

**ESCUELA DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA**



**TRABAJO FIN DE GRADO**

**MEDIDA DE LA RESPUESTA BINAURAL AL  
IMPULSO EN ESPACIOS ACÚSTICOS DE  
INTERIOR CON APLICACIÓN A SU AURALIZACIÓN**

**Titulación: Grado en Ingeniería en Tecnologías  
de la Telecomunicación**

**Autor: José Antonio Benítez Quevedo**

**Tutor: Dr. Eduardo Hernández Pérez**

**Fecha: Diciembre 2014**



## ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA



### TRABAJO FIN DE GRADO

### MEDIDA DE LA RESPUESTA BINAURAL AL IMPULSO EN ESPACIOS ACÚSTICOS DE INTERIOR CON APLICACIÓN A SU AURALIZACIÓN

### HOJA DE FIRMAS

**Alumno/a**

**Tutor/a**

Fdo.: José Antonio Benítez Quevedo

Fdo.: Eduardo Hernández Pérez

**Fecha: Diciembre 2014**



## ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN Y ELECTRÓNICA



### TRABAJO FIN DE GRADO

### MEDIDA DE LA RESPUESTA BINAURAL AL IMPULSO EN ESPACIOS ACÚSTICOS DE INTERIOR CON APLICACIÓN A SU AURALIZACIÓN

### HOJA DE EVALUACIÓN

Calificación: \_\_\_\_\_

**Presidente**

Fdo.:

**Vocal**

**Secretario/a**

Fdo.:

**Fecha: Diciembre 2014**

Fdo.:



*Dedicado a la memoria de mi padre,  
Juan Lorenzo (1934 - 2014).  
Este trabajo es el fruto de su esfuerzo y sacrificio  
por darme los estudios que él no pudo tener.*



## Agradecimientos

Las primeras palabras de gratitud que quiero expresar son para mi tutor de este trabajo, Eduardo Hernández, que no sólo ha ejercido las labores inherentes de ayuda y orientación académica, sino que ha sido un apoyo fundamental en los momentos de estrés o decaimiento. También quiero agradecer al director de la EITE, Juan Luis Navarro, su predisposición a solucionar todos los obstáculos que me he encontrado durante la realización del trabajo y su esfuerzo porque pudiera presentarlo a tiempo, aunque al final no pudiera ser.

En cuanto a mis amigos, a ellos les tengo que agradecer los momentos que hemos compartido desde que nos conocimos el primer año de universidad y que han hecho más llevadero el duro camino que supone siempre hacer una carrera:

Gracias a Tarahis Fernández, por conseguir siempre arrancarme una sonrisa incluso en los momentos más duros.

Gracias a Alejandro Ruiz, porque a pesar de la distancia, siempre es la primera persona de quien recibo una llamada o un mensaje para interesarse por mí.

Gracias a Fran Bollo, por ser la persona más valiente que conozco y demostrarnos a todos que hay que perseguir los sueños por mucho que nos cueste.

Gracias a Ismael Barreto, por todas las risas y confianzas que hemos vivido juntos y por las que nos quedan todavía por vivir.

Y, sobre todo, gracias a Luis Pellicer, por haberme demostrado ser un verdadero amigo y por haber sido el bastón en el que me he podido apoyar en los momentos más difíciles. Contigo aprendo cada día a ser una persona más crítica y un mejor ingeniero.

En el ámbito familiar, tengo que dar las gracias a mi hermano Juan Fernando, por haber asumido las riendas económicas de la casa para que yo pudiera concentrarme en los estudios y a mi madre que, a pesar de los momentos de malas notas y de tener que pagar incrementos de matrícula, siempre me ha apoyado para que terminase la carrera.

Mis últimas palabras de agradecimiento son para la persona a la que está dedicado este trabajo, mi padre, que desgraciadamente nos dejó antes de que pudiera concluir el proyecto. Él fue junto con mi madre los que me motivaron a entrar en la universidad, ya que al principio yo no lo tenía muy claro. Siempre creyó en mí y nunca dudó en ayudarme económicamente en todo lo que emprendí. Por eso sé que él se habría sentido muy feliz de verme terminar mis estudios de grado.

Mil gracias papá por los valores que me has inculcado y por el cariño que me has dado durante toda mi vida. Pienso en ti todos los días y te recordaré siempre.



## ÍNDICE

### CAPÍTULO 1:

<b>INTRODUCCIÓN AL TRABAJO FIN DE GRADO</b> .....	15
1.1.- Objetivos .....	16
1.2.- Competencias de la titulación abordadas en el Trabajo Fin de Grado .....	16
1.3.- Antecedentes al Trabajo de Fin de Grado .....	18
1.4.- Estructura y resumen de los capítulos .....	18

### CAPÍTULO 2:

<b>EL CAMPO SONORO EN EL INTERIOR DE UN RECINTO</b> .....	21
2.1.- Propagación del sonido en un recinto cerrado .....	21
2.2.- Sonido reflejado .....	21
2.3.- Estudio de las primeras reflexiones. Acústica geométrica .....	22
2.3.2.- Eco flotante .....	25
2.4.- Modos propios de una sala. Acústica ondulatoria .....	25
2.5.- Balance energético sonoro.....	27
2.6.- Campo directo y campo reverberante. Nivel total de presión sonora .....	28
2.7.- Tiempo de reverberación .....	30
2.7.1.- Valores recomendados del tiempo de reverberación .....	31
2.7.2.- Cálculo del tiempo de reverberación .....	31
2.7.3.- Medida del tiempo de reverberación.....	33

### CAPÍTULO 3:

<b>AURALIZACIÓN</b> .....	35
3.1.- Fundamentos de la auralización.....	35
3.2.- Técnicas de convolución.....	37
3.2.1.- Convolución discreta .....	37
3.3.- Usos profesionales de la auralización .....	39
3.4.- Metodología empleada para la auralización práctica de los recintos .....	41

### CAPÍTULO 4:

<b>MEDIDA DE LA RESPUESTA AL IMPULSO DE ESPACIOS ACÚSTICOS</b> .....	43
4.1.- Técnicas básicas de medida en la acústica de recintos .....	43
4.1.1.- Señales pseudoimpulsivas.....	44
4.1.3.- Señales pseudoaleatorias.....	45
4.1.4.- Barridos en frecuencia .....	46
4.2.- Señales usadas para la excitación de los recintos .....	48

### CAPÍTULO 5:

<b>SISTEMAS PARA LA MEDIDA DE LA RESPUESTA BINAURAL</b> .....	51
5.1.- Equipo de medidas de campo .....	51
5.2.- Equipo de medidas para simulación binaural .....	52

**CAPÍTULO 6:**

<b>MEDIDAS PRÁCTICAS DE LAS RESPUESTAS AL IMPULSO EN LOS RECINTOS</b> .....	55
6.1.- Metodología para calcular los parámetros acústicos .....	55
6.2.- Datos y resultados obtenidos de los recintos .....	60
6.2.1.- SALÓN DE ACTOS DE LA EITE DE LA ULPGC.....	61
6.2.2.- SALÓN DE ACTOS DE LA EIIC DE LA ULPGC .....	66
6.2.3.- SALÓN DE ACTOS DE LA EA DE LA ULPGC .....	71
6.2.4.- SALA DE CONFERENCIAS DEL ISTIC .....	76
6.2.5.- AULA MAGNA DEL ISTIC.....	81
6.3.- Resultados finales .....	86
6.4.- Medidas de simulación .....	86
6.4.1.- Metodología.....	86
6.4.2.- Salón de Actos de la EITE de la ULPGC.....	87
6.4.3.- Salón de Actos de la EA de la ULPGC .....	88
6.4.4.- Aula Magna del ISTIC .....	88

**CAPÍTULO 7:**

<b>AURALIZACIÓN PRÁCTICA DE LOS ESPACIOS ACÚSTICOS</b> .....	89
7.1.- Procesado de las respuestas binaurales al impulso .....	89
7.1.1.- Promediado de las tres medidas en cada posición de micrófono .....	90
7.1.2.- Análisis de las primeras reflexiones de la RIR .....	90
7.1.3.- Extracción del sonido directo por separado .....	93
7.1.4.- Extracción de las primeras reflexiones por separado .....	94
7.1.5.- Obtención de una cola reverberante única para cada recinto .....	95
7.2.- Evaluación de los resultados obtenidos en el procesado .....	96
7.2.1.- Comparación de las BRIR sintetizadas con las BRIR medidas .....	96
7.2.1.- Tests de audición de las BRIR.....	99
7.3.- Técnica de interpolación empleada para los puntos no medidos .....	100
7.4.- Interfaz gráfica de usuario .....	102
7.4.1.- Pantalla de bienvenida (auryn.m).....	103
7.4.2.- Pantalla de selección del recinto (elegir_recinto.m) .....	104
7.4.3.- Pantalla de auralización del recinto (aura_recinto.m).....	104
7.4.4.- Pantalla de ayuda de la aplicación (ayuda.m).....	106

**CAPÍTULO 8:**

<b>CONCLUSIONES</b> .....	109
8.1.- Conclusiones obtenidas .....	109
8.2.- Mejoras y líneas de ampliación.....	110

**CAPÍTULO 9:**

<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	111
---------------------------	-----

**CAPÍTULO 10:**

<b>PLIEGO DE CONDICIONES</b> .....	113
------------------------------------	-----



10.1.- Introducción .....	113
10.2.- Norma UNE-EN ISO 3382-2 .....	113
10.2.1.- Objeto y campo de aplicación .....	113
10.2.2.- Posiciones de medida de la fuente sonora.....	113
10.2.3.- Posiciones de medida del micrófono .....	114
10.3.- Licencia del software.....	114
10.3.1.- Concesión de licencia .....	114
10.3.2.- Derechos de autor .....	115
10.3.3.- Restricciones .....	115
10.3.4.- Limitación de responsabilidad.....	115
10.3.5.- Varios.....	115
10.4.- Aparatos de medida .....	115
10.4.1.- Medidor de Nivel Sonoro RION modelo NL-18 .....	116
10.4.2.- Micrófono Behringer ECM8000.....	117
10.4.3.- Calibrador Brüel & Kjaer modelo 4231.....	117
10.4.4.- Sistema inalámbrico SHURE EP2TRE215 .....	118
10.4.5.- Interfaz de audio AKAI EIE pro .....	118
10.4.6.- Amplificador AP600.....	119
10.4.7.- Altavoz omnidireccional BP012 .....	120
10.4.8.- PC netbook ASUS Eee PC 1015PD .....	120
10.4.9.- PC portátil HP Pavilion g6-2356ss.....	121
10.5.- Montaje realizado .....	121
10.6.- Software Dirac .....	122
10.7.- Software Matlab.....	126
<b>CAPÍTULO 11:</b>	
<b>PRESUPUESTO .....</b>	<b>129</b>
11.1.- Introducción .....	129
11.2.- Tiempo empleado en la realización del trabajo .....	129
11.3.- Amortización del material instrumental e informático .....	131
11.4.- Seguros.....	133
11.5.- Presupuesto final.....	133
<b>Índice de figuras.....</b>	<b>139</b>
<b>Índice de tablas .....</b>	<b>142</b>
<b>Índice de gráficas .....</b>	<b>143</b>





# CAPÍTULO 1:

## INTRODUCCIÓN AL TRABAJO FIN DE GRADO

La simulación virtual de espacios acústicos que doten de realismo a las visitas también virtuales que hoy en día se pueden realizar a través de Internet, por ejemplo auditorios, teatros, catedrales, iglesias, conventos, etc., incrementaría el realismo y por tanto la satisfacción de la experiencia inmersiva. Esto no tiene por qué quedarse exclusivamente en la virtualidad, sino que puede avivar un deseo de visitar en vivo ese lugar, asistir a alguna representación que se realice en el recinto, realizar una producción audiovisual allí, etc., luego ese valor añadido a una visita virtual podría actuar como reclamo en múltiples y variados ambientes, ya que el alcance a través de las redes es global.

La incorporación de la experiencia acústica recibe el nombre de auralización [1], que es el proceso de hacer audible, por medios físicos o modelos matemáticos, el campo sonoro de una fuente en un espacio determinado, de tal manera que se simula la escucha binaural experimentada en una posición determinada en el espacio. Sucintamente, la auralización es la convolución entre la respuesta al impulso del recinto que queremos simular y cualquier sonido anecoico. Esto puede hacerse de dos maneras: una mediante el uso de un simulador acústico de recintos (EASE, Odeon, etc.) y la otra mediante la medida y caracterización in situ.

La opción del simulador acústico pasa por el “traslado” del modelo físico recogido en los planos del recinto a la herramienta de simulación acústica, tarea no exenta de múltiples dificultades así como consumidora de un gran número de horas de personal de elevada cualificación técnica. Además, este proceso tropieza con un escollo importante: se desconoce con exactitud el comportamiento acústico de todos los materiales que recubren las paredes del recinto así como el de los distintos objetos que en él se encuentran.

Por otro lado, un recinto acústico puede modelarse como un sistema lineal cuya conducta se caracteriza a través de la respuesta al impulso [2]. Ésta contiene una descripción completa de los cambios que una señal sonora sufre cuando viaja desde la fuente al receptor (micrófono u oyente) por su camino directo más las reflexiones multitrayecto debidas a la presencia de paredes y objetos reflectantes. Luego la medida in situ (si contamos con los medios adecuados) captura el comportamiento preciso del sistema lineal (recinto acústico). A partir de ahí, aplicando las herramientas básicas de los sistemas lineales, se hace posible el procesado de señales de audio anecoicas que resultarán transformadas según la función de transferencia que, por ensayo en el propio recinto, se obtenga. Este último método resulta más inmediato que el anterior.

En la actualidad, el Laboratorio de Sonido del Departamento de Señales y Comunicaciones dispone de un sistema para medida de tiempo de reverberación monoaural que habría de configurarse para la realización de mediciones en modo binaural, diseñando y añadiendo los



elementos necesarios. Una vez realizada dicha configuración, se pretende realizar el estudio de recintos con características acústicas diferentes para obtener patrones de comportamiento del campo acústico que nos permitan desarrollar una pequeña base de datos con la clasificación tipológica de cada uno. Además, dada la importancia de la respuesta binaural al impulso a los estímulos percibidos en los espacios cerrados [2] [12], estas medidas se realizarán considerando dos canales. Por último, se diseñará una interfaz gráfica en Matlab para poder realizar la simulación de los recintos desde cualquier ordenador.

## 1.1.- Objetivos

El presente Trabajo Fin de Grado (TFG) engloba los siguientes objetivos:

1.- Puesta a punto y calibración de un sistema de medida de la respuesta binaural al impulso.

2.- Caracterización práctica de la respuesta impulsiva de varios recintos con distintos niveles de absorción acústica, empleando dos tipos de señal excitación.

3.- Obtener un patrón para la respuesta binaural al impulso en cualquier ubicación del recinto considerado.

4.- Interfaz gráfica de auralización en función de la respuesta binaural al impulso para distintos recintos en cualquier localización.

## 1.2.- Competencias de la titulación abordadas en el Trabajo Fin de Grado

- COMPETENCIAS BÁSICAS Y GENERALES:

CB1 - Que los estudiantes hayan demostrado poseer y comprender conocimientos en un área de estudio que parte de la base de la educación secundaria general, y se suele encontrar a un nivel que, si bien se apoya en libros de texto avanzados, incluye también algunos aspectos que implican conocimientos procedentes de la vanguardia de su campo de estudio.

CB2 - Que los estudiantes sepan aplicar sus conocimientos a su trabajo o vocación de una forma profesional y posean las competencias que suelen demostrarse por medio de la elaboración y defensa de argumentos y la resolución de problemas dentro de su área de estudio.

CB3 - Que los estudiantes tengan la capacidad de reunir e interpretar datos relevantes (normalmente dentro de su área de estudio) para emitir juicios que incluyan una reflexión sobre temas relevantes de índole social, científica o ética.

CB4 - Que los estudiantes puedan transmitir información, ideas, problemas y soluciones a un público tanto especializado como no especializado.



CB5 - Que los estudiantes hayan desarrollado aquellas habilidades de aprendizaje necesarias para emprender estudios posteriores con un alto grado de autonomía.

CG4 - Capacidad para diseñar e implementar sistemas de adquisición y procesado de señales.

CG5 - Capacidad para diseñar, programar, verificar y usar aplicaciones en el entorno de las telecomunicaciones.

CG7 - Capacidad para comprender las características básicas del sistema fonador, las características de la voz, los sonidos musicales, la percepción del sonido, los parámetros de la señal de audio, su digitalización y codificación en distintos formatos, así como la comprensión y utilización básica de los soportes, sistemas de captación, sistemas de producción, sistemas de difusión y sistemas de reproducción sonora.

- **COMPETENCIAS TRANSVERSALES:**

CT1 - Comunicarse de forma adecuada y respetuosa con diferentes audiencias (clientes, colaboradores, promotores, agentes sociales, etc.), tanto en castellano como en inglés, utilizando los soportes y vías de comunicación más apropiados (especialmente las nuevas tecnologías de la información y la comunicación) de modo que pueda llegar a comprender los intereses, necesidades y preocupaciones de las personas y organizaciones, así como expresar claramente el sentido de la misión que tiene encomendada y la forma en que puede contribuir, con sus competencias y conocimientos profesionales, a la satisfacción de esos intereses, necesidades y preocupaciones.

- **COMPETENCIAS ESPECÍFICAS:**

CR1 - Capacidad para aprender de manera autónoma nuevos conocimientos y técnicas adecuados para la concepción, el desarrollo o la explotación de sistemas y servicios de telecomunicación.

CR2 - Capacidad de utilizar aplicaciones de comunicación e informáticas (ofimáticas, bases de datos, cálculo avanzado, gestión de proyectos, visualización, etc.) para apoyar el desarrollo y explotación de redes, servicios y aplicaciones de telecomunicación y electrónica.

CR3 - Capacidad para utilizar herramientas informáticas de búsqueda de recursos bibliográficos o de información relacionada con las telecomunicaciones y la electrónica.

CR8 – Capacidad para comprender los mecanismos de propagación y transmisión de ondas electromagnéticas y acústicas, y sus correspondientes dispositivos emisores y receptores.

CR15 – Conocimiento de la normativa y la regulación de las telecomunicaciones en los ámbitos nacional, europeo e internacional.

CESI4 - Capacidad para realizar proyectos de ingeniería acústica sobre: Aislamiento y acondicionamiento acústico de locales; Instalaciones de megafonía; Especificación, análisis y selección de transductores electroacústicos; Sistemas de medida, análisis y control de ruido y vibraciones; Acústica medioambiental; Sistemas de acústica submarina.

CTFG - Ejercicio original a realizar individualmente y presentar y defender ante un tribunal universitario, consistente en un proyecto en el ámbito de las tecnologías específicas de la Ingeniería de Telecomunicación de naturaleza profesional y en el que se sintetizan e integran las competencias adquiridas en las enseñanzas.

### 1.3.- Antecedentes al Trabajo de Fin de Grado

El concepto de auralización se introdujo por primera vez con relación al modelado acústico de las salas [1]. Ya en 1929 en Munich, Spandöck trató de procesar señales a partir de mediciones realizadas dentro de un modelo a escala, de modo que se podía escuchar la acústica de una habitación, a pesar de que la "habitación" era únicamente un modelo que se encontraba en una mesa de laboratorio.

La idea se extendió con rapidez, sin embargo, en aquellos momentos era casi imposible lograr que se pusiera en práctica. Veinte años más tarde, en 1949, comenzaron a difundirse las grabadoras de cinta magnética. Fue así que Spandöck, finalmente, presentó su sistema basado en señales ultrasónicas, maquetas y una grabadora que trabajaba a varias velocidades. Los elementos básicos ya estaban presentes en este enfoque: el procesamiento de la señal de audio y la reproducción del sonido. Los resultados en ese momento no eran comparables con las expectativas de calidad de audio que se han llegado a lograr en la actualidad, además, aparecieron algunos efectos negativos, tales como el ruido de fondo. Sin embargo, se considera como uno de los primeros experimentos que rozaban el concepto de "auralización".

Con el gran avance tecnológico de los ordenadores, el concepto de auralización fue reinventado por Schroeder al principio de la década de 1960. Fue finalmente en la década de 1990 que Mendel Kleiner, profesor e investigador de la Universidad Tecnológica de Chalmers (Göteborg, Suecia), introdujo la palabra "auralización". Hoy en día, cualquier software empleado en la simulación acústica de salas se considera incompleto sin una opción de auralización.

Las técnicas de auralización han crecido rápidamente en popularidad. Entre ellas, la auralización de aislantes acústicos se ha convertido en una herramienta indispensable para la evaluación del aislamiento acústico en edificios, especialmente para hacer llegar al cliente final la experiencia que se esconde detrás de todo el enjambre de parámetros acústicos predichos. Incrementando la interacción entre el usuario y el entorno simulado nos lleva a una evaluación del espacio sonoro mucho más realista.

Otra de las aplicaciones de la auralización sería poder experimentar cómo se escucharían los sonidos afectados por la respuesta al impulso de cualquier recinto, no de manera simulada, sino obteniendo previamente las respuestas al impulso en el recinto. Dicha aplicación, que es la que se desarrolla en este TFG, puede emplearse en páginas webs de teatros en las que el usuario, si así lo desea, puede predecir cómo escucharía la obra desde cualquier lugar destinado al público. Con anterioridad, se ha desarrollado un Proyecto Final de Carrera [8] que realizó la caracterización acústica de la Iglesia de Santo Domingo (Las Palmas de Gran Canaria), programándose también una interfaz gráfica en Matlab que realiza la auralización, aunque utilizando respuestas al impulso monoaurales.

### 1.4.- Estructura y resumen de los capítulos

La documentación del TFG está estructurada en 11 capítulos. Los nueve primeros pertenecen a la memoria, el capítulo 10 corresponde al pliego de condiciones y, por último, el capítulo 11 detalla el presupuesto calculado para este trabajo.



En este capítulo 1, “Introducción al Trabajo Fin de Grado”, se describen los objetivos del trabajo, las competencias de la titulación que se desarrollarán con él y la estructura de esta documentación.

En el capítulo 2, “El campo sonoro en el interior de un recinto”, se resumen las distintas teorías que existen para modelar la transmisión del sonido dentro de una sala y se presenta el principal parámetro para evaluar las características acústicas de un recinto: el tiempo de reverberación.

En el capítulo 3, “Auralización”, se exponen los fundamentos y técnicas de la simulación de entornos acústicos, a la vez que se comenta los principales usos prácticos de la auralización. El capítulo finalizará explicando la metodología empleada en este TFG para auralizar.

En el capítulo 4, “Medida de la respuesta al impulso de espacios acústicos”, se describen las técnicas obtenidas para obtener la función de transferencia de un recinto y se explican las principales señales que se usan para la excitación acústica de las salas, concretando por último la técnica utilizada para las medidas de este TFG.

En el capítulo 5, “Sistema para la medida de la respuesta binaural”, se comentan los equipos que se han empleado en las medidas realizadas en los recintos así como su conexionado.

En el capítulo 6, “Medidas prácticas de las respuestas al impulso en los recintos”, se presentan los resultados obtenidos en las medidas realizadas en las salas objeto de estudio de este trabajo. Para ello, se muestran las gráficas obtenidas a partir de los datos extraídos de las respuestas al impulso.

En el capítulo 7, “Auralización práctica de los recintos acústicos”, se describe todo el procesado que se realiza sobre las medidas para optimizar el proceso posterior de auralización, así como la técnica de interpolación empleada para simular los puntos que no se han medido directamente en el recinto. Por último, se mostrará y explicará la interfaz gráfica de usuario programada en Matlab para que cualquier usuario pueda realizar las auralizaciones de una forma sencilla.

En el capítulo 8, “Conclusiones”, se expondrán los logros alcanzados desde el comienzo del proyecto, además de algunas de las cosas que se podrían mejorar y en qué línea se podrían hacer.

En el capítulo 9, “Bibliografía”, se detalla todo el material documental (libros, artículos científicos y páginas web) que se ha usado para la ejecución de este TFG y la elaboración de su documentación.

En el capítulo 10, “Pliego de condiciones”, se establecen las características de los equipos a emplear en las mediciones, montaje realizado, software empleado, además de la norma utilizada para la toma de medidas.

Finalmente, en el capítulo 11, “Presupuesto”, se presenta todo el periodo de realización del proyecto desde el establecimiento de las condiciones del trabajo a realizar, con la elección de las estaciones, medidas, estudio, cálculos, simulaciones, etc., hasta los gastos derivados de la redacción de la memoria.





# CAPÍTULO 2:

## EL CAMPO SONORO EN EL INTERIOR DE UN RECINTO

### 2.1.- Propagación del sonido en un recinto cerrado

La energía radiada por una fuente sonora, situada en un recinto cerrado, llega a un oyente ubicado en un punto cualquiera del mismo de dos formas diferentes [2]:

- Sonido directo: La propagación de la onda acústica desde la fuente hacia el receptor se realiza en las mismas condiciones que en el espacio libre.
- Sonido indirecto o reflejado: Está asociado a las sucesivas reflexiones que sufre la onda acústica cuando incide sobre las diferentes superficies del recinto.

La energía correspondiente al sonido directo depende exclusivamente de la distancia a la fuente sonora, mientras que la energía asociada a cada reflexión depende del camino recorrido por el rayo sonoro así como del grado de absorción acústica, tanto de los materiales usados como revestimientos de las superficies implicadas, como del medio por el que se propagan las ondas sonoras (aire).

### 2.2.- Sonido reflejado

Al analizar la evolución temporal del sonido reflejado en un punto cualquiera del recinto objeto de estudio, se observan básicamente dos zonas de características notablemente diferenciadas: una primera zona que engloba todas aquellas reflexiones que llegan inmediatamente después del sonido directo, y que reciben el nombre de primeras reflexiones o reflexiones tempranas (“early reflections”), y una segunda formada por reflexiones tardías que constituyen la denominada cola reverberante (“late reverberation”) [2].

Si bien la llegada de reflexiones al punto en cuestión se produce de forma continua, y por tanto sin cambios bruscos, también es cierto que las primeras reflexiones llegan de forma más discretizada que las tardías, debido a que se tratan de reflexiones de orden bajo (habitualmente, orden  $\leq 3$ ). Se dice que una reflexión es de orden “n” cuando el rayo sonoro asociado ha incidido “n” veces sobre las diferentes superficies del recinto antes de llegar al receptor. El límite temporal entre las primeras reflexiones y la cola reverberante varía en cada caso concreto en función de la forma y del volumen del recinto.



La representación gráfica temporal de la llegada de las diversas reflexiones, acompañadas de su nivel energético correspondiente, se denomina reflectograma o ecograma. En la figura 2.1 se representa de forma esquemática la llegada de los diferentes rayos sonoros a un receptor junto con el reflectograma asociado, con indicación del sonido directo, las primeras reflexiones y la zona de reflexiones tardías (cola reverberante).

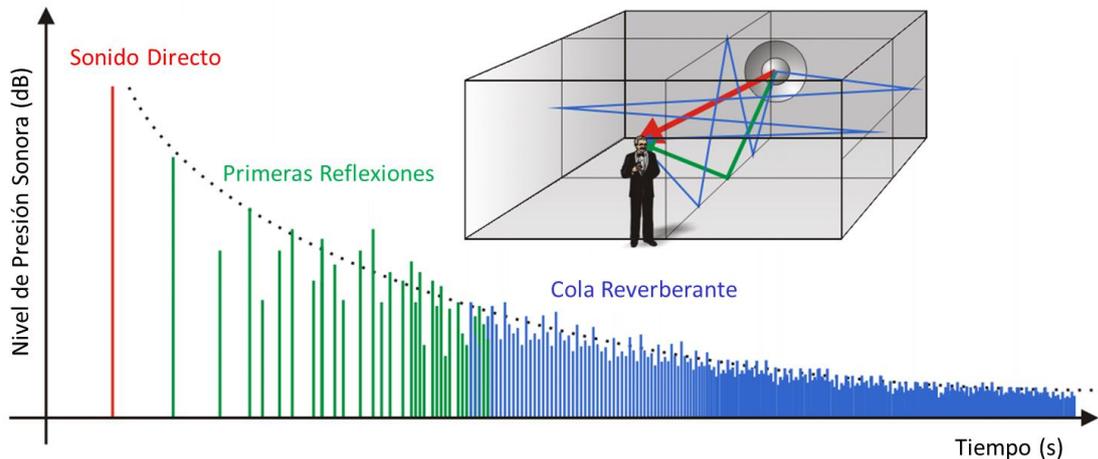


Figura 2.1.- Reflectograma con la distinción de sus tres zonas características [14].

### 2.3.- Estudio de las primeras reflexiones. Acústica geométrica

En general, las primeras reflexiones presentan un nivel energético mayor que las correspondientes a la cola reverberante, ya que son de orden más bajo. Además, por el hecho de depender directamente de las formas geométricas de la sala, son específicas de cada punto y, por tanto, determinan las características acústicas propias del mismo, junto con el sonido directo (figura 2.2).

La hipótesis elemental de partida para calcular el reflectograma asociado a un punto cualquiera consiste en tratar los rayos sonoros como si se tratase de rayos de luz, es decir, considerando que las reflexiones de los mismos sobre las distintas superficies son totalmente especulares y que, por tanto, verifican la ley de la reflexión, representada gráficamente en la figura 2.3.

El análisis acústico basado en la hipótesis de reflexiones especulares constituye la base de la denominada acústica geométrica [6]. Evidentemente dicho análisis no es más que una aproximación a la realidad. Para que en la práctica se produzca una reflexión marcadamente especular es necesario que se cumplan los siguientes requisitos, por lo que a la superficie de reflexión se refiere:



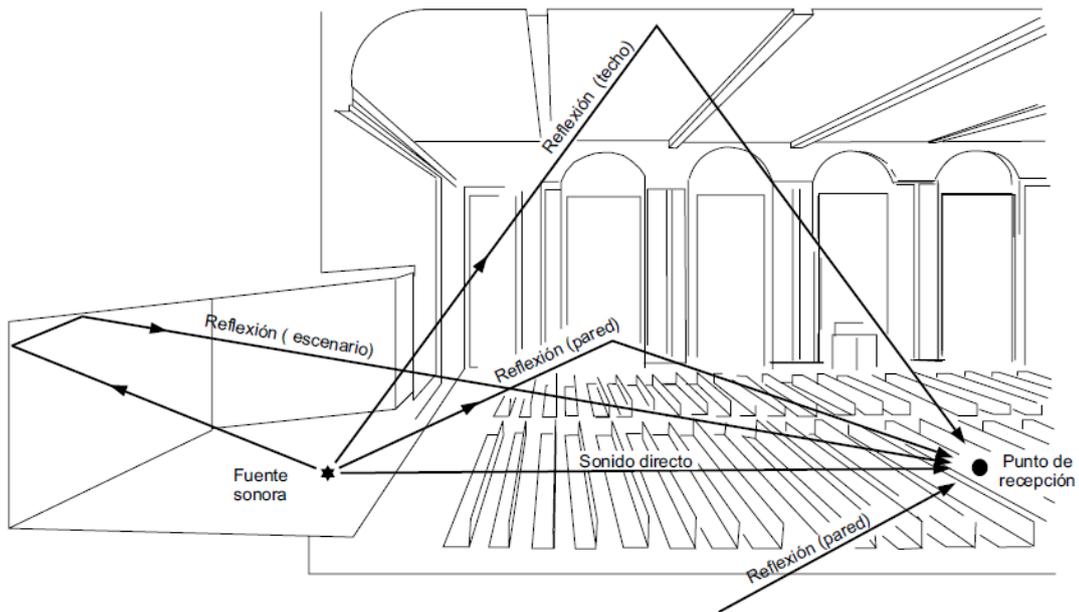


Figura 2.2.- Ejemplo de llegada del sonido directo y de las primeras reflexiones a un receptor [6].



**Ángulo de incidencia = Ángulo de reflexión**

Los dos rayos están en el mismo plano que la normal

Figura 2.3.- Ley de la reflexión especular [15].

- Dimensiones grandes en comparación con la longitud de onda del sonido en consideración.
- Superficie lisa y muy reflectante (poco absorbente):

En el caso de que las dimensiones sean menores o similares a la longitud de onda del sonido, la onda sonora rodea la superficie y sigue propagándose como si el obstáculo que representa la misma no existiese. Dicho fenómeno se conoce con el nombre de difracción [3].

Si la superficie presenta irregularidades de dimensiones comparables con la longitud de onda, se produce una reflexión de la onda incidente en múltiples direcciones. Dicho fenómeno se conoce con el nombre de difusión del sonido [3].

Por otro lado, como se ha comentado anteriormente, la cola reverberante está formada por las reflexiones tardías. Debido a que la densidad temporal de las reflexiones en un punto cualquiera de un recinto cerrado aumenta de forma cuadrática con el tiempo [2], existe una gran

concentración de dichas reflexiones en cualquier punto de recepción y, además, sus características son prácticamente iguales con independencia del punto considerado. Es por ello que el estudio de la cola reverberante se efectúa siempre mediante criterios basados en la denominada acústica estadística en lugar de la acústica geométrica, según se verá en el apartado 2.7.

Debido a que el oído humano es incapaz de discriminar la llegada discreta de todas y cada una de las reflexiones, lo que generalmente se percibe es un sonido continuo. Sólo en determinados casos es posible percibir individualmente una o varias reflexiones. Para ello es necesario que su nivel y retardo respecto al sonido directo sean significativos, como se verá a continuación.

### 2.3.1.- Percepción subjetiva de primeras reflexiones. Ecos.

Todas aquellas reflexiones que llegan a un oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo son integradas por el oído humano y, en consecuencia, su percepción no es diferenciada respecto al sonido directo [6].

Cuando el sonido emitido es un mensaje oral, tales reflexiones contribuyen a mejorar la inteligibilidad o comprensión del mensaje y, al mismo tiempo, producen un aumento de sonoridad (o sensación de amplitud del sonido).

Por el contrario, la aparición en un punto de escucha de una reflexión de nivel elevado con un retardo superior a los 50 ms es totalmente contraproducente para la obtención de una buena inteligibilidad de la palabra, ya que es percibida como una repetición del sonido directo (suceso discreto). En tal caso, dicha reflexión se denomina eco. El retardo de 50 ms equivale a una diferencia de caminos entre el sonido directo y la reflexión de, aproximadamente, 17 m. En la figura 2.4 se representa gráficamente dicho efecto.

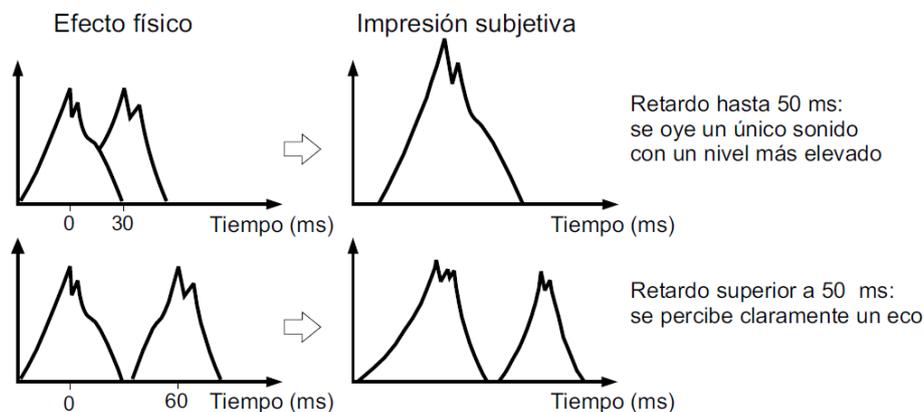


Figura 2.4.- Superposición de sonidos con diferentes retardos e impresión subjetiva asociada [6].

De forma más precisa, en la figura 2.5 se muestran las cuatro zonas características por lo que a relación entre sonido retardado e inteligibilidad de la palabra se refiere. En el eje de abscisas se indica el retardo temporal entre la reflexión (sonido retardado) y el sonido directo, mientras que en el eje de ordenadas aparece la diferencia de niveles entre ambos sonidos. La curva de separación entre las cuatro zonas es sólo aproximada.

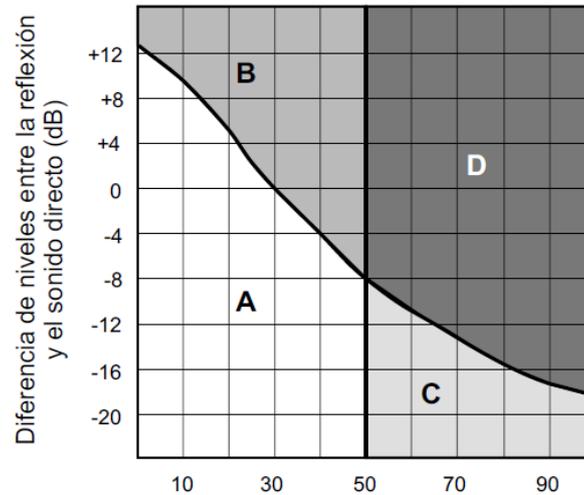


Figura 2.5.- Relación entre sonido retardado e inteligibilidad de la palabra (zonas características) [6].

- Zona A: La reflexión llega antes de los 50 ms. El oído integra la reflexión y se produce un aumento de inteligibilidad y de sonoridad.
- Zona B: La reflexión llega antes de los 50 ms aunque con un nivel relativo más elevado. El oído integra la reflexión, pero se produce un desplazamiento de la localización de la fuente sonora, generadora del sonido directo, hacia la superficie generadora de la reflexión (“image shift”, efecto Haas o efecto de precedencia).
- Zona C: La reflexión llega después de los 50 ms. La reflexión no es perjudicial para la inteligibilidad debido a que su nivel relativo es suficientemente bajo.
- Zona D: La reflexión llega después de los 50 ms aunque con un nivel relativo más elevado. La reflexión es percibida como un eco y se produce una pérdida de inteligibilidad.

### 2.3.2.- Eco flotante

El eco flotante (“flutter echo”) consiste en una repetición múltiple, en un breve intervalo de tiempo, de un sonido generado por una fuente sonora, y aparece cuando ésta se sitúa entre dos superficies paralelas, lisas y muy reflectantes [2] (ver figura 2.6).

## 2.4.- Modos propios de una sala. Acústica ondulatoria

La combinación de ondas incidentes y reflejadas en una sala da lugar a interferencias constructivas y destructivas o, lo que es lo mismo, a la aparición de las denominadas ondas estacionarias o modos propios de la sala [2]. Cada modo propio va asociado a una frecuencia, igualmente denominada propia, y está caracterizado por un nivel de presión sonora SPL que varía en función del punto considerado.



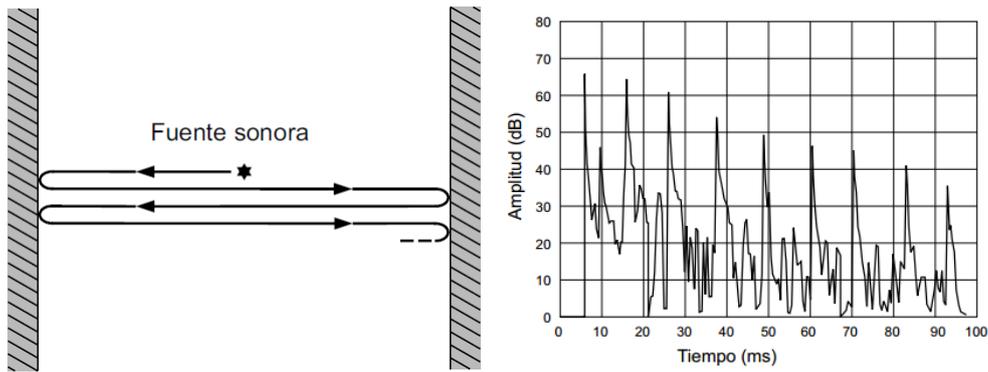


Figura 2.6.- Izquierda, eco flotante surgido al colocar la fuente sonora entre dos paredes paralelas, lisas y muy reflectantes. Derecha, curva energía-tiempo (ETC) ilustrativa de la existencia de eco flotante [6].

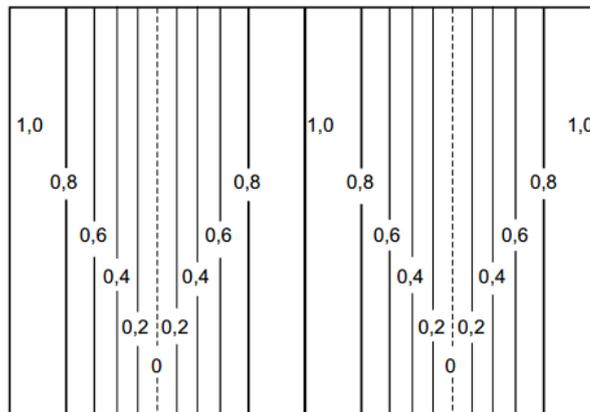


Figura 2.7.- Distribución de niveles SPL normalizados asociados a un modo propio de una sala [6].

El estudio analítico de los modos propios se realiza mediante la denominada acústica ondulatoria que, junto con la acústica geométrica y la estadística anteriormente comentadas, constituyen las tres teorías clásicas que hacen posible conocer con rigor el comportamiento del sonido en un recinto cualquiera [2].

El número de modos propios es ilimitado, si bien su distribución a lo largo del eje de frecuencias es discreta, aumentando su densidad con la frecuencia. La presencia de todos ellos provoca en cada punto una concentración de energía alrededor de las diversas frecuencias propias, lo cual confiere un sonido característico a cada sala. Dicho sonido recibe el nombre de “coloración” y normalmente se pone de manifiesto en espacios de dimensiones relativamente reducidas, como por ejemplo los estudios de grabación.

