siguiente manera:

$$TR_{mid} = \frac{TR_{500Hz} + TR_{1000Hz}}{2}$$

Ecuación 16: ecuación del TR_{mid} que se tendrá en cuenta

Fuente 1

posición del sonómetro	500Hz	1kHz
P01	0,8	0,8
P02	0,6	0,7
P03	1,1	1
P04	1,1	1
P05	1	1
P06	1	0,9
promedio	0,93	0,90

Tabla 13 Tabla de valores de TR Fuente 1

Fuente 2

<u>posición del sonómetro</u>	<u>500Hz</u>	<u>1kHz</u>
<u>P01</u>	<u>1,1</u>	<u>1</u>
<u>P02</u>	<u>0,9</u>	<u>0,9</u>
<u>P03</u>	<u>0,6</u>	<u>0,6</u>
<u>P04</u>	<u>0,5</u>	<u>0,5</u>
<u>P05</u>	<u>0,4</u>	<u>0,5</u>
<u>P06</u>	<u>0,8</u>	<u>0,9</u>
<u>promedio</u>	<u>0,72</u>	<u>0,73</u>

Tabla 14 Tabla de valores de TR Fuente 2

Media de valores y resultado de TRmid

f(Hz)	500	1000
MEDIA	0,83	0,82

Tabla 15 Tabla de valores promedios de ambas fuentes

$$TR_{mid} = \frac{TR_{500Hz} + TR_{1000Hz}}{2} = \frac{0.83 + 0.82}{2} = 0.82s$$

Ecuación 17: Cálculo del Trmid con los datos de la simulación en CATT acustics

El resultado da acorde a la tabla 11 pero no a los datos de una sala polivalente. Se realizó el mismo proceso, pero con los datos del T30 (Datos también recogidos en las medidas *in situ*).

3.3.2.1.3 Graficas de simulación del tiempo de reverberación

Fuente 1:

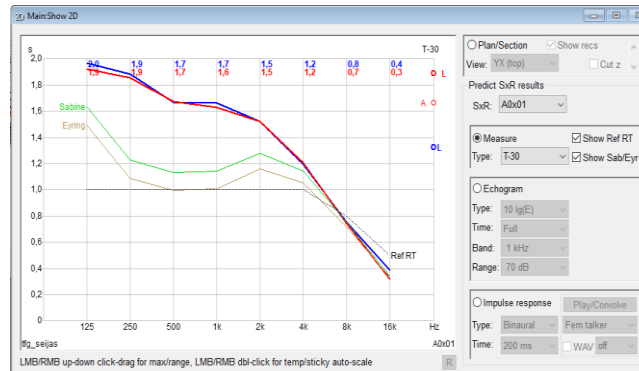


Ilustración 31: Gráfica de T30 en el receptor 1 fuente 1

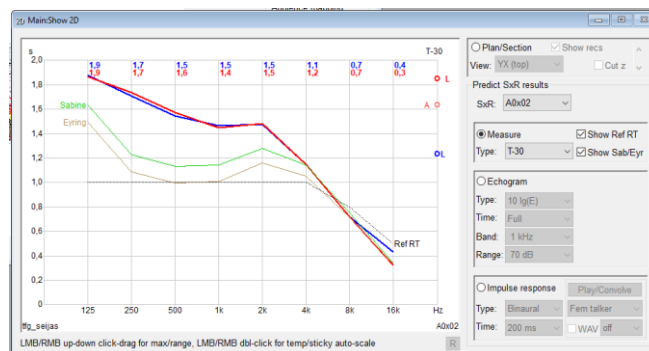


Ilustración 32: Gráfica de T30 en el receptor 2 fuente 1

Fuente 2:

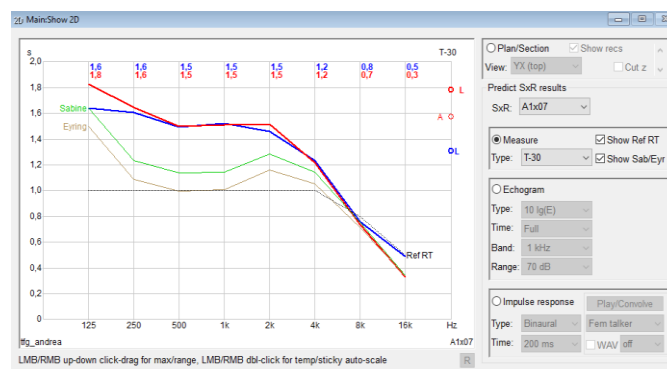


Ilustración 33: Gráfica de T30 en el receptor 7 fuente 2

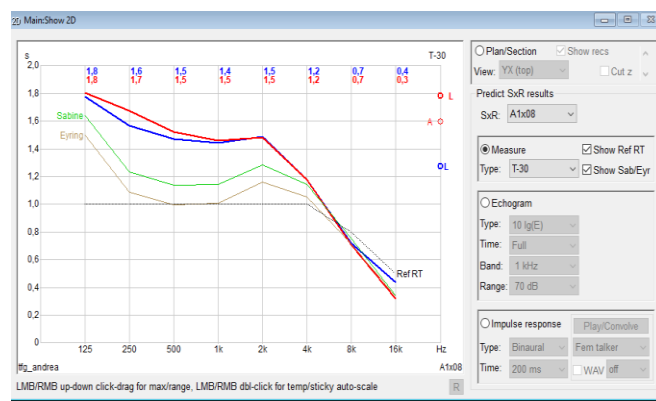


Ilustración 34: Gráfica de T30 en el receptor 8 fuente 2

Las imágenes de los otros receptores (sonómetros) se muestran en el **anexo VI**.

3.3.2.1.4 Medición y toma de resultados del tiempo de reverberación

T30 fuente 1						
posición del sonómetro	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
P01	2,00	1,90	1,70	1,65	1,50	1,20
P02	1,90	1,70	1,65	1,45	1,50	1,15
P03	1,80	1,80	1,50	1,45	1,50	1,20
P04	1,80	1,70	1,50	1,50	1,50	1,20
P05	1,75	1,70	1,55	1,50	1,50	1,20
P06	1,80	1,70	1,60	1,45	1,50	1,20
Promedio	1,84	1,75	1,58	1,50	1,50	1,19

Tabla 16 Tabla de valores de T30 Fuente 1

T30 fuente 2						
posición del sonómetro	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
P01	1,80	1,60	1,50	1,45	1,50	1,20
P02	1,70	1,60	1,50	1,50	1,50	1,20
P03	1,80	1,65	1,50	1,45	1,50	1,20
P04	1,80	1,60	1,50	1,50	1,40	1,20
P05	1,70	1,55	1,35	1,40	1,40	1,10
P06	1,80	1,70	1,55	1,60	1,50	1,20
Promedio	1,77	1,62	1,48	1,48	1,47	1,18

Tabla 17 Tabla de valores de T30 Fuente 2

MEDIA	1,80	1,68	1,53	1,49	1,48	1,19
-------	------	------	------	------	------	------

Tabla 18 Tabla de valores medios de T30

Resultados TRmid con los valores de T30

$$TR_{mid} = \frac{TR_{500Hz} + TR_{1000Hz}}{2} = \frac{1.53 + 1.49}{2} = 1.51s$$

Ecuación 18: Cálculo del Trmid con los datos de la simulación en CATT acustics del T30

Como se observa el resultado da acorde a los datos de la tabla de referencia para salas mayores a 350m³ exactamente los de una sala polivalente (1,2-1,5). Aunque el valor está justo en el último valor de esta escala, por lo que puede que el sonido persista más tiempo del deseado y dificulte un poco la comprensión de la palabra.

3.3.2.1.4 Brillo y Calidez:

Ahora se calculan dos parámetros importantes que se pueden obtener con los datos del T30 que arrojó la simulación. Se empezará por el brillo:

$$Br = \frac{TR_{2KHz} + TR_{4KHz}}{TR_{500Hz} + TR_{1KHz}} = \frac{1.48 + 1.19}{1.53 + 1.49} = 0.88 \approx 0.9$$

Ecuación 19: Cálculo del brillo Br con los datos de T30 obtenidos de la simulación

Se recomienda que este parámetro sea mayor a 0.87, por lo que en este caso se cumple con un buen valor de brillo en la sala, por una diferencia mínima. Por lo tanto, este es un valor que se puede mejorar. Ahora se calcula la calidez con la siguiente ecuación:

$$BR = \frac{TR_{125Hz} + TR_{250Hz}}{TR_{500Hz} + TR_{1KHz}} = \frac{1.80 + 1.68}{1.53 + 1.49} = 1.15 \approx 1.2$$

Ecuación 20: Cálculo de la calidez BR con los datos de T30 obtenidos de la simulación

Como se observa en la sección de marco teórico estos datos están dentro de lo deseado (1.1 a 1.45) para que el sonido de la voz sea óptimo en este tipo de salas. Pasa con este parámetro lo mismo que con el brillo, al estar dentro del margen por muy poca diferencia este parámetro se tendrá en cuenta para las propuestas de mejora.