Los valores de las frecuencias propias asociadas a los diferentes modos propios dependen de la geometría y de las dimensiones del recinto y, en general, su determinación resulta muy compleja. Únicamente cuando se trata de recintos de forma paralelepípeda con superficies totalmente reflectantes es posible calcularlos de una forma muy sencilla, mediante la denominada fórmula de Rayleigh:

$$f_{k,m,n} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{k}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2} \quad (\text{Ec 2.1})$$

donde:

$c$  es la velocidad de propagación del sonido (en m/s)

$L_x$ ,  $L_y$  y  $L_z$  representan las dimensiones de la sala (en metros).

$k$ ,  $m$  y  $n$  pueden tomar cualquier valor entero (0, 1, 2, 3, ...).

Cada combinación de valores  $k$ ,  $m$ ,  $n$  da lugar a una frecuencia y modo propio asociado, que recibe el nombre de modo propio  $k$ ,  $m$ ,  $n$ . Por ejemplo, la combinación  $k=2$ ,  $m=1$ ,  $n=1$  da lugar al modo propio 2, 1, 1.

Si el recinto no fuese de formas sencillas, lo que ocurre en la mayoría de los casos, la solución de la ecuación resulta impracticable. De cualquier manera, y a efectos de ingeniería, los modos de cualquier recinto pueden ser fácilmente determinados si se realiza un barrido en frecuencia (con velocidad apropiada al volumen de la sala).

## 2.5.- Balance energético sonoro

En el apartado 2.1 se ha descrito la propagación de una onda sonora en un recinto cerrado partiendo de la hipótesis de que la fuente sonora emite un sonido intenso y breve.

A continuación se analiza dicho comportamiento, aunque suponiendo ahora que la fuente radia energía de forma continua. En tal caso resulta evidente que, una vez transcurrido un periodo de tiempo transitorio, se alcanza un estado de equilibrio caracterizado por el hecho de que la absorción acústica producida por las superficies del recinto se iguala con el aporte energético de la fuente. Existe, en consecuencia, un balance energético sonoro [6].

El punto de partida consiste en poner en marcha una fuente sonora omnidireccional y en dejarla emitir de forma continua. A partir del instante inicial, la onda sonora generada se propaga en todas las direcciones y cada rayo sonoro recorre un camino distinto, reflejándose una y otra vez sobre las diferentes superficies de la sala. En cada reflexión, parte de la energía es absorbida y parte es devuelta al recinto en mayor o menor cuantía, en función del grado de absorción acústica del revestimiento correspondiente a la superficie implicada.

El aporte constante de energía por parte de la fuente sonora hace que la energía total recibida en cualquier punto de la sala, obtenida como suma de la directa y la reflejada, vaya aumentando progresivamente hasta alcanzar el mencionado punto de equilibrio.

La rapidez en la atenuación del sonido depende del grado de absorción de las superficies del recinto: a mayor absorción, atenuación más rápida. El grado de permanencia del sonido una vez que la fuente sonora se ha desconectado se denomina reverberación [2]. Por lo tanto, la

reverberación de una sala es mayor cuanto más tarda el sonido en atenuarse, es decir, cuanto menos absorbente es el recinto.

En la figura 2.8 se representa la evolución teórica de la presión sonora asociada a las fases de conexión de la fuente sonora, alcance del régimen permanente y desconexión de la fuente, tanto en escala lineal como en escala semilogarítmica. Dichas gráficas surgen de la aplicación exclusiva de la acústica estadística y, por consiguiente, son válidas para cualquier punto de la sala objeto de estudio, con independencia de su ubicación dentro de la misma.

Según se observa, el decaimiento en escala lineal sigue una evolución exponencial, lo cual se traduce en una línea recta en escala semilogarítmica. Ello resulta de gran utilidad para la determinación teórica del tiempo de reverberación, definido en el apartado 2.7.

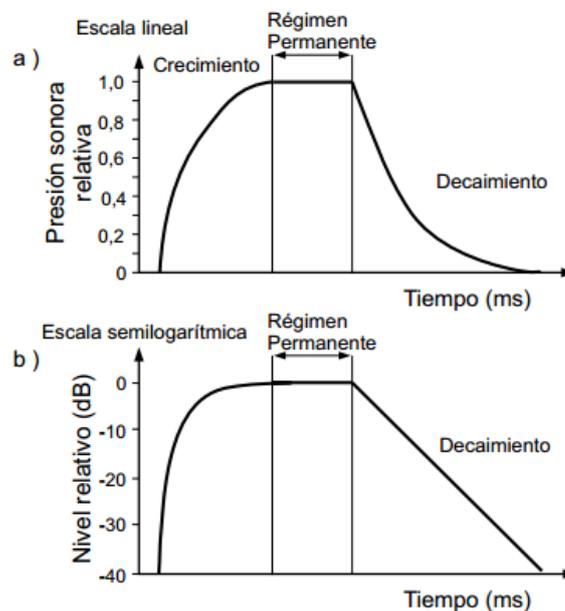


Figura 2.8.- Evolución teórica de la presión sonora en un punto de un recinto al conectar y, posteriormente, desconectar una fuente sonora: a) escala lineal; b) escala semilogarítmica [8].

En la práctica nunca se obtiene una curva tan regular y, además, a cada punto de medida le corresponde una curva diferente del resto. Esto es especialmente evidente durante, aproximadamente, los primeros 100 ms desde la llegada del sonido directo debido a la existencia de primeras reflexiones específicas asociadas al punto considerado (como se ha dicho con anterioridad, el estudio de las primeras reflexiones se realiza por medio de la acústica geométrica).

## 2.6.- Campo directo y campo reverberante. Nivel total de presión sonora

Siguiendo con la hipótesis de régimen permanente y aplicando exclusivamente la teoría de la acústica estadística, resulta que la energía sonora total presente en cualquier punto de una sala se obtiene como suma de una energía de valor variable, que depende de la ubicación del punto, y



otra de valor constante. Se supone que se parte de una fuente sonora de directividad conocida que radia una potencia constante.

La energía de valor variable corresponde al sonido directo, y disminuye a medida que el receptor se aleja de la fuente, mientras que la energía de valor constante va asociada al sonido indirecto o reflejado. El hecho de que dicha energía no dependa del punto en consideración proviene de aplicar la teoría estadística a todo el sonido reflejado y, en consecuencia, de tratar por igual todas las reflexiones, sean primeras o tardías (cola reverberante). Esta hipótesis teórica conduce a resultados evidentemente aproximados, si bien presenta la ventaja de la simplicidad de cálculo de la energía total.

Habitualmente no se trabaja en términos de energía, sino de nivel de presión sonora SPL, lo cual es totalmente equivalente. Ello se debe a que, en la práctica, el nivel SPL es fácilmente medible mediante un sonómetro.

Por lo tanto, según lo que se acaba de exponer, la presión sonora total en un punto cualquiera de un recinto se obtiene a partir de la contribución de las presiones del sonido directo (disminuye con la distancia a la fuente) y del sonido reflejado (se mantiene constante).

La zona donde predomina el sonido directo se denomina zona de campo directo. A dicha zona pertenecen los puntos más próximos a la fuente sonora y en ella el nivel de presión sonora, llamado nivel de campo directo  $L_D$ , disminuye 6 dB cada vez que se dobla la distancia a la fuente. Es como si el receptor estuviese situado en el espacio libre [2].

La zona donde predomina el sonido reflejado recibe el nombre de zona de campo reverberante (es por ello que a dicho sonido también se le denomina sonido reverberante). A ella pertenecen los puntos más alejados de la fuente sonora. En esta zona, el nivel de presión sonora, denominado nivel de campo reverberante  $L_R$ , se mantiene constante [2].

La distancia para la cual  $L_D = L_R$  se denomina distancia crítica  $D_C$ . Se puede demostrar que:

$$D_c = 0,14\sqrt{QR} \quad (\text{Ec 2.2})$$

donde:

Q = factor de directividad de la fuente sonora en la dirección considerada.

R = constante de la sala =  $\frac{S_T \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$  (en  $\text{m}^2$ ).

$S_T$  = superficie total de la sala (en  $\text{m}^2$ ).

$\bar{\alpha}$  = coeficiente medio de absorción de la sala (apartado 2.7.2).

En la figura 2.9 se muestra la evolución del nivel relativo total de presión sonora en función de la distancia a la fuente, normalizada con respecto a la distancia crítica  $D_C$ .

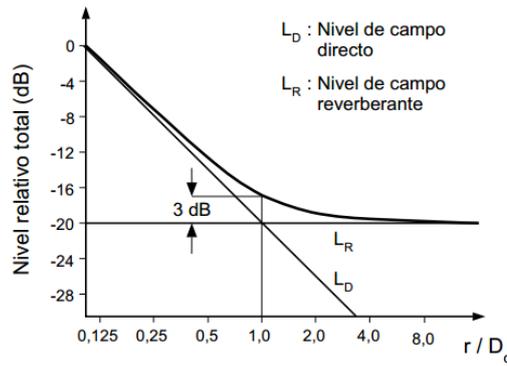


Figura 2.9.- Evolución del nivel relativo total de presión sonora en función de la distancia a la fuente sonora normalizada con respecto a la distancia crítica [6].

Se puede comprobar que, para puntos próximos a la fuente sonora  $\left(\frac{r}{D_C} \ll 1\right)$ :  $L_p \approx L_D$ .

Mientras que para puntos alejados  $\left(\frac{r}{D_C} \gg 1\right)$ :  $L_p \approx L_R$ .

Por otra parte, se puede demostrar que cuanto mayor sea el grado de absorción de un recinto a una determinada frecuencia, mayor será el valor de la constante de la sala R (aumento de la distancia crítica  $D_C$ ) y menor el nivel de presión sonora de campo reverberante  $L_R$ .

A título de ejemplo, en la figura 2.10 se representan tres gráficas de niveles relativos totales de presión sonora correspondientes a una sala "viva" (poco absorbente), a una sala intermedia y a una sala "apagada" (muy absorbente), en función de la distancia a la fuente sonora.

Se puede observar que, efectivamente:  $L_{R1} > L_{R2} > L_{R3}$ .

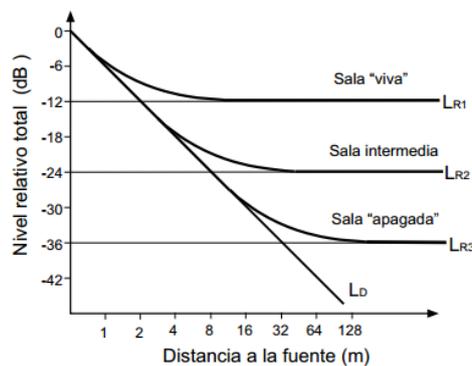


Figura 2.10.- Gráficas de niveles relativos totales de presión sonora correspondientes a una sala "viva", a una sala intermedia y a una sala "apagada" [6].

## 2.7.- Tiempo de reverberación

Con el fin de poder cuantificar la reverberación de un recinto, se define el tiempo de reverberación (TR) a una frecuencia determinada como el tiempo (en segundos) que transcurre

desde que el foco emisor se detiene hasta el momento en que el nivel de presión sonora SPL cae 60 dB con respecto a su valor inicial [2].

Un recinto con un TR grande se denomina “vivo” (nave industrial, iglesia, etc.), mientras que si el TR es pequeño recibe el nombre de recinto “apagado” o “sordo” (locutorio, estudio de grabación, etc.). Ambas denominaciones coinciden con las del apartado anterior, lo cual es lógico habida cuenta de que el nivel de campo reverberante aumenta con el TR [6].

Por lo general, el TR varía con la frecuencia, tendiendo a disminuir a medida que ésta aumenta. Ello es debido, en parte, a las características de mayor absorción con la frecuencia de los materiales comúnmente empleados como revestimientos, así como a la absorción del aire, especialmente manifiesta en recintos grandes y a altas frecuencias.

### 2.7.1.- Valores recomendados del tiempo de reverberación

Habitualmente, cuando se establece un único valor recomendado de TR para un recinto dado, se suele hacer referencia al obtenido como media aritmética de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1kHz. Se representa por  $TR_{mid}$  [6].

En general, el valor más adecuado de  $TR_{mid}$  depende tanto del volumen del recinto como de la actividad a la que se haya previsto destinarlo. Por ejemplo, cuando se trata de salas destinadas a la palabra, es conveniente que los valores de TR sean bajos, con objeto de conseguir una buena inteligibilidad, mientras que en el caso de salas de conciertos son recomendables unos valores apreciablemente más elevados a fin de que la audición musical resulte óptima.

En la tabla 2.1 se dan los márgenes de valores recomendados de  $TR_{mid}$  para diferentes tipos de salas en el supuesto de que estén ocupadas.

TIPO DE SALA	$TR_{mid}$ , SALA OCUPADA (EN S)
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)	1,8 – 2,0
Iglesia/catedral (órgano y canto coral)	2,0 – 3,0
Locutorio de radio	0,2 – 0,4

Tabla 2.1.- Márgenes de valores recomendados de  $TR_{mid}$  en función del tipo de sala (recintos ocupados) [6].

### 2.7.2.- Cálculo del tiempo de reverberación

Si bien existe un gran número de fórmulas para el cálculo teórico del TR, la fórmula clásica por excelencia, y aceptada como de referencia a nivel internacional por su sencillez de cálculo, es la denominada fórmula de Sabine. La correspondiente expresión matemática, obtenida aplicando la teoría acústica estadística y despreciando el efecto de la absorción producida por el aire, es la siguiente [6]:

$$TR = 0,161 \frac{V}{A_{tot}} \quad (\text{Ec 2.3})$$

donde:

$V$  = volumen del recinto (en  $\text{m}^3$ ).

$A_{tot}$  = absorción total del recinto (definida a continuación).

El grado de absorción del sonido de un material cualquiera se representa mediante el llamado coeficiente de absorción  $\alpha$ . Se define como la relación entre la energía absorbida por dicho material y la energía incidente sobre el mismo:

$$\alpha = \frac{\text{Energía absorbida}}{\text{Energía incidente}} \quad (\text{Ec 2.4})$$

Sus valores están comprendidos entre 0 (correspondiente a un material totalmente reflectante) y 1 (caso de absorción total). El valor de  $\alpha$  está directamente relacionado con las propiedades físicas del material y varía con la frecuencia.

En cuanto a la denominada absorción  $A$  de un material cualquiera, ésta se obtiene como resultado de multiplicar su coeficiente de absorción  $\alpha$  por su superficie  $S$ . La unidad de absorción es el sabine (1 sabine corresponde a la absorción de  $1 \text{ m}^2$  de ventana abierta).

Finalmente, y debido a que un recinto está constituido por distintas superficies recubiertas de materiales diversos, se define la absorción total  $A_{tot}$  como la suma de todas y cada una de las absorciones individuales, es decir:

$$A_{tot} = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n \quad (\text{Ec 2.5})$$

A partir de  $A_{tot}$  es posible calcular el coeficiente medio de absorción  $\bar{\alpha}$  dividiendo la absorción total  $A_{tot}$  por la superficie total del recinto  $S_T$ :

$$\bar{\alpha} = \frac{A_{tot}}{S_T} \quad (\text{Ec 2.6})$$

donde:

$S_T = S_1 + S_2 + \dots + S_n$  = superficie total del recinto (paredes + techo + suelo).

Con todo lo anterior, el TR se puede expresar como sigue:

$$TR = 0,161 \frac{V}{\bar{\alpha} S_T} \quad (\text{Ec 2.7})$$



Según se observa, el TR calculado a cada frecuencia de interés mediante dicha fórmula no tiene en cuenta la ubicación del receptor, es decir, es único para cada recinto. Ello es consecuencia de que la misma surge exclusivamente de la aplicación de la acústica estadística.

Por otra parte es preciso comentar que, a pesar de la utilización universal de esta fórmula, su validez se circunscribe al caso de recintos con las siguientes características:

- Decaimiento energético exponencial asociado a un campo sonoro perfectamente difuso (la energía se propaga con la misma probabilidad en todas las direcciones).
- Geometría regular de la sala.
- Coeficiente medio de absorción  $\bar{\alpha} < 0,4$ .

### 2.7.3.- Medida del tiempo de reverberación

El TR se calcula a partir de la curva de decaimiento energético (ETC), medida en un punto cualquiera de una sala.

La obtención del TR a cada frecuencia de interés, a partir de la correspondiente curva ETC, no se lleva a cabo directamente por simple observación del tiempo que transcurre hasta que el nivel disminuye 60 dB. Ello es debido a que dicha curva presenta irregularidades, a pesar de que su decaimiento asintótico es efectivamente en forma de línea recta. El motivo de la aparición de dichas irregularidades es que en ningún recinto real existe un campo sonoro perfectamente difuso. Teóricamente, sería necesario repetir la medida de la curva ETC un número infinito de veces para, posteriormente, obtener una curva promedio exenta ya de irregularidades [6].

En la práctica, la determinación del TR se realiza aplicando el método de Schroeder. Dicho investigador demostró matemáticamente que la curva promedio anterior se puede obtener de forma totalmente equivalente a base de integrar (sumar) todas las contribuciones energéticas asociadas a una única curva ETC, desde un instante de tiempo infinito (en la práctica, habitualmente entre 1 y 3 segundos) hasta el instante inicial.

A título de ejemplo, en la figura 2.11 se muestra una curva ETC, la curva obtenida a partir de la integración temporal de la ETC y el valor del TR calculado a partir de esta última (margen superior derecho).

En la práctica, nunca es posible observar una caída de 60 dB, por falta de margen dinámico [6]. En consecuencia, es el usuario quien fija los instantes inicial y final, a partir de los cuales el sistema de medida calcula automáticamente el TR.

En el ejemplo anterior, se han fijado unos márgenes tales que la disminución de nivel es de 20 dB, ya que corresponde al tramo más recto de la curva. En este caso, el TR se obtiene multiplicando por 3 el tiempo asociado a dicha disminución.

Finalmente, conviene señalar que la manera práctica de obtener el valor del RT representativo de una sala, a cada de frecuencia de trabajo, consiste en promediar los valores medidos en diferentes puntos de la misma.



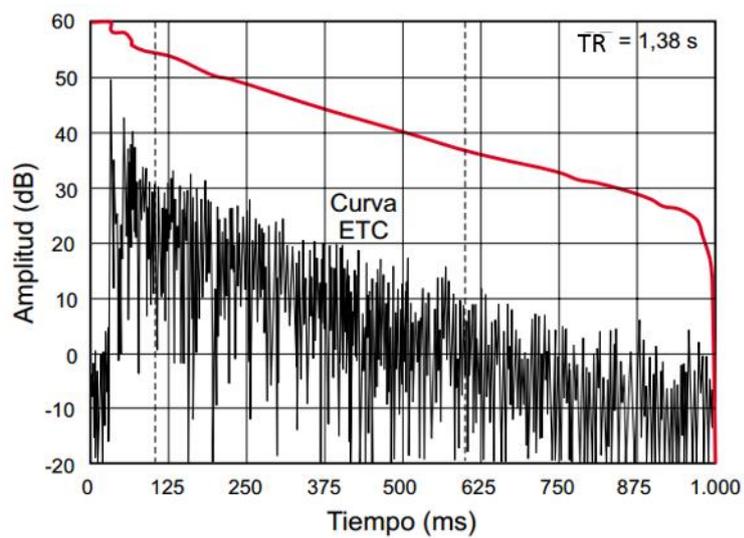


Figura 2.11.- Curva ETC y curva utilizada para el cálculo del TR, obtenida como resultado de la integración de la ETC [6].



# CAPÍTULO 3: AURALIZACIÓN

En el capítulo anterior hemos visto modelos y métodos analíticos que permiten predecir y calcular el comportamiento de las ondas acústicas cuando se propagan en el interior de un recinto cerrado. No obstante, este conjunto de herramientas constituye una aproximación técnica y no contempla, o evalúa de un modo insuficiente, aspectos como la percepción, la impresión y la interpretación del sonido, que únicamente pueden llegar a ser evaluados con una experiencia sensorial completa, es decir, interviniendo el propio oído.

Las técnicas de auralización ofrecen una ampliación importante al análisis, la síntesis, la predicción y la clasificación del sonido. Esto se debe a que la auralización implica directamente al oyente sin necesidad de que tenga que comprender términos acústicos complejos, consiguiendo aportar un componente importante de sensación multimodal y los correspondientes efectos psicológicos que nos produce el sonido.

## 3.1.- Fundamentos de la auralización

Podemos definir la auralización como la técnica que permite crear archivos sonoros audibles a partir de datos numéricos (simulaciones, medidas in-situ, sonidos sintetizados) [1].

El principio de la auralización se ilustra en la figura 3.1. Ésta muestra los elementos básicos de la generación, radiación, transmisión y reproducción del sonido.

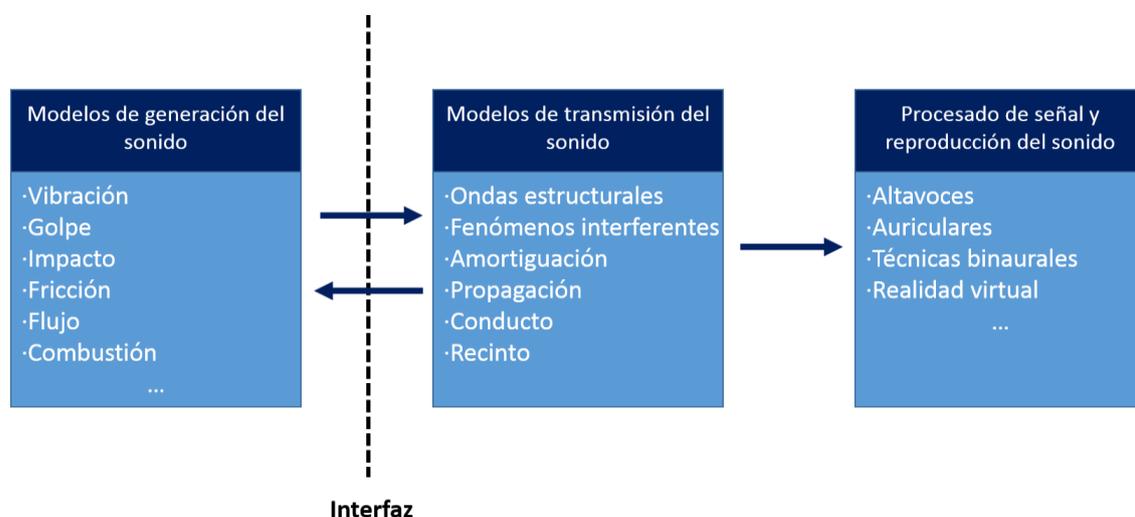


Figura 3.1.- Esquema de los modelos posibles de auralización.

Podemos apreciar en la figura 3.1 que la frontera entre la generación y transmisión del sonido es bidireccional, lo que indica que puede producirse un efecto de retroalimentación. No obstante, en una sala pocas veces encontramos este efecto en la fuente, ya que la impedancia de radiación no se ve afectada por el recinto. Sin embargo, si la fuente es una persona, adaptará su proyección de voz según la respuesta al impulso del recinto (RIR, *Room Impulse Response*), aunque esto no es un problema de retroalimentación física, sino de respuesta psicológica. Desde un punto de vista puramente físico, el flujo de señal puede modelarse de forma unidireccional. En contraste, cuando nos encontramos con la transmisión del sonido a través de vibraciones estructurales la situación cambia completamente. La velocidad de vibración y propagación del sonido en barras y placas dependen del tipo de fuente y del contacto directo entre los componentes, por lo que si presentará retroalimentación.

Si la interfaz entre la fuente y la cadena de transmisión se define de forma robusta, el fenómeno acústico puede transformarse en un modelo de flujo de señal. En este contexto, el término “robusta” significa que la interfaz transfiera la misma velocidad o presión cuando los elementos de la generación o transmisión del sonido se cambian. El flujo de señal puede representarse típicamente como un modelo de dos puntos, cuyos componentes pueden determinarse mediante simulación o medidas. Si se conoce la función de transferencia de los elementos, entonces la transmisión de la señal a través del medio de propagación puede procesarse mediante convolución, tal y como se muestra en la figura 3.2 [1].

Esto parece sencillo a primera vista, pero la tarea de generar un filtro apropiado para realizar la convolución se hace más complicada si tenemos más detalles en cuenta a la hora de diseñarlo. Obviamente, también tendremos que tener en cuenta que los requisitos de calidad auditiva de los parámetros implicados en la auralización deberán ser altos: el ancho de banda y la correspondiente frecuencia de muestreo que lo determinará, la coloración espectral y que la calidad del sistema de reproducción no afecte a ésta, la relevancia de la dirección de incidencia del sonido, la distancia percibida del evento sonoro, la impresión específica del recinto, las características de la fuente, el movimiento de la fuente o el receptor, sólo por citar unas cuantas importantes. La técnica de auralización y su resultado final, un archivo de audio, debe tener todos estos aspectos en cuenta, dependiendo de la aplicación específica para la que se destine.

Antes de explicar con más profundidad los detalles de la auralización, es necesario hacer una visión de conjunto del proceso. Empezamos con la descripción de la fuente, una señal primaria que puede ser creada naturalmente o reproducida a partir de una grabación. Dicha señal primaria puede representar un flujo de volumen de una fuente puntual, la potencia sonora y directividad de una fuente extendida o de fuentes distribuidas, o la fuerza o velocidad de un movimiento vibratorio, por ejemplo. Posteriormente, el sonido primario puede introducirse en el camino de transmisión. El resultado será una señal de presión sonora transmitida que puede considerarse perceptible y preparada para la reproducción sonora (la forma más sencilla es por medio de auriculares).



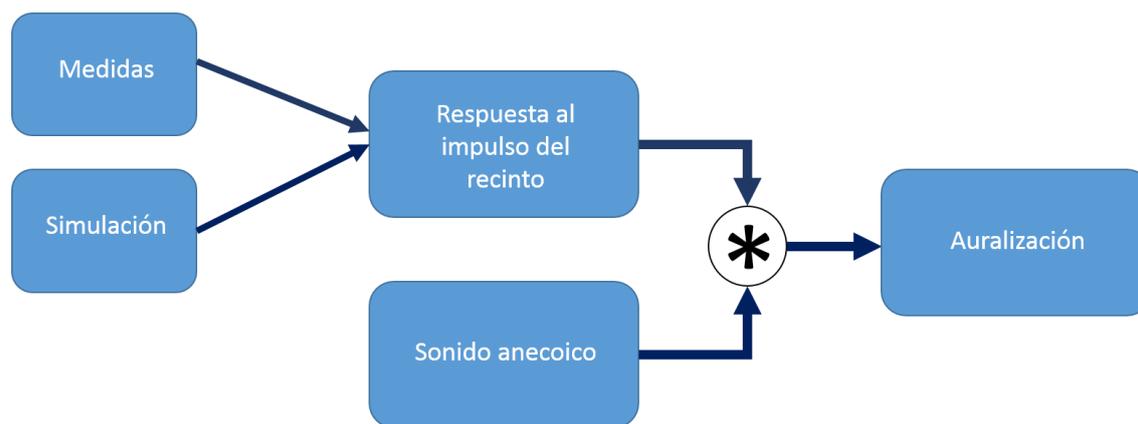


Figura 3.2.- Proceso de auralización.

Los pasos necesarios para una correcta auralización se llevan a cabo usando herramientas del campo del procesado de señales. La función de transferencia, obtenida mediante simulación o medidas, es convenientemente interpretada como la función de transferencia de un filtro. La operación de convolución es la base del análisis y procesado de señales y está relacionado con los sistemas lineales e invariantes en el tiempo (LTI, *Linear Time-Invariant*).

## 3.2.- Técnicas de convolución

La convolución puede hacerse de dos maneras: directamente en el dominio del tiempo mediante filtros FIR (*Finite Impulse Response*, respuesta al impulso finita) o indirectamente en el dominio de la frecuencia utilizando la FFT (*Fast Fourier Transform*, transformada rápida de Fourier) [7]. Sin embargo, en este último caso debe tenerse en cuenta que la FFT requiere bloques de longitud fija y que es una operación relacionada con señales periódicas. También puede ser necesario recurrir al uso de ventanas temporales para reducir las distorsiones que presentan las discontinuidades. Además, tenemos que recordar que la técnica de convolución o filtrado sólo es válida para sistemas LTI. Para sistemas que presenten variaciones con el tiempo, la señal de excitación debe procesarse en bloques que sean aproximadamente invariantes. Si este es el caso, los filtros pueden adaptarse mientras se realiza el procesado y sus pendientes de atenuación pueden usarse para realizar las transiciones entre bloques.

### 3.2.1.- Convolución discreta

El procesado de las señales requiere de un cierto número de operaciones de cálculo. Las multiplicaciones de coma flotante son las operaciones que más tiempo consumen, mientras las sumas y almacenamientos son normalmente insignificantes en la programación secuencial. Sin embargo, el coste computacional puede incrementarse cuando intervienen el procesado en paralelo y la comunicación por redes.

Otro detalle importante aparece cuando el procesado se realiza en procesadores digitales de señal (DSP, *Digital Signal Processor*) mediante formatos de números enteros. En este caso, las señales deben normalizarse antes del procesado para evitar que los datos se sobrepasen de la

escala permitida. Aunque esta técnica incrementa la velocidad de la convolución, puede presentar la desventaja de reducir el rango dinámico de las señales implicadas.

En la convolución discreta, la señal de entrada  $x[n]$  y la respuesta al impulso  $h[n]$  se almacenan como secuencias temporales. La señal de salida se calcula mediante la siguiente expresión:

$$y[n] = x[n] * h[n] = \sum_{k=0}^{N-1} x[k] * h[n - k] \quad (\text{Ec 3.1})$$

Esta operación requiere de  $N \cdot L$  multiplicaciones de coma flotante, siendo  $N$  la longitud de la señal de entrada y  $L$  la longitud de la respuesta al impulso, equivalente también al número de coeficientes del filtro FIR.

### 3.2.2.- Convolución FFT

En este caso, se realiza la operación equivalente a la convolución en el dominio de la frecuencia, que es la multiplicación de los espectros de las señales. Los datos de entrada se guardan en un vector como una secuencia temporal y la respuesta al impulso, junto con la señal de salida, se consideran como vectores de la misma longitud. Se realiza la FFT de los vectores  $x[n]$  y  $h[n]$ , se multiplican ambos espectros y se realiza la operación inversa de la FFT al resultado para obtener la señal de salida  $y[n]$ .

Sin embargo, en el caso de señales continuas, no es posible procesar las señales en un solo bloque, a menos que contemos con un amplio espacio en memoria pero incluso así, existen aplicaciones en las que no podemos esperar a que se realice la convolución completa como es la reproducción en tiempo real. Por lo tanto, tendremos que dividir la señal en segmentos temporales, procesarlos uno a uno con la respuesta al impulso y transferir los resultados al dispositivo de salida determinado de forma secuencial. La convolución FFT segmentada se usa habitualmente para convolucionar respuestas al impulso de duración corta con señales de larga duración. La forma más utilizada para realizar este tipo de convolución es la de solape-suma (*overlap-add*).

En este algoritmo, la señal de entrada, de longitud  $N$ , se descompone en segmentos temporales de longitud  $n$ , con el propósito de que cada segmento sea procesado de forma independiente por el filtro de la respuesta al impulso, de longitud  $L$ . Cada segmento de señal se rellena con una secuencia de ceros de longitud  $L-1$ , de manera que la duración total de cada segmento será de  $n+L-1$ . A continuación, se realiza la FFT tanto del segmento de señal como del filtro utilizado. Los espectros resultantes se multiplican y el producto se transforma al dominio del tiempo mediante la IFFT (*Inverse FFT*, FFT inversa). El resultado individual de procesar cada segmento se solapa con el resultado de procesar los segmentos adyacentes y la suma de todos ellos produce la señal de salida.



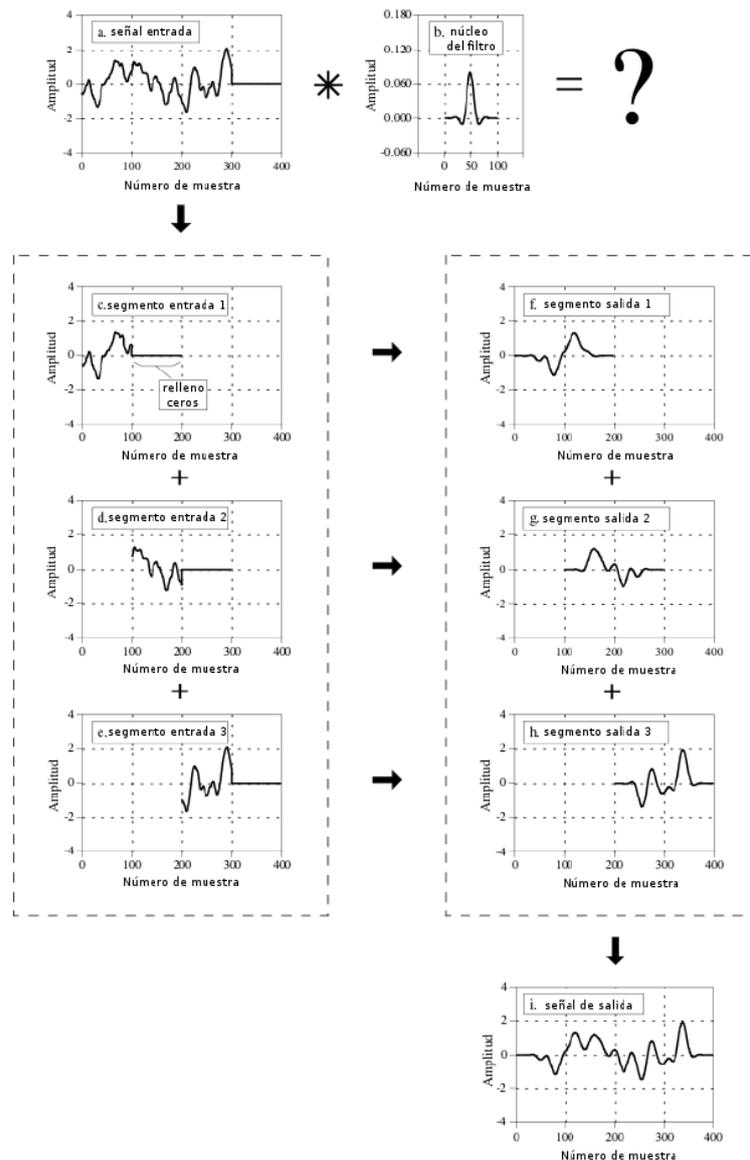


Figura 3.3.- Convolución mediante el método de solape-suma

### 3.3.- Usos profesionales de la auralización

La auralización tiene su principal aplicación profesional en la comprobación de las propiedades acústicas de una sala, con la intención de hacer posibles modificaciones o correcciones para mejorar la escucha del sonido en el interior del recinto.

Como hemos mencionado en el apartado 3.1 de este capítulo, la obtención de la RIR se puede obtener mediante la realización de medidas in-situ o realizando una simulación por ordenador de la sala y calculando los tipos de reflexiones y su distribución temporal. Para este último caso, existen soluciones de software que nos permiten hacer un análisis pormenorizado de todos los parámetros acústicos estandarizados, además de poder hacer gráficos en 3D con la distribución del nivel de presión sonora de una fuente por la sala. Los programas más utilizados son



“EASE” (Enhanced Acoustic Simulator for Engineers), de AFMG, y “Odeon Room Acoustics Software”, de Odeon A/S.

Ambos sistemas tienen la misma metodología: se construye un modelo tridimensional del recinto o se exporta desde una aplicación CAD, se introduce en las caras del modelo la información de los materiales empleados en la construcción de la sala original y se calcula la función de transferencia del recinto utilizando métodos basados en la acústica geométrica (trazado de rayos, método de las fuentes imagen). Estos programas poseen cada uno un módulo de auralización para poder realizar simulaciones convolucionando un sonido anecoico con la respuesta al impulso calculada.

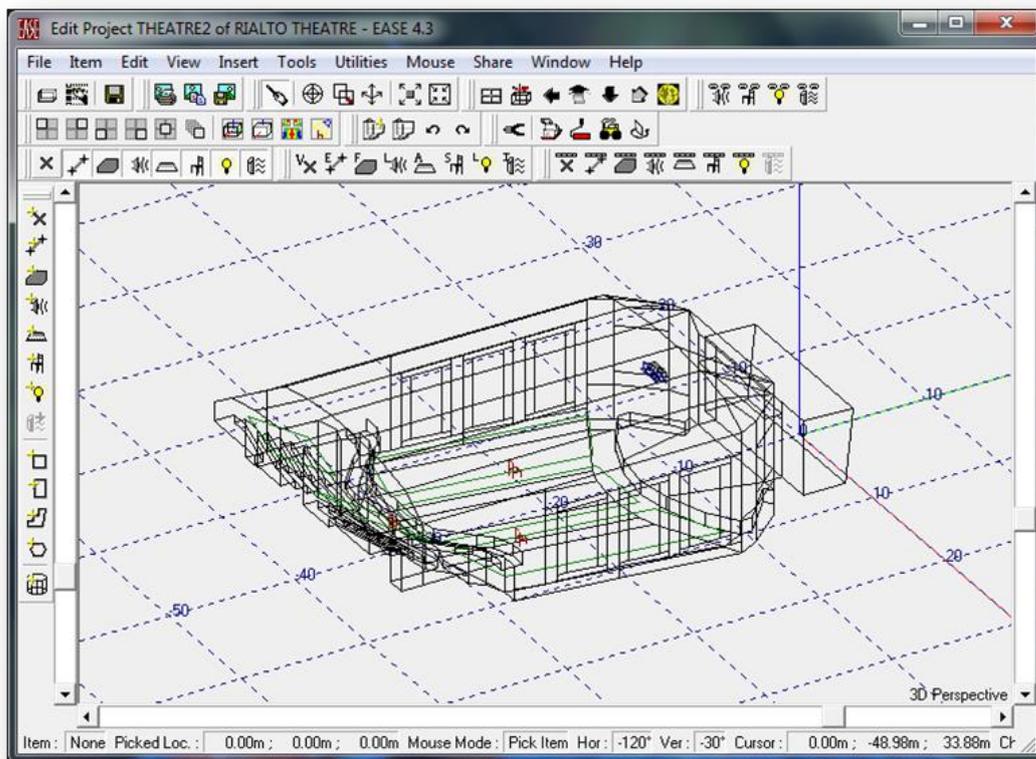


Figura 3.4.- Pantalla del EASE, con vista del modelo 3D de un recinto.

En el caso de obtener la respuesta de una sala midiendo directamente en ella, podremos usar un software específico para la realización de medidas en recintos acústicos. El más conocido y usado es el DIRAC, que es el que se ha empleado en este trabajo. Este programa de Brüel & Kjaer, conectado a una interfaz de audio, nos permite obtener la respuesta al impulso correspondiente a un trayecto fuente-receptor. Para ello, es capaz de generar internamente señales de excitación y enviarlas a través de la salida de audio de la interfaz hacia un altavoz. Ese altavoz radiará ondas de presión acústica al recinto y serán registradas por un micrófono que, conectado también a la interfaz de audio, enviará la señal al DIRAC para que la procese y obtenga la RIR.

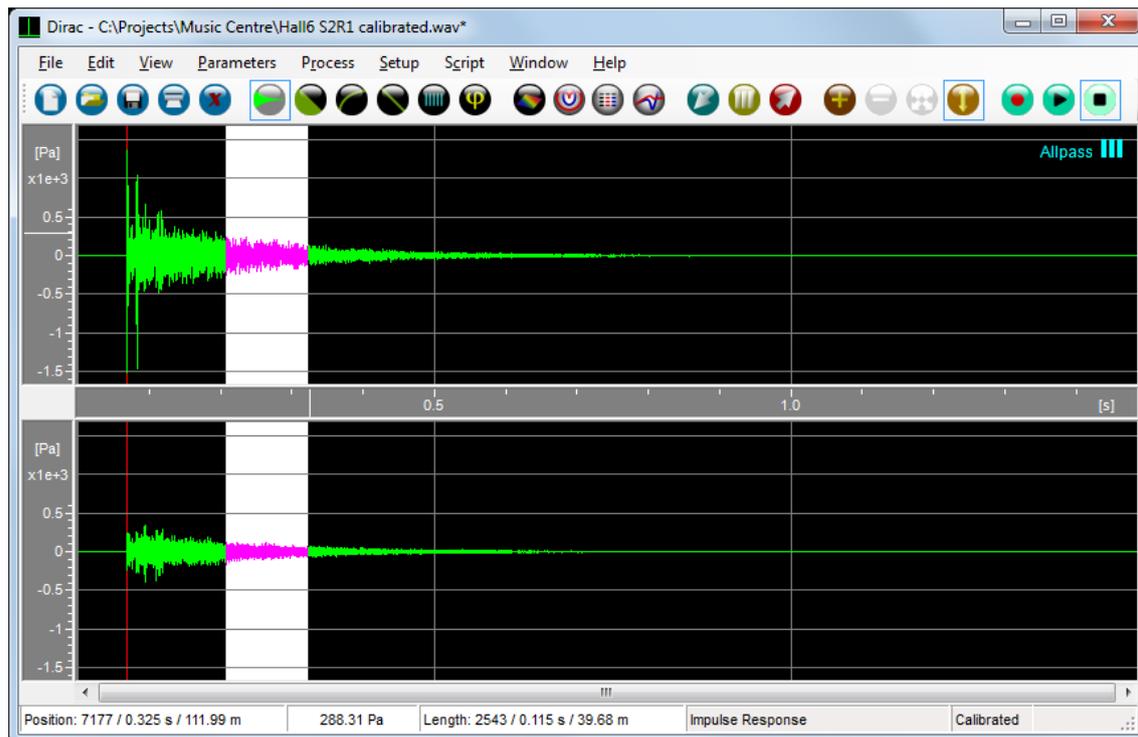


Figura 3.5.- Pantalla del DIRAC mostrando una respuesta binaural al impulso.