3.3.2.2 Parámetro de claridad de voz

Este parámetro compara la energía acústica en las reflexiones tempranas con las que llegan posteriormente. En las siguientes imágenes se observa la simulación de este parámetro.

3.3.2.2.1 Gráficas simulación de la claridad de la voz

Fuente 1

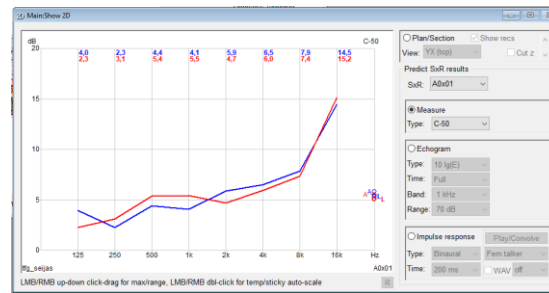


Ilustración 35: Gráfica de C50 en el receptor 1 fuente 1

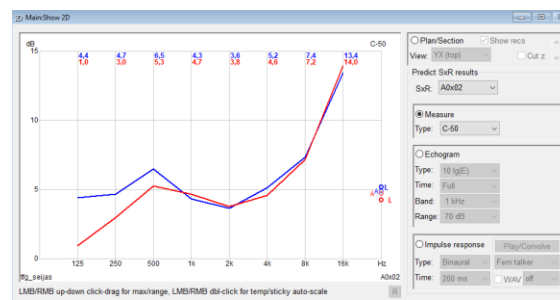


Ilustración 36: Gráfica de C50 en el receptor 2 fuente 1

Fuente 2

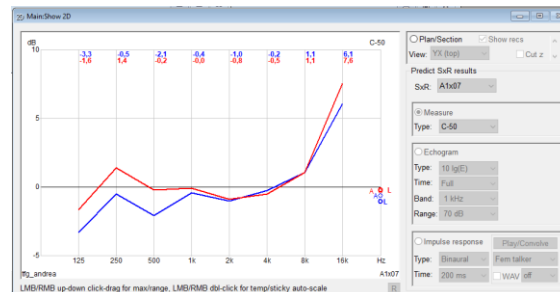


Ilustración 37: Gráfica de C50 en el receptor 1 fuente 2

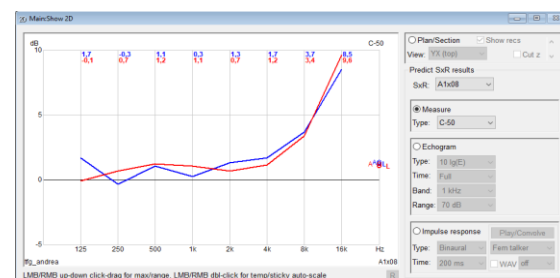


Ilustración 38: Gráfica de C50 en el receptor 2 fuente 2

3.3.2.1.4 Medición y toma de resultados de la claridad de voz

Una vez se tienen las seis gráficas de simulación, para obtener el valor total del C50 se debe realizar las medias de los resultados.

C50 fuente 1						
posición del sonómetro	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
P01	4,00	2,30	4,40	4,10	5,90	6,50
P02	4,40	4,70	6,50	4,30	3,60	5,20
P03	-0,30	-0,90	-1,00	-1,00	-0,60	1,00
P04	0,60	1,10	-2,20	0,30	-1,10	1,00
P05	-4,30	-2,00	-1,50	-0,10	-0,50	0,20
P06	-1,90	2,10	0,00	1,70	0,30	1,40
Promedio	0,42	1,22	1,03	1,55	1,27	2,55

Tabla 19: Tabla de valores medidos y su promedio C50 fuente 1

C50 fuente 2						
posición del sonómetro	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
P01	-3,30	-0,50	-2,10	-0,40	-1,00	-0,20
P02	1,70	-0,30	1,10	0,30	1,30	1,70
P03	2,90	3,00	5,40	5,80	5,80	5,20
P04	6,10	7,40	5,50	5,20	6,00	5,30
P05	11,10	10,40	8,70	6,50	8,30	8,40
P06	0,1	1,1	2,4	0,2	1,8	1,6
promedio	3,10	3,52	3,50	2,93	3,70	3,67