Ambos métodos, simulación y medidas, tienen sus ventajas e inconvenientes. En el caso de las simulaciones es obvio que éstas constituyen una simplificación de las propiedades acústicas de la sala y no llegarán a obtener un comportamiento exactamente similar al del recinto real que se está estudiando. No obstante, presentan la ventaja de que es posible la evaluación acústica de una sala antes incluso de que se haya construido, por lo que será posible realizar pruebas con distintos materiales de revestimiento hasta obtener la respuesta deseada.

En el caso de las medidas, el punto a favor es que llegaremos a obtener la auténtica respuesta de la sala. Pero ahora el inconveniente se encuentra en que no conseguiremos determinar la respuesta de todas las ubicaciones posibles directamente, al resultar inviable medir en todas las posiciones posibles de un recinto. Sin embargo, esta dificultad puede solucionarse empleando técnicas de interpolación para obtener las RIR de los puntos que no se han medido directamente.

### 3.4.- Metodología empleada para la auralización práctica de los recintos

En este TFG se va a obtener la respuesta binaural al impulso de tres recintos (BRIR, *Binaural Room Impulse Response*), con la intención de realizar auralizaciones en estéreo. Para ello, se utilizarán dos micrófonos que recogerán la señal que proyectará en el recinto una fuente omnidireccional. Posteriormente, se emplearán las BRIR medidas para que sean convolucionadas con sonidos anecoicos. La convolución se hará siguiendo el esquema de la figura 3.5.

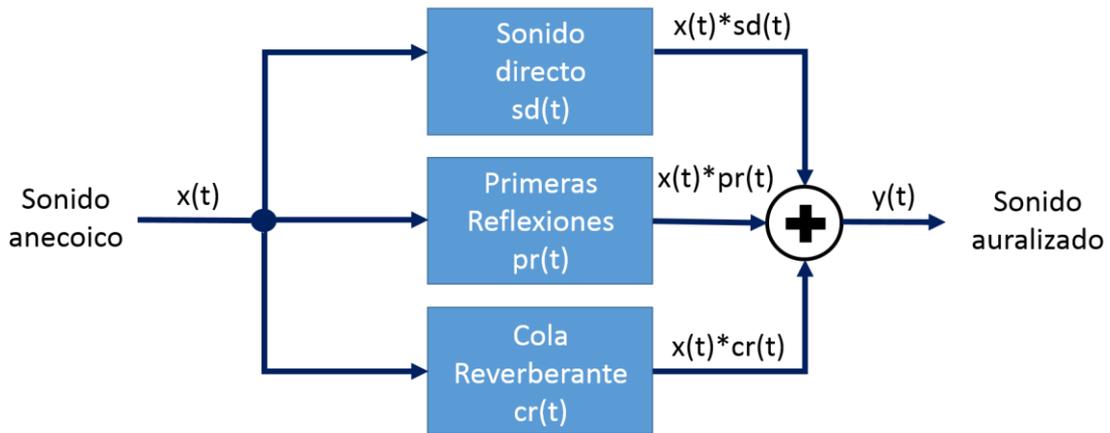


Figura 3.6.- Método de auralización empleado en el TFG.

Según podemos apreciar en la imagen, el sonido sin reflexiones se convolucionará de forma separada con las tres partes principales de la BRIR: el sonido directo, las primeras reflexiones y la cola reverberante. Para ello, se realizará un procesamiento a las respuestas para aislar sus tres partes fundamentales. Luego, los productos obtenidos en las tres convoluciones se sumarán dando como resultado el sonido auralizado. Todo este proceso se puede ver en detalle en el capítulo 7, "Auralización práctica de los recintos acústicos".



# CAPÍTULO 4:

## MEDIDA DE LA RESPUESTA AL IMPULSO DE ESPACIOS ACÚSTICOS

Uno de los principales objetivos en la acústica de recintos es intentar encontrar y definir ciertos parámetros objetivos, con la intención de relacionar de alguna forma las propiedades acústicas (derivadas de las características arquitectónicas del recinto) con las impresiones subjetivas percibidas por el oído humano [2].

Para ello, se han definido una serie de parámetros que describen objetivamente la acústica de una sala: el tiempo de reverberación, la claridad, la definición, etc... Todos ellos se pueden obtener directa o indirectamente de la RIR. Por tanto, la correcta medida de la RIR resulta fundamental, ya que es la “base” de la que se extraen las características acústicas de una sala.

### 4.1.- Técnicas básicas de medida en la acústica de recintos

En un recinto, el camino que recorre una onda sonora desde el emisor hasta el receptor puede ser considerado como un sistema de transmisión acústica, siendo la señal de entrada el sonido generado por la fuente acústica y la señal de salida la captada por un micrófono. Además, si dicho camino puede modelarse como un sistema LTI, la salida del sistema describirá los cambios sufridos por la señal acústica de entrada [2].

Según la teoría de sistemas lineales, para obtener a la salida de un sistema LTI la respuesta al impulso  $h(t)$  con la que se caracterizaría el sistema de transmisión acústica, hay que excitar dicho sistema utilizando como señal de entrada un impulso  $\delta(t)$  [7].

Los problemas surgen cuando queremos generar dicho impulso, puesto que debe tener un rango dinámico adecuado para todas las frecuencias de interés. Normalmente los altavoces son incapaces de reproducir señales impulsivas correctamente debido a la presencia de ruido de fondo en las medidas de campo y, también, a la necesidad de concentrar en un corto intervalo de tiempo la energía de excitación para obtener una relación señal-ruido (SNR) suficientemente alta. Además, si la amplitud de la señal de excitación sobrepasa el rango dinámico del altavoz este puede resultar dañado [2].

Sin embargo, sabemos que la transformada de Fourier del impulso es constante en todo el espectro. Como en este caso sólo nos interesan las frecuencias en las que el oído humano funciona correctamente (desde 20 Hz hasta 20 kHz), podremos generar una señal cuyo contenido espectral sea constante en esa banda, facilitando el trabajo.



Cuando una señal tiene este tipo de característica espectral, es decir, amplitud constante en todas las frecuencias, se dice que su espectro es similar al del ruido blanco. Si dicha señal se pasa por un filtro de octavas observaremos que la energía disminuye en 3 dB cada vez que aumentamos una octava.

Para las medidas acústicas se utiliza también otro tipo de característica espectral, denominada espectro de ruido rosa. El ruido rosa se filtra para dar igual potencia por octava. Puesto que el número de Hz en cada octava sucesiva aumenta por dos, esto significa que la potencia de ruido rosa por Hz de ancho de banda disminuye en un factor de 3 decibelios por octava. Este tipo de coloración espectral se asemeja al comportamiento del oído humano, lo que hace que las frecuencias graves, medias y agudas tengan el mismo nivel de intensidad aparente o sonoridad.

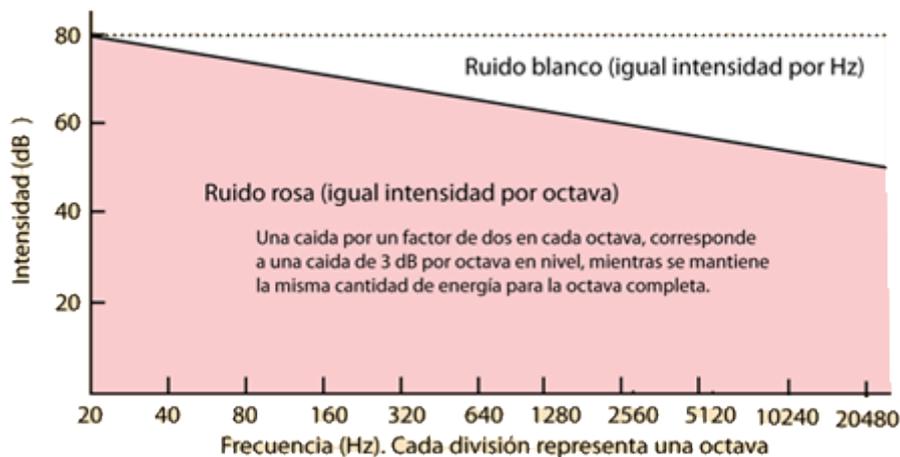


Figura 4.1.- Comparación entre ruido rosa y ruido blanco (escala en dB) [16].

A continuación describiremos las principales señales de excitación que se utilizan para las medidas de recintos.

#### 4.1.1.- Señales pseudoimpulsivas

Es el método más sencillo de todos, y consiste en utilizar fuentes acústicas que generen sonidos transitorios muy breves y de gran potencia. A estas fuentes las llamamos pseudoimpulsivas. Dependiendo de la forma en que se genera el impulso podemos distinguir varios tipos: disparos de pistola, explosión de globos, petardos, etc... La principal ventaja es su bajo coste, pero hay un problema: estos métodos no son repetitivos, es decir, una excitación difiere de otra. De esta manera no se podrá caracterizar a todas las señales de excitación del mismo modo, restando así fiabilidad al proceso de medida. Además, como la duración del impulso es corta no podemos asegurar una correcta distribución energética como para superar el ruido de fondo en todo el espectro de interés [9].

### 4.1.2.- Señales aleatorias

Otro tipo de señales de excitación son las señales aleatorias, que consisten en emitir un ruido aleatorio durante el tiempo suficiente para alcanzar un nivel estable. Al tener una densidad espectral constante, las señales aleatorias parecen adecuadas para obtener una correcta RIR.

La diferencia en este caso es que, en vez de obtener la RIR deconvolucionando la salida  $y(t)$  con la entrada  $x(t)$ , la teoría de sistemas nos indica que la correlación cruzada de dos señales  $x(t)$  e  $y(t)$ , entrada y salida de un sistema, es igual a la autocorrelación de la señal de entrada convolucionada con la RI del sistema [7]:

$$\phi_{xy}(t) = \phi_{xx}(t) * h(t) \quad (\text{Ec 4.1})$$

donde:

$\phi_{xy}(t)$  = correlación cruzada entre la señal de excitación  $x(t)$  y la señal de salida  $y(t)$ .

$\phi_{xx}(t)$  = autocorrelación de  $x(t)$ .

Suponiendo que la señal de entrada es una señal con espectro blanco (al menos en el intervalo de frecuencias de estudio), su autocorrelación se asemeja a un impulso:

$$\phi_{xy}(t) = \delta(t) * h(t) = h(t) \quad (\text{Ec 4.2})$$

Debido a esto, para hallar la función de transferencia será suficiente con obtener la correlación cruzada entre la señal de entrada y la de salida.

Este tipo de señales no son lo suficientemente repetitivas, lo cual provocará una falta de fiabilidad en los resultados.

### 4.1.3.- Señales pseudoaleatorias

Este tipo de señales surgen para solucionar el problema de las señales aleatorias, la falta de repetitividad. Por eso este tipo de señales son deterministas, es decir, tratan de emular un sonido aleatorio, pero en realidad no lo es.

Las señales más destacadas dentro de este grupo son las señales MLS (Maximum Length Sequences) [2]. Son secuencias binarias que pueden ser generadas de una manera muy fácil con un registro de desplazamiento y una puerta digital XOR. Un registro de desplazamiento es un grupo de localidades de memorias llamadas celdas, que operan sincrónicamente por una señal de reloj (pulsos). El objetivo es que un dato cargado en la primera celda sea transferido a la siguiente celda al recibir un pulso de reloj, hasta moverlo a lo largo de todo el registro. El dato es cargado en la primera etapa moviéndose una posición a la izquierda por cada transición positiva del pulso del reloj, hasta salir y ser descartado en el otro extremo. Se establece un circuito cerrado de retroalimentación de manera que intercepte la salida de dos o más etapas y alimente el resultado de nuevo a la primera etapa. Si el registro de desplazamiento tiene  $N$  etapas, la longitud  $L$  de la secuencia más larga que se puede obtener antes de que la secuencia comience a repetirse

es  $L = 2^N - 1$ . La eliminación de un estado se hace para que cada periodo de la señal MLS tenga la longitud exacta de un bloque FFT, con el propósito de facilitar su procesado. Si se escoge adecuadamente el cierre de la puerta XOR, la secuencia binaria resultante será de máxima longitud.

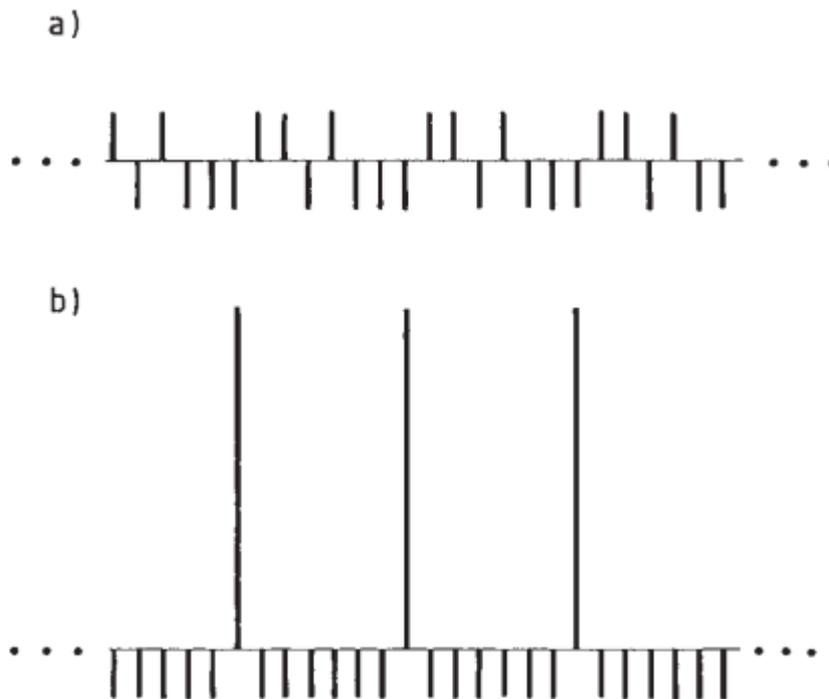


Figura 4.2.- a) Representación temporal de una señal MLS con  $N = 3$ . b) Representación temporal de la autocorrelación de una señal MLS. Su valor máximo es igual a  $L$  [2].

Las MLS tienen unas propiedades que las hacen adecuadas para las medidas de funciones de transferencia, como la de que su autocorrelación es muy similar a la de un impulso (posee un máximo cuya amplitud es igual a  $L$  y el resto de valores hasta completar un periodo es igual a  $-1$ ). Además el cálculo de su correlación cruzada es más sencillo gracias a la transformada de Hadamard, que nos permite hacer los cálculos sin abandonar el dominio temporal. Pero también tienen sus inconvenientes como la alta vulnerabilidad a la distorsión y la varianza temporal [11]. Además, la ventaja de su sencillez de cómputo se ha visto desplazada ante el incremento de velocidad en los actuales procesadores informáticos.

Es habitual normalizar la función de autocorrelación de la señal MLS dividiendo la suma del producto por  $L$ , con el propósito de no exceder la zona lineal del altavoz o altavoces usados como fuente acústica. Con esta normalización el pico es 1 y los valores de los desplazamientos intermedios son igual a  $-1/L$ .

#### 4.1.4.- Barridos en frecuencia

Para finalizar disponemos de los barridos en frecuencia o *sweeps*. Son señales deterministas, consiguiendo así una mejor SNR y menor vulnerabilidad frente a la varianza en el tiempo. El resultado obtenido será mejor con los barridos en frecuencia que con las señales



anteriores. Aumentando la duración del barrido se mejora la SNR y disminuye la influencia de la variación frente al tiempo [12].

Este tipo de señales se basan en una frecuencia pura creciente en el tiempo. De este modo, se excita toda la zona espectral de interés por medio del tono de excitación en ese instante.

Los barridos se pueden crear en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. En este último caso, su magnitud y retardo de grupo son sintetizados y, haciendo la transformada inversa de Fourier, se obtendrá el barrido.

Para sintetizar el retardo de grupo en función de la frecuencia  $\tau(f)$ , se debe definir la fase de la señal, indicando así en qué momento del tiempo llega cada componente de frecuencia:

$$\tau(f) = - \frac{d\varphi}{df} \quad (\text{Ec 4.3})$$

donde:

$$\frac{d\varphi}{df} = \text{derivada de la fase respecto de la frecuencia.}$$

Para saber la relación entre el tiempo y la frecuencia tenemos la frecuencia instantánea  $f_i(t)$ , que nos indica con qué frecuencia se está excitando en cada instante de tiempo.

$$f_i(t) = \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{Hz}) \quad (\text{Ec 4.4})$$

donde:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \text{derivada de la fase respecto del tiempo.}$$

A continuación veremos los posibles barridos que existen.

**- Barrido lineal:** Los barridos lineales tienen un espectro blanco y su incremento en frecuencia se hace manteniendo constante el factor K [12].

$$K = \frac{f_2 - f_1}{T} \quad (\text{Ec 4.5})$$

donde:

$f_1$  y  $f_2$  representan las frecuencias inicial y final, respectivamente.

T representa la duración total del barrido.

Para sintetizar un barrido lineal en el dominio del tiempo solo hay que crear una señal senoide, cuya fase se vaya incrementando respecto del tiempo.

$$f_i(t) = \left(\frac{1}{2\pi}\right) \frac{d\varphi}{dt} = Kt + f_1 = \frac{f_2 - f_1}{T} \cdot t + f_1 \quad (\text{Hz}) \quad (\text{Ec 4.6})$$

donde:



$t$  = instante de tiempo actual.

Y sabiendo que la fase se obtiene integrando la frecuencia instantánea, la fase para sintetizar un barrido lineal es:

$$\varphi(t) = 2\pi \int f_i(t) dt = 2\pi \left[ f_1 t + \frac{f_2 - f_1}{T} \cdot \frac{t^2}{2} \right] \quad (\text{rad/s}) \quad (\text{Ec 4.7})$$

**- Barrido exponencial:** Los barridos exponenciales tienen un espectro rosa, es decir, todas las octavas tienen la misma cantidad de energía. En este tipo de barrido la frecuencia aumenta con una fracción fija de una octava por unidad de tiempo [12].

$$K = \frac{\log\left(\frac{f_2}{f_1}\right)}{T} \quad (\text{Ec 4.8})$$

Al igual que en el caso anterior, para sintetizar un barrido exponencial en el dominio del tiempo, se debe crear una señal senoide que tenga una fase creciente con el tiempo, pero en este caso el incremento es logarítmico. Para conseguir esta fase, lo primero que hay que hacer es definir la frecuencia instantánea.

$$\log(fi(t)) = \left(\frac{1}{2\pi}\right) \frac{d\varphi}{dt} = Kt + \log(f_1) = \frac{\log\left(\frac{f_2}{f_1}\right)}{T} \cdot t + \log(f_1) \quad (\text{Ec 4.9})$$

$$fi(t) = e^{\left(\frac{\log\left(\frac{f_2}{f_1}\right)}{T} \cdot t + \log(f_1)\right)} = e^{\left(\frac{\log\left(\frac{f_2}{f_1}\right)}{T} \cdot t\right)} \cdot e^{\log(f_1)} = e^{\left(\frac{\log\left(\frac{f_2}{f_1}\right)}{T} \cdot t\right)} \cdot f_1 \quad (\text{Hz}) \quad (\text{Ec 4.10})$$

Finalmente, podemos conseguir la fase integrando la expresión anterior.

$$\varphi(t) = 2\pi \int fi(t) dt = \frac{2\pi \cdot f_1 \cdot T}{\log\left(\frac{f_2}{f_1}\right)} \cdot e^{\left(\frac{\log\left(\frac{f_2}{f_1}\right)}{T} \cdot t\right)} \quad (\text{rad/s}) \quad (\text{Ec 4.11})$$

## 4.2.- Señales usadas para la excitación de los recintos

Para excitar acústicamente los recintos que se han medido, el software que se ha utilizado para medir las RIR, el Dirac 4.0, permite elegir entre tres tipos de señales: MLS, barrido lineal y barrido exponencial. Además, en el caso de las dos primeras, permite activar un filtro para convertir el espectro blanco característico de estas señales en rosa, con el objetivo de mejorar las respuestas medidas en el rango de las frecuencias bajas [9].

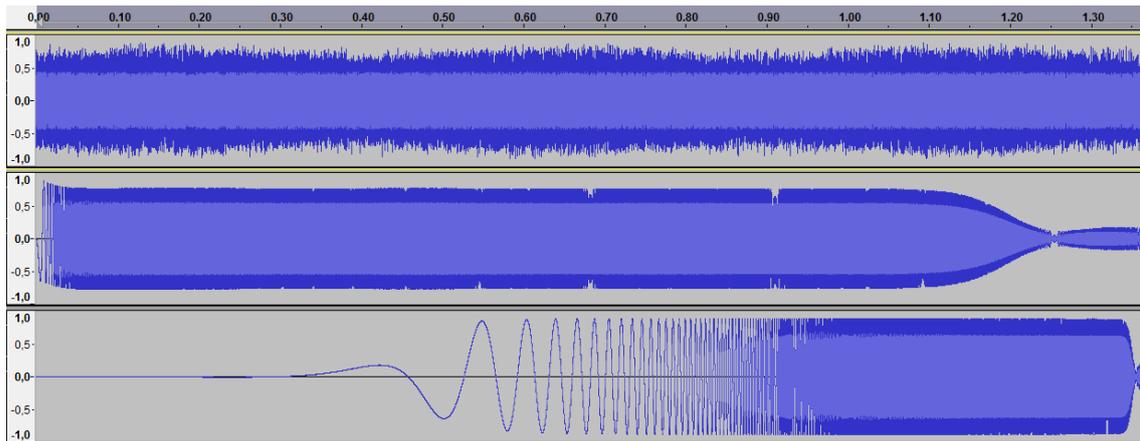


FIGURA 4.3.- ARRIBA, SEÑAL MLS. CENTRO, BARRIDO LINEAL. ABAJO, BARRIDO EXPONENCIAL.

Para el caso de las medidas de campo, destinadas a obtener los parámetros acústicos de los recintos, se han escogido dos tipos de señales: MLS y barrido lineal, ambas con el filtro rosa anteriormente mencionado. En el caso del barrido lineal, se ha preferido escoger esta opción en lugar de usar el barrido exponencial directamente porque se observó que en su espectro aparecían una serie de resonancias a partir de los 3 kHz, mientras que el barrido lineal filtrado ofrecía una mejor uniformidad en toda la banda (figura 4.5).

La metodología que se ha seguido es de excitar tres veces cada posición de medida en el recinto por cada señal utilizada, con el propósito de obtener en cada posición un número aceptable de medidas con el que poder realizar promedios estadísticos para disminuir el margen de error. Esto quiere decir que por cada localización de micrófono tendremos un total de seis medidas, tres realizadas con señal MLS y otras tres realizadas con barrido lineal.

Para el caso de las medidas realizadas para la simulación binaural, se ha usado sólo el barrido lineal, obteniéndose por cada localización de micrófono tres medidas. Esta decisión se tomó para agilizar los procesos de medida en los recintos, después de observar que las medidas con ambos tipos de señal no arrojaban resultados contradictorios. También se han consultado artículos que hablan sobre la preferencia actual de medir las RIR con barridos, ya que son más robustos frente a las distorsiones y a las variaciones temporales, además de ofrecer una mejor relación señal-ruido [11] [12].

Durante el análisis de las medidas de campo, se observó que éstas presentaban un ancho de banda reducido. Investigando la incidencia se detectó que la causa era la entrada de audio del ordenador portátil utilizado en las medidas, ya que realiza un filtrado de las componentes espectrales a partir de los 6 kHz. Este inconveniente no desvirtúa los resultados obtenidos, ya que la normativa aplicada a las medidas (ISO 3382) establece que el rango espectral mínimo que deben cubrir las medidas son las bandas de un tercio de octavas con frecuencias medias desde 100 Hz hasta 5 kHz. Por lo tanto, los resultados obtenidos en las octavas con frecuencias centrales 6,3, 8 y 10 kHz no son correctos y no serán tenidos en cuenta a la hora de realizar los promedios entre octavas. En la figura 4.5, podemos apreciar el efecto de filtrado mencionado para un barrido lineal.

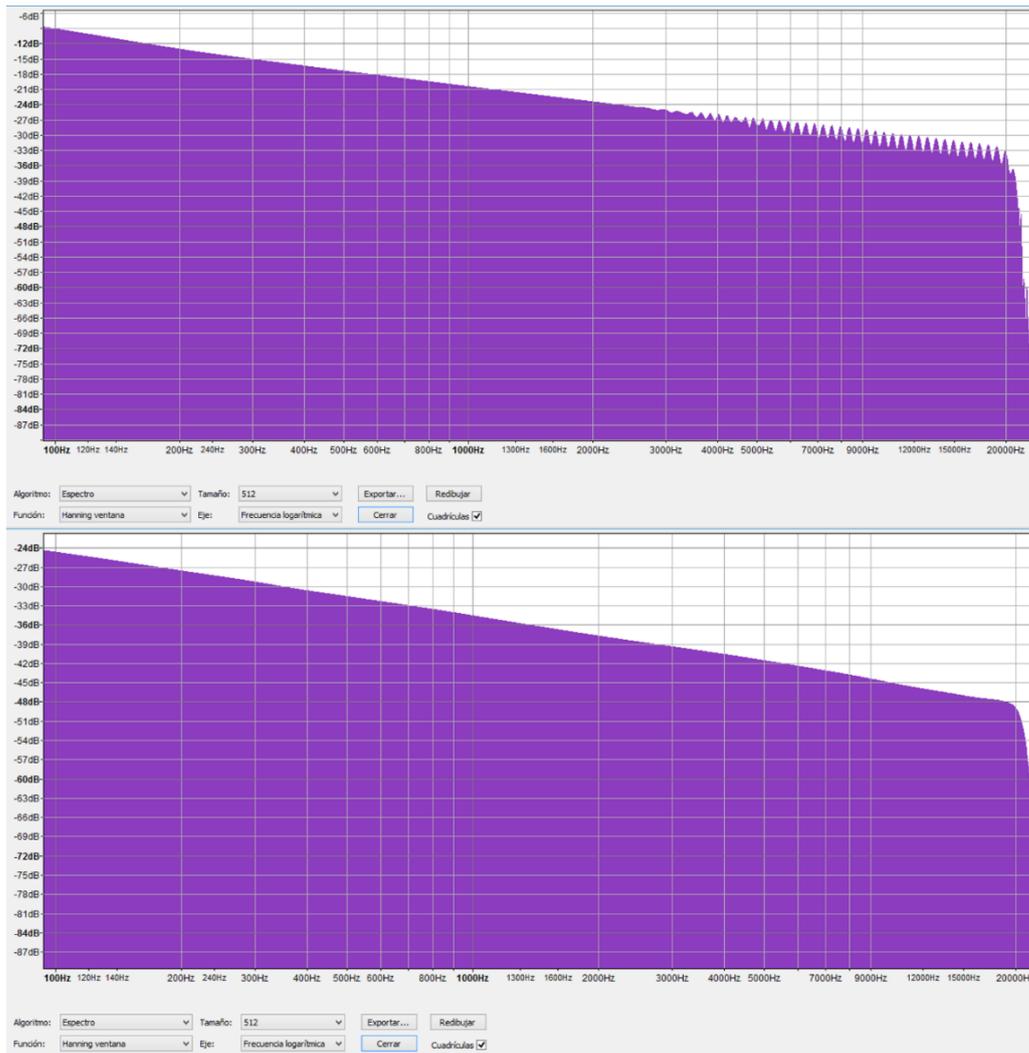


Figura 4.4.- Arriba, espectro del barrido exponencial (Pueden observarse las resonancias que se producen a partir de los 3 kHz). Abajo, espectro del barrido lineal con filtro rosa.

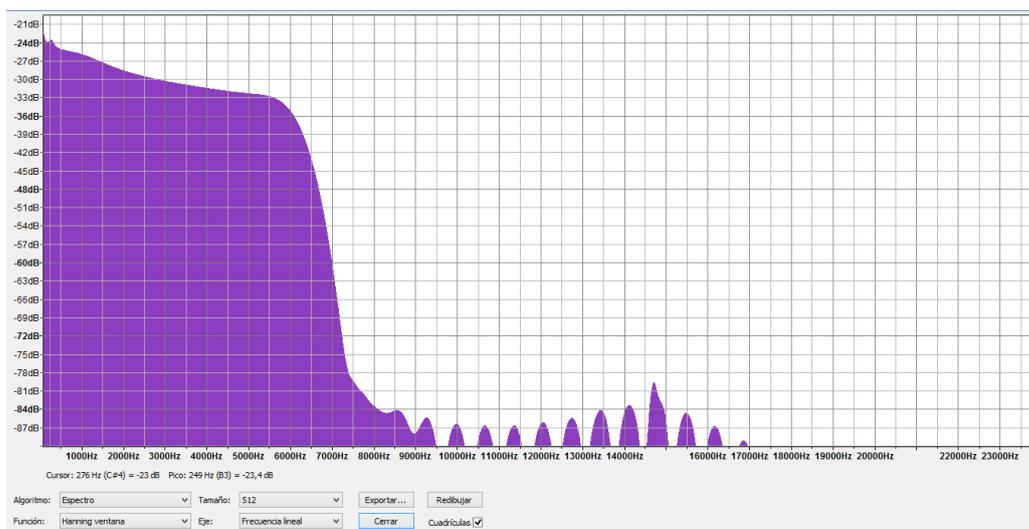


Figura 4.5.- Barrido lineal filtrado por la entrada de audio del portátil utilizado para las medidas.

# CAPÍTULO 5:

## SISTEMAS PARA LA MEDIDA DE LA RESPUESTA

### BINAURAL

En este capítulo describiremos los equipos que se han utilizado para las medidas de la RIR en las distintas salas que han sido objeto de estudio en este TFG. Sólo se describirá la funcionalidad de cada uno de los instrumentos en el contexto del proceso de medida así como su conexionado, ya que las especificaciones técnicas de cada uno de ellos se detallarán en el Pliego de Condiciones. Además, en el DVD adjunto a la memoria están disponibles las hojas de características o manuales de los equipos de medida.

Distinguiremos dos conjuntos distintos de equipos de medida: uno para realizar las medidas de campo en los recintos, con el propósito de extraer sus principales parámetros acústicos y así obtener los criterios objetivos para seleccionar tres recintos definitivos, y otro para medir las BRIR con el propósito de utilizarlas para la auralización de sonidos anecoicos en la interfaz gráfica de Matlab.

#### 5.1.- Equipo de medidas de campo

Para la realización de las medidas de campo, destinadas a la obtención de los parámetros acústicos de los recintos a estudiar, se ha realizado el sistema de medida que exponemos en el diagrama de la figura 5.1:

Este sistema consta de los siguientes equipos:

- **Ordenador Netbook Asus EEE PC 1015PD:** Envía las señales de excitación generadas por el Dirac desde su salida de audio hasta la entrada de audio del amplificador de potencia CESVA AP600.
- **Amplificador AP600:** Amplifica la señal que le es enviada desde el ordenador y la envía desde su salida de audio hacia la fuente.
- **Fuente dodecaédrica BP012:** Está formada por doce altavoces que permitirán emitir la señal que llega del amplificador en todas las direcciones del recinto. La presión acústica que genera será recogida por el sonómetro.



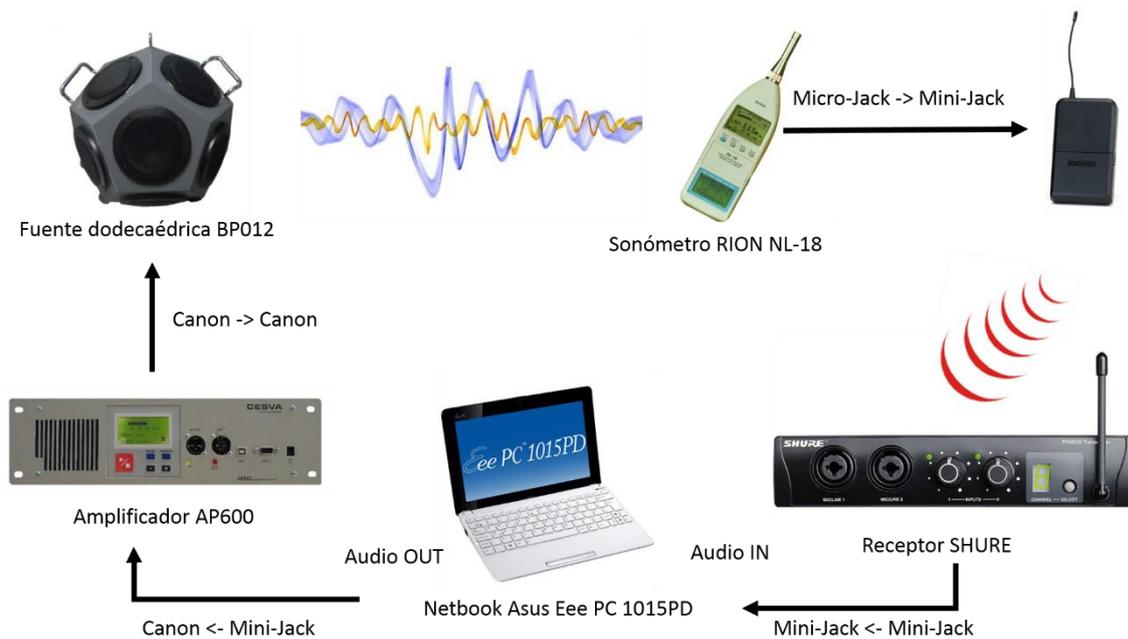


Figura 5.1.- Esquema de conexionado del sistema de medidas de campo.

- **Sonómetro RION NL-18:** Capta la presión acústica que emite la fuente y la transforma en una señal eléctrica. Dicha señal se enviará al transmisor SHURE desde la salida de corriente alterna del sonómetro.
- **Sistema de comunicación inalámbrico SHURE:** Consta de un transmisor y un receptor de RF. El transmisor recogerá la salida eléctrica del sonómetro y la emitirá hacia el receptor. El receptor, a su vez, realizará la demodulación de la señal de RF y la enviará a través de su salida de audio a la entrada de audio del ordenador.

## 5.2.- Equipo de medidas para simulación binaural

A continuación, en el diagrama de la figura 5.2 exponemos el sistema de medida que se ha utilizado para la obtención de medidas con el propósito de usarlas para la simulación binaural:

Podemos apreciar que, respecto al sistema anterior, se han modificado los elementos destinados a la recepción del sonido para poder enviar al ordenador las señales recogidas por los dos micrófonos. Los nuevos equipos son los siguientes:

- **Micrófonos Behringer EMC8000:** Se usan dos micrófonos de este tipo para poder recoger dos señales de audio para realizar la simulación binaural. La señal de cada micrófono se envía a la interfaz de audio.
- **AKAI Professional EIE Pro:** La interfaz de audio recoge las señales eléctricas de los micrófonos y las envía al ordenador a través de su propia interfaz USB.

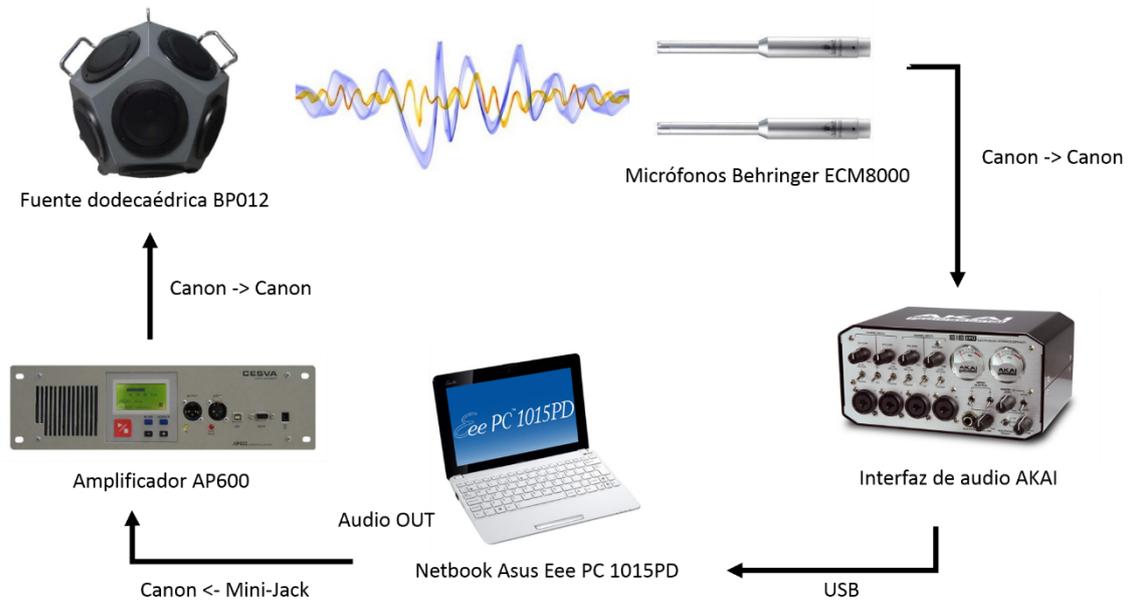


Figura 5.2.- Esquema de conexionado del sistema de medidas para simulación binaural.

Es importante realizar la calibración de los equipos en ambos sistemas mediante la opción disponible en el software Dirac para poder obtener mayor precisión en las medidas. El proceso de calibración se detalla en el Pliego de Condiciones.



# CAPÍTULO 6:

## MEDIDAS PRÁCTICAS DE LAS RESPUESTAS AL IMPULSO EN LOS RECINTOS

Para el desarrollo de este trabajo se han elegido cinco recintos, tres de ellos pertenecientes a la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC) y los otros dos restantes pertenecientes al Instituto Superior de Teología de las Islas Canarias (ISTIC). Dichos recintos son:

- Salón de actos de la Escuela de Ingeniería de Telecomunicación y Electrónica (EITE) de la ULPGC.
- Salón de actos de la Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles (EIIC) de la ULPGC.
- Salón de actos de la Escuela de Arquitectura (EA) de la ULPGC.
- Sala de Conferencias del ISTIC.
- Aula Magna del ISTIC.

El propósito de la realización de medidas de campo en estas salas es la de extraer a partir de las RIR los TR en función de la frecuencia de cada una de las salas. Con esta información y la obtención de las dimensiones del recinto, podremos obtener el coeficiente medio de absorción. Con este dato, elegiremos tres de los recintos para realizar una segunda ronda de medidas, ésta vez para obtener las BRIR con la intención de procesarlas para su uso en la auralización.

### 6.1.- Metodología para calcular los parámetros acústicos

En cada recinto se elegirán una serie de posiciones, tanto del micrófono como de la fuente, en función de las recomendaciones recogidas en la norma UNE-EN ISO 3382:2 (2008), “Medición de parámetros acústicos en recintos. Tiempo de reverberación en recintos ordinarios”. En el Pliego de Condiciones se detalla el método escogido para determinar las posiciones tanto del micrófono como de la fuente. También está disponible el texto de la norma en el DVD adjunto a la memoria.

En cada posición de micrófono se realizarán un total de seis medidas con el software Dirac: tres medidas con señal MLS y tres medidas con barrido lineal, ambas señales filtradas para obtener un espectro rosa. Esta serie de medidas se repetirán por cada posición de fuente. El Dirac guarda las RIR capturadas en archivos wav. Los archivos se guardarán siguiendo el siguiente esquema para los nombres:





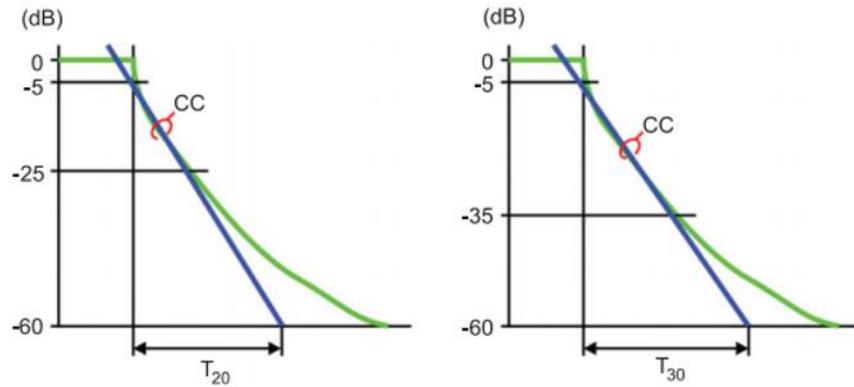


Figura 6.2.- Izquierda, forma de calcular el  $T_{20}$ . Derecha, forma de calcular el  $T_{30}$ . [9]

- **CC (EDT,  $T_{20}$ ,  $T_{30}$ , RT):** Coeficientes de correlación de cada uno de los tiempos medidos. Determina si la sección de la curva de decaimiento elegida para medir el tiempo específico sigue una línea recta [9]. Si es así, su valor será igual a -1. Cuanto menor recta sea, el valor del CC se aproximará a 0.
- **SNR (Relación señal - ruido):** Mide la relación logarítmica entre el nivel de la señal que se registra con el nivel del ruido de fondo. Esta medida sirve para evaluar la calidad de la señal que ha sido recibida por el sistema de recepción [9].