Tabla 20 : Tabla de valores medidos y su promedio C50 fuente 2

MEDIA	1,76	2,37	2,27	2,24	2,48	3,11
GLOBAL	3,11					

Tabla 21: Tabla de media por banda y media global C50 fuente 1 y 2

En esta tabla están los valores medios por banda de frecuencia. La media global de C50 sería 3.11, este valor se obtiene haciendo la media de los resultados de la fila Media teniendo en cuenta que al tratarse de dB se realiza mediante logaritmos y exponentes. Según la tabla de

la tabla 4 el nivel de C50, al estar entre 2dB y 12dB, la claridad de la voz está en el rango recomendado para una buena inteligibilidad de la palabra.

3.3.2.3 Parámetro de Definición

Este parámetro define la razón de energía recibida en los primeros 50 ms y la energía total recibida. En las siguientes imágenes se observa la simulación de este parámetro.

3.3.2.2.1 Graficas de simulación de la definición

Fuente 1:

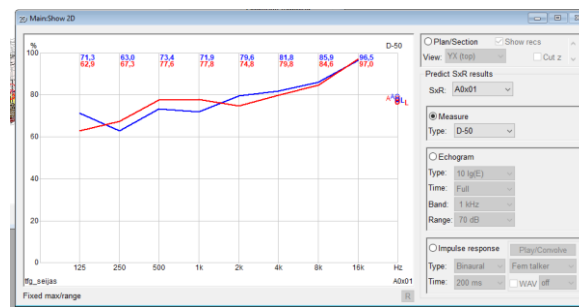


Ilustración 39: Gráfica de D50 en el receptor 1 fuente 1

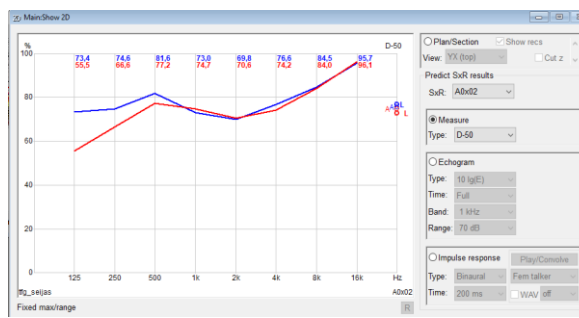


Ilustración 40: Gráfica de D50 en el receptor 2 fuente 1

3.3.2.1.4 Medición y toma de resultados de la definición

Una vez se tienen las dos gráficas de simulación, para obtener el valor total del D50 se debe realizar las medias de ambos resultados:

D50 fuente 1						
posición del sonómetro	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
P01	71,30	63,00	73,40	71,90	79,60	81,80
P02	73,40	74,60	81,60	73,00	69,80	76,60
P03	48,30	44,80	44,00	44,10	46,80	55,90
P04	53,30	56,10	37,60	51,50	43,80	55,90
P05	27,10	38,60	41,20	49,20	47,10	50,90
P06	39,10	62,10	49,80	59,80	51,80	58,00
Promedio	52,08	56,53	54,60	58,25	56,48	63,18

Tabla 22: Tabla de valores por banda de frecuencia y su promedio del D 50 fuente 1

D50 fuente 2						
posición del sonómetro	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
P01	31,90	47,30	38,30	47,70	44,40	48,60
P02	59,80	48,10	56,30	51,60	57,50	59,80
P03	66,10	66,50	77,70	79,30	79,00	76,60
P04	80,30	84,50	78,10	76,90	79,80	77,20
P05	92,8	91,6	88,2	81,6	87,1	87,4
P06	50,80	56,40	63,40	51,40	60,40	58,90
Promedio	63,62	65,73	67,00	64,75	68,03	68,08

Tabla 23: Tabla de valores por banda de frecuencia y su promedio del D 50 fuente 2

MEDIA	57,85	61,13	60,80	61,50	62,26	65,63
--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

Tabla 24: Tabla de la media de los valores por bandas de tercio de octava D50

GLOBAL	0,62
---------------	-------------

Tabla 25: Tabla Valor global medio de D50

En esta tabla están los valores medios por banda de frecuencia. Estos valores están expresados en porcentaje, por lo que para el resultado final se dividirá entre 100. La media

Fuente 2

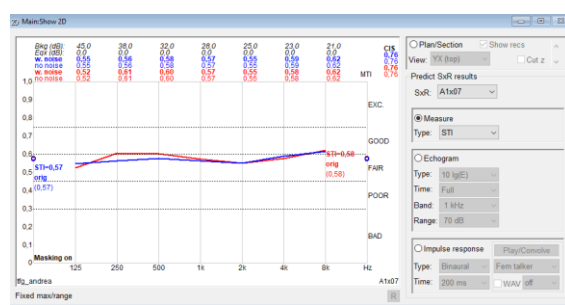


Ilustración 43: Gráfica de STI en el receptor 1 fuente 2

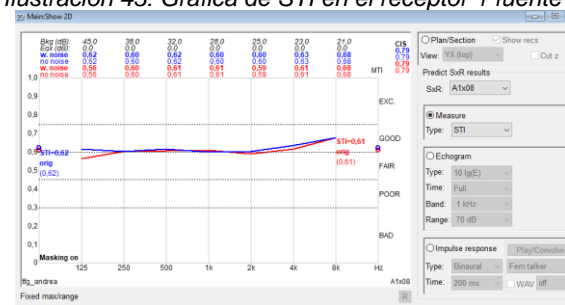


Ilustración 44: Gráfica de STI en el receptor 2 fuente 2

3.3.2.4.2 Medición y toma de resultados del Speech Transmission Index:

Para obtener el valor del STI se debe realizar las medias de los resultados, Se puede ver ya por las gráficas que la mayoría de los valores oscilan entre “bueno” y “excelente”.

STI Fuente 1						
posición del sonómetro	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
P01	0,65	0,61	0,65	0,65	0,69	0,72
P02	0,67	0,66	0,70	0,66	0,64	0,69
P03	0,56	0,55	0,56	0,56	0,56	0,61
P04	0,60	0,60	0,58	0,61	0,56	0,62
P05	0,52	0,52	0,64	0,57	0,59	0,60
P06	0,53	0,64	0,61	0,61	0,58	0,62
promedio	0,59	0,60	0,62	0,61	0,60	0,64

Tabla 26: Valores y promedio STI Fuente 1 simulación

STI fuente 2						
posición del sonómetro	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
P01	0,55	0,56	0,58	0,57	0,55	0,59
P02	0,62	0,60	0,62	0,60	0,60	0,60
P03	0,62	0,64	0,70	0,71	0,70	0,71
P04	0,72	0,72	0,72	0,71	0,70	0,68
P05	0,83	0,79	0,75	0,69	0,75	0,73
P06	0,58	0,58	0,63	0,6	0,61	0,62
Promedio	0,65	0,65	0,67	0,65	0,65	0,66

Tabla 27: Valores y promedio STI Fuente 2 simulación

MEDIA	0,62	0,62	0,65	0,63	0,63	0,65
-------	------	------	------	------	------	------

Tabla 28 : Valores promedio STI Fuente 1y 2 simulación

GLOBAL	0,63
--------	------

Tabla 29: media global STI

En esta tabla están los valores medios por banda de frecuencia. La media global del STI sería **0.63**, este valor se obtiene haciendo la media de los resultados de la fila *Media*. Según la tabla de la Tabla 11 el nivel de STI, al ser menor a 0.65, no sería adecuado para la comprensión del habla en el Aula Magna. Aunque hay que tener en cuenta que la diferencia de valores no es muy grande.

Y si se observa la tabla 4 indica una buena inteligibilidad va desde 0.6 a 0.75, por lo que en ese caso nuestra sala entra en este parámetro mas no en el de excelente.

4. Propuestas de mejora

En este apartado se detalla las propuestas de mejora acústica para el Aula Magna de la Escuela Politécnica Superior de Gandía, cuyas características actuales presentan retos específicos para cumplir con los estándares acústicos deseados en una sala polivalente. A continuación, se analizó los problemas identificados y con ello propuse las posibles soluciones.

4.1 Diagnóstico basado en resultados

A partir de las mediciones realizadas, se han obtenido los siguientes parámetros acústicos:

- ❖ **TRmid** :1.51 s según valores T30, lo cual está al límite al rango recomendado (1.2s a 1.5 s) para salas polivalentes de este volumen (>350 m³).
- ❖ **Brillo y calidez**: dentro de los rangos aceptables.
- ❖ **Claridad de la voz C50**: 3.11 dB, lo que indica una claridad moderada, aunque mejorable para eventos basados en el habla, siendo el valor deseable ≥ 4 dB.
- ❖ **Definición de la palabra D50**: 0.62. Este valor es aceptable, pero puede mejorarse para optimizar la inteligibilidad.
- ❖ **STI**: 0.63, situado en el límite inferior de lo aceptable para actividades habladas.