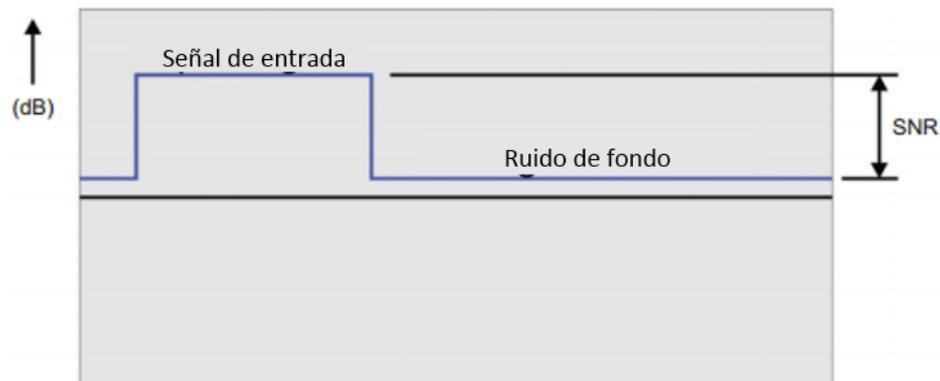


Figura 6.3.- SNR. [9]

- **INR (Relación impulso - ruido):** Mide la relación logarítmica entre el nivel más alto de la RIR con el nivel del ruido de fondo. Esta medida mide la calidad general del sistema de medida al completo [9].

Una vez obtenidos estos parámetros en cada medida individual, calculados por tercios de octava, se procederá a trasladar la información desde el Dirac a una hoja de cálculo para realizar los siguientes promedios por cada posición de micrófono:

1. Promedio de las tres medidas realizadas con señal MLS por cada posición de fuente.
2. Promedio de las tres medidas realizadas con barrido lineal por cada posición de fuente.
3. Promedio global, a partir de los promediados obtenidos en el paso 1, de las medidas realizadas en todas las posiciones de fuente con señal MLS.

- Promedio global, a partir de los promediados obtenidos en el paso 2, de las medidas realizadas en todas las posiciones de fuente con barrido lineal.

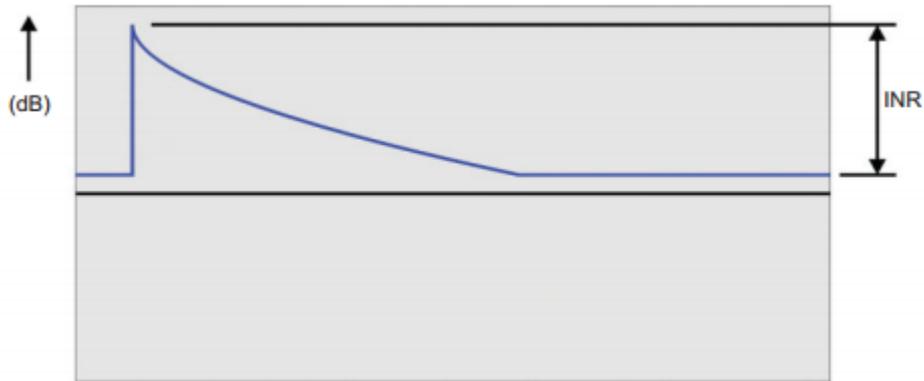


Figura 6.4.- INR. [9]

Es decir, por cada posición de micrófono obtendremos el promediado de los parámetros medidos por cada señal de excitación usada.

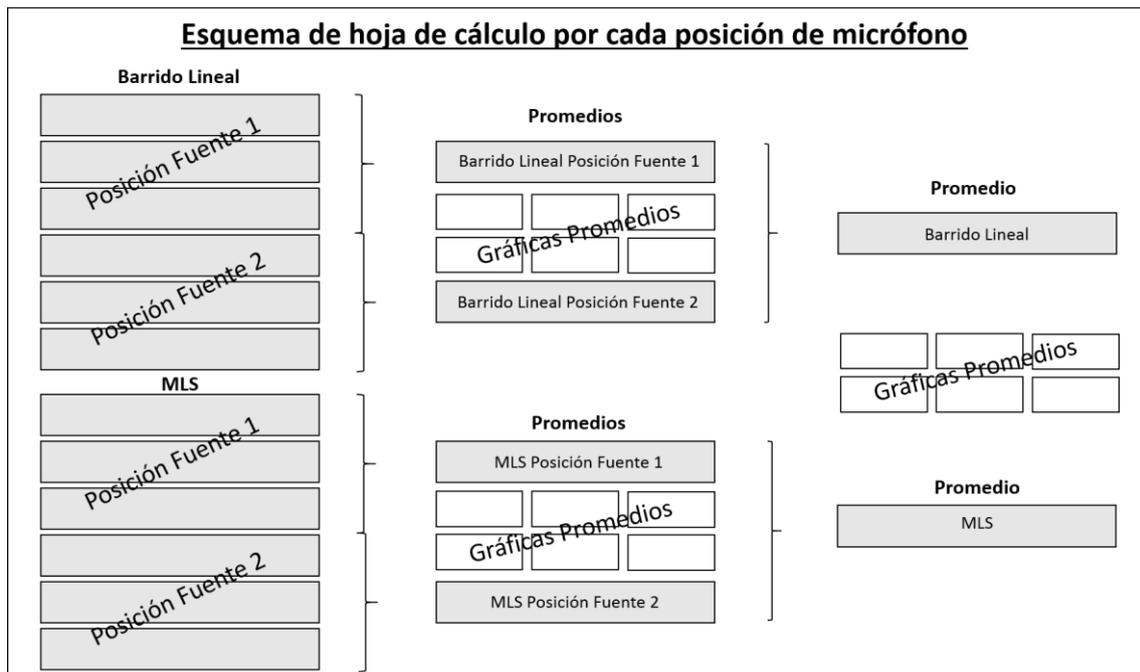


Figura 6.5.- Esquema de las hojas de cálculo correspondientes a cada posición de micrófono.

A continuación, se trasladarán los resultados de cada posición de micrófono a otra hoja de cálculo, una por cada señal usada. En estas nuevas hojas se harán también los siguientes promedios:

- Promedio para cada posición de micrófono de los valores globales obtenidos del EDT,  $T_{20}$  y  $T_{30}$ . El promediado se considerará el TR de cada posición individual.

2. Promedio de los TR de cada posición de micrófono con el propósito de obtener un único valor en función de la frecuencia para la sala.

Una vez obtenido el TR global en función de la frecuencia, se procederá a obtener el coeficiente de absorción media de la sala en función de la frecuencia despejándolo de la expresión de Sabine para el TR (Ecuación 2.7).

Con la intención de obtener un parámetro global para poder comparar los recintos, se procederá a calcular el  $TR_{mid}$  [6], que tiene la siguiente expresión:

$$TR_{mid} = \frac{TR(500 \text{ Hz}) + TR(1 \text{ kHz})}{2} \text{ (s)} \quad (\text{Ec 6.2})$$

Con este valor se obtendrá el coeficiente medio de absorción ( $\bar{\alpha}$ ) global del recinto. Conociendo la absorción media de cada uno de los locales, elegiremos tres de los cinco recintos para realizar las mediciones definitivas para la auralización, escogiendo uno con una absorción alta, otro con una absorción media y el último con una absorción baja.

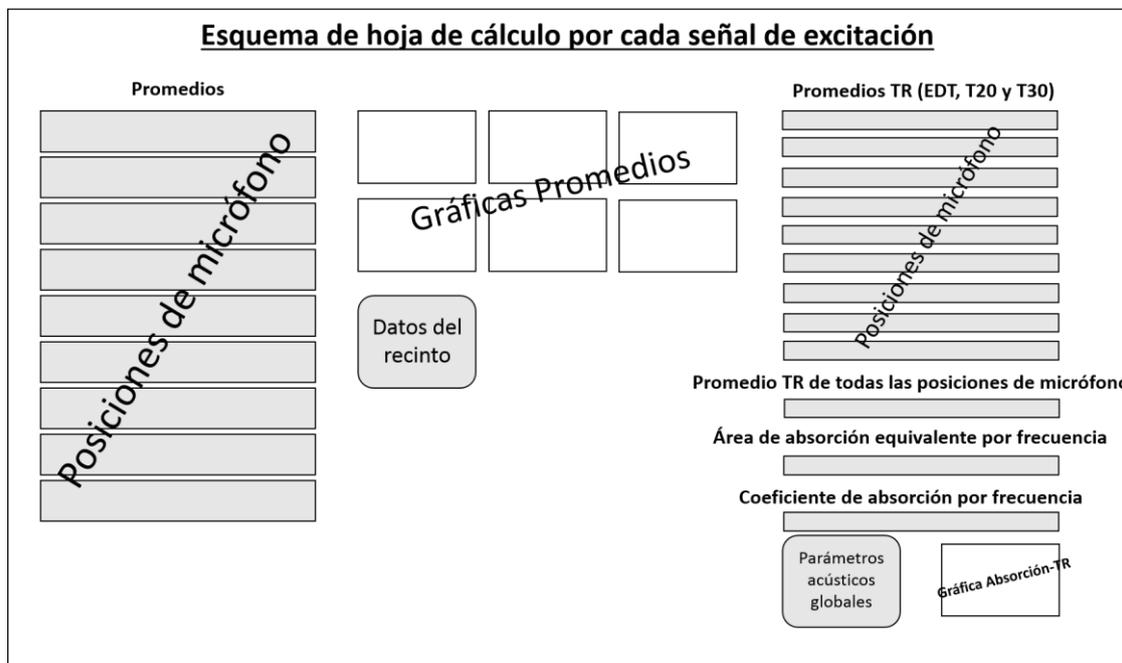


Figura 6.6.- Esquema de las hojas de cálculo con los parámetros globales del recinto por cada señal de excitación usada.

A continuación representaremos los datos obtenidos de los recintos, ilustrándolos con un esquema de cada uno de ellos para poder ver sus dimensiones arquitectónicas y geometría.

Para no recargar la memoria con innumerables tablas, se presentarán sólo las gráficas de los parámetros acústicos obtenidos mediante la señal de barrido lineal por cada posición de micrófono, junto con el valor del coeficiente medio de absorción en función de la frecuencia. Por último, se detallarán también los valores del  $TR_{mid}$  y del coeficiente medio de absorción global de la sala. Las hojas de cálculo con los promedios realizados así como los valores que aquí se muestran usando como excitación señal MLS se pueden consultar en el DVD adjunto a la memoria. Se podrá

observar que no se aprecian resultados marcadamente contradictorios entre las medidas realizadas con ambos tipos de señales.

En los esquemas de los locales, se marcarán con el icono de un altavoz las ubicaciones de las fuentes, y con el icono de un micrófono las posiciones de micrófono. Estas posiciones tendrán la letra “M” si sólo se han usado para medidas de campo, la letra “S” si sólo se han usado para las medidas de simulación, o “M+S” si esa posición se ha empleado para los dos tipos de medidas.

## 6.2.- Datos y resultados obtenidos de los recintos



### 6.2.1.- SALÓN DE ACTOS DE LA EITE DE LA ULPGC

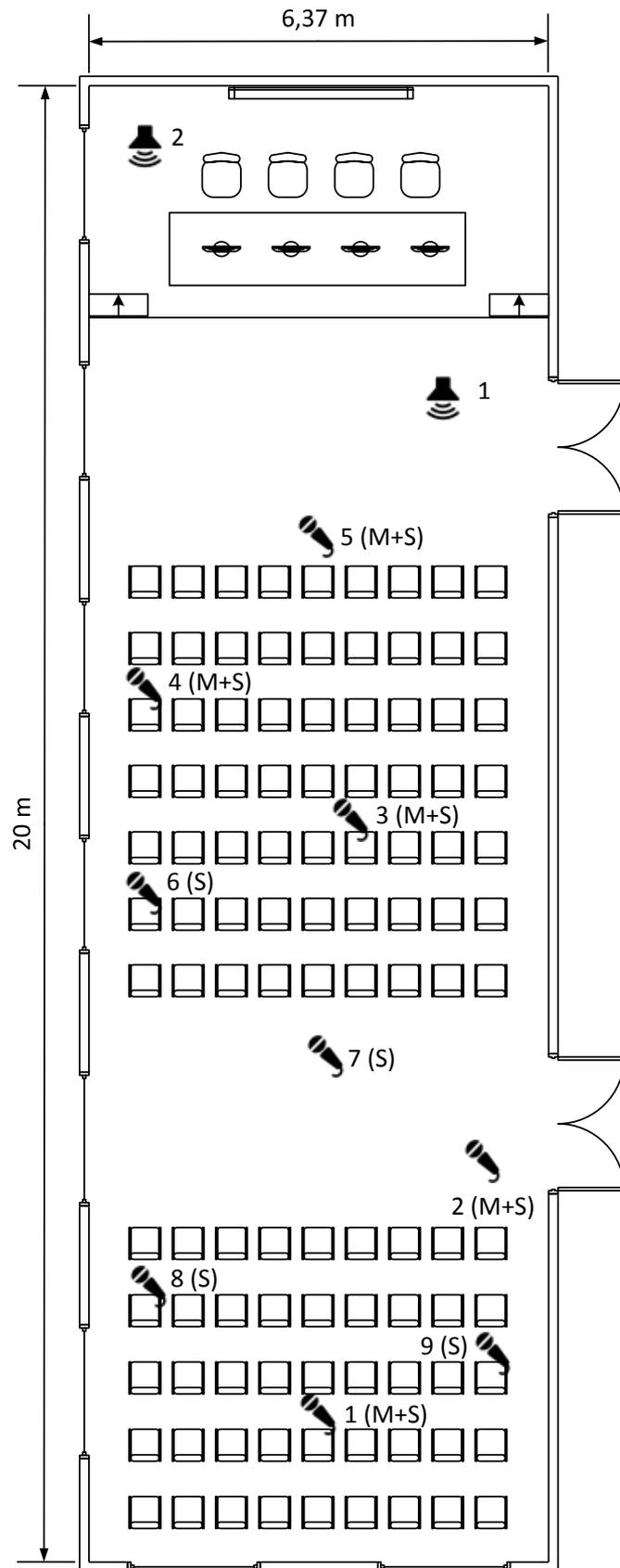
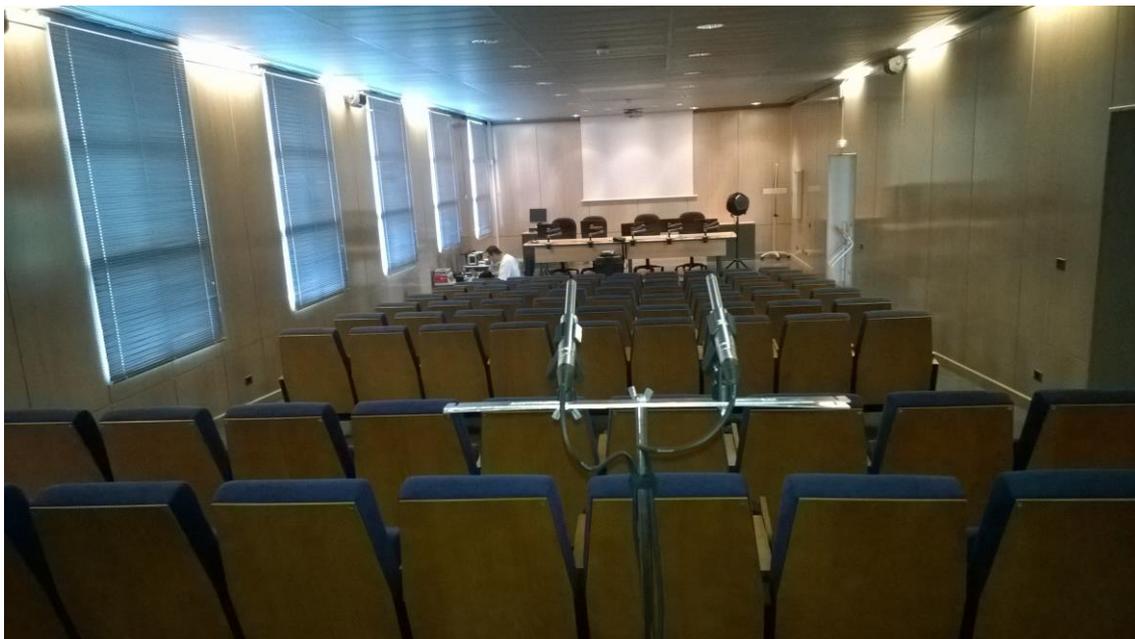


Figura 6.7.- Esquema del Salón de Actos de la EITE.

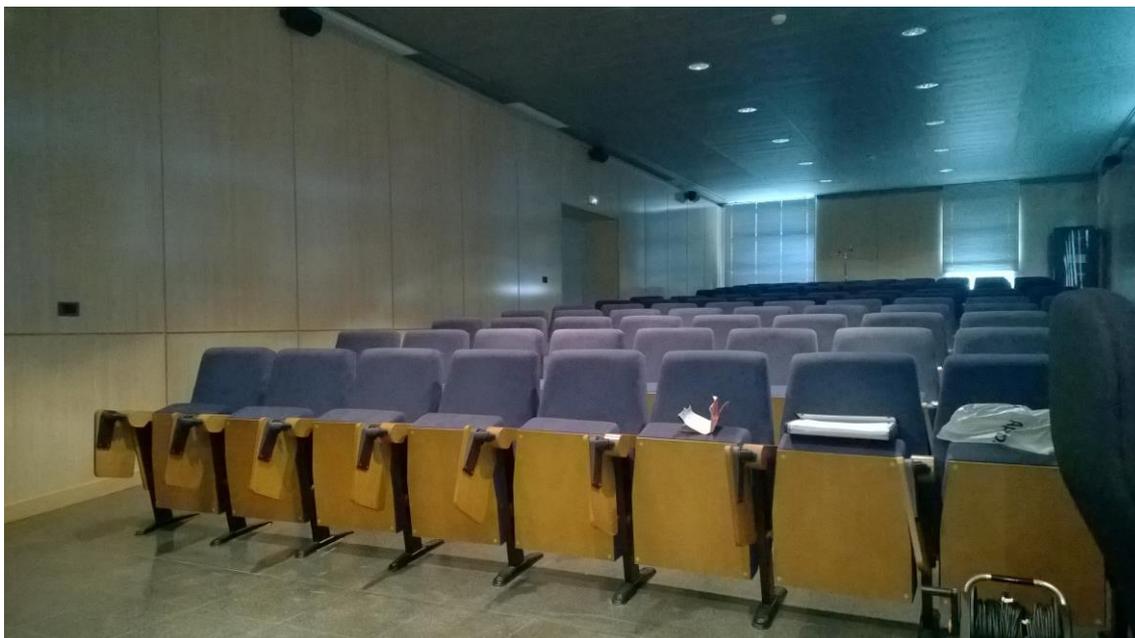
### DIMENSIONES DEL RECINTO

- **Altura:** 3,48 m;
  - **Anchura:** 6,37m
  - **Largo:** 20 m
  - **Volumen:** 440 m<sup>3</sup>
- Altura del escenario:** 0,3 m.

### FOTOGRAFÍAS DEL RECINTO



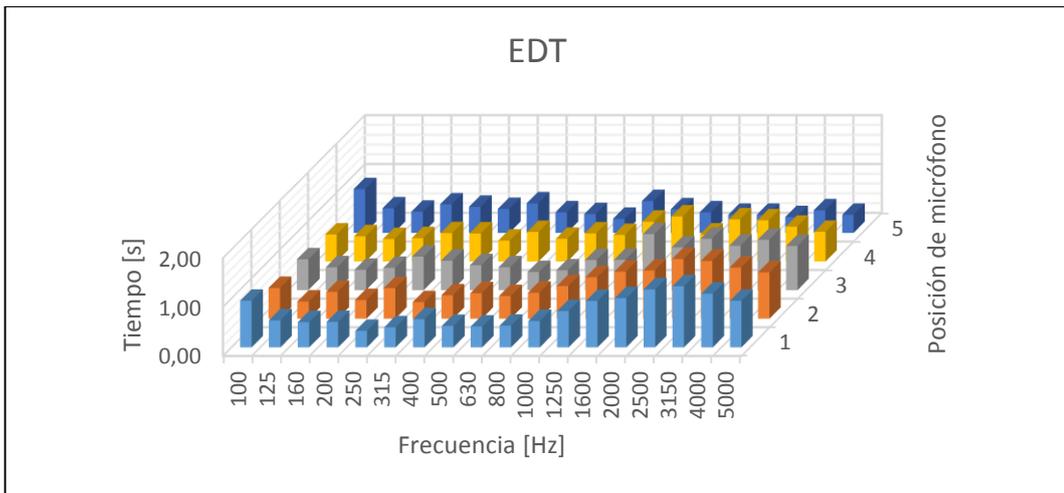
*Figura 6.7.1.- Vista del Salón de Actos de la EITE desde butacas traseras.*



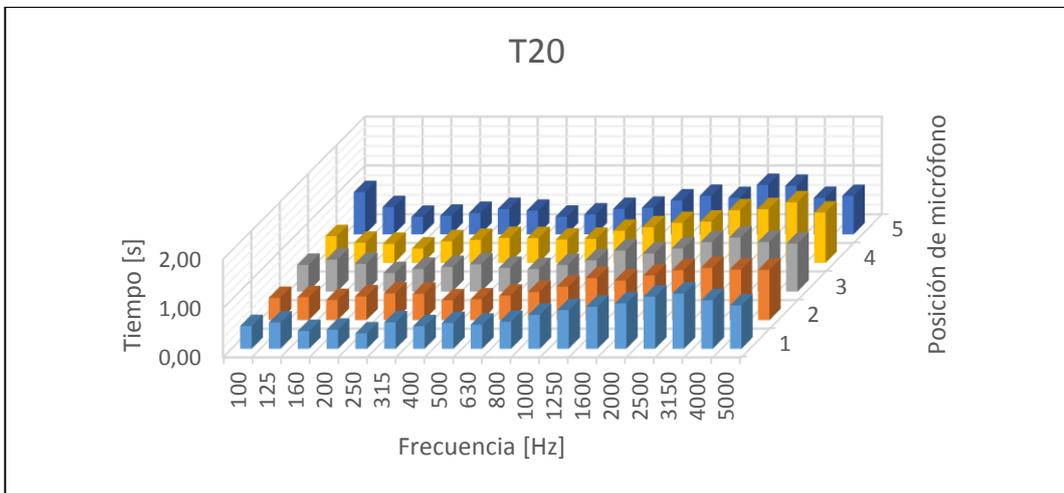
*Figura 6.7.2.- Vista del Salón de Actos de la EITE desde el escenario.*



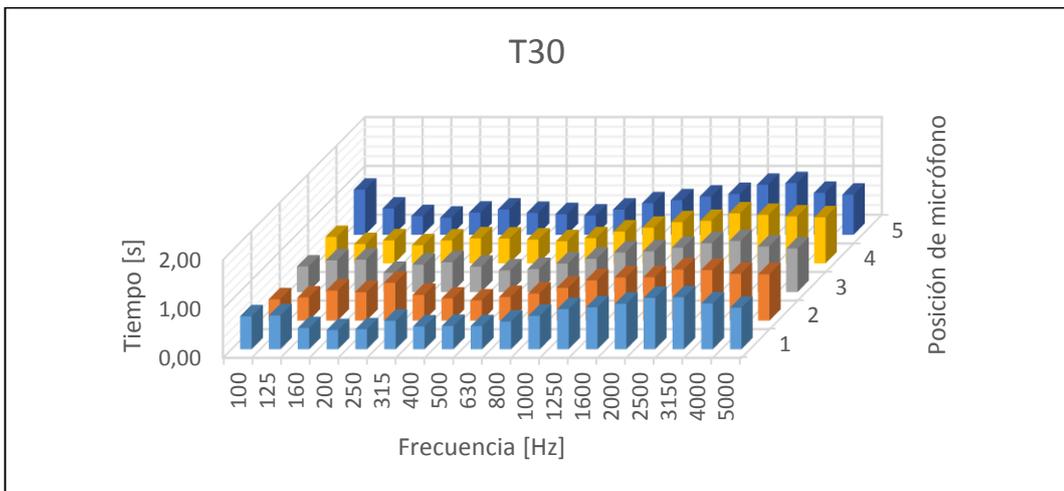
## RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS MEDICIONES



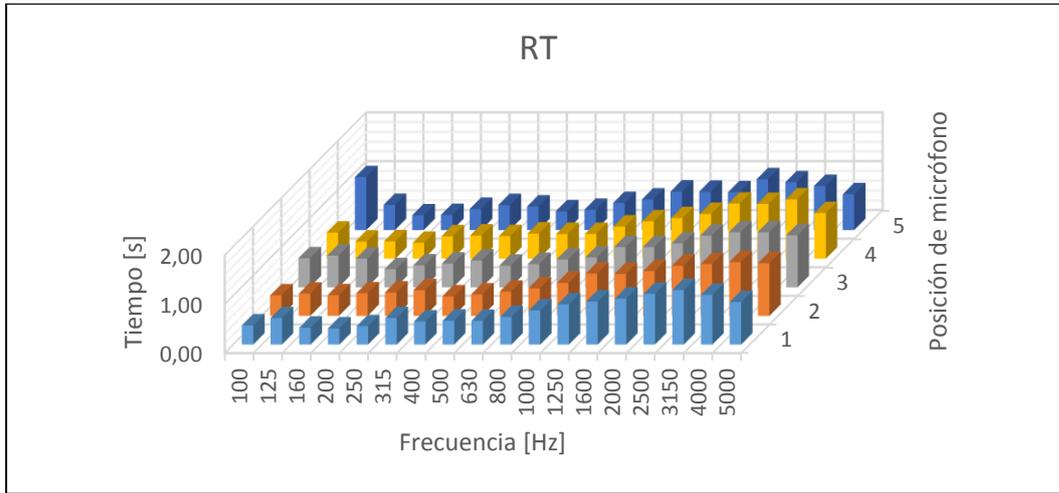
Gráfica 6.1.- Valores del EDT del salón de actos de la EITE.



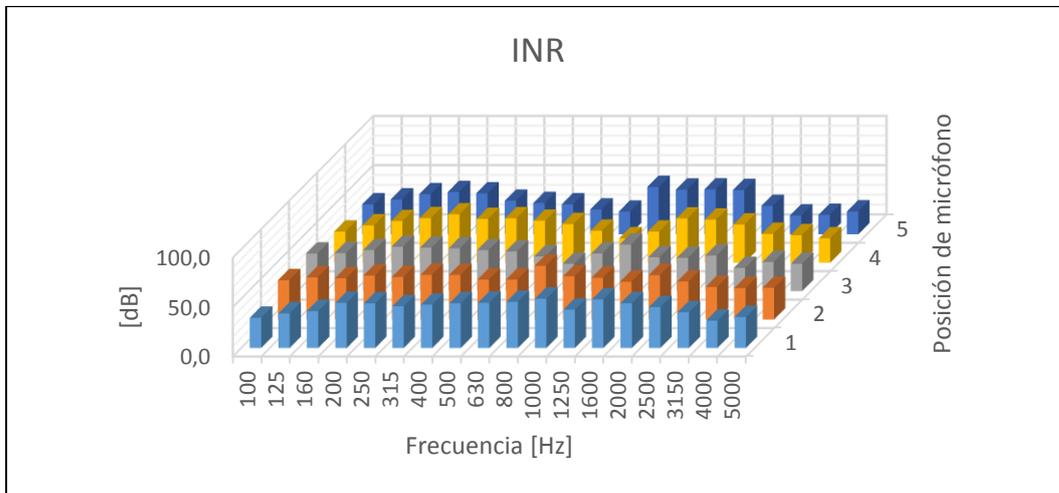
Gráfica 6.2.- Valores del T20 del salón de actos de la EITE.



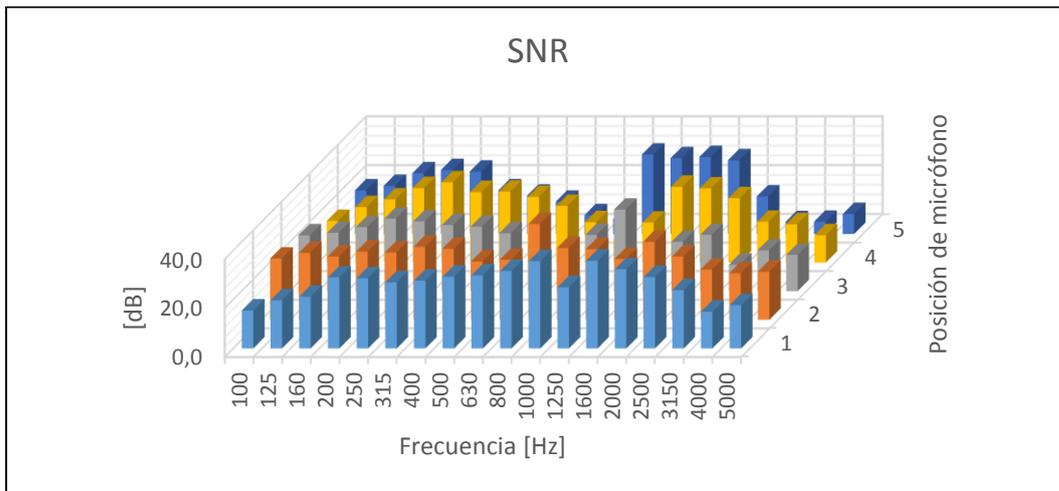
Gráfica 6.3.- Valores del T30 del salón de actos de la EITE.



Gráfica 6.4.- Valores del RT del salón de actos de la EITE.

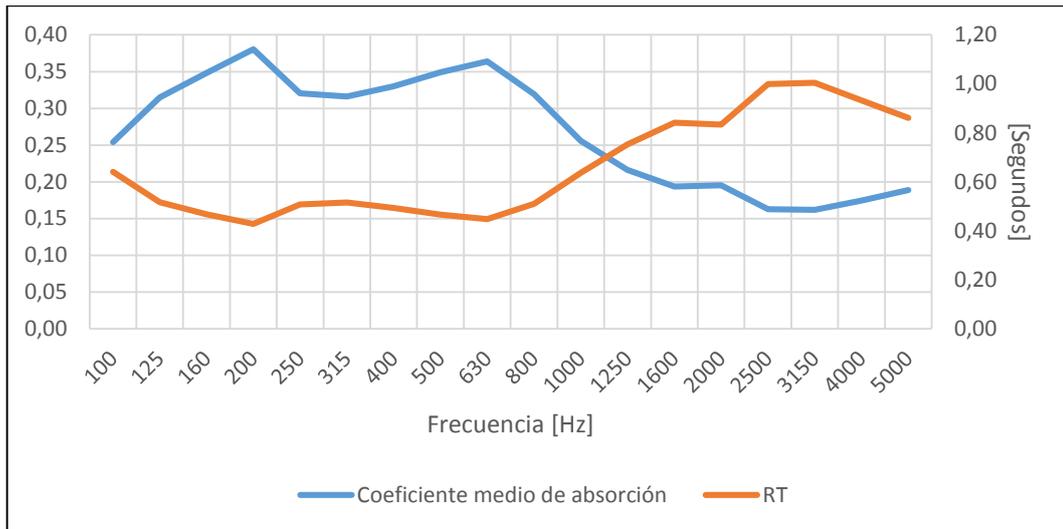


Gráfica 6.5.- Valores de la INR del salón de actos de la EITE.



Gráfica 6.6.- Valores de la SNR del salón de actos de la EITE.





Gráfica 6.7.- Valores del coeficiente medio de absorción y del RT por frecuencia del salón de actos de la EITE.

RTmid (s)	0,55
Coefficiente medio de absorción global	0,30

Tabla 6.1.- Parámetros acústicos globales del salón de actos de la EITE.



## 6.2.2.- SALÓN DE ACTOS DE LA EIIC DE LA ULPGC

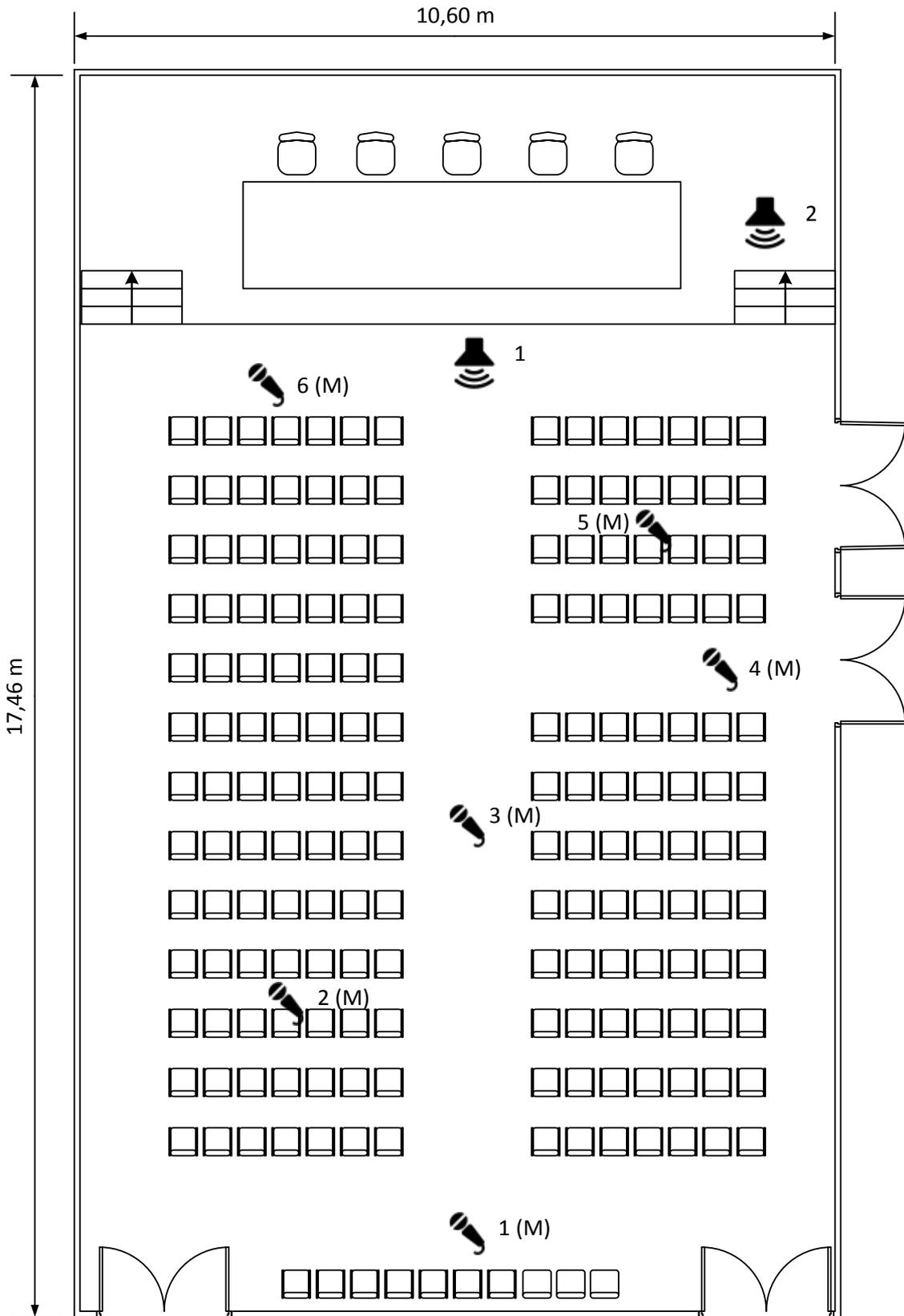
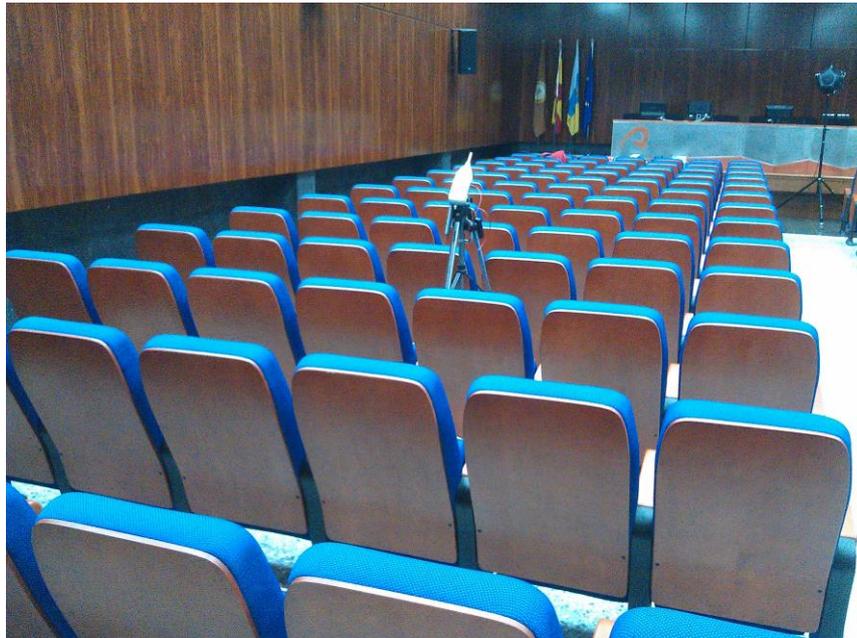


Figura 6.8.- Esquema del Salón de Actos de la EIIC.

### DIMENSIONES DEL RECINTO

- **Altura:** 4,41 m;
  - **Anchura:** 10,6 m
  - **Largo:** 17,46 m
  - **Volumen:** 815 m<sup>3</sup>
- Altura del escenario:** 0,5 m

### FOTOGRAFÍAS DEL RECINTO



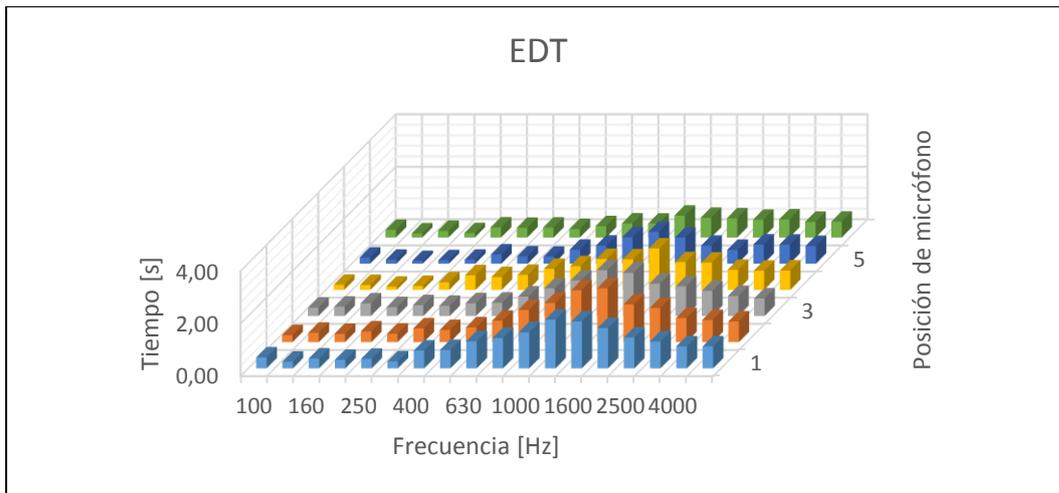
*Figura 6.8.1.- Vista del Salón de Actos de la EIC desde las butacas traseras.*



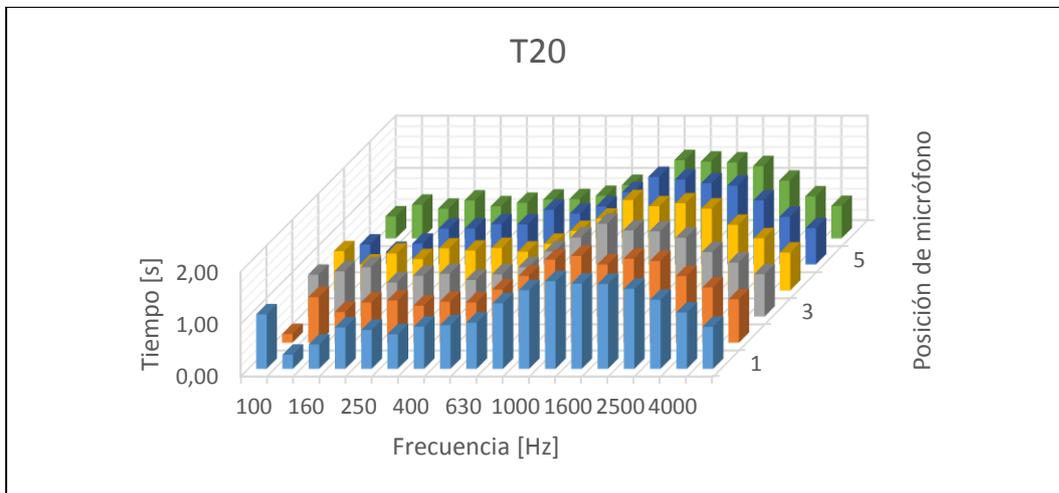
*Figura 6.8.2.- Izquierda, vista del Salón de Actos de la EIC desde el escenario. Derecha, vista lateral.*



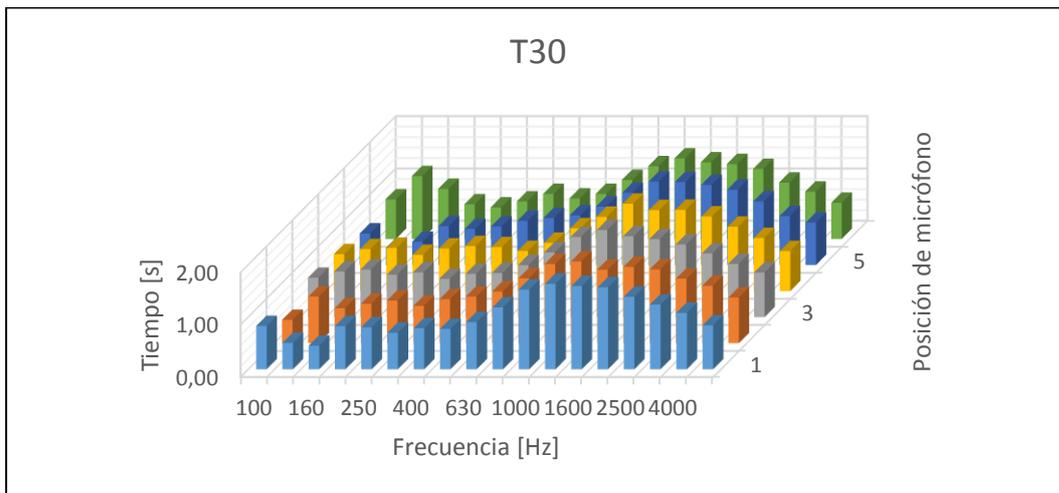
**RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS MEDICIONES**



Gráfica 6.8.- Valores del EDT del salón de actos de la EIIC.