Los resultados muestran una reverberación un poco excesiva y una claridad e inteligibilidad aceptable, pero no 100% optima

4.2 Propuestas de Mejora

Para reducir el tiempo de reverberación (TRmid) y adaptarlo al rango deseado de 1.2s a 1.5s, se propone la instalación de materiales absorbentes. Entre estos, se sugiere la colocación de paneles absorbentes en paredes y techo, utilizando materiales como fibra de vidrio recubierta o paneles de espuma acústica de alta densidad, que son efectivos para absorber frecuencias medias y altas.

Además, se pueden incorporar cortinas acústicas gruesas y pesadas en la tarima para aumentar la absorción en frecuencias medias y bajas.

En cuanto a la mejora de la claridad del habla (C50 y D50), se sugiere el uso de difusores acústicos en las paredes traseras o en zonas estratégicas donde las reflexiones puedan causar ecos molestos.

También se recomienda rediseñar el sistema de audio, verificando la posición y el número de altavoces para garantizar una distribución uniforme del sonido. La implementación de un sistema de refuerzo sonoro con ecualización ajustada a las características específicas de la sala será esencia, Esta propuesta de rediseño del sistema de audio se encontrará de manera más detallada en otro Trabajo Fin de Grado que se realiza de forma paralela Ferruz, P. (2024). Diseño e implementación de un sistema electroacústico de varias vías para la reproducción de cortos en el Aula Magna de la Escuela Politècnica Superior de Gandía (Trabajo de Fin de Grado). Universitat Politècnica de València [32]. El sistema de sonido debe incluir micrófonos de calidad y altavoces estratégicamente ubicados, distribuidos uniformemente para cubrir a toda la audiencia sin crear zonas de sombra o puntos de excesiva intensidad sonora.

Para incrementar el STI hacia valores superiores a 0.65, se debe controlar el ruido de fondo mediante un aislamiento acústico adecuado que minimice los ruidos externos. Además, los paneles absorbentes y los difusores anteriormente mencionados, combinados con un sistema de refuerzo sonoro bien calibrado, contribuirán significativamente a este parámetro.

La implementación de estas propuestas permitirá ajustar los parámetros acústicos de la sala a los valores recomendados para una sala polivalente, mejorando tanto la inteligibilidad del habla como la calidad sonora general. Estas intervenciones garantizarán un uso más versátil del aula magna, adaptándose a sus múltiples funciones.

5. Conclusiones

Este estudio ha analizado las características acústicas del Aula Magna de la Escuela Politécnica Superior de Gandia de la UPV (EPSG), proponiendo acciones de mejora para su acondicionamiento acústico. Se han llevado a cabo mediciones in situ del tiempo de reverberación y simulaciones utilizando el software CATT Acoustics, comparando los resultados obtenidos con los parámetros de calidad acústica que se han considerado adecuados para el uso habitual del Aula Magna.

Los resultados de las mediciones y simulaciones revelaron que convenía ajustar los parámetros acústicos del Aula Magna: el tiempo de reverberación, la claridad de la palabra y la inteligibilidad del habla. Las desviaciones identificadas se deben principalmente a la estructura y los materiales actuales del Aula Magna.

Para mejorar los parámetros de calidad se propusieron varias soluciones y estrategias de diseño acústico. Estas incluyen la implementación de materiales con mejores propiedades de absorción acústica, la reconfiguración del espacio para mejorar la difusión sonora y la incorporación de tratamientos acústicos específicos en las superficies más problemáticas. Las simulaciones realizadas con estas propuestas mostraron una mejora significativa en los parámetros acústicos, acercándose a los valores recomendados por la normativa.

En conclusión, el Aula Magna de la EPSG requiere un acondicionamiento acústico para cumplir con los estándares necesarios para su uso como espacio educativo, recreativo, cultural y de conferencias.

Considerar el confort acústico es esencial para el éxito de cualquier espacio destinado a varias tareas tan variadas, y este estudio proporciona una base sólida para futuras mejoras y estudios en el campo del acondicionamiento acústico. Además de destacar la importancia de considerar un buen diseño acústico en la planificación y en el proceso de construir una sala.

Bibliografía

1. *Sonido: definición, cómo se produce y características*. (s/f). Recuperado el 28 de noviembre de 2024, de <https://humanidades.com/sonido/>
2. ESERO (European Space Education Resource Office) Spain. (s/f). *Longitud de Onda y Frecuencia*. Esero.es. Recuperado el 28 de noviembre de 2024, de https://esero.es/practicas-en-abierto/decodifica-imagenes-iss/longitud_de_onda_y_frecuencia.html
3. *Fenómenos Físicos que Configuran la Propagación del Sonido*. (2023, octubre 3). Diseño Sonoro. <https://disenosonoro.com/fenomenos-fisicos-que-configuran-la-propagacion-del-sonido/>
4. *Reflexión, absorción y difusión acústica - Definición y tratamiento*. (2020, enero 29). SPIGOGROUP. <https://www.spigogroup.com/reflexion-difusion-absorcion-acustica/>
5. (S/f-c). Wikipedia.org. Recuperado el 1 de diciembre de 2024, de https://es.wikipedia.org/wiki/Reflexi%C3%B3n_%28sonido%29
6. *EL FÍSICO LOCO*. (s/f). Blogspot.com. Recuperado el 28 de noviembre de 2024, de https://elfisicoloco.blogspot.com/2013/02/difraccion_5.html
7. Chloé. (2022, mayo 26). *Guía para tratar la absorción acústica de los espacios [importancia, materiales y consejos]*. Woodslines. <https://woodslines.com/es/guia-absorcion-acustica/>
8. de Acondicionamiento Acústico, C. (s/f). *Guía para el diseño de Auditorios*. Arauacustica.com. Recuperado el 28 de noviembre de 2024, de https://www.arauacustica.com/files/publicaciones_relacionados/pdf_esp_351.pdf
9. ▷ *Principales problemas acústicos de una sala*. (2018, marzo 12). Ingenieria Musical. <https://ingenieriamusical.net/acustica-musical/los-tres-problemas-acusticos-de-tu-sala/>
10. *Área de absorción acústica equivalente*. (2021, diciembre 14). Urbipedia. https://www.urbipedia.org/hoja/%C3%81rea_de_absorci%C3%B3n_ac%C3%B3stica_equivalente
11. *Guía Completa de Acústica Básica para Auditorios: Diseño, Soluciones y Mantenimiento*. (2024, mayo 23). *Sonido para Auditorios*. <https://sonidoauditorios.com/acustica-basica-para-auditorios/>
12. *-Acústica de Salas*. (s/f). Cirrusresearch.es. Recuperado el 28 de noviembre de 2024, de <https://www.cirrusresearch.es/aplicaciones/acustica-de-salas>
13. *Acústica de salas*. (2022, mayo 13). AACUSTICA. <https://aacustica.com/acustica-de-salas/>

14. López, P. (2019, agosto 24). *Calcula el TR o tiempo de reverberación de la cabina de radio*. Liberaturadio. <https://liberaturadio.org/calcula-el-rt60-tiempo-reverberacion/>
15. Calero, I. (2024, mayo 17). *¿Qué es el Tiempo de Reverberación?* GROUPE BOËT. <https://www.groupe-boet.com/es/que-es-el-tiempo-de-reverberacion/>
16. ¿Qué es el tiempo de reverberación y cómo se calcula? (2018, abril 19). *Cirrus Research*. <https://cirrusresearch.com/es/que-es-el-tiempo-de-reverberacion-y-como-se-calcula/>
17. tecno-spuma. (2013, enero 13). *Tiempo de reverberación - normativa*. Sontect. <https://www.sontect.com/tiempo-de-reverberacion-normativa>
18. de la Hoz, M. L. (s/f). *Introducción*. Ugr.es. Recuperado el 28 de noviembre de 2024, de https://www.ugr.es/~mlhoz/Acustica_3/page_01.htm
19. tecno-spuma. (2013, enero 13). *Tiempo de reverberación - normativa*. Sontect. <https://www.sontect.com/tiempo-de-reverberacion-normativa>
20. De las instalaciones, 2. 1. Aislamiento Acústico 2. 2. Acondicionamiento Acústico 2. 3. Ruido y. Vibración. (s/f). *DB HR Protección frente al ruido*. Codigotecnico.org. Recuperado el 28 de noviembre de 2024, de https://www.codigotecnico.org/pdf/DocAdicionales/GuiaHR/05_Capitulo2_2_Acondicionamiento_acustico.pdf
21. (S/f-a). Studio-22.com. Recuperado el 28 de noviembre de 2024, de <https://www.studio-22.com/blog/enciclopedia/indice-de-claridad>
22. (S/f-c). Wordpress.com. Recuperado el 28 de noviembre de 2024, de <https://climacusticaparaarquitectos.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/08/parametros-de-acustica.pdf>
23. de la Voz, I. E. (2017). *Física del sonido, percepción y canto*. Sottovoce. <https://doi.org/10.58079/UHPT>
24. UNE-EN ISO 3382-1:2008, Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios, (S/f). Une.org. Recuperado el 1 de julio de 2024, de <https://une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0053180>
25. Norma IEC 61260, (S/f). Une.org. Recuperado el 1 de julio de 2024, de <https://une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0053180>
26. UNE-EN ISO 717-2:2021, Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 2: Aislamiento a ruido de impactos, (S/f). Une.org. Recuperado el 1 de julio de 2024, de <https://une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0053180>
27. (S/f-b). Codigotecnico.org. Recuperado el 1 de diciembre de 2024, de <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HR/DBHR.pdf>