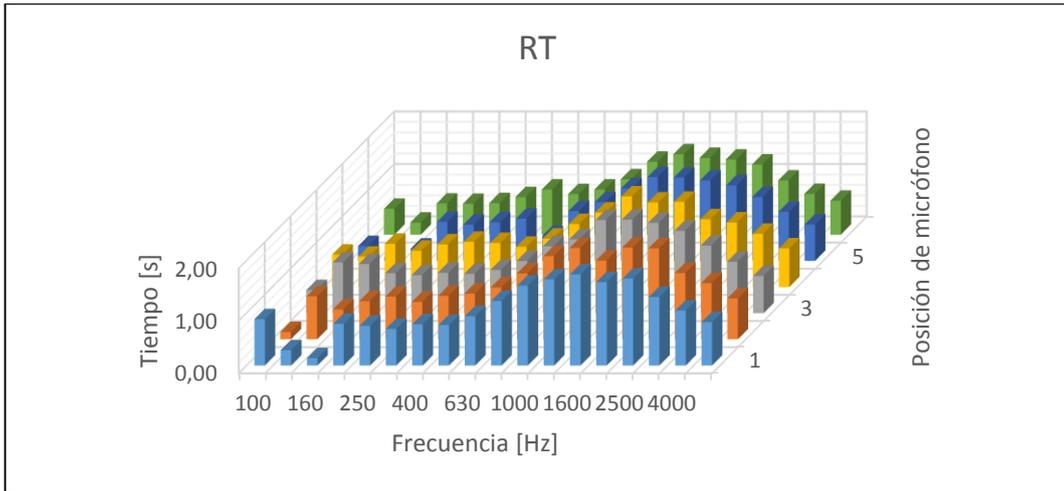


Gráfica 6.9.- Valores del T20 del salón de actos de la EIIC.

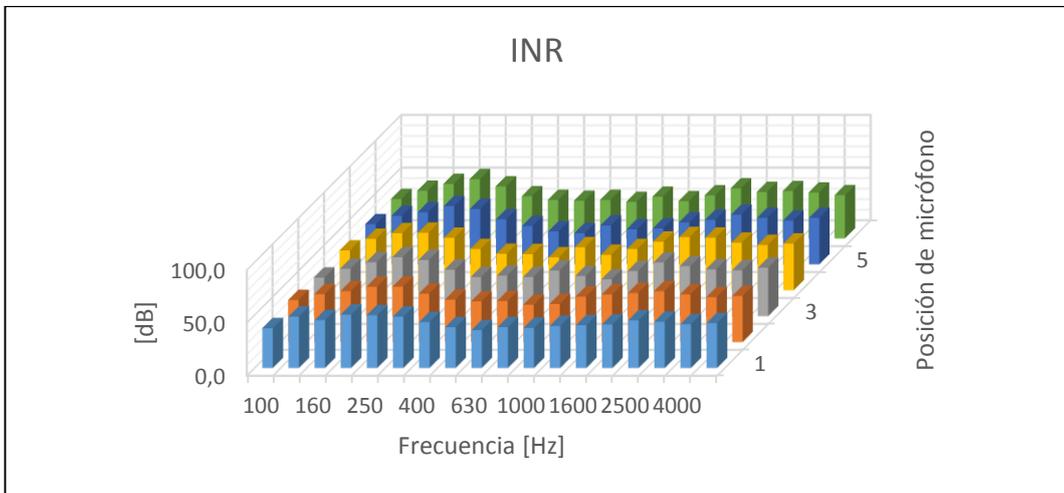


Gráfica 6.10.- Valores del T30 del salón de actos de la EIIC.

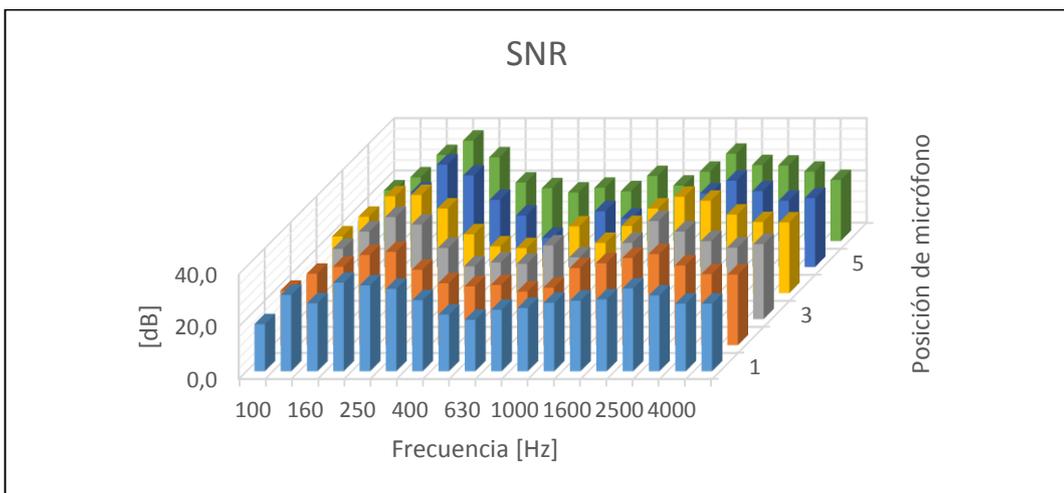




Gráfica 6.11.- Valores del RT del salón de actos de la EIIC.

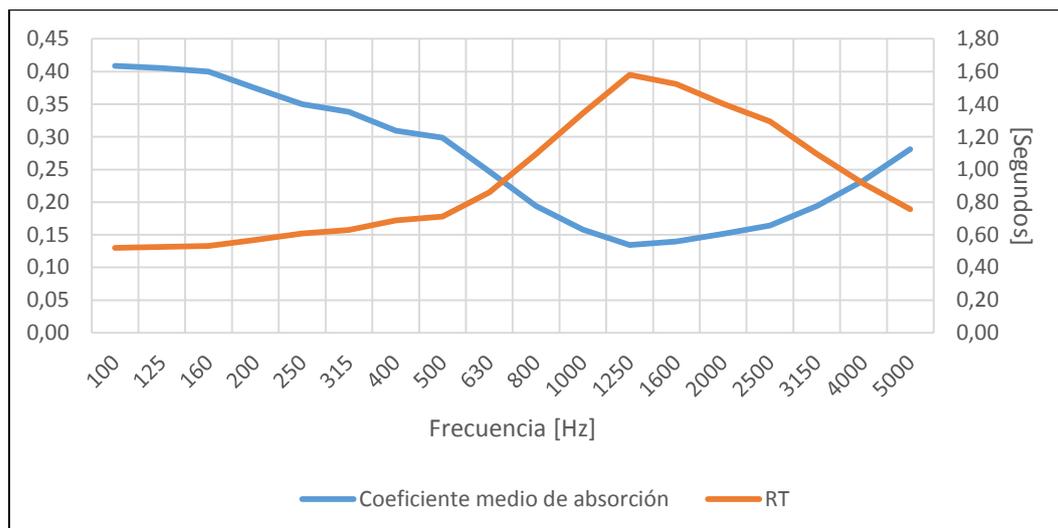


Gráfica 6.12.- Valores de la INR del salón de actos de la EIIC.



Gráfica 6.13.- Valores de la SNR del salón de actos de la EIIC.





Gráfica 6.14.- Valores del coeficiente medio de absorción y del RT por frecuencia del salón de actos de la EIIC.

RTmid (s)	1,03
Coeficiente medio de absorción global	0,21

Tabla 6.2.- Parámetros acústicos globales del salón de actos de la EIIC.



### 6.2.3.- SALÓN DE ACTOS DE LA EA DE LA ULPGC

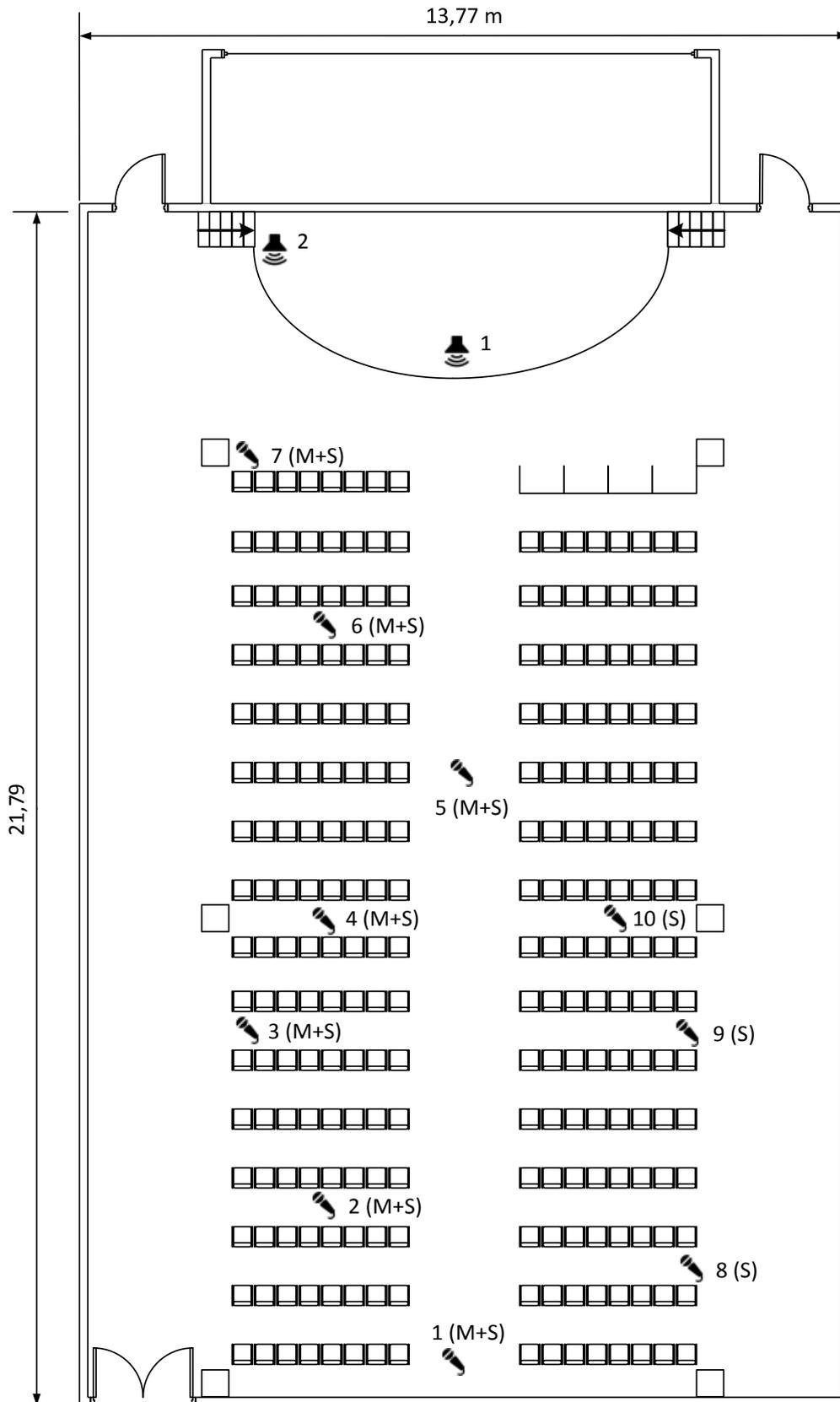


Figura 6.9.- Esquema del Salón de Actos de la EA.

### DIMENSIONES DEL RECINTO

- **Altura:** 3,43 m;      **Altura del escenario:** 1 m
- **Anchura:** 13,77 m;    **Anchura entre columnas:** 8,49 m
- **Largo:** 21,79 m;      **Largo entre columnas:** 8 m
- **Volumen:** 1025 m<sup>3</sup>

### FOTOGRAFÍAS DEL RECINTO

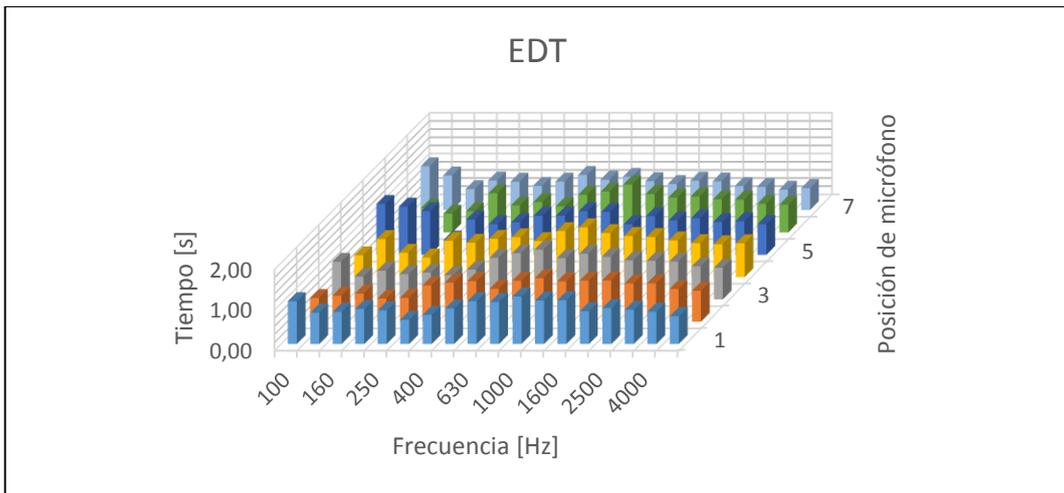


*Figura 6.9.1.- Vista del Salón de Actos de la EA desde las butacas traseras.*

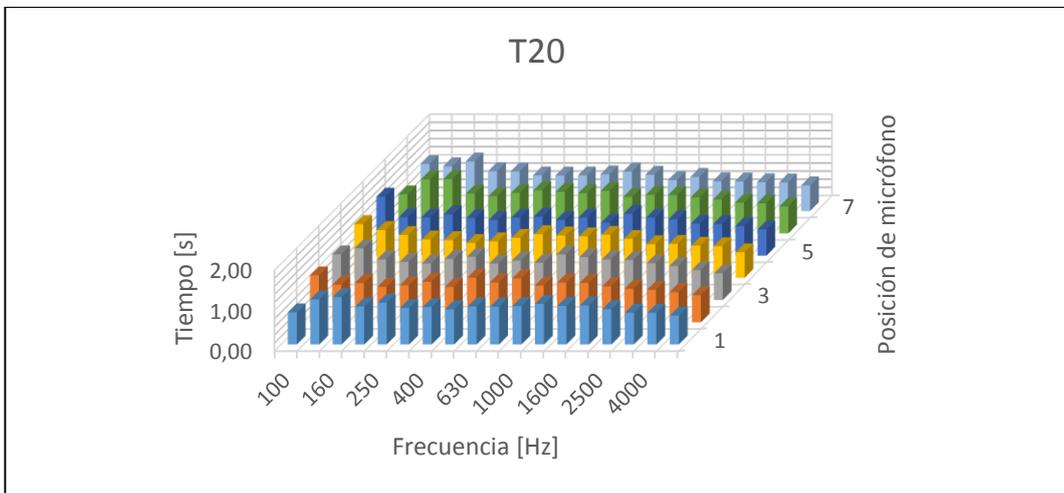


*Figura 6.9.2.- Vista lateral del Salón de Actos de la EA con detalle de la pared trasera.*

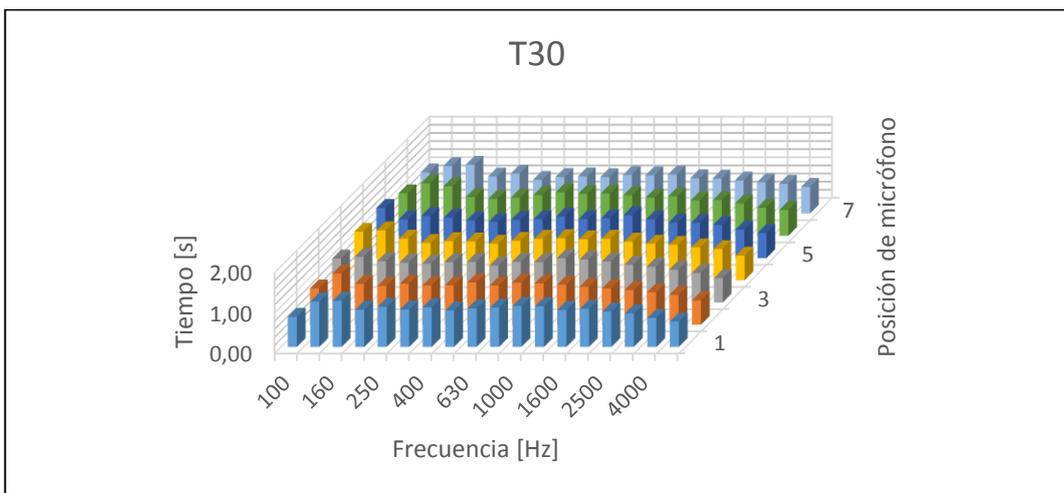
## RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS MEDICIONES



Gráfica 6.15.- Valores del EDT del salón de actos de la EA.

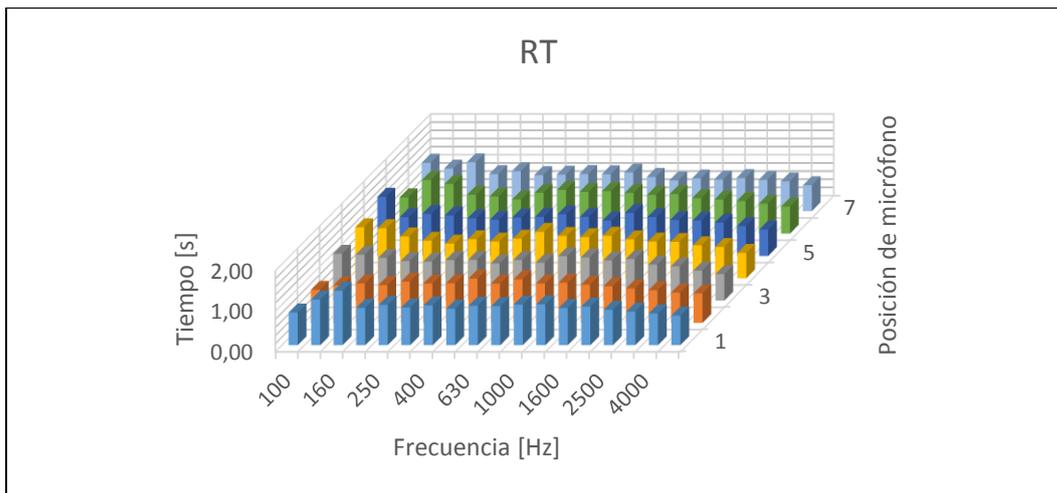


Gráfica 6.16.- Valores del T20 del salón de actos de la EA.

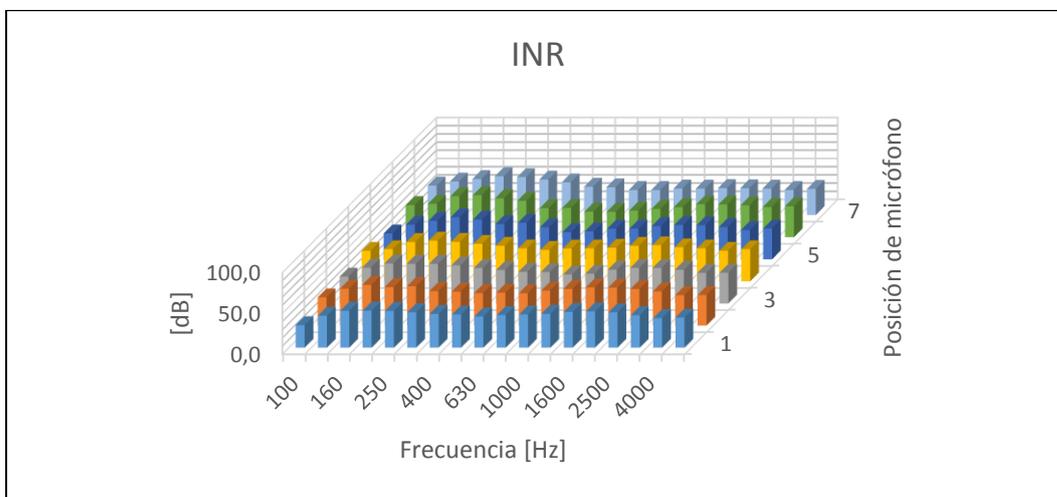


Gráfica 6.17.- Valores del T30 del salón de actos de la EA.

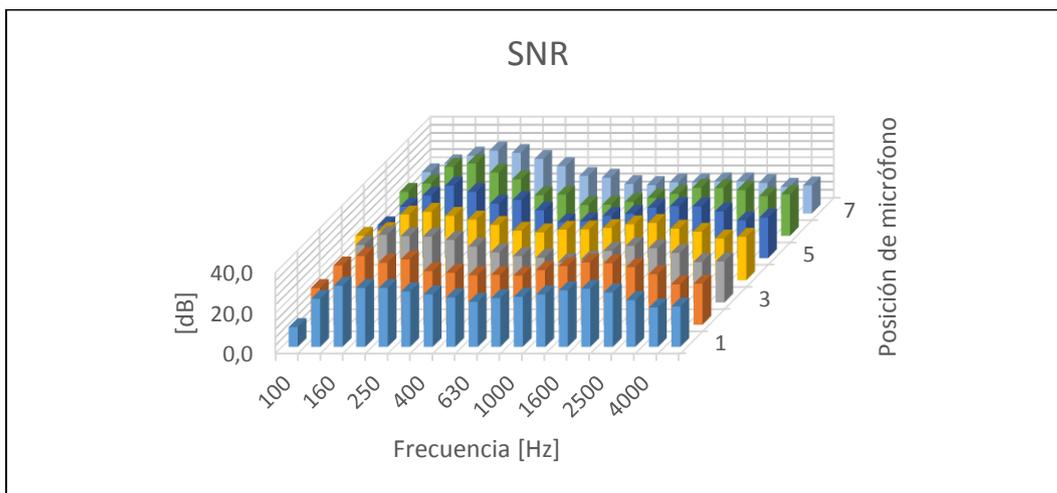




Gráfica 6.18.- Valores del RT del salón de actos de la EA.

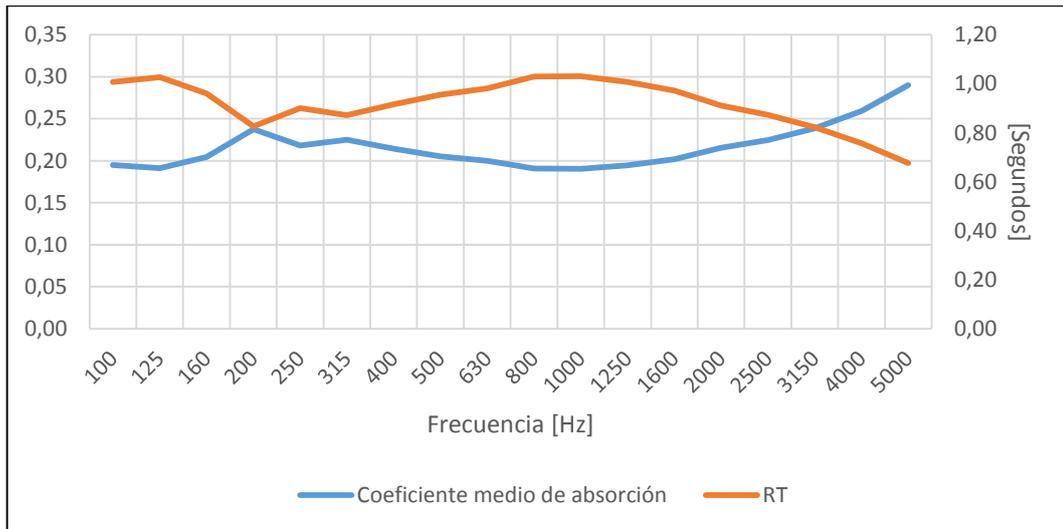


Gráfica 6.19.- Valores de la INR del salón de actos de la EA.



Gráfica 6.20.- Valores de la SNR del salón de actos de la EA.





Gráfica 6.21.- Valores del coeficiente medio de absorción y del RT por frecuencia del salón de actos de la EA.

RTmid (s)	0,99
Coefficiente medio de absorción global	0,20

Tabla 6.3.- Parámetros acústicos globales del salón de actos de la EA.



## 6.2.4.- SALA DE CONFERENCIAS DEL ISTIC

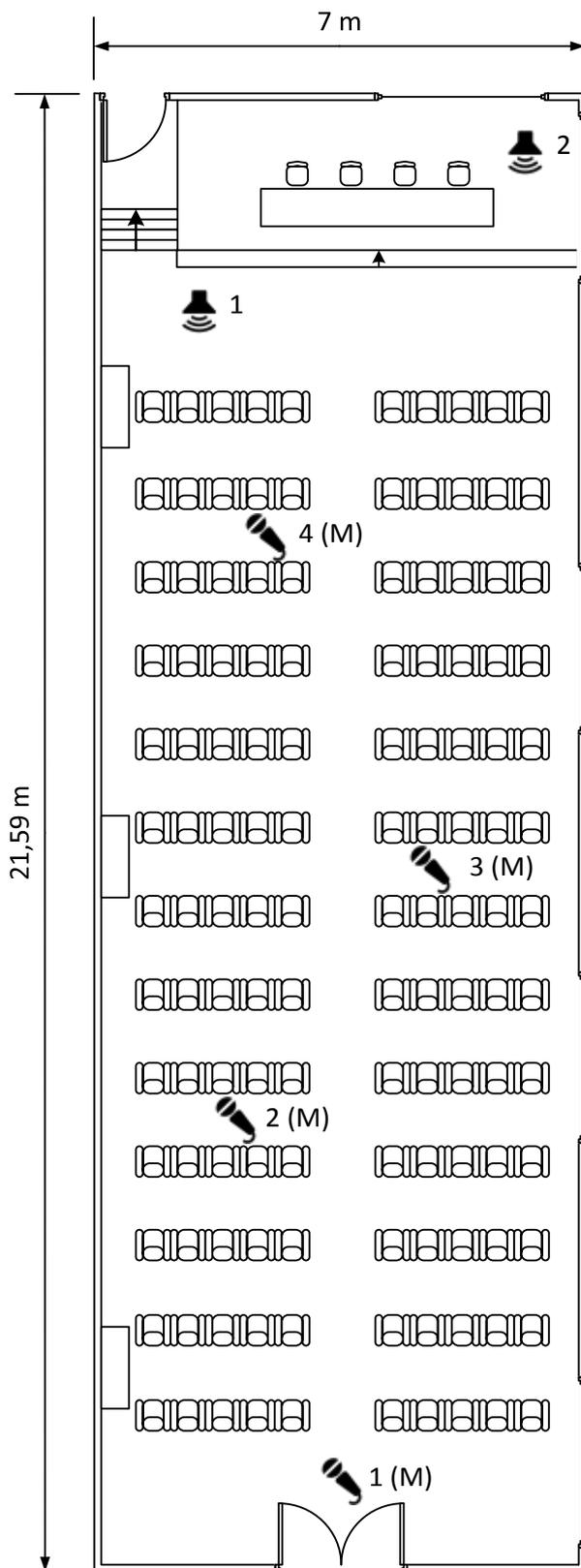


Figura 6.10.- Esquema de la Sala de Conferencias del ISTIC.



### DIMENSIONES DEL RECINTO

- **Altura:** 4 m;
  - **Anchura:** 7 m;
  - **Largo:** 21,59 m;
  - **Volumen:** 560 m<sup>3</sup>
- Altura del escenario:** 0,3 m.

### FOTOGRAFÍAS DEL RECINTO

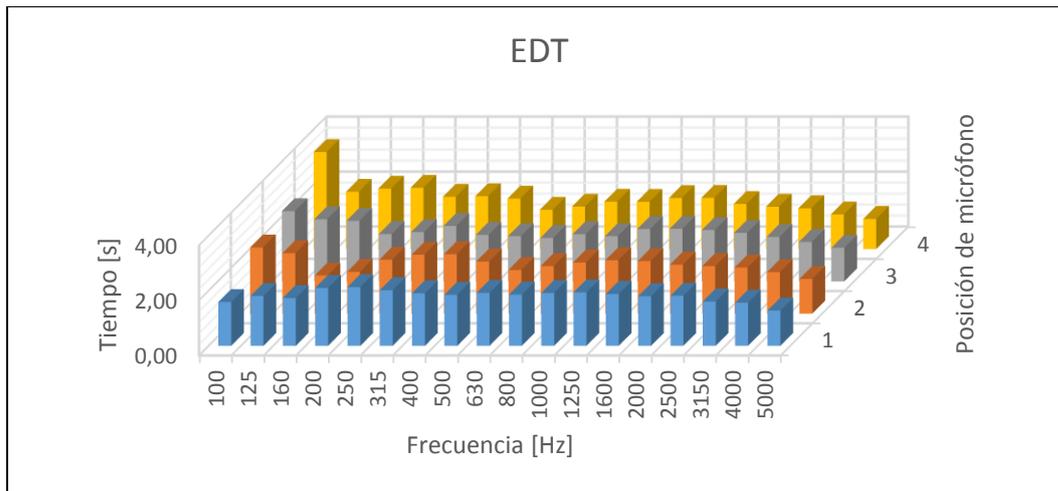


*Figura 6.10.1.- Vista de la Sala de Conferencias del ISTIC desde la parte trasera.*

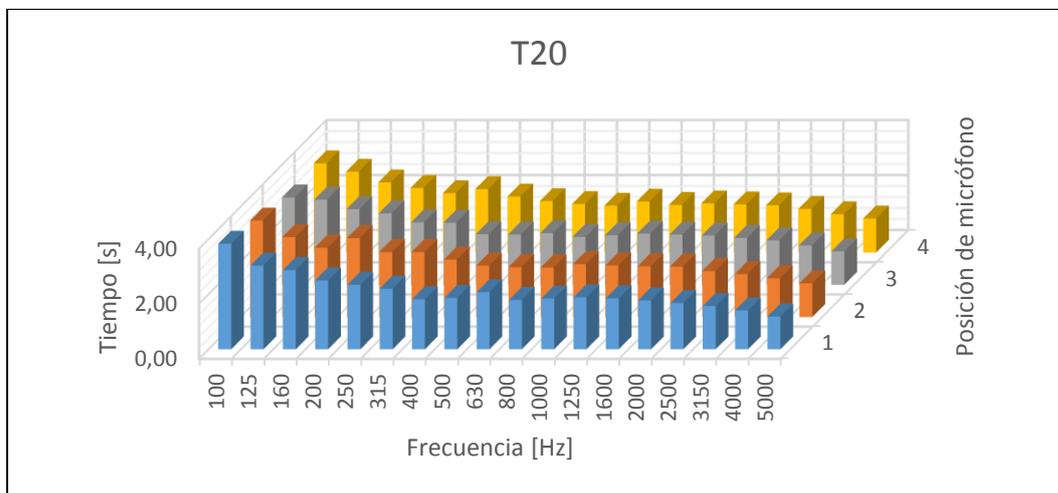


*Figura 6.10.2.- Vista de la Sala de Conferencias del ISTIC desde el escenario.*

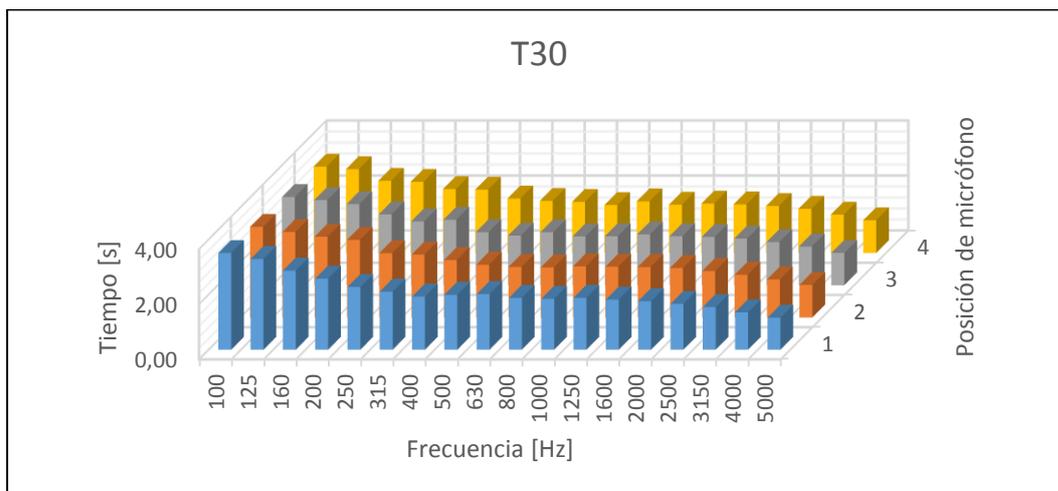
## RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS MEDICIONES



Gráfica 6.22.- Valores del EDT de la sala de conferencias del ISTIC.

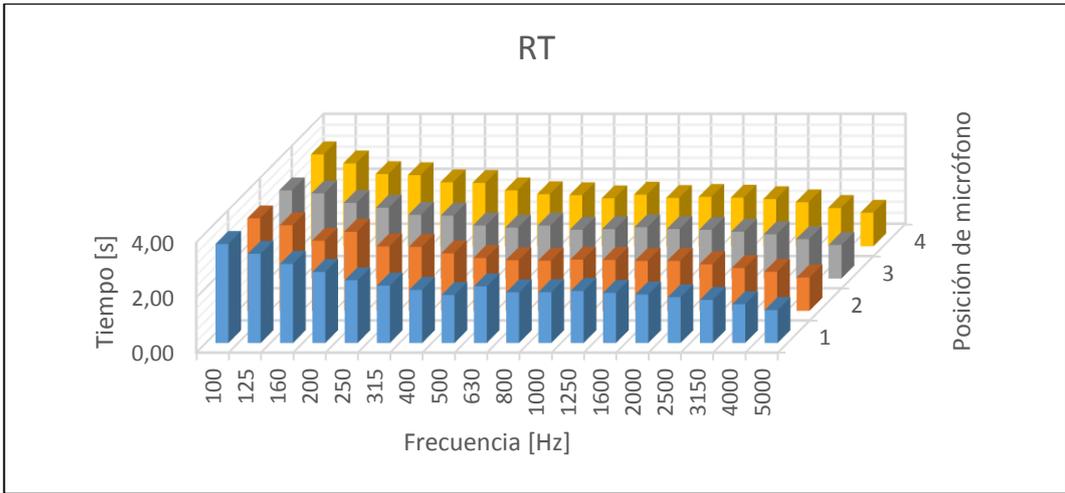


Gráfica 6.23.- Valores del T20 de la sala de conferencias del ISTIC

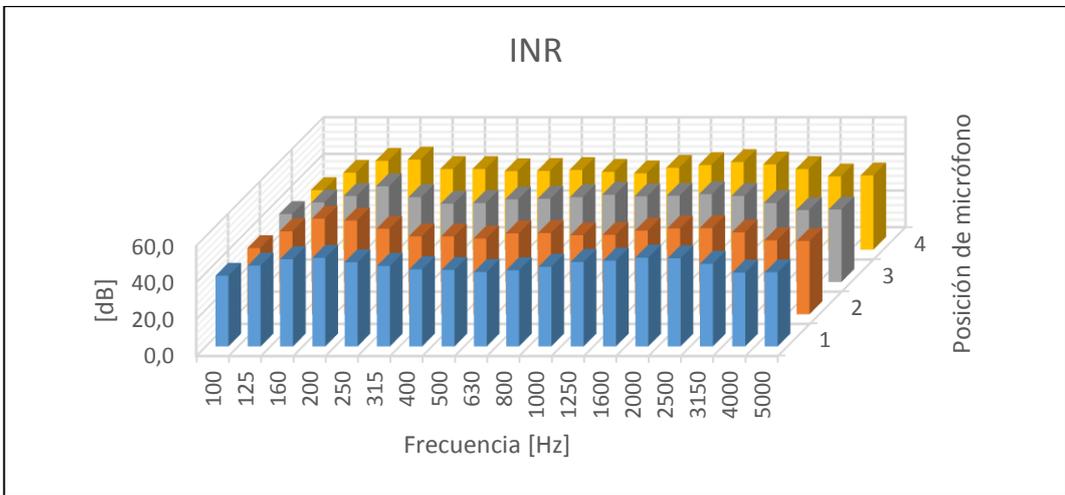


Gráfica 6.24.- Valores del T30 de la sala de conferencias del ISTIC.

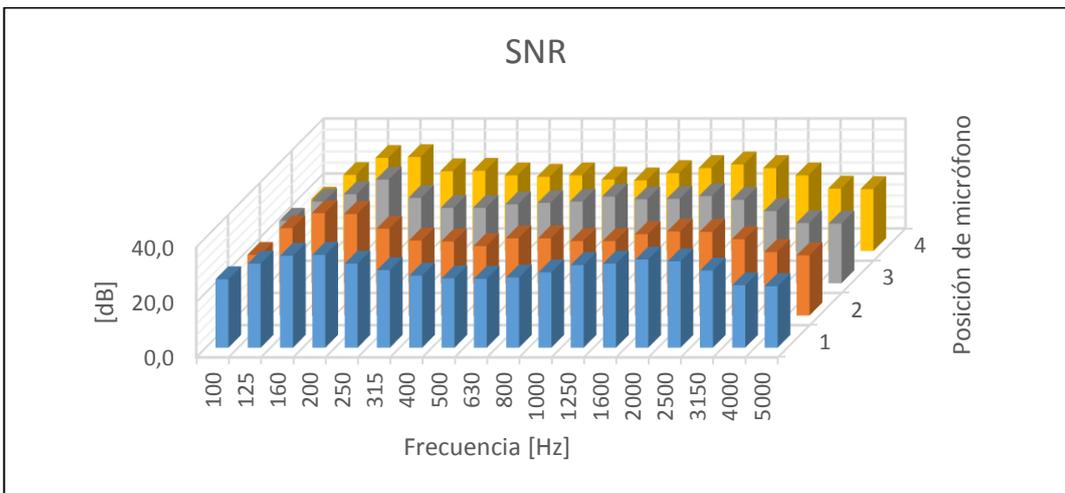




Gráfica 6.25.- Valores del RT de la sala de conferencias del ISTIC.

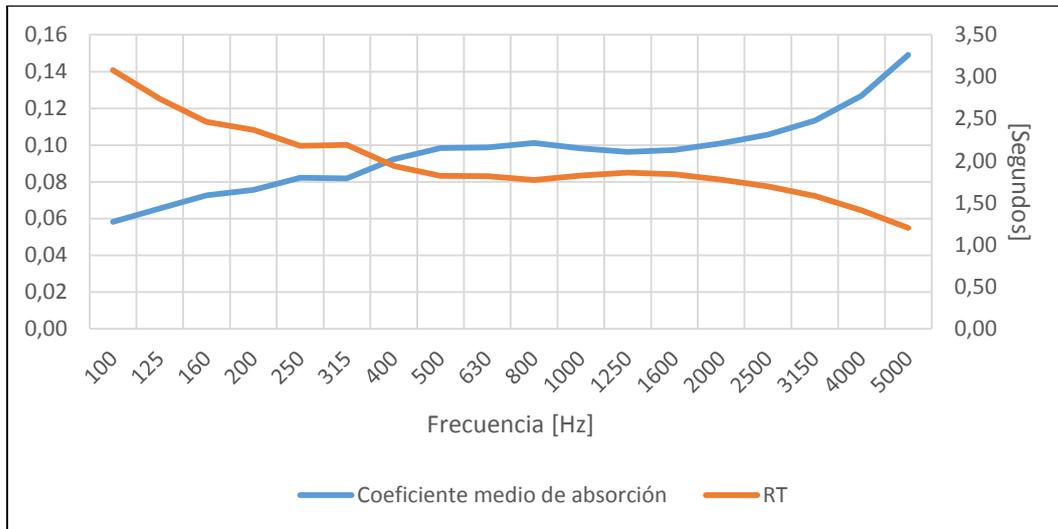


Gráfica 6.26.- Valores de la INR de la sala de conferencias del ISTIC.