28. Decoratel. (2020, diciembre 14). *La influencia de la meteorología en los auditorios al aire libre*. Fabricante de telones para teatros. <https://www.decoratel.com/2020/12/14/la-influencia-de-la-meteorologia-en-los-auditorios-al-aire-libre/>
29. (S/f-b). Acdacustics.com. Recuperado el 28 de noviembre de 2024, de <https://www.acdacustics.com/files/conceptos.pdf>
30. Dalenbäck, B. (s. f.). *CATT-Acoustic / The FIRverb Suite / ReflPhinder / GratisVolver Pro*. <https://www.catt.se/>
31. UNE-EN ISO 3382-1:2010 Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos. (ISO 3382-1:2009), (S/f). Une.org. Recuperado el 1 de julio de 2024, de <https://une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0053180>
32. Ferruz, P. (2024). Diseño e implementación de un sistema electroacústico de varias vías para la reproducción de cortos en el Aula Magna de la Escuela Politècnica Superior de Gandía (Trabajo de Fin de Grado). Universitat Politècnica de València.



**ANEXO I. Relación del trabajo
con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030**

Anexo al Trabajo de Fin de Grado y Trabajo de Fin de Máster
Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030

Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No procede
ODS 1. Fin de la pobreza				X
ODS 2. Hambre cero				x
ODS 3. Salud y bienestar		x		
ODS 4. Educación de calidad	x			
ODS 5. Igualdad de género				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento				x
ODS 7. Energía asequible y no contaminante				
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico				x
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras	x			
ODS 10. Reducción de las desigualdades				x
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles				x
ODS 12. Producción y consumo responsables				x
ODS 13. Acción por el clima				x
ODS 14. Vida submarina				x
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres				x
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas				x
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos				x

Descripción de la alineación del TFG/TFM con los ODS con un grado de relación más alto



ODS 3 de Salud y bienestar: El acondicionamiento acústico de una sala, en este caso el Aula Magna, permite ajustar el sonido a niveles que no solo cumplen con condiciones acústicas ideales, sino también a niveles de sonido adecuados para una experiencia educativa y/o de entretenimiento saludable. Este enfoque asegura que no haya estrés, sobreexposición al ruido, ni a sonidos altos o de poca claridad, promoviendo así un entorno saludable y cómodo para todos los usuarios.

ODS 4 Educación de calidad: El Aula Magna, siendo una sala polivalente, se utiliza para una variedad de actividades, incluyendo eventos académicos y educativos. Al mejorar la acústica y las condiciones acústicas del espacio, se facilita que estas actividades se realicen con mayor efectividad y calidad. Un entorno acústicamente adecuado es crucial para el aprendizaje y la enseñanza, garantizando que la información se transmita de manera clara y efectiva.

ODS 9 Industria, Innovación e Infraestructura Con estos trabajos de acondicionamiento acústico, buscamos mejorar la infraestructura de nuestra universidad e innovar en la creación de espacios óptimos. Estas mejoras son esenciales para el desarrollo continuo y la modernización de nuestras instalaciones, asegurando que estén a la vanguardia y respondan a las necesidades actuales de nuestros estudiantes y personal.