Gráfica 6.27.- Valores de la INR de la sala de conferencias del ISTIC.





Gráfica 6.28.- Valores del coeficiente medio de absorción y del RT por frecuencia de la sala de conferencias del ISTIC.

RTmid (s)	1,82
Coefficiente medio de absorción global	0,10

Tabla 6.4.- Parámetros acústicos globales de la sala de conferencias del ISTIC.



### 6.2.5.- AULA MAGNA DEL ISTIC

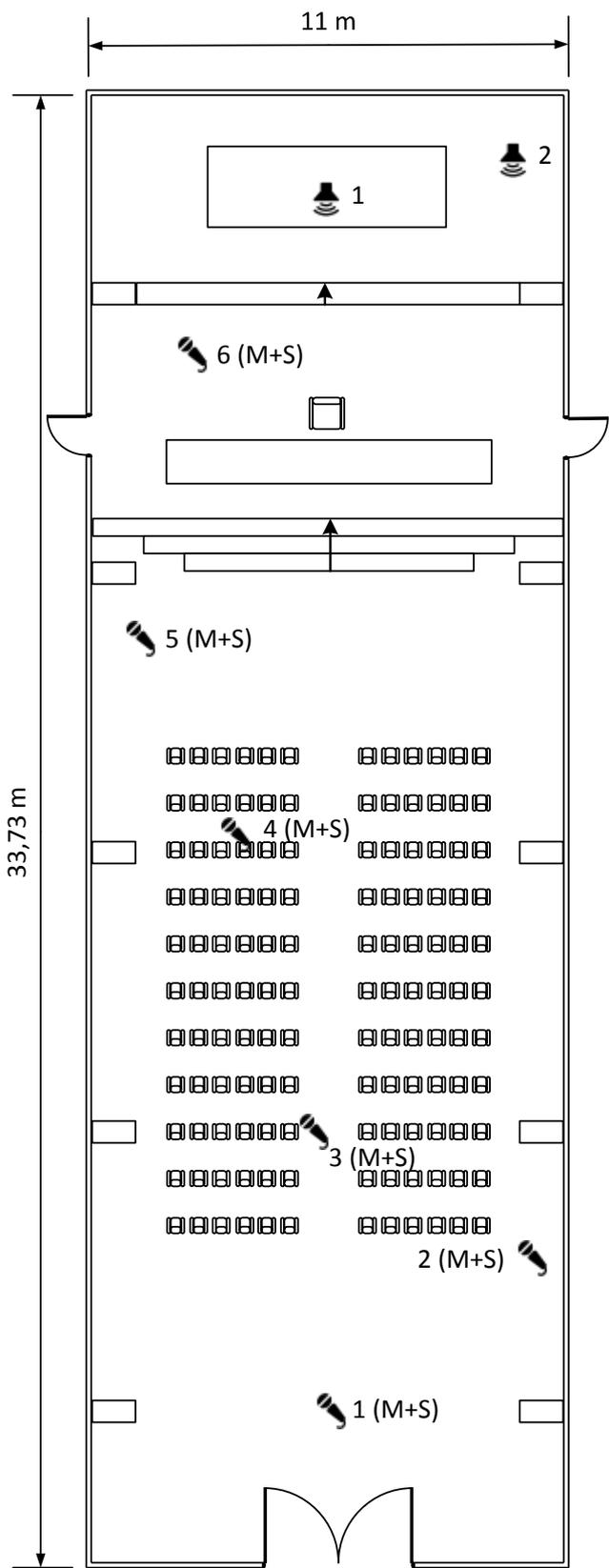


Figura 6.11.- Esquema del Aula Magna del ISTIC.



### DIMENSIONES DEL RECINTO

- **Altura máxima:** 14,2 m;      **Altura mínima:** 12,45 m.
- **Anchura:** 11 m;                      **Anchura entre pilares:** 8,22 m.
- **Largo:** 33,73 m;
- **Volumen:** 5265 m<sup>3</sup>

### FOTOGRAFÍAS DEL RECINTO



*Figura 6.11.1.- Vista del Aula Magna del ISTIC desde el altar.*



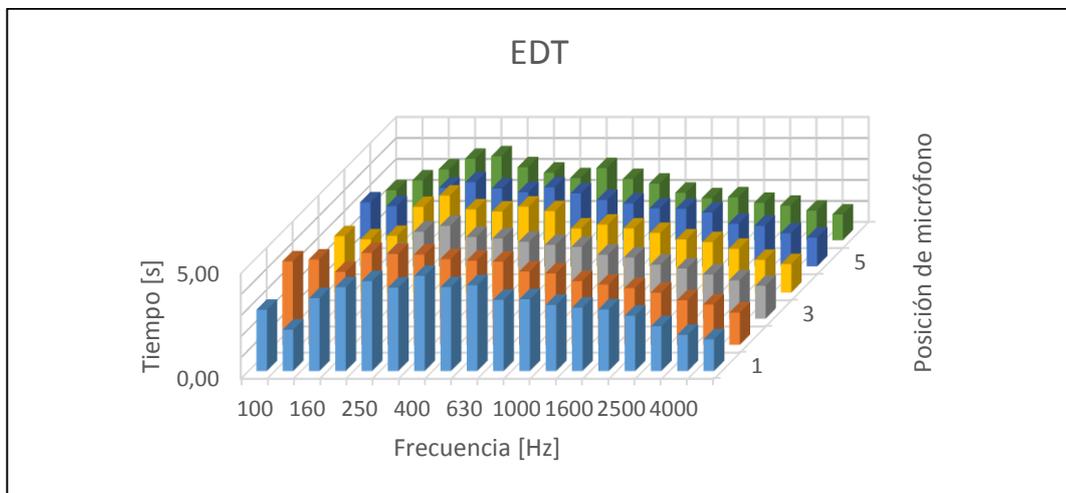
*Figura 6.11.2.- Vista del Aula Magna del ISTIC desde la parte trasera.*



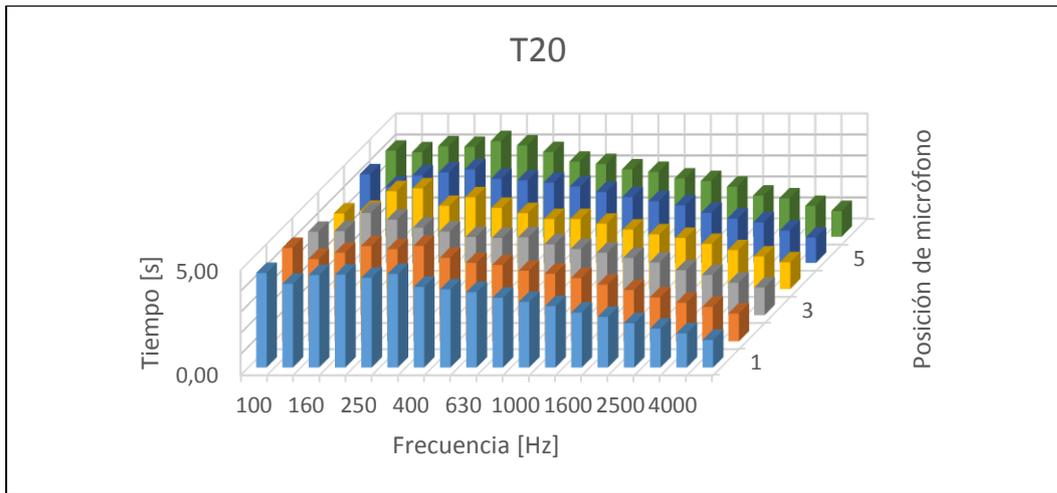


Figura 6.11.3.- Izquierda, vista lateral del Aula Magna del ISTIC. Derecha, vista del techo.

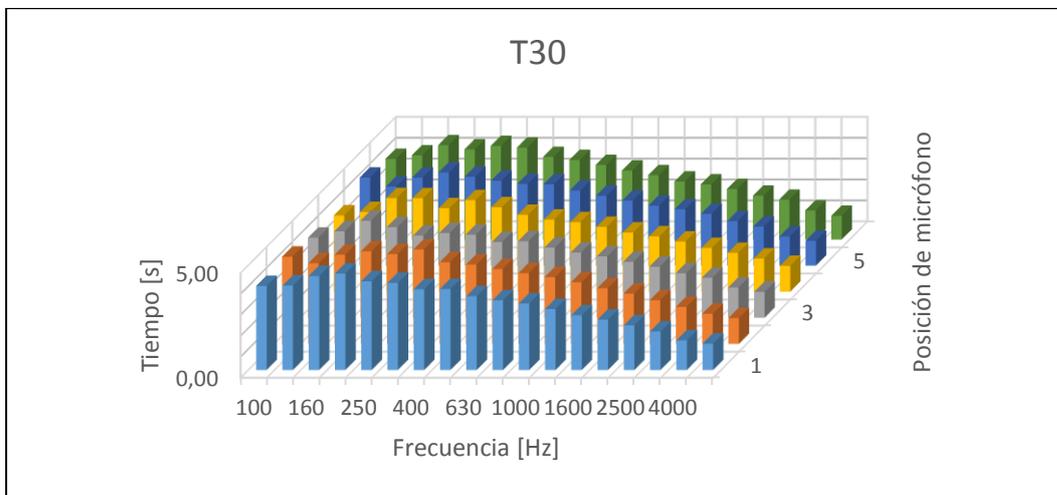
## RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS MEDICIONES



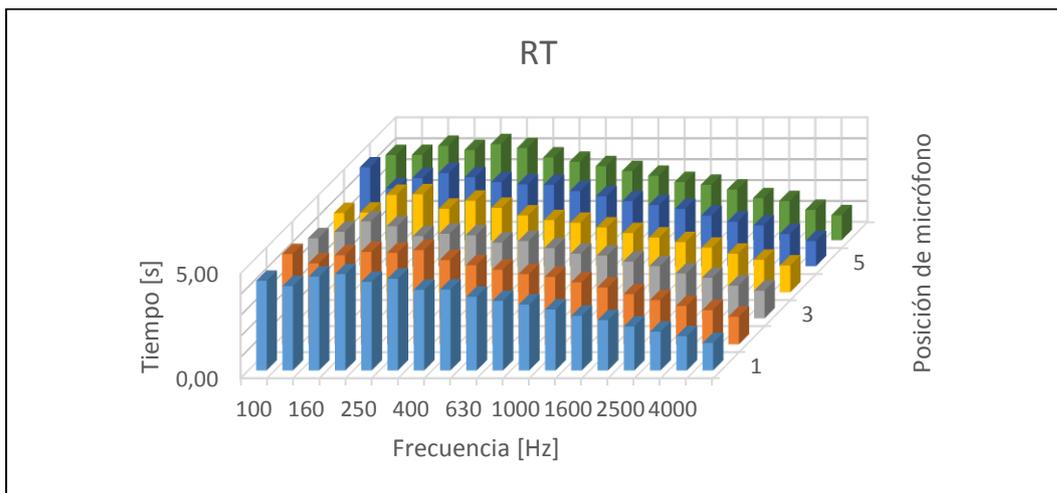
Gráfica 6.29.- Valores del EDT del Aula Magna del ISTIC.



Gráfica 6.30.- Valores del T20 del Aula Magna del ISTIC.

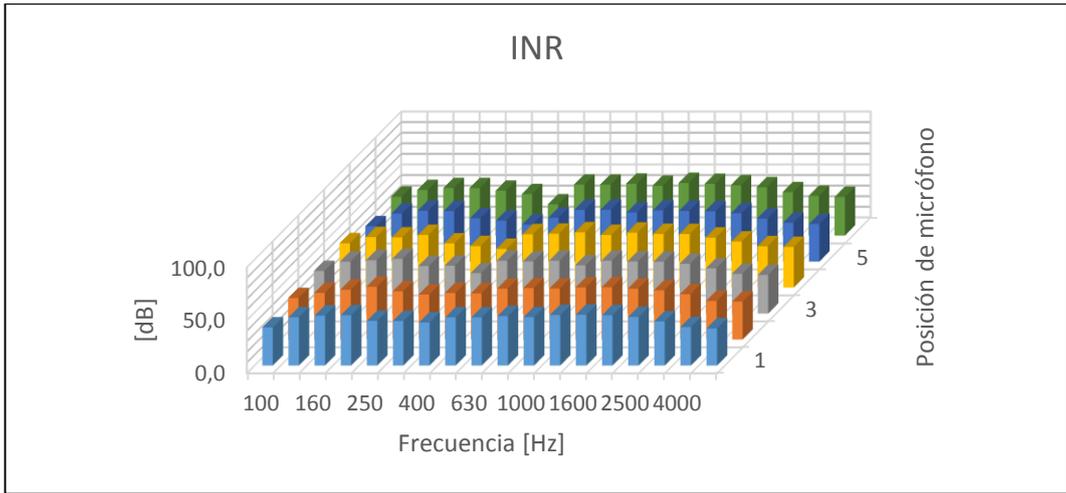


Gráfica 6.31.- Valores del T30 del Aula Magna del ISTIC.

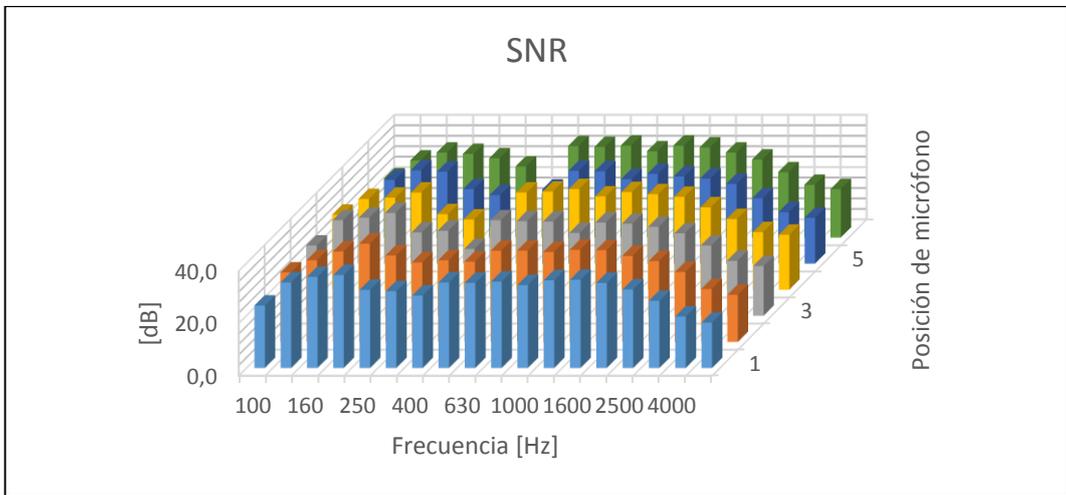


Gráfica 6.32.- Valores del RT del Aula Magna del ISTIC.

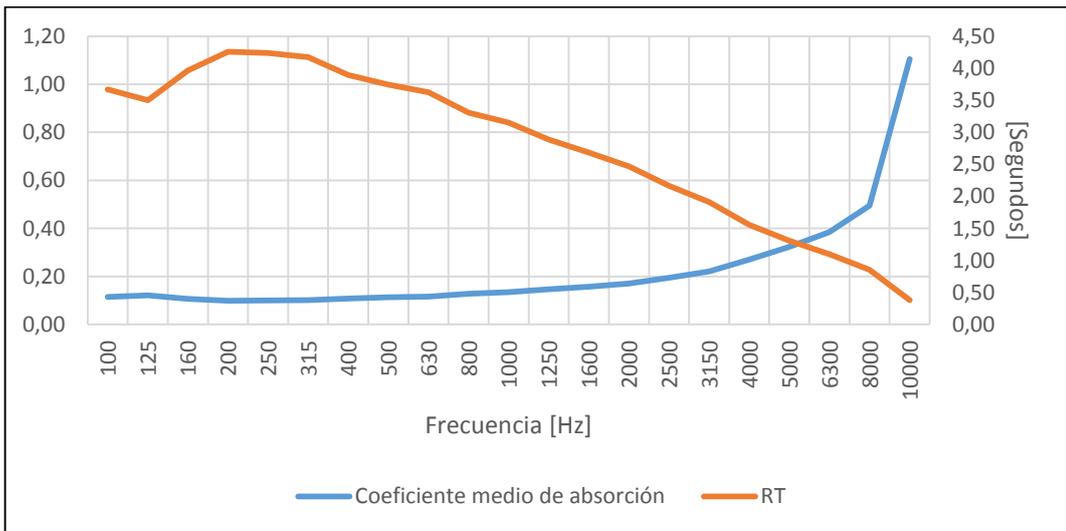




Gráfica 6.33.- Valores de la INR del Aula Magna del ISTIC.



Gráfica 6.34.- Valores de la SNT del Aula Magna del ISTIC.



Gráfica 6.35.- Valores del coeficiente medio de absorción y del RT por frecuencia del Aula Magna del ISTIC.



RTmid (s)	3,45
Coefficiente medio de absorción global	0,12

Tabla 6.5.- Parámetros acústicos globales del Aula Magna del ISTIC.

### 6.3.- Resultados finales

Resumiendo, para cada recinto hemos obtenido los siguientes TR y coeficientes medios de absorción:

RECINTOS	TR (s)	$\bar{\alpha}$
Salón de actos de la EITE	0,55	0,30
Salón de actos de la EIIC	1,03	0,21
Salón de actos de la EA	0,99	0,20
Sala de conferencias del ISTIC	1,82	0,10
Aula Magna del ISTIC	3,45	0,12

Tabla 6.6.- Parámetros acústicos globales de los recintos bajo estudio.

Como podemos apreciar en las gráficas, tanto el salón de actos de la EITE como el de la EIIC poseen aproximadamente la misma forma en su curva tonal, que es típica de las salas de conferencias. Lo mismo ocurre con la sala de conferencias y el Aula Magna del ISTIC, cuya curva tonal es propia de los recintos con una elevada reverberación. En base a esta observación, se decidió elegir los recintos más apropiados en cuanto a logística, principalmente teniendo en cuenta la distancia con respecto al Laboratorio de Sonido del Departamento de Señales y Comunicaciones, para evitar tener que hacer desplazamientos largos debido a la cantidad de equipos que hay que transportar. Los recintos definitivos para realizar las medidas destinadas para la simulación binaural son:

- Salón de Actos de la EITE de la ULPGC.
- Salón de Actos de la EA de la ULPGC.
- Aula Magna del ISTIC.

### 6.4.- Medidas de simulación

El propósito de estas medidas es obtener las RI binaurales, es decir, esta vez el registro sonoro se llevará a cabo utilizando dos micrófonos especialmente preparados para la realización de medidas de calidad, con la intención de obtener una mayor calidad en la BRIR para poder usarla en la auralización.

#### 6.4.1.- Metodología

Se seguirán las mismas directrices utilizadas en las medidas de reconocimiento en cuanto a las posiciones de micrófono y fuente. Únicamente se harán más localizaciones de micrófono para cubrir un mayor rango del recinto y así tener suficientes posiciones de medida que se puedan usar

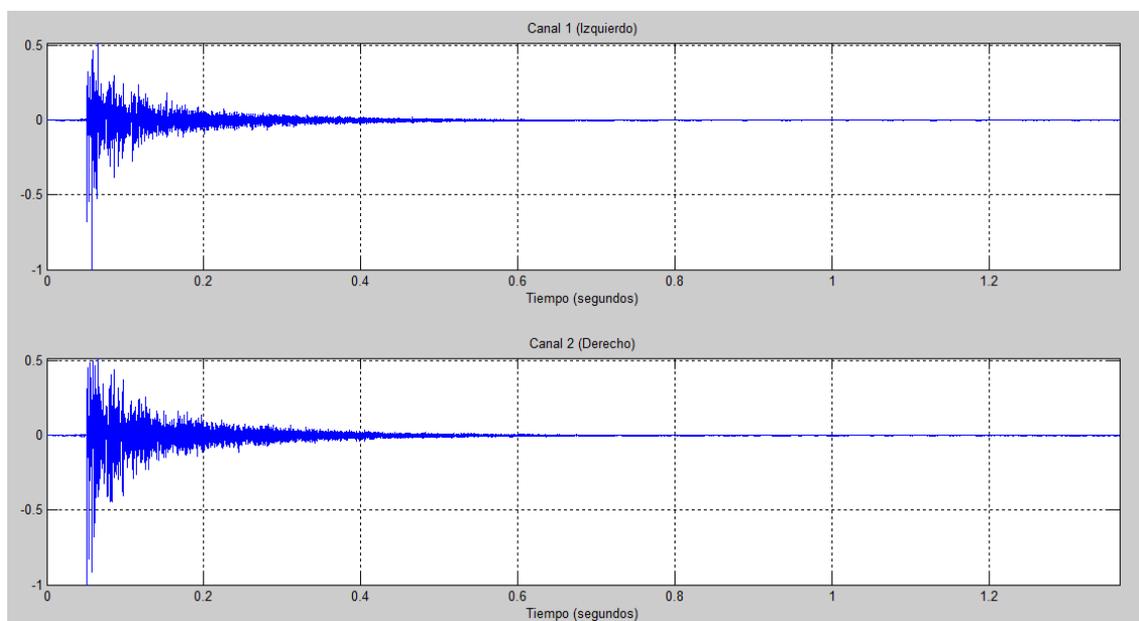


como referencia para auralizar las posiciones que no se hayan medido directamente. Los micrófonos se colocarán separados a una distancia aproximada equivalente a la que existe entre los dos pabellones auditivos del ser humano, es decir, 17 cm. No se realizarán medidas de parámetros acústicos sino que las respuestas se almacenarán directamente para su posterior procesado antes de utilizarlas definitivamente para la simulación binaural.

Esta vez se usará sólo como señal de excitación el barrido lineal, aplicándole nuevamente un filtrado rosa para mejorar la respuesta en las frecuencias bajas. Los motivos de esta decisión se expusieron el capítulo 4, apartado 4.4.

A continuación reproduciremos por cada recinto elegido una de las respuestas binaurales medidas correspondientes a las posiciones más centradas de la sala, para que se puede observar el tipo de reverberación que posee cada una de ellas. El resto de las medidas se encuentran disponibles en el DVD adjunto a la memoria.

#### 6.4.2.- Salón de Actos de la EITE de la ULPGC



*Figura 6.12.- Respuesta binaural al impulso del salón de actos de la EITE (TEL\_2\_3.wav).*



### 6.4.3.- Salón de Actos de la EA de la ULPGC

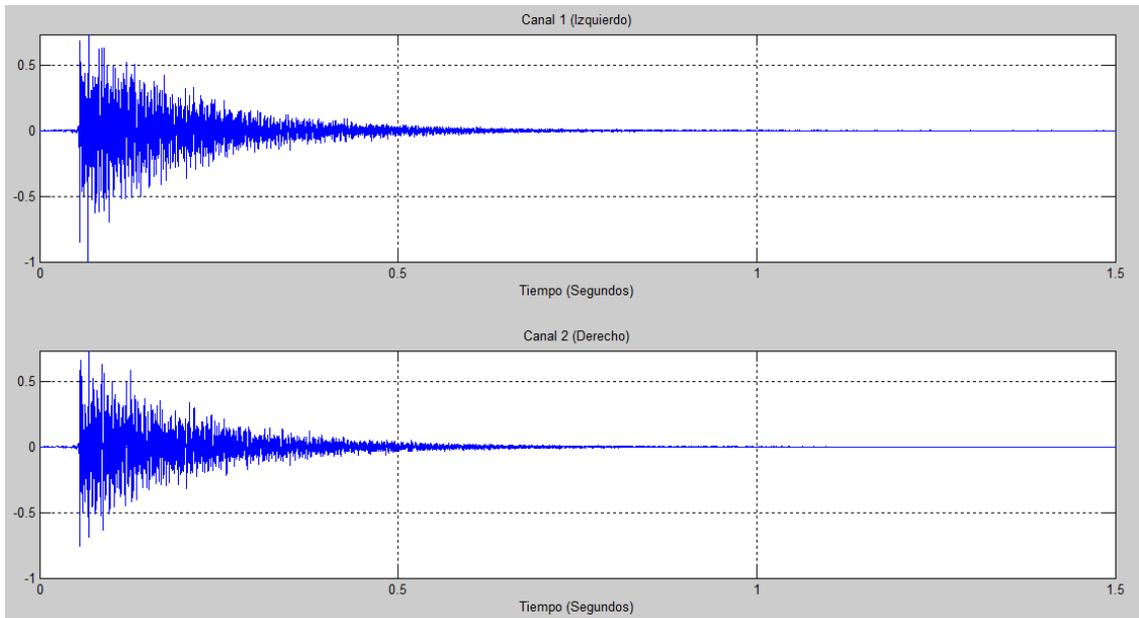


Figura 6.13.- Respuesta binaural al impulso del salón de actos de la EA (ARQ\_2\_5.wav).

### 6.4.4.- Aula Magna del ISTIC

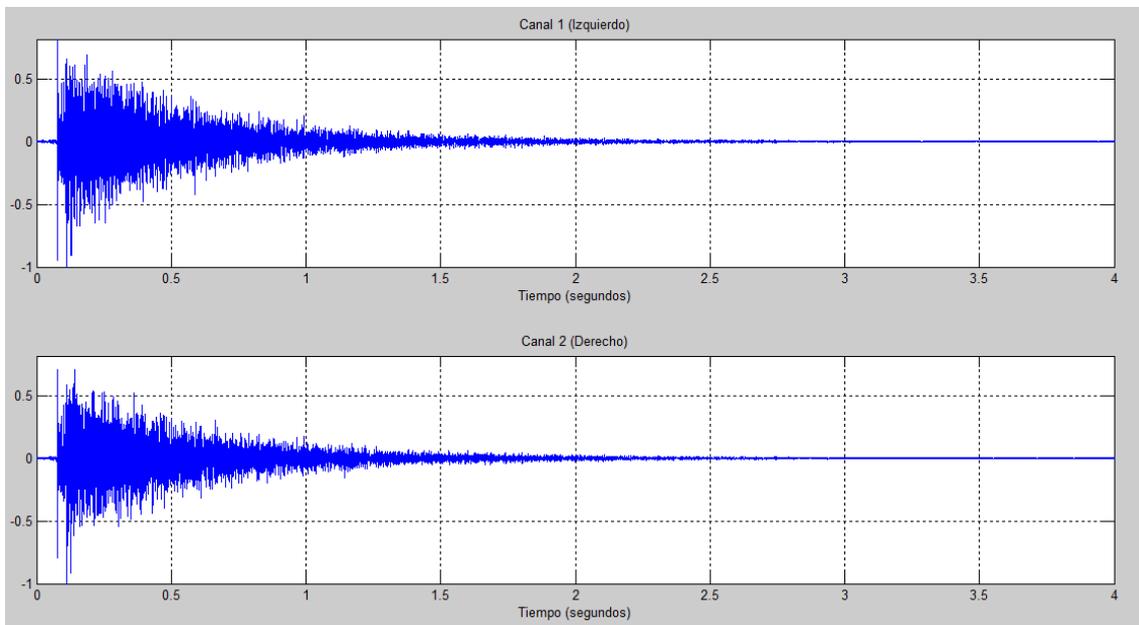


Figura 6.14.- Respuesta binaural al impulso del Aula Magna del ISTIC (AMT\_2\_3.wav).



# CAPÍTULO 7:

## AURALIZACIÓN PRÁCTICA DE LOS ESPACIOS

### ACÚSTICOS

En este capítulo vamos a describir el procesado que se ha realizado a las BRIR medidas en los recintos para optimizar la posterior auralización. Para guiar todo el proceso, se utilizará una respuesta al impulso determinada con la que se seguirán los pasos dados, entendiéndose que éstos serán exactamente idénticos para todas las respuestas medidas. Seguidamente se comentará el método que se ha utilizado para interpolar los puntos del recinto que no se han medido directamente y, por último, se explicará la interfaz gráfica de usuario que se ha diseñado para realizar de una forma sencilla las auralizaciones.

#### 7.1.- Procesado de las respuestas binaurales al impulso

El procesado de cada BRIR medida se hará siguiendo el siguiente esquema:

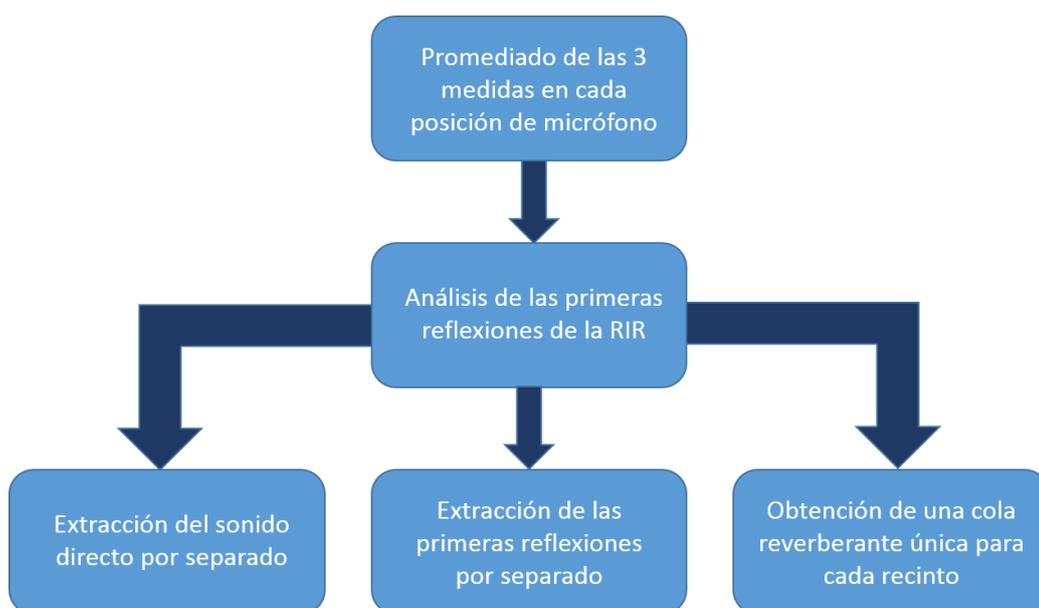


Figura 7.1.- Esquema de procesado de las BRIR.



El primer paso será promediar las tres medidas realizadas por cada posición de micrófono, para obtener por dichas posiciones una sola medida con la que se harán las siguientes etapas de procesado. Luego se analizará cada respuesta promediada para buscar las ubicaciones de las primeras reflexiones. Con esa información se podrán extraer y guardar en archivos de texto por separado las tres partes principales de la BRIR: el sonido directo, las primeras reflexiones y la cola reverberante. En el caso de esta última, al tener un comportamiento estadístico en contraposición con el determinístico de las dos anteriores, se podrá obtener un único archivo de texto que se podrá utilizar para implementar la cola reverberante en todas las posiciones del recinto.

Pasamos, a continuación, a comentar en detalle cada una de las etapas del procesado.

### 7.1.1.- Promediado de las tres medidas en cada posición de micrófono

Para realizar el promediado de las tres medidas haremos uso del archivo “promedio.m”. Este script de Matlab te permite seleccionar las tres BRIR que deseas promediar medidas en una posición de micrófono. Con el objetivo de sincronizar las tres medidas para evitar errores en el promedio, se utiliza como referencia la primera respuesta elegida y se calcula el retardo relativo de las otras dos con respecto a ella mediante la correlación cruzada, que tiene la siguiente fórmula.

$$\phi_{xy}(m) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N-m-1} x_{n+m} \cdot y_n^* & ; \quad m \geq 0 \\ \phi_{xy}^*(-m) & ; \quad m < 0 \end{cases} \quad (\text{Ec 7.1})$$

Realizando esta operación, obtendremos el retardo correspondiente hallando el índice del pico más alto de la correlación, que nos dará el número de muestras que debemos añadir o quitar para sincronizar las respuestas.

Una vez hecha la sincronización, procederemos a realizar el promedio en sí, obteniendo como resultado un único archivo wav correspondiente a una posición de micrófono para una posición de fuente determinada. La figura 7.2 ilustra la BRIR promediada del Salón de Actos de la EITE de la ULPGC obtenida en la posición de micrófono 3 para la posición de fuente 1 (TEL\_1\_3.wav).

### 7.1.2.- Análisis de las primeras reflexiones de la RIR

Esta etapa se hará con el programa “marcar2RT1.m”, que nos permite visualizar una señal en los dominios del tiempo y de la frecuencia, además de su espectrograma. Para el caso de las señales estéreo sólo se podrá ver un canal por separado. También, superpuesta a la señal en el dominio del tiempo, se podrá observar la envolvente de energía y, en el caso del espectro, aparecerá superpuesta la envolvente espectral. Para mostrar todas estas gráficas, el programa nos solicitará los siguientes datos:

- Canal: Elegir entre el canal 1 y el canal 2, sólo en el caso de que la señal que se va a analizar sea estéreo.
- Intervalo de integración de la envolvente de energía: Nos permite elegir el tiempo utilizado para calcular la envolvente de energía de la señal en milisegundos.
- Tipo de proceso para la envolvente espectral: Podemos seleccionar si el diseño del filtro se hará siguiendo un modelo AR (*AutoRegressive*, autorregresivo) o ARMA (*AutoRegressive Moving Average*, autorregresivo de media móvil).



- Número de polos de la envolvente espectral: Se podrán especificar en cualquiera de los dos procesos que se hayan elegido anteriormente.
- Número de ceros de la envolvente espectral: Sólo se podrán especificar si hemos seleccionado el proceso ARMA.

Una vez que hayamos introducido todos los parámetros anteriores, aparecerán todas las gráficas, tal como podemos observar en la figura 7.3:

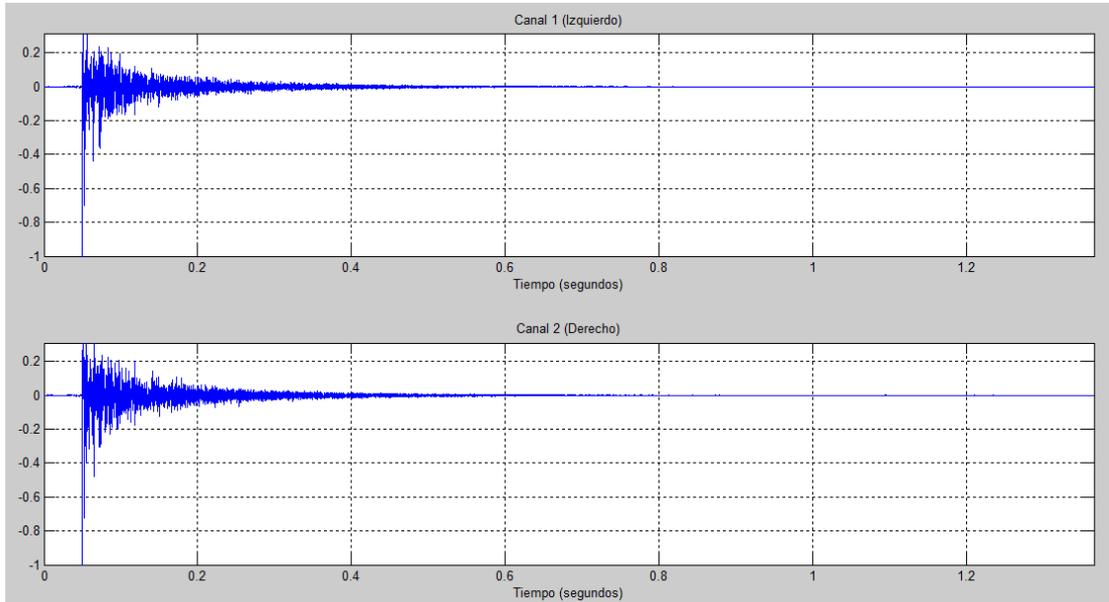


Figura 7.2.- Respuesta binaural al impulso correspondiente al archivo TEL\_1\_3.wav.

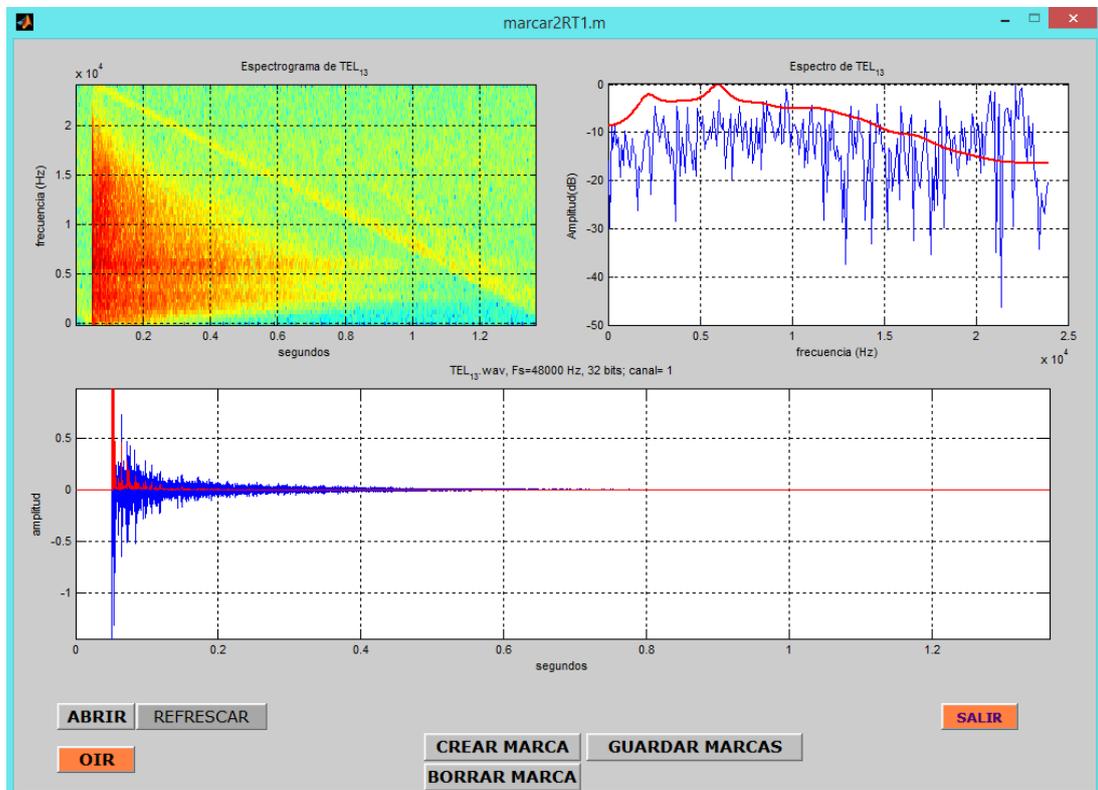


Figura 7.3.- Vista general del programa marcar2RT1.m con la señal TEL\_1\_3.wav visualizada (Canal 1).

Ahora, con el propósito de identificar las primeras reflexiones, vamos a crear una serie de marcas sobre la envolvente de energía para identificar sus posiciones en la medida. Para esto se tendrá que pulsar el botón “CREAR MARCA”, lo que hará aparecer una cruzeta para que seleccionemos el punto exacto donde queremos que el programa comience la identificación de reflexiones. Este punto lo situaremos inmediatamente después de que el sonido directo haya desaparecido:

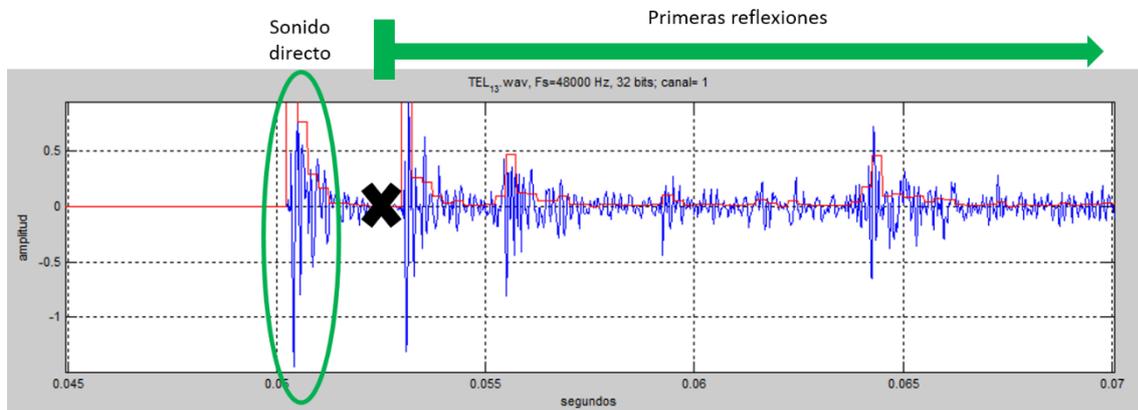


Figura 7.4.- Elección del punto de inicio para buscar las primeras reflexiones.

El punto en el que finaliza la búsqueda de primeras reflexiones se hará a través del tiempo de mezcla  $t_m$  (mixing time). Este parámetro acústico se define como el tiempo en milisegundos, contado desde la llegada del sonido directo, en que finalizan las primeras reflexiones y comienza la cola reverberante, es decir, el instante en el que la RIR deja de tener un comportamiento determinístico para pasar a tenerlo estadístico [13]. Existen varias formas de obtener el  $t_m$  pero en este trabajo se ha empleado la siguiente fórmula por ser, tras su uso con varias de las respuestas medidas en este trabajo, la que más acertadamente ha predicho la transición entre los dos tipos de reflexiones:

$$t_m = 47 \frac{V}{S_T} \text{ (ms)} \quad (\text{Ec 7.2})$$

donde:

$V$  = volumen de la sala (en  $\text{m}^3$ ).

$S_T$  = superficie total de la sala (en  $\text{m}^2$ ).

Aplicando esta fórmula se han obtenido los siguientes tiempos en los recintos:

RECINTO	$t_m$ (ms)
Salón de Actos de la EITE	47,51
Salón de Actos de la EA	57,32
Aula Magna del ISTIC	123,05

Tabla 7.1.- Tiempos de mezcla de los recintos elegidos para simular.

Estos tiempos están directamente programados por lo que, según hayamos escogido la respuesta de un recinto u otro, se aplicará el  $t_m$  correspondiente que indicará el final del tramo donde se encuentran las primeras reflexiones.

Establecido el intervalo de análisis, a continuación se nos pedirá que indiquemos el umbral mínimo de detección de reflexiones. Esto se hará indicando el porcentaje de energía respecto de la reflexión más grande que se encuentra en el intervalo. El umbral se ha variado dependiendo de las características de la respuesta y de la amplitud de las reflexiones, oscilando entre un 1% y un 5%.

Una vez que se ha definido el intervalo de actuación y el umbral mínimo de detección, se procede a la identificación de las primeras reflexiones. Para ello, se calculará la primera derivada de la envolvente de energía, con la que se obtendrán las transiciones de la envolvente que indican los cambios en el nivel energético de la señal. Luego, se discriminarán todas aquellas transiciones cuyo nivel de amplitud sea menor al umbral. Por último, se localizarán los índices de la señal donde se han producido las transiciones y se guardarán en un archivo de texto cuyos nombres seguirán el siguiente esquema:

**mar\_abreviaturaRecinto\_nºPosicionFuente\_nºPosicionMicrófono\_nºCanal.txt**

Por ejemplo, para la BRIR utilizada para ilustrar este capítulo, las marcas se guardarán con los siguientes nombres:

mar\_TEL\_1\_3\_C1.txt

mar\_TEL\_1\_3\_C2.txt

Las marcas creadas se mostrarán automáticamente superpuestas en la gráfica de la señal en el dominio del tiempo, resaltadas en color verde:

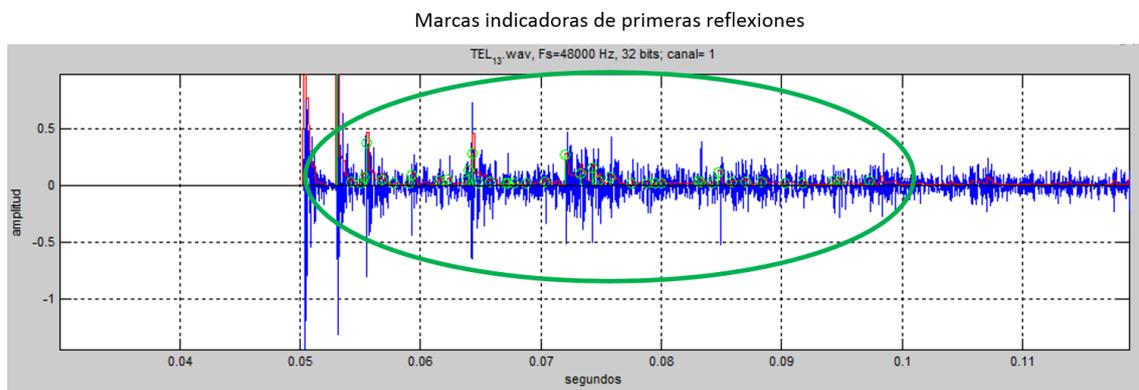


Figura 7.5.- Ampliación de la BRIR (Tel\_1\_3.wav, canal 1) con las marcas verdes indicadoras de las primeras reflexiones.

Los archivos de las marcas se utilizarán en las siguientes etapas de procesado para obtener por separado las tres partes fundamentales de la RIR.

### 7.1.3.- Extracción del sonido directo por separado

Procedemos ahora a la extracción de las partes fundamentales de la BRIR para guardar sus valores en archivos de texto independientes, empezando por el sonido directo. Para ello utilizaremos el script titulado "discretizar\_SD.m". En este archivo, una vez elegida la medida que

queremos procesar, se normalizará respecto a los valores máximos por canal de la BRIR más cercana a la fuente, con la intención de preservar la información de la atenuación por distancia.

A continuación se cargarán los archivos con las marcas obtenidas en la anterior etapa de procesado, y se usará el primer índice de cada archivo para delimitar la búsqueda del nivel máximo de señal, que indicará la llegada del sonido directo. Una vez localizado el máximo se procede a su extracción, generando una señal consistente en una secuencia de ceros para conservar también la información del retardo del sonido directo. Se incorporarán también las muestras correspondientes a los 0,25 ms por delante y 0,25 ms por detrás del máximo. El valor de 0,25 ms corresponde al tiempo de integración usado para calcular la envolvente de energía en marcar2RT1.m. Los valores del filtro creado se guardarán en un archivo de texto cuyo nombre seguirá el siguiente esquema:

**SD\_abreviaturaRecinto\_nºPosicionFuente\_nºPosicionMicrófono.txt**

Por ejemplo, en el caso de la respuesta utilizada para ilustrar este capítulo, las muestras se guardarán con el siguiente nombre:

SD\_TEL\_1\_3\_.txt

La gráfica del filtro resultante se puede observar en la siguiente figura:

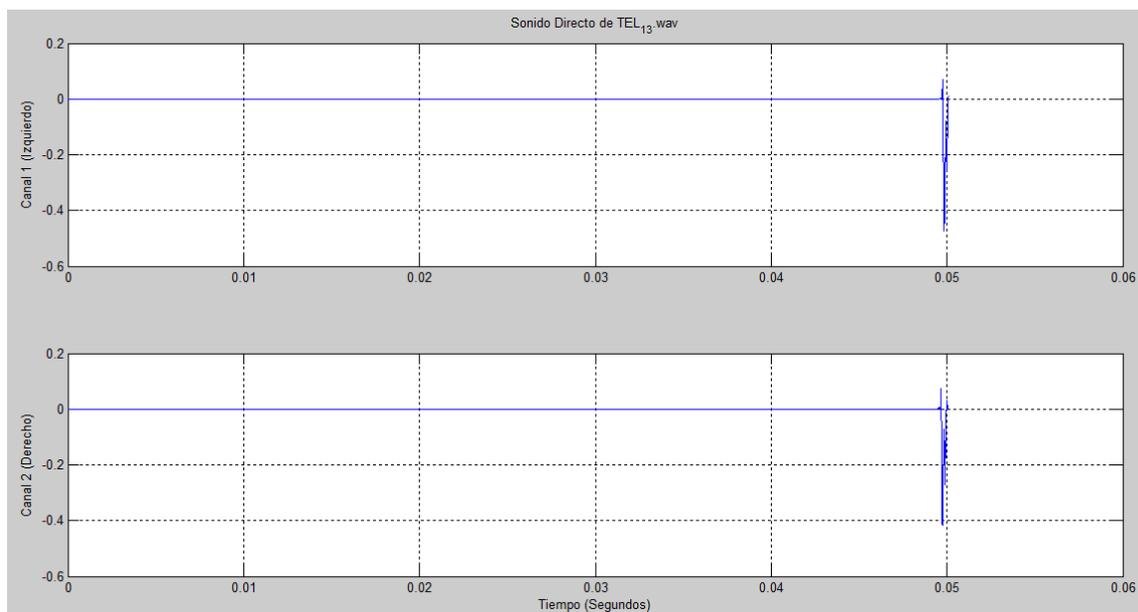


Figura 7.6.- Sonido Directo extraído de TEL\_1\_3.wav.

#### 7.1.4.- Extracción de las primeras reflexiones por separado

Ahora, se procederá a la extracción de las primeras reflexiones de la BRIR, haciendo uso esta vez del script titulado “discretizar\_PR.m”. En este archivo, una vez elegida la medida que queremos procesar, se normalizará respecto a los valores máximos por canal de la BRIR más cercana a la fuente, con la intención de preservar la información de la atenuación por distancia.

A continuación se cargarán los archivos con las marcas obtenidas con el programa marcar2RT1.m. Cada una de estas marcas indica el índice de la señal donde se produjo una variación de energía. Para extraer las primeras reflexiones, se hará un bucle donde se irá analizando cada índice de los archivos de marcas. Partiendo del índice, se buscará el máximo de señal localizado

entre los siguientes 0.25 ms, que corresponderá con la llegada de la reflexión. Se incorporarán también las muestras correspondientes a los 0,25 ms por delante y 0,25 ms por detrás del máximo. Los valores escogidos, junto con una secuencia de ceros que se añadirá para conservar la información del retardo de llegada se guardarán en un archivo de texto cuyo nombre seguirá el siguiente esquema:

**PR\_abreviaturaRecinto\_nºPosicionFuente\_nºPosicionMicrófono.txt**

Por ejemplo, para la respuesta utilizada para ilustrar este capítulo, las muestras se guardarán con el siguiente nombre:

PR\_TEL\_1\_3\_.txt

La gráfica del filtro resultante se puede observar en la siguiente figura:

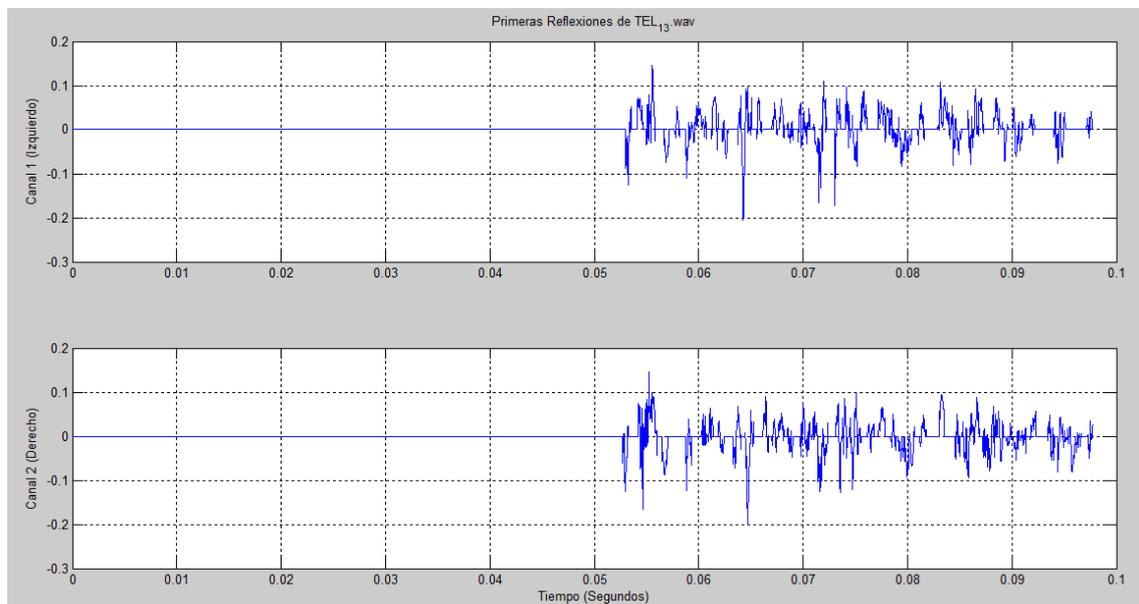


Figura 7.7.- Primeras Reflexiones extraídas de TEL\_1\_3.wav.

### 7.1.5.- Obtención de una cola reverberante única para cada recinto

En la última etapa del procesado se extraerá la cola reverberante de una señal de cada recinto. En esta parte de la BRIR, la densidad de las reflexiones aumenta notablemente y, por tanto, se pierde la capacidad de localización que ofrecen el sonido directo y las primeras reflexiones. Esto hace que la cola reverberante se asemeje a un proceso aleatorio y, debido a ello, posee un comportamiento estadístico. Dicho comportamiento nos va a hacer posible utilizar un único filtro para sintetizar las colas de todas las respuestas de un mismo recinto.

Para la realización del filtro utilizaremos el script titulado “discretizar\_CR.m”. En este archivo seleccionaremos la BRIR que vamos a utilizar para extraer la cola. Como en las etapas anteriores, primero se normalizará la medida respecto de los valores máximos por canal de la BRIR más cercana a la fuente. Después, se nos pedirá el valor del TR de la sala, para poder delimitar el tamaño de la cola.

A continuación se cargarán los archivos con las marcas obtenidas con el programa marcar2RT1.m. Se utilizará como punto de partida el último índice del archivo para empezar a

obtener los valores de la cola reverberante. Para reducir la información, se tomarán valores de la cola cada 0,25 ms hasta llegar al TR especificado. La cola no se rellenará con ceros directamente en esta etapa, sino cuando se vaya a realizar la auralización, ya que el número específico de ceros lo marcará la duración del filtro con las primeras reflexiones de la BRIR concreta que se vaya a usar.

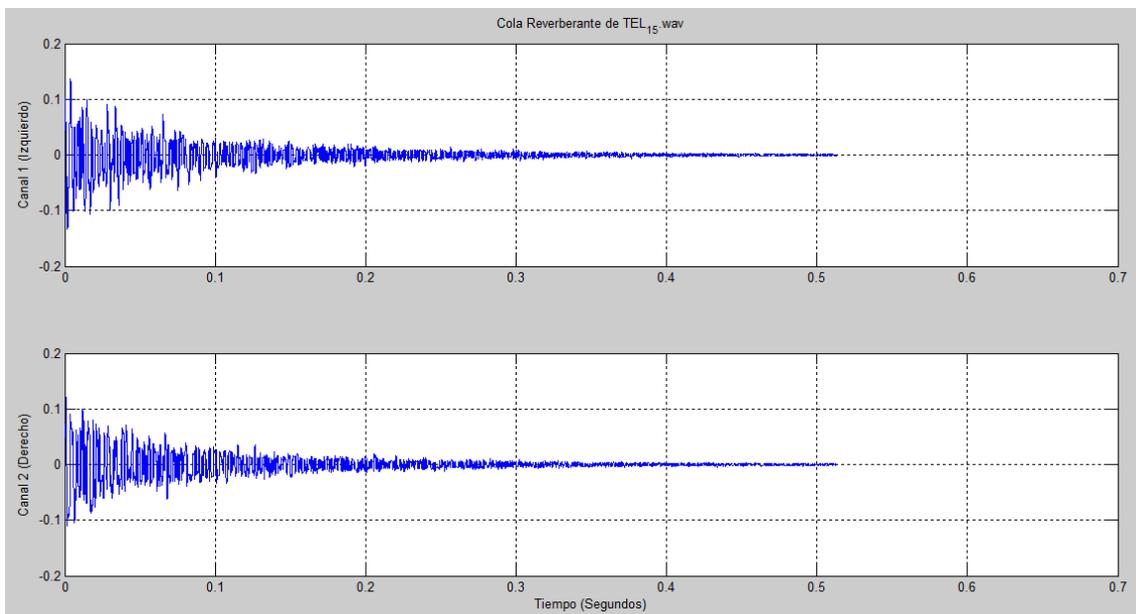
Los valores del filtro se guardarán en un archivo de texto cuyo nombre seguirá el siguiente esquema:

### **CR\_abreviaturaRecinto.txt**

Por ejemplo, para el filtro obtenido a partir de la extracción de la cola reverberante de una de las BRIR del Salón de Actos de la EITE, las muestras se guardarán con el siguiente nombre:

CR\_TEL.txt

La gráfica del filtro resultante se puede observar en la siguiente figura:



*Figura 7.8.- Cola reverberante extraída de TEL\_1\_5.wav.*

## **7.2.- Evaluación de los resultados obtenidos en el procesado**

Para realizar la comprobación de los filtros sintetizados a partir de las BRIR de los recintos, se van a hacer dos tipos de evaluaciones: una desde el punto de vista exclusivo de la comparación entre el filtro sintetizado y el filtro medido directamente; y la otra realizando pruebas de escucha comparándolas con grabaciones hechas directamente en los recintos.

### **7.2.1.- Comparación de las BRIR sintetizadas con las BRIR medidas**

Para realizar esta evaluación se hará uso del script de Matlab titulado “comparar\_BRIR.m”. Este archivo nos permite seleccionar la BRIR que deseamos comparar con su versión sintetizada, que se reconstruirá a partir de los filtros correspondientes al sonido directo y a las primeras reflexiones de la medida elegida, y al filtro de la cola reverberante del recinto. La evaluación del grado de similitud entre ambas BRIR se hará mediante la coherencia espectral  $C_{xy}(f)$ , que mide

cuanto se parecen entre sí dos señales por cada frecuencia, expresándolo mediante un porcentaje. Para ello, se utiliza la siguiente fórmula:

$$C_{xy}(f) = \frac{|P_{xy}(f)|^2}{P_{xx}(f) \cdot P_{yy}(f)} \cdot 100 (\%) \quad (\text{Ec 7.3})$$

donde:

$P_{xy}(f)$  = Densidad espectral de potencia (DEP) de la correlación cruzada de  $x[n]$  e  $y[n]$  (en W/Hz).

$P_{xx}(f)$  = DEP de la autocorrelación de  $x[n]$  (en W/Hz).

$P_{yy}(f)$  = DEP de la autocorrelación de  $y[n]$  (en W/Hz).

Esta medida nos devolverá un vector con el porcentaje correspondiente de similitud por cada frecuencia.

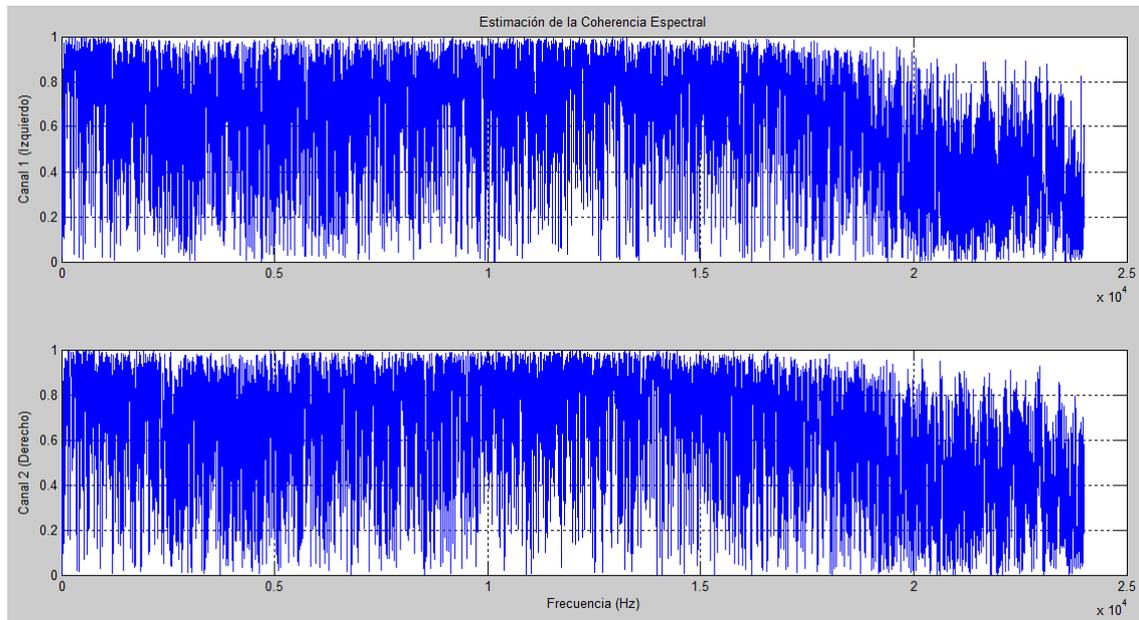


Figura 7.9.- Coherencia espectral entre el filtro medido y sintetizado de TEL\_1\_3.wav.

Para tener un porcentaje único por cada BRIR, se realizará un promedio de todos los porcentajes obtenidos hasta la frecuencia de 10 kHz, obteniéndose los resultados reproducidos en las siguientes tablas:

BRIR	CANAL 1 (%)	CANAL 2 (%)
TEL_1_1	62,43	60,68
TEL_1_2	63,31	63,44
TEL_1_3	66,12	66,93
TEL_1_4	66,26	66,71
TEL_1_5	71,05	71,56
TEL_1_6	64,40	64,45

TEL_1_7	66,82	67,04
TEL_1_8	62,12	62,37
TEL_1_9	63,00	61,77
TEL_2_1	62,80	66,22
TEL_2_2	65,76	65,92
TEL_2_3	67,47	69,80
TEL_2_4	67,45	75,18
TEL_2_5	70,53	71,95
TEL_2_6	67,79	71,03
TEL_2_7	65,76	68,97
TEL_2_8	63,84	66,39
TEL_2_9	64,77	66,26

Tabla 7.2.- Coherencias espectrales del Salón de Actos de la EITE.

BRIR	CANAL 1 (%)	CANAL 2 (%)
ARQ_1_1	86,81	86,22
ARQ_1_2	86,68	86,79
ARQ_1_3	86,85	86,92
ARQ_1_4	87,49	87,41
ARQ_1_5	88,19	88,34
ARQ_1_6	87,92	87,10
ARQ_1_7	88,59	88,21
ARQ_1_8	86,60	86,68
ARQ_1_9	87,12	87,05
ARQ_1_10	87,60	87,47
ARQ_2_1	86,26	86,24
ARQ_2_2	86,67	86,51
ARQ_2_3	87,10	87,00
ARQ_2_4	86,98	87,03
ARQ_2_5	87,23	87,49
ARQ_2_6	87,33	87,33
ARQ_2_7	88,60	88,86
ARQ_2_8	86,60	86,52
ARQ_2_9	86,94	86,73
ARQ_2_10	86,81	86,66

Tabla 7.3.- Coherencias espectrales del Salón de Actos de la EA.

BRIR	CANAL 1 (%)	CANAL 2 (%)
AMT_1_1	87,39	85,97
AMT_1_2	87,78	87,12
AMT_1_3	87,05	85,44
AMT_1_4	85,97	85,38
AMT_1_5	83,33	83,71
AMT_1_6	91,54	90,44
AMT_2_1	86,97	86,04
AMT_2_2	89,03	87,63
AMT_2_3	88,12	86,73
AMT_2_4	89,74	88,39
AMT_2_5	89,11	87,60
AMT_2_6	87,46	87,18

Tabla 7.4.- Coherencias espectrales del Aula Magna del ISTIC.



Los menores porcentajes del Salón de Actos de la EITE tienen su explicación en el hecho de que es un recinto con una reverberación muy escasa. Esto hace que la mayor parte de la energía esté distribuida entre el sonido directo y las primeras reflexiones que, al ser las zonas determinísticas de la BRIR, son más susceptibles a la eliminación de muestras que se ha realizado para reducir la información. Obviamente este hecho disminuye en los casos del Salón de Actos de la EA y del Aula Magna del ISTIC que, al ser recintos que tienen una mayor reverberación, la cantidad de energía se reparte más en todas las zonas de la BRIR y, al tener la cola reverberante un comportamiento estadístico, no le afecta tanto el proceso de reducción de muestras. Esto consigue elevar los porcentajes en función de la frecuencia de la coherencia espectral y, por tanto, aumentar el porcentaje general.

El script también nos permite visualizar las respuestas medida y sintetizada en el tiempo para compararlas, junto con las gráficas de sus DEP.

No obstante, hay que tener en cuenta que esta comprobación es única y exclusivamente a nivel de señal. Para realizar un análisis más completo, debemos realizar pruebas de escucha que constituyen la siguiente parte de la evaluación.

### 7.2.1.- Tests de audición de las BRIR

Con el objetivo de realizar a posteriori las citadas pruebas de audición, se ha reproducido en los recintos una grabación de sonidos anecoicos, consistente en cuatro instrumentos musicales interpretando dos o tres notas cada uno. Dichos instrumentos son: una viola, una guitarra, un oboe y un saxo. Estos sonidos se recogerán con los micrófonos utilizados para las medidas y se guardarán con la siguiente terminología:

**abreviaturaRecinto\_Anecoico\_nºPosiciónFuente\_nºPosiciónMicrófono.wav**

Posteriormente, se realizará la escucha de estos sonidos junto con las auralizaciones realizadas por Matlab para comprobar la calidad acústica de las simulaciones. Esto se hará mediante el script titulado **prueba\_Anecoico.m**, que nos permite elegir uno de los archivos mencionados anteriormente y busca los filtros adecuados para realizar la auralización. El script creará dos objetos reproductores de audio: uno con el nombre “anecoico”, correspondiente al archivo grabado directamente en el recinto, y el otro con el nombre “auralización” correspondiente a la simulación realizada por Matlab.

El script también nos permite visualizar las grabaciones en el tiempo para compararlas, junto con las gráficas de sus DEP y de la coherencia espectral en función de la frecuencia, aunque en este caso no van a ser relevantes ya que las señales no van a ser exactamente iguales. Lo determinante es que la percepción acústica del recinto quede recogida en el sonido auralizado.

Todas las grabaciones que se hicieron en el recinto fueron comprobadas con sus correspondientes auralizaciones, obteniéndose en todas ellas resultados aceptables y captando las características de reverberación de los tres recintos usados para el análisis.

### 7.3.- Técnica de interpolación empleada para los puntos no medidos

Para realizar la auralización, se ha programado una interfaz gráfica en Matlab (comentada en el siguiente apartado), que permite al usuario elegir los puntos de colocación de la fuente y el oyente en cualquier ubicación del escenario y del área de audiencia, respectivamente, para hacer la simulación. Como no se han realizado medidas en todas las posiciones del recinto, tendremos que recurrir a alguna técnica de interpolación para calcular aquellas ubicaciones que no se han medido directamente. En el caso de ambas situaciones, fuente y oyente, se ha usado la distancia euclídea para determinar la posición de la fuente o de micrófono más cercana al punto escogido por el usuario. El cálculo de la distancia euclídea  $d_e$  entre dos puntos se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$d_e = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \text{ (m)} \quad (\text{Ec 7.4})$$

En el caso de la posición de fuente, se determinará la distancia más cercana al punto elegido por el usuario para elegir si las medidas que se utilizarán para la auralización corresponden a las realizadas para la posición de fuente 1 o la posición de fuente 2 del recinto.

En cuanto a la posición del oyente, el cálculo se hace un poco más complejo, ya que no sólo hay que determinar la posición de micrófono más cercana al punto elegido por el usuario, sino también hacer las correcciones adecuadas sobre el nivel de amplitud de la señal y el tiempo de llegada a la ubicación. Dichas modificaciones sólo se realizarán a los filtros del sonido directo y de las primeras reflexiones ya que, como se ha comentado en el capítulo 2, el nivel de la cola reverberante permanece siempre estable en cualquier ubicación de la sala. Vamos a ilustrar los supuestos posibles mediante ejemplos.

Supongamos primero que el usuario elige un punto del Salón de Actos de la EITE situado cerca de cuatro posiciones de micrófono, tal y como se muestra en la figura 7.10.

Como se puede apreciar en la imagen, la posición más cercana corresponde a la 5. Esta posición está más cerca de la fuente que el punto elegido, por lo que habrá que atenuar la señal y retrasarla en el tiempo.

Para atenuar el sonido haremos el siguiente razonamiento, la señal al propagarse sufre una atenuación inversamente proporcional a la distancia que recorre, es decir, si llamamos  $d_m$  a la distancia que existe entre la fuente y la posición de micrófono, el sonido habrá llegado a dicha posición atenuado por un factor de  $1/d_m$ . El sonido auralizado tendrá que tener una atenuación proporcional a  $1/d_o$ , siendo  $d_o$  la distancia del punto escogido por el usuario hasta la fuente. Para introducir esta atenuación en el filtro se realizará la siguiente operación:

$$\text{filtro modificado} = \left( \frac{1}{d_o} - \frac{1}{d_m} \right) \cdot (\text{filtro original}) + (\text{filtro original}) \quad (\text{Ec 7.5})$$



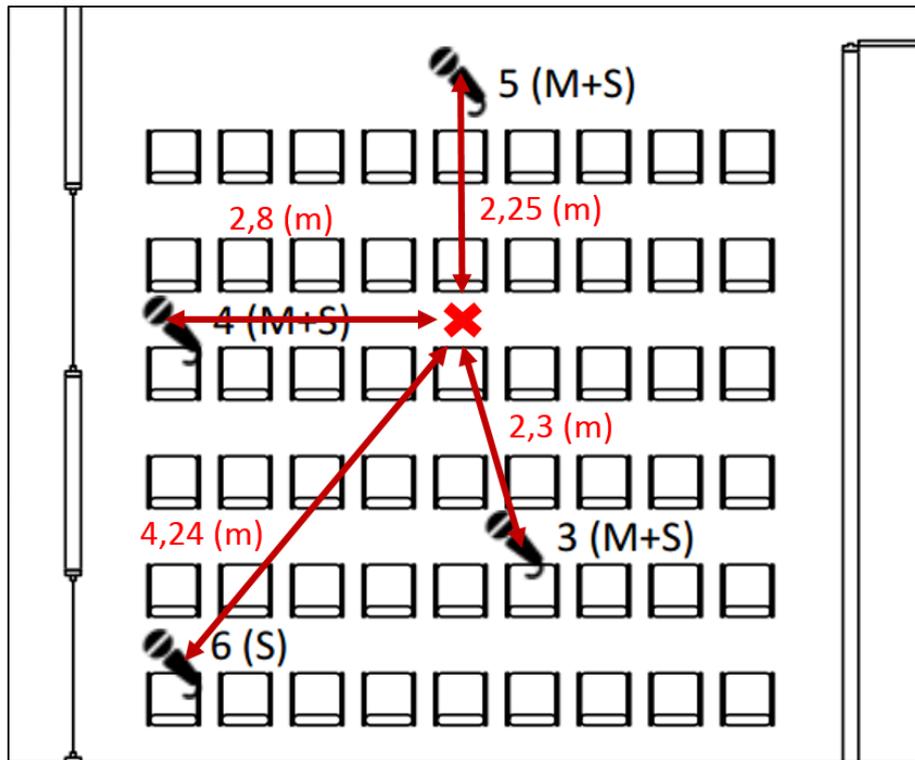


Figura 7.10.- Punto elegido por un usuario (marcado con una cruz roja) y las distancias de éste respecto a las posiciones de micrófono.

Como la información original del filtro contiene ya implícitamente la atenuación  $1/d_m$ , el resultado del filtro modificado será igual a  $(1/d_o) \cdot (\text{filtro original})$ , que es el resultado buscado.

Ahora, para aumentar el retardo de propagación, haremos uso de la expresión:

$$\tau = \frac{|d_m - d_o|}{c} \text{ (s)} \quad (\text{Ec 7.6})$$

donde:

$\tau$  = tiempo del retardo (en s).

$c$  = velocidad de propagación del sonido (en m/s).

El retardo se multiplicará por la frecuencia de muestreo utilizada en los filtros para obtener el número de muestras que hay que añadir al inicio del filtro para retrasar la llegada del sonido directo y de las primeras reflexiones.

Supongamos ahora el caso contrario, que el punto escogido por el usuario está más cercano a la fuente que la posición de micrófono más cercana que se ha obtenido mediante el cálculo de la distancia euclídea, como se puede apreciar en la figura 7.11.

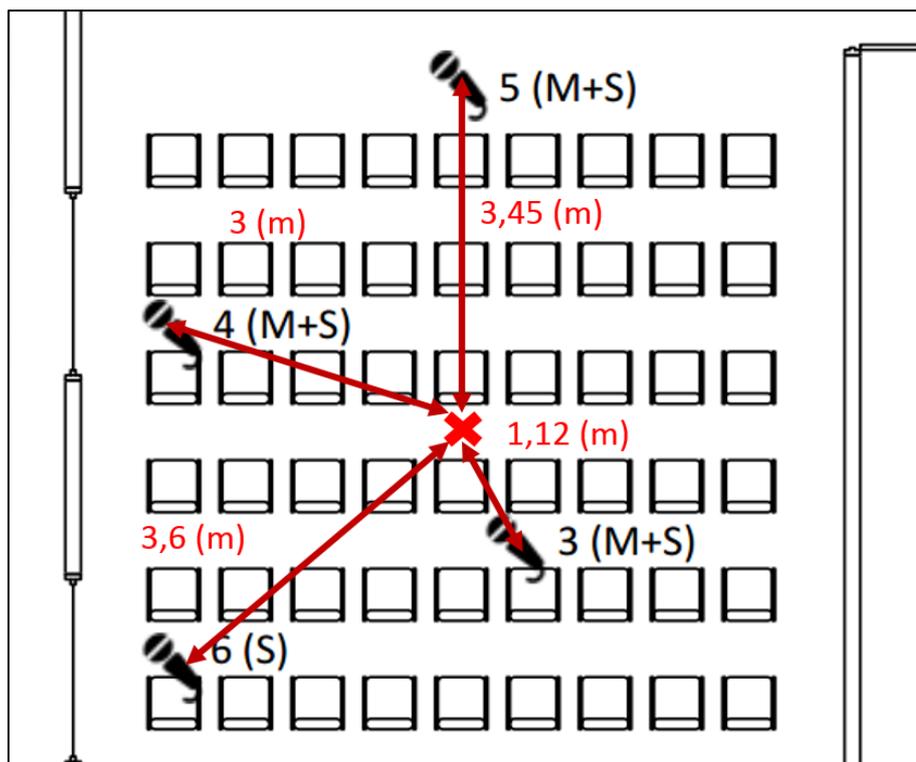


Figura 7.11.- Punto elegido por un usuario (marcado con una cruz roja) y las distancias de éste respecto a las posiciones de micrófono.

En esta ocasión, la posición más cercana corresponde a la 3. Esta posición está más lejana a la fuente que el punto elegido, por lo que habrá que amplificar la señal y adelantarla en el tiempo.

Para amplificar las amplitudes de los filtros, se tendrá que hacer la siguiente modificación en sus respuestas:

$$\text{filtro modificado} = -\left(-\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_m}\right) \cdot (\text{filtro original}) + (\text{filtro original}) \quad (\text{Ec 7.6})$$

El resultado del filtro modificado será a igual  $(1/d_o) \cdot (\text{filtro original})$  nuevamente, sólo que esta vez habrá representado una amplificación de las amplitudes de las muestras.

Para obtener  $\tau$ , se recurrirá de nuevo a la ecuación 7.6, sólo que esta vez representará un adelanto de tiempo en vez de un retardo. Por tanto, el valor de  $\tau$  se multiplicará por la frecuencia de muestreo utilizada en los filtros para obtener el número de muestras que hay que eliminar del inicio del filtro para adelantar la llegada del sonido directo y de las primeras reflexiones.

## 7.4.- Interfaz gráfica de usuario

Como se comentó al inicio del apartado anterior, para que cualquier usuario pueda realizar de una manera cómoda las auralizaciones de los tres recintos elegidos para simular, se ha programado una interfaz gráfica con Matlab. Esta interfaz tiene el nombre de "Auryn", y nos permitirá seleccionar el recinto que queremos simular para, posteriormente, elegir los puntos de la

sala donde queremos escuchar virtualmente los sonidos que incorpora la interfaz o, incluso, elegir nuestros propios archivos de audio para auralizar. Pasaremos a describir cada una de las pantallas que compone “Auryn”.

#### 7.4.1.- Pantalla de bienvenida (auryn.m)



*Figura 7.12.- Pantalla de bienvenida de "Auryn".*

En esta pantalla aparece el nombre de la interfaz junto con cuadro de diálogo que presenta la aplicación. Debajo aparecen los logos del Departamento de Señales y Comunicaciones (DSC) y de la EITE de la ULPGC. En la esquina inferior derecha se encuentra un botón “CONTINUAR” que nos llevará a la siguiente pantalla.



### 7.4.2.- Pantalla de selección del recinto (elegir\_recinto.m)



Figura 7.13.- Pantalla de selección del recinto de "Auryn".

Aquí se nos permitirá elegir a través de un cuadro de selección de texto uno de los tres recintos disponibles en la base de datos de la interfaz. En el lado derecho nos aparecerá una imagen del recinto seleccionado y, debajo de ésta, un recuadro con las dimensiones de la sala y los valores del  $TR_{mid}$  y del coeficiente medio de absorción, con la idea de que el usuario tenga una primera impresión del recinto. Una vez que hayamos elegido la sala, pulsaremos el botón "CONTINUAR", situado nuevamente en la esquina inferior derecha, para acceder a la siguiente pantalla.

### 7.4.3.- Pantalla de auralización del recinto (aura\_recinto.m)

En esta pantalla es donde realizaremos las auralizaciones. Podemos ver que se nos presenta en pantalla un modelo en 3D simplificado del recinto que hemos escogido. Tenemos la posibilidad de rotarlo y aumentar o disminuir el zoom sobre él con los botones correspondientes de la barra de herramientas situada en la esquina superior izquierda.

Dicho modelo posee ejes que indican, en metros, las dimensiones de la sala. Tiene dos zonas coloreadas: una amarilla que corresponde al escenario de la sala, y la otra verde indicando el patio de butacas o el lugar donde se sitúa la audiencia.

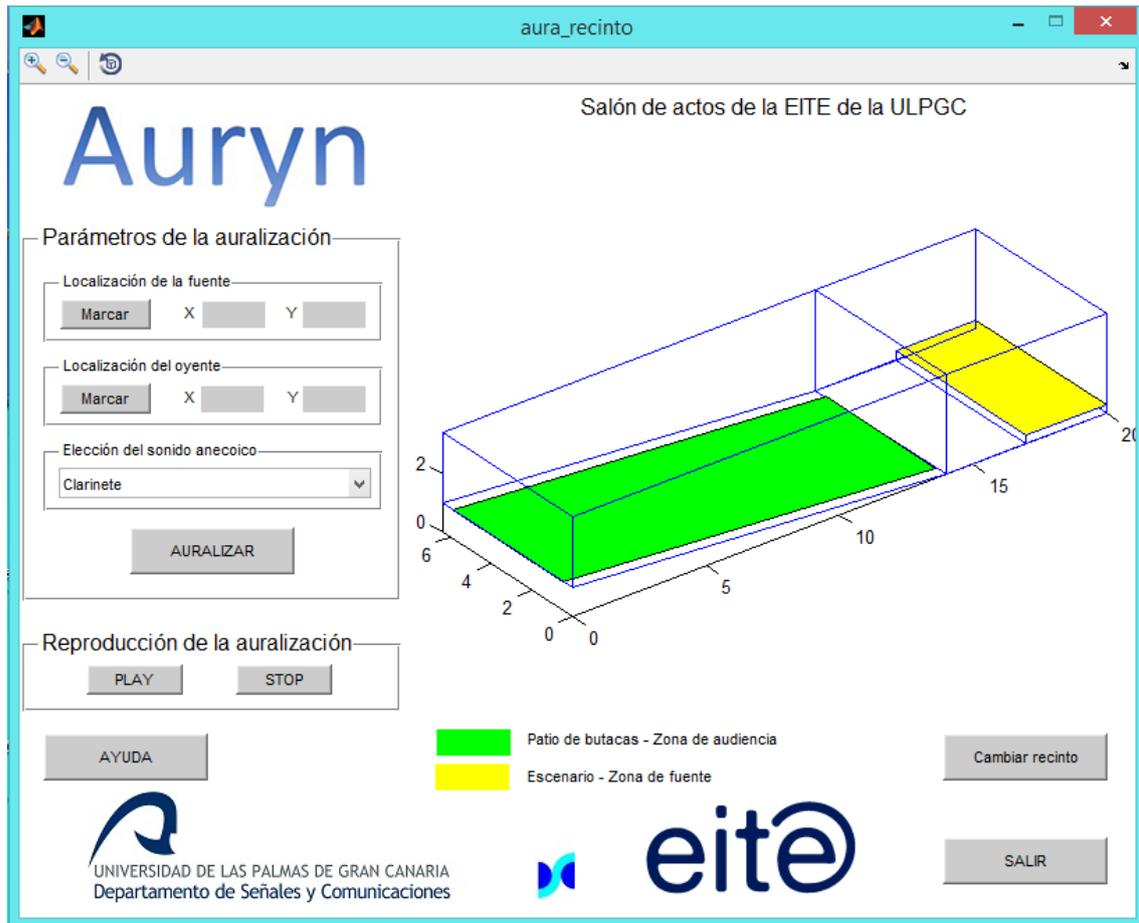


Figura 7.14.- Pantalla de auralización de "Auryn".

En la parte izquierda de la pantalla tenemos una sección denominada “Parámetros de auralización”, donde introduciremos los datos necesarios para poder realizar la auralización. Estos datos son los siguientes:

- Localización de la fuente: Al pulsar el botón “Marcar”, el modelo del recinto se pondrá en una vista superior y aparecerá una cruceta que nos permitirá marcar con comodidad el punto donde queremos situar la fuente. El punto quedará señalado por una marca negra en forma de cruz.
- Localización del oyente: Al pulsar el botón “Marcar”, el modelo del recinto se pondrá en una vista superior y aparecerá una cruceta que nos permitirá marcar con comodidad el punto donde queremos situar al oyente en la sala. El punto quedará señalado por una marca negra en forma de círculo.
- Elección del sonido anecoico: Elegiremos el sonido sin reflexiones de los disponibles en la base de datos o podremos cargar un archivo wav externo para realizar la auralización.

Una vez introducidos estos puntos, pulsamos el botón “AURALIZAR” para escuchar la simulación calculada por Matlab. Una barra de progreso nos indicará el porcentaje que se lleva realizado de la auralización. Cuando la barra se haya completado, se reproducirá automáticamente el sonido auralizado.

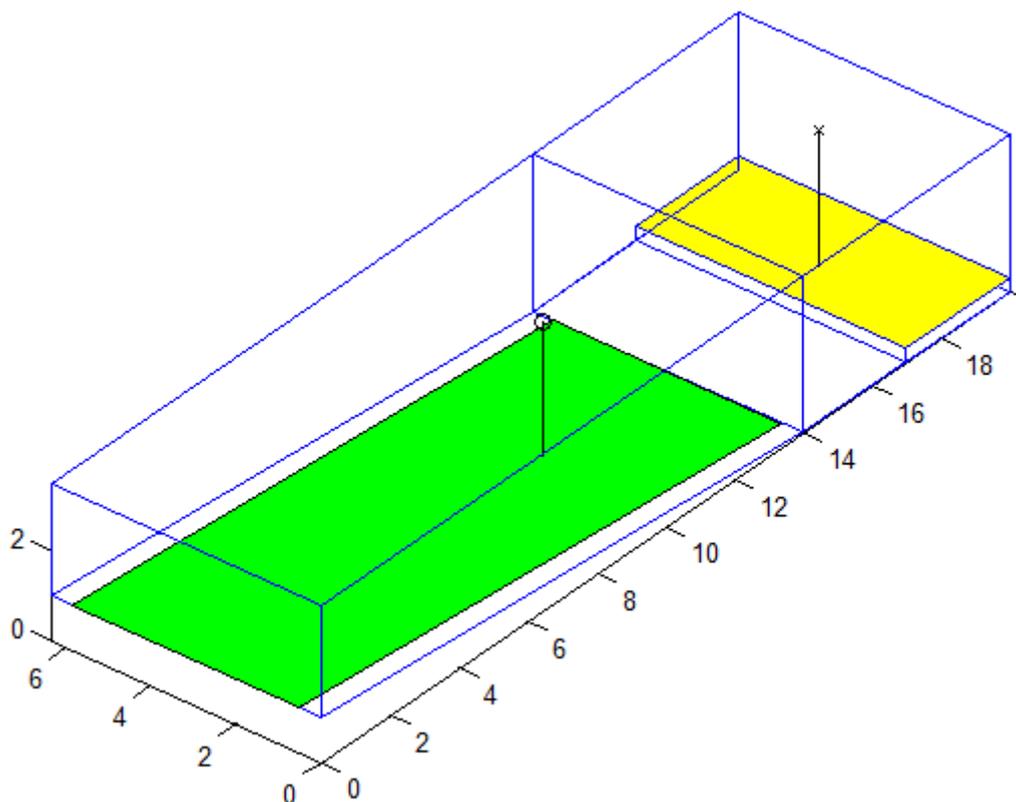


Figura 7.15.- Detalle del modelo 3D del recinto con las marcas indicadoras de las posiciones de fuente (cruz) y de micrófono (círculo).

En la parte izquierda de la pantalla también podemos observar la sección “Reproducción de la auralización”. Aquí podremos volver a reproducir la simulación pulsando el botón “PLAY” o detener cualquier reproducción con el botón “STOP”.

En la esquina inferior derecha tenemos dos botones: “Cambiar recinto”, que nos devolverá a la pantalla de selección del recinto “elegir\_recinto.m”, y justo debajo el botón “SALIR”, que nos hará abandonar la aplicación.

Por último, en la esquina inferior izquierda, por encima de la zona de los logos, se encuentra el botón “AYUDA”, que nos llevará a la última pantalla de la aplicación.

#### 7.4.4.- Pantalla de ayuda de la aplicación (ayuda.m)

Esta pantalla simplemente nos ofrecerá un texto con las indicaciones necesarias para realizar correctamente la auralización en la pantalla “aura\_recinto.m”, a la que podremos volver pulsando el botón “CERRAR”.



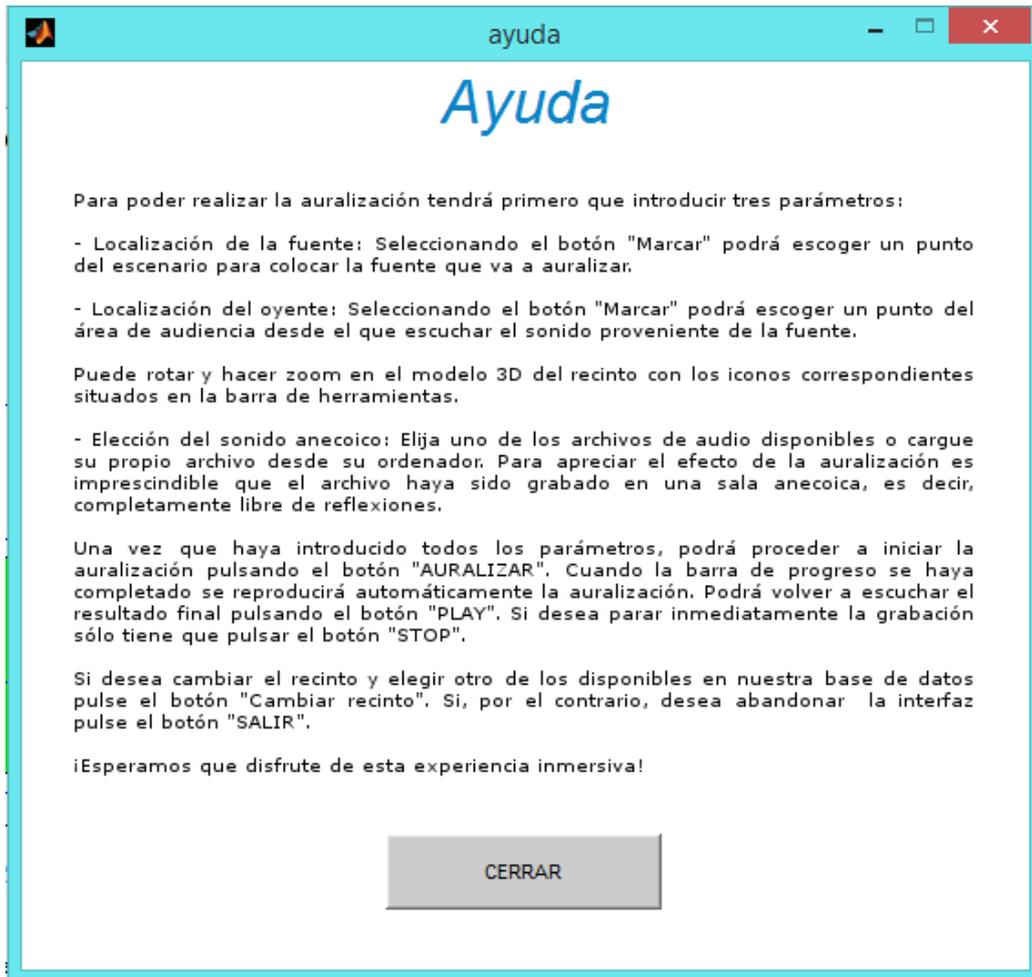


Figura 7.16.- Pantalla de ayuda de "Auryn".



# CAPÍTULO 8:

## CONCLUSIONES

### 8.1.- Conclusiones obtenidas

El trabajo que aquí se presenta ha permitido afrontar la aplicación a tres casos concretos del concepto de simulación binaural. Un hecho que por sabido no deja de ser destacable, ha sido el constatar que pasar de la teoría a la práctica en ingeniería implica siempre la realización de toda una suerte de procesos que en general resultan transparentes a los usuarios, pero que son imprescindibles para una buena ejecución de casi cualquier desarrollo.

Un primer aspecto ha sido el comprobar que las respuestas al impulso obtenidas con el software DIRAC 4.0, y los distintos accesorios para ello empleados, presentan unas prestaciones adecuadas a la hora de obtener los parámetros acústicos y psicoacústicos del recinto, pero en aplicaciones de auralización se hace necesaria obtener respuestas con un elevado margen dinámico que no siempre pueden ser entregadas por este programa. Por lo tanto, una primera conclusión es que se hace necesario un procesado después de su medición in situ que corrija la presencia de ruido y de otras señales.

Una segunda conclusión es que la discretización y separación de las respuestas al impulso en sus tres partes básicas (sonido directo, primeras reflexiones y cola reverberante) para mejorar la computación en paralelo y reducir el nivel del ruido de fondo funciona aceptablemente, cumpliendo su cometido de reducción de información de almacenamiento y manteniendo las características perceptivas del local.

Para la auralización es necesaria la realización de medidas in situ, el número de medidas a realizar siempre dependerá del volumen y geometría del local, pero es prácticamente imposible medir absolutamente todas las localizaciones. Sin embargo, debe ser posible que se pueda auralizar en cualquier posición del recinto. Para ello se hace necesario aplicar alguna metodología o técnica que permita extrapolar las respuestas al impulso medidas a cualquier localización del recinto. Esto obliga a establecer un proceso específico, aunque general, para su aplicación a cualquier recinto. Con la realización de este proyecto hemos concluido que ese proceso puede hacerse mediante la comparación de las distancias euclídeas con respecto a las posiciones reales en las que se han colocado los micrófonos para escoger la posición más cercana al punto elegido por el usuario.



Por último, otra de las conclusiones es que es posible el diseño y aplicación de correcciones a la respuesta al impulso para establecer los efectos propios de la propagación de las ondas sonoras (atenuaciones y retardos), con el propósito de mejorar la auralización obtenida a partir de los criterios expuestos anteriormente.

## 8.2.- Mejoras y líneas de ampliación

El presente Trabajo de Fin de Grado es susceptible de que se realicen mejoras, de las cuales podemos destacar:

- Ampliar el algoritmo de procesado para que pueda escucharse la auralización antes de que termine de realizarse completamente la operación, con el propósito de mejorar la experiencia de usuario cuando se utilizan archivos sonoros de larga duración y de permitir el procesado en tiempo real para aplicaciones de sonido en directo.
- Incorporar a la cadena de auralización las características de transferencia de los oídos para incrementar el realismo de la simulación.
- Aumentar el número de recintos disponibles para auralizar, consiguiendo una base de datos con una amplia selección de salas con características acústicas diferentes.
- Incrementar el número de archivos sonoros anecoicos disponibles para auralizar, ampliándolos a conjuntos musicales ejecutando temas completos de distintos estilos, que permitan a los usuarios tener experiencias sonoras más completas.
- Desarrollar la aplicación de usuario en Java para su integración en una web dedicada a recintos tales como teatros, auditorios, etc., de manera que el usuario no sólo pueda contemplar la visión que a priori va a tener desde su butaca cuando compra una entrada desde internet, sino también la percepción sonora que tendrá desde ese asiento.



# CAPÍTULO 9:

## BIBLIOGRAFÍA

### **PUBLICACIONES EDITORIALES:**

- [1] Vorländer, M. (2006). Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality. Berlín: Springer-Verlag.
- [2] Kuttruff, H. (2009). Room Acoustics (5<sup>th</sup> Edition). Oxfordshire: Spon Press.
- [3] Kuttruff, H. (2007). Acoustics: An Introduction. Oxfordshire: Taylor & Francis.
- [4] Blauert, J. (2005). Communication Acoustics. Berlín: Springer-Verlag.
- [5] Howard, D. M., Angus J. A. S. (2009). Acoustics and Psychoacoustics (4<sup>th</sup> Edition). Oxford: Focal Press.
- [6] Carrión, A. (1998). Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos. Barcelona: UPC.
- [7] Oppenheim, A. V., Willsky, A. S., Nawab, S. H. (1998). Señales y Sistemas (2<sup>a</sup> Edición). Ciudad de México: Pearson Prentice Hall.
- [8] Caballero, A., Hernández, E. (2012). Proyecto Fin de Carrera. Caracterización práctica de la respuesta al impulso de la iglesia de Santo Domingo para su auralización indirecta en un entorno virtual. Las Palmas de Gran Canaria: Escuela de Ingeniería de Telecomunicación y Electrónica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- [9] Bruel & Kjaer. (2007). DIRAC Room Acoustics Software Type 7841 Version 4.0 – User Manual.

### **ARTÍCULOS DE REVISTAS O CONGRESOS:**

- [10] Arau, H. (1996). Influencia del radio de reverberación en el establecimiento de la densidad de energía sonora estacionaria en campo difuso. Revista de Acústica de Sociedad Española de Acústica. 1<sup>o</sup>-2<sup>o</sup> Trimestre, Volumen XXVII nº1 y 2.
- [11] Farina, A. (2007). Advancements in impulse response measurements by sine sweeps. 122<sup>nd</sup> Audio Engineering Society Convention, 5-8 de Mayo de 2007. Viena.

[12] Müller, S., Massarini, P. (2001). Transfer-Function Measurement with Sweeps. Journal of the Audio Engineering Society (AES), volumen 49, número 6, páginas 443-471.

[13] Lindau, A., Kosanke, L., Weinzierl, S. (2010). Perceptual evaluation of physical predictors of the mixing time in binaural room impulse responses. 128<sup>th</sup> Audio Engineering Society Convention, 22-25 de Mayo de 2010. Londres.

#### **DOCUMENTOS WEB:**

[14] Audiophile Club of Athens. (2010). Room Acoustics & Reverberation Time RT(60). Consultada el 20 de octubre de 2014, en <http://www.aca.gr/index/forums/fen/hiend2?row=528>.

[15] Departamento de Electrónica de IEFPS Tartanga, Erandio Bizkaia. (2014). Fundamentos de las Fibras Ópticas. Consultada el 20 de octubre de 2014, en <http://fibraoptica.blog.tartanga.net/fundamentos-de-las-fibras-opticas/>.

[16] Olmo, M., Nave, R. (2009). Sonido y Audición. Consultada el 22 de octubre de 2014, en <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/sound/soucon.html>.

[17] Santiago García Gago (2010) Manual para Radialistas Analfatécnicos. Consultada el 28 de octubre de 2014, en <http://www.analfatecnicos.net/index.php>.



# CAPÍTULO 10:

## PLIEGO DE CONDICIONES

### 10.1.- Introducción

El pliego de condiciones general contiene una descripción del contenido del Trabajo Fin de Grado, esto es, la legislación de obligado cumplimiento para la elaboración del apartado técnico (en nuestro caso la Norma UNE-EN ISO 3382-2) y para la utilización y distribución del software creado en el trabajo. En cuanto a las condiciones técnicas particulares se recogerán los materiales, equipos y software utilizados en el proyecto, además del montaje llevado a cabo para su elaboración.

### 10.2.- Norma UNE-EN ISO 3382-2

#### 10.2.1.- Objeto y campo de aplicación

Esta parte de la Norma ISO 3382 especifica los métodos de medición del tiempo de reverberación en recintos ordinarios. Describe el procedimiento de medición, el número de posiciones de medición requerido y el método para evaluar los datos y presentar el informe de ensayo.

Los resultados de la medición se pueden utilizar para la corrección de otras mediciones acústicas, por ejemplo, el nivel de presión acústica de las fuentes sonoras o las mediciones del aislamiento acústico, y para comparación con los requisitos del tiempo de reverberación en los recintos.

#### 10.2.2.- Posiciones de medida de la fuente sonora

Como los motivos para la realización de las mediciones pueden ser muy distintos, el número de posiciones de medida se elige de forma que alcance una cobertura apropiada del recinto. Las posiciones de micrófono deben estar al menos separadas por una distancia equivalente a la mitad de la longitud de onda, es decir, una distancia mínima de unos 2 metros para el intervalo de frecuencias habitual. La distancia entre cualquier posición de micrófono y la superficie reflectante más cercana, incluyendo el suelo debe ser de al menos un cuarto de longitud de onda, es decir, normalmente 1 metro.



Ninguna posición de micrófono debe estar demasiado cerca de cualquier posición de fuente para evitar una influencia demasiado grande del sonido directo. La distancia mínima  $d_{min}$  en metros puede ser calculada a partir de:

$$d_{min} = 2 \sqrt{\frac{V}{c \cdot T}} \quad (\text{Ec 10.1})$$

donde:

V = volumen (en  $m^3$ ).

c = velocidad del sonido (en m/s).

T = estimación del tiempo de reverberación esperado (en s).

Cada par de posiciones de medida es una combinación de una posición de fuente y una posición de micrófono. El número de posiciones puede escogerse para obtener una cobertura baja, o una cobertura normal.

### 10.2.3.- Posiciones de medida del micrófono

Los distintos parámetros no son propiedades estadísticas del auditorio y variarán sistemáticamente de un asiento a otro. Por tanto es importante incluir un número adecuado de posiciones de fuente y de micrófono para caracterizar el auditorio completo.

De los tres métodos propuestos en la norma para establecer las posiciones de medición, se ha escogido el método de ingeniería. Este método es adecuado para la verificación del comportamiento de los edificios con respecto a las especificaciones del tiempo de reverberación o de la absorción del recinto. La precisión nominal se supone superior al 5% en bandas de octava y superior al 10% en bandas de un tercio de octava.

Se realizan mediciones de la respuesta al impulso para al menos dos posiciones de la fuente. Se requieren al menos seis combinaciones de fuente-micrófono independientes.

El micrófono debería colocarse a una altura de 1,2 m sobre el suelo en la zona de asientos de la audiencia para que sea representativo de la altura del oído de un oyente sentado.

La fuente debería estar en posiciones representativas de las usadas por los intérpretes de la sala. Debido a que la mayoría de las salas son simétricas alrededor de la línea central las posiciones de recepción pueden ser distribuidas sólo en un lado de la sala con posiciones de fuente situadas simétricamente alrededor de la línea central. Por tanto puede hacer una posición central de la fuente con otras posiciones a igual distancia de la línea central hacia la derecha y hacia la izquierda. Se recomienda una altura de la fuente de 1,5 m.

## 10.3.- Licencia del software

### 10.3.1.- Concesión de licencia



Este programa es propiedad de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria y cualquier usuario debe estar de acuerdo y cumplir los términos y condiciones establecidas en esta licencia del programa, aceptando todas sus cláusulas. El uso de este software o de una copia en un PC, será bajo la autorización expresa del autor, tutor del proyecto y de la Escuela de Ingeniería de Telecomunicación y Electrónica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

### 10.3.2.- Derechos de autor

Este programa junto con la documentación están protegidos por las leyes de la propiedad intelectual que le sean aplicables, así como las disposiciones de los tratados internacionales. En consecuencia, el usuario debe utilizar el programa como cualquier producto protegido por derechos de autor. Sin embargo, el usuario podrá usar una copia y utilizar los códigos fuente de la programación y la documentación siempre bajo la autorización del autor, del tutor y de la Escuela de Ingeniería de Telecomunicación y Electrónica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

### 10.3.3.- Restricciones

El usuario no podrá realizar ingeniería inversa, de compilación o desensamblado del programa. Éste podrá transferir el programa a un tercero, siempre que no tenga copias del programa, incluyendo posibles actualizaciones o retener material escrito adicional que acompañe al programa.

### 10.3.4.- Limitación de responsabilidad

En ningún caso serán el autor ni el tutor, ni la Escuela de Ingeniería de Telecomunicación y Electrónica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria responsables de los perjuicios directos, indirectos, incidentales o consiguientes, gastos, lucro cesante, pérdida de ahorros, interrupción de negocios, pérdida de información comercial o de negocio, o cualquier otra pérdida que resulte del uso o de la incapacidad de usar el programa o la documentación. El usuario conoce y acepta que los derechos de licencia reflejan esta asignación de riesgo como el resto de cláusulas y restricciones. El autor y los tutores rechazan cualquier otra garantía que no haya sido indicada anteriormente.

### 10.3.5.- Varios

En el supuesto de que cualquier disposición de esta licencia sea declarada total o parcialmente inválida, la cláusula afectada será modificada convenientemente de manera que sea ejecutable una vez modificada, plenamente eficaz, permaneciendo el resto de este contrato en vigencia.

Este contrato se rige por las leyes de España. El usuario acepta la jurisdicción exclusiva de los tribunales de este país en relación con cualquier disputa que pudiera derivarse de la presente licencia.

## 10.4.- Aparatos de medida



Los materiales utilizados para la obtención de las diferentes respuestas al impulso del recinto y la posterior auralización fueron:

#### 10.4.1.- Medidor de Nivel Sonoro RION modelo NL-18

Un sonómetro es un instrumento de medida que sirve para medir niveles de presión sonora.

Básicamente está constituido por un transductor (micrófono), acondicionadores de señal (previo), sección de análisis y presentación de datos (cuerpo del sonómetro).

El funcionamiento básico de un sonómetro lógicamente comienza por el micrófono. Al diafragma del micrófono llegan ondas de presión sonora con una cierta intensidad. Esta presión sonora se convierte a un pequeño voltaje generado por el transductor del micrófono, el cual es entregado al amplificador previo que aumenta la relación señal a ruido para facilitar la manipulación de la señal en el cuerpo del sonómetro.



Figura 10.1- Estructura general de un sonómetro.

Según la normativa vigente los sonómetros están agrupados en 4 clases: clase 0, clase 1, clase 2 y clase 3. Para cada una de ellas existen unas especificaciones que los sonómetros tienen que cumplir, entre éstas se destacan:

- **Ponderaciones en frecuencia**

Las ponderaciones en frecuencia son modificadores que se aplican a la señal para obtener una respuesta lo más parecida posible a la del oído humano (ponderaciones A y C) o para obtener un espectro plano (ponderación Z). Según el tipo de medida a realizar y el objeto de la misma, se aplicarán unas ponderaciones u otras. En nuestro caso no se realizó la aplicación de ponderaciones.

- **Ponderaciones temporales**

Con el objeto de adaptar el tiempo de integración del sonómetro al tipo de medida a realizar, existen 2 tipos de ponderaciones temporales, la rápida (Fast) y la lenta (Slow) cuya tiempo de integración es de 0,125 ms y 1 s respectivamente. Obviamente, se suele utilizar la ponderación rápida para ruidos más impulsivos y aleatorios, mientras que la lenta se emplea para medir ruidos continuos en el tiempo. De todas formas, las normas y ordenanzas actuales explican detalladamente cuando hay que emplear una u otra. En este caso se empleó la ponderación temporal "Fast".

- **Indicación “por debajo de rango”**

Si cualquier medición es menor que el límite inferior especificado de un rango de funcionamiento lineal a una frecuencia dada, debe existir una alerta que indique que esto está ocurriendo. El manual de instrucciones debe describir el funcionamiento y la interpretación de las indicaciones “por debajo del rango”.

### 10.4.2.- Micrófono Behringer ECM8000

Para las medidas destinadas a la auralización se han usado dos micrófonos Behringer ECM8000. Este micrófono de condensador es omnidireccional y tiene una respuesta en frecuencia ultra-plana, lo que lo hace apropiado para obtener medidas con una gran fidelidad.

Su respuesta en frecuencia barca todo el rango audible (20 Hz – 20 kHz), tiene una impedancia interna de 200  $\Omega$  y posee una sensibilidad de 70 dB ref. 1 V/Pa.



Figura 10.2.- Behringer ECM8000.

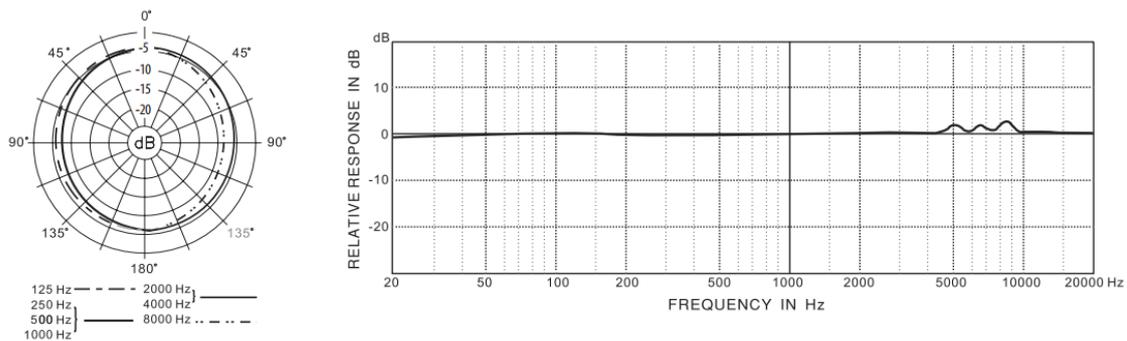


Figura 10.3.- Izquierda, diagrama de directividad del ECM8000. Derecha, su respuesta en frecuencia en el eje.

### 10.4.3.- Calibrador Brüel & Kjaer modelo 4231

El calibrador de nivel sonoro 4231 se utiliza para verificar sonómetros y otros equipos para medidas acústicas.

Al pulsar el botón “on”, el calibrador se pone en marcha, de forma que se emite un tono de 1 kHz con un nivel de presión sonora de 94 dB. El calibrador posee además un botón “+20 dB”, que hace que el nivel de presión sonora se incremente en 20 dB sobre su valor normal.

El sonómetro se calibra colocando el 4231 sobre el micrófono, de forma que lo que se tiene que apreciar en el sonómetro son los 94 dB que se están emitiendo desde el calibrador.



Figura 10.4.- Calibrador Brüel & Kjaer 4231.

#### 10.4.4.- Sistema inalámbrico SHURE EP2TRE215

Sistema personal de monitorización inalámbrica PSM200. La transmisión se realiza en la banda de UHF y con un único canal (mono). El sistema consta de emisor de RF, mezclador de 2 canales y petaca receptora híbrida (alámbrica - inalámbrica). Se utiliza junto con el sonómetro en las medidas de campo.



Figura 10.5.- SHURE EP2TRE215

#### 10.4.5.- Interfaz de audio AKAI EIE pro



El EIE pro de AKAI se puede usar con cualquier estación de trabajo o software de grabación de audio digital compatible con el envío de audio a través de USB. Tiene 4 canales configurables para funcionar tanto como entradas de micrófono como de línea, todos ellos con ganancia ajustable. Posee dos medidores de tipo vúmetro para visualizar el nivel de los canales y conmutadores para ajustar las características de la mezcla final que será enviada a la salida estéreo de la interfaz o a través de su host USB. El AKAI se usará junto con los micrófonos ECM8000 en las medidas destinadas a la simulación binaural.



Figura 10.6.- AKAI EIE pro

#### 10.4.6.- Amplificador AP600

El AP600 es un conjunto formado por un generador de ruido rosa y blanco y un amplificador de potencia. El AP600 ha sido especialmente diseñado para generar la señal a reproducir por el altavoz omnidireccional BP012. Gracias a su salida de ruido interno y su entrada para ruido externo el AP600 puede ser utilizado como generador de ruido más amplificador, sólo como generador de ruido o sólo como amplificador. Además permite insertar entre el generador de ruido y el amplificador equipos suplementarios de tratamiento de la señal como ecualizadores o compresores.



Figura 10.7.- Amplificador CESVA AP600.

El AP600 dispone de protección anticlip y de protección térmica. El sistema de refrigeración por aire forzado del AP600 está controlado por un microprocesador que apaga el ventilador durante un minuto después de parar la reproducción de señal. Esto es ideal para la medición de ruidos de

fondo o la medición de tiempos de reverberación en ambientes poco ruidosos. El AP600 puede ser operado directamente desde el teclado de que dispone o controlado por un ordenador a través del software suministrado. Esta comunicación con el ordenador puede ser vía cable o inalámbrica.

#### 10.4.7.- Altavoz omnidireccional BP012

El BP012 es un conjunto de 12 altavoces montados en un baffle dodecaédrico que asegura una emisión omnidireccional del ruido reproducido. Esto permite emitir por igual en todas las direcciones del espacio, cumpliendo los requisitos de directividad establecidos en las normativas ISO 140 e ISO 3382.



Figura 10.8.- Altavoz omnidireccional BP012.

El BP012 acepta una potencia de 600 W RMS con la cual es capaz de desarrollar 123 dB de potencia acústica en las bandas de tercio de octava de 100 a 5000 Hz.

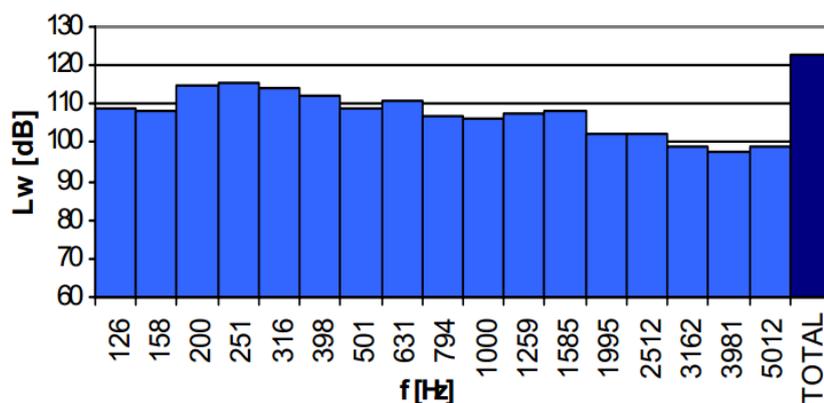


Figura 10.9.- Distribución frecuencial del BP012.

#### 10.4.8.- PC netbook ASUS Eee PC 1015PD



Ordenador utilizado para la toma de medidas debido a los problemas de compatibilidad del software de medidas acústicas con los sistemas operativos actuales. En él está instalado el software de medición Dirac 4.0. Sistema operativo: Windows XP.



*Figura 10.9.- ASUS Eee PC 1015PD.*

#### 10.4.9.- PC portátil HP Pavilion g6-2356ss

Este portátil fue utilizado para la elaboración de la memoria y para la utilización del software matemático Matlab. Sistema operativo: Windows 8.1.



*Figura 10.10.- HP Pavilion g6-2356ss*

### 10.5.- Montaje realizado

Para la obtención práctica de la respuesta al impulso se debe colocar la fuente sonora en diferentes posiciones del recinto, los que de manera más habitual utilizan los posibles oradores que hagan uso del local. Igualmente las medidas de recepción se han de realizar en distintas localizaciones del recinto, fundamentalmente en las zonas donde se colocan los oyentes. Estas mediciones se realizan con la ayuda del software de medidas acústicas, Dirac 4.0.



Dirac se encargará de emitir la señal de excitación escogida (permite usar señal MLS, barrido lineal y barrido exponencial), que saldrá del ordenador y será amplificada por el amplificador de potencia, conectado entre el ordenador y la fuente sonora.

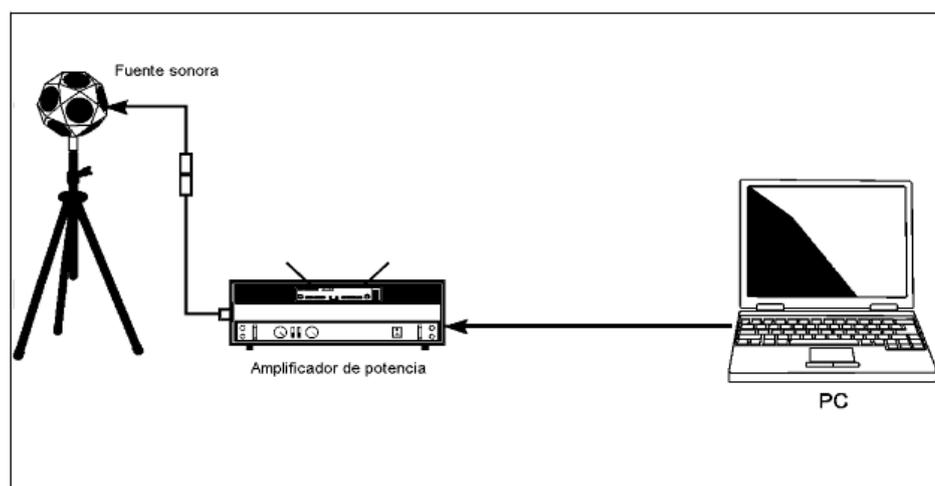
En el caso de las mediciones realizadas para el reconocimiento del recinto el sonómetro, que será el dispositivo que se irá moviendo en las localizaciones de los oyentes, llevará conectado un transmisor de RF que enviará la señal de audio obtenida en el recinto al receptor, que irá conectado al ordenador. Finalmente, el software Dirac se encargará de representar la correspondiente respuesta al impulso. Para el caso de las mediciones realizadas para la simulación de los recintos elegidos, se utilizarán dos micrófonos conectados directamente por cable XLR a una DAW, que a su vez estará conectada al ordenador mediante USB.

Los montajes se encuentran en el capítulo 5 [Sistema para la medida de la respuesta binaural].

## 10.6.- Software Dirac

- **Descripción del software**

El software Dirac 7841, en nuestro caso versión 4.0, permite medir las respuestas al impulso utilizando como intermediario un ordenador, en el cual irá instalado el software.



*Figura 10.11.- Conexión de equipos para la excitación del recinto.*

Dirac calcula el espectro en frecuencia y muchos otros parámetros tales como el tiempo de reverberación (EDT, T20, T30), la relación señal-ruido (SNR), etc. Estos parámetros acústicos se determinan mediante la Norma UNE-EN ISO 3382.

Entre las técnicas que existen para medir la respuesta al impulso, se puede utilizar una señal generada por el propio software de entre las tres disponibles, donde la excitación se reproduce mediante una fuente, que sería el radiador omnidireccional dodecaédrico, teniendo como

intermediario un amplificador. A este tipo de medición se le denomina “asíncrono”, ya que no hay un tiempo compartido entre la reproducción y la grabación.

Las respuestas al impulso que se obtienen pueden ser medidas tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, y éstos pueden ser usados para reproducirlos a través de filtros de banda o para la auralización. Además, de todos los valores calculados, se pueden obtener tablas y/o gráficos.

- **Pantalla de inicio**

Una vez instalado y ejecutado el software podemos observar la pantalla de inicio, en ella aparecerá una ventana en la cual se mostrará, posteriormente, la respuesta al impulso medida.

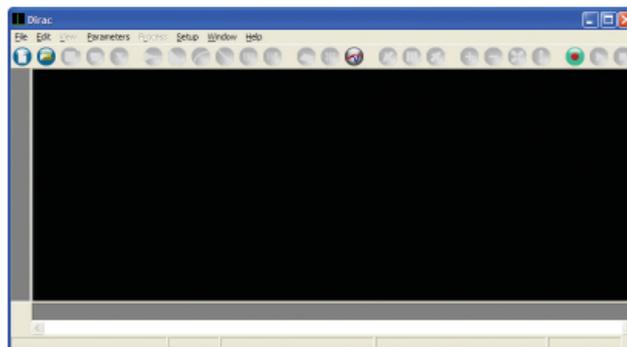


Figura 10.12.- Ventana principal del Dirac

Antes de comenzar a trabajar con Dirac se debe configurar el dispositivo de sonido que se va a utilizar. De forma predeterminada Dirac utiliza los dispositivos de Windows.

También es muy importante la calibración, la cual nos permitirá controlar correctamente los niveles de señal medidos.

- **Proceso de Calibración**

La calibración consiste en conectar la salida y entrada de línea a través de un cable mini-jack.

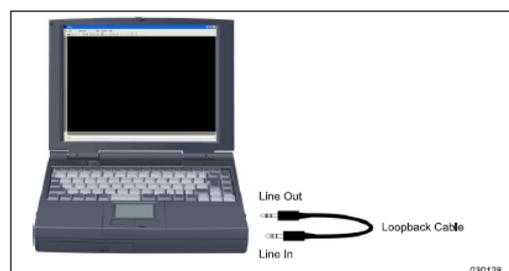


Figura 10.13.- Calibración mediante un cable mini-jack conectado en bucle.

Durante la calibración, Dirac analiza el dispositivo de sonido y encuentra los ajustes más óptimos, regulando así la ganancia y los niveles para el posterior uso en la ventana de medición. Si la calibración resulta efectiva, el dispositivo estará preparado para una correcta medición de la respuesta al impulso. A continuación se muestra el cuadro de diálogo que aparecerá si se ha procedido a una correcta calibración.

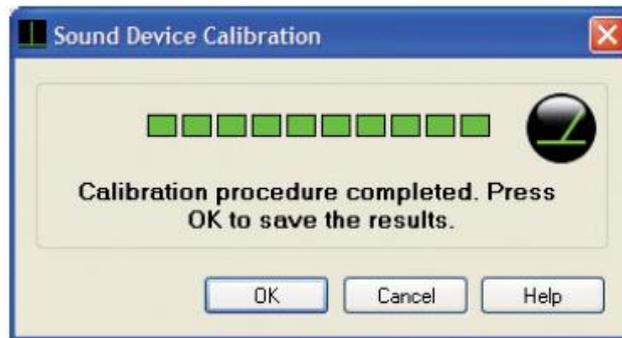


Figura 10.14.- Calibración completada correctamente.

- **Menú y representación de la respuesta al impulso**

Una vez calibrado el dispositivo, en el menú que aparece en la figura 10.15 se pueden ajustar los niveles de grabación, así como la elección de la señal que se va a usar para excitar el recinto.

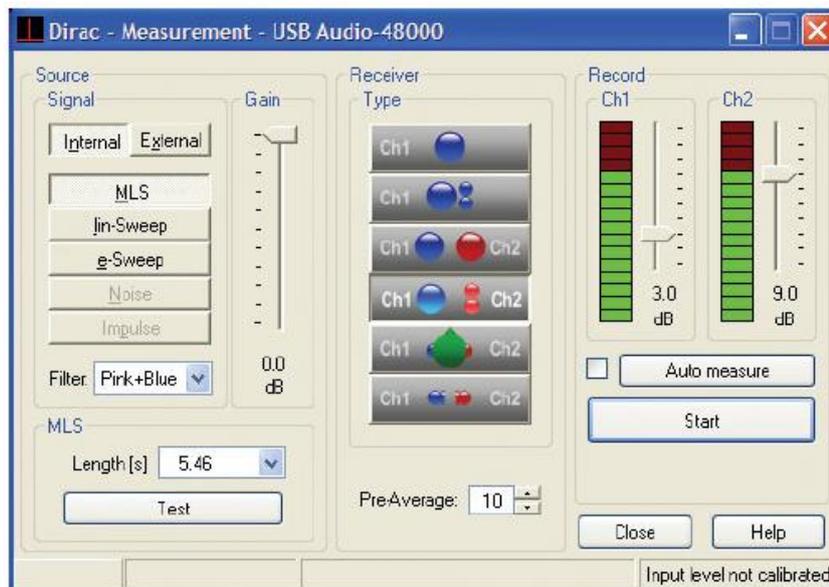


Figura 10.15.- Menú de ajustes del proceso de medida.

Una vez ajustados los niveles se podrá proceder al comienzo de la medida, esto es, a la emisión de la señal de excitación elegida.

Cuando finalice la medición, el software mostrará la respuesta al impulso resultante en la ventana que podemos apreciar en la figura 10.16, permitiendo así corregir la configuración de la medición si fuera necesario. Además, utilizando el menú “Ver” o la “barra de herramientas” se podrá observar otros puntos de vista de la señal.

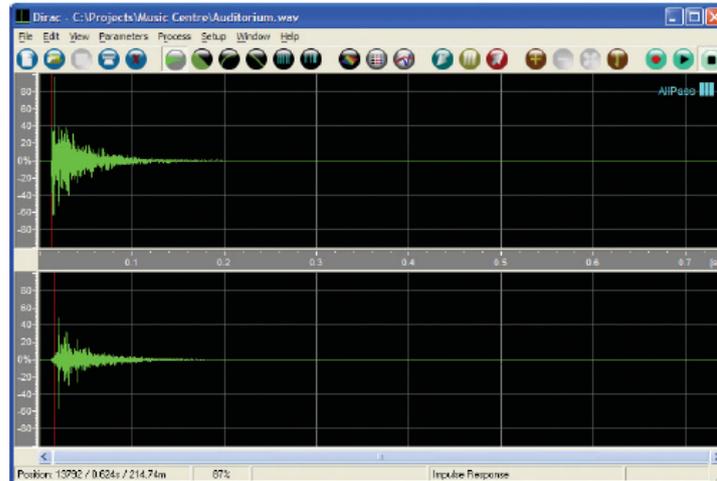


Figura 10.16.- Respuesta al impulso binaural (2 canales). Ventana con el menú y la barra de herramientas.

- **Análisis**

A partir de cada respuesta al impulso obtenida, Dirac puede calcular diversos parámetros acústicos presentándolos en forma de tablas o gráficos.

	125	250	500	1000	2000	4000	8000
EDT [s]	1.907	2.167	2.206	1.974	2.117	1.543	0.674
T20 [s]	2.075	2.291	1.856	2.008	2.002	1.801	1.376
T30 [s]	2.063	2.319	1.865	2.046	2.019	1.826	1.413
Ts [ms]	100.6	97.0	129.5	83.2	98.1	72.8	46.4
C80 [dB]	3.31	4.77	1.25	4.69	3.48	5.55	8.00
D50 [-]	0.47	0.56	0.43	0.63	0.56	0.62	0.75

Figura 10.17.- Tabla creada por Dirac con algunos parámetros calculados a partir de la respuesta al impulso.

Otras de las opciones que nos permite Dirac es la de poder escuchar la respuesta al impulso obtenida para la posible auralización.

- **Parámetros**

Las tablas permiten ver grupos de parámetros en relación a la respuesta al impulso obtenida. Se puede acceder a ellas a través del “menú de parámetros” que aparece en la ventana en la que se presenta la respuesta al impulso.

Cuando Dirac se inicia por primera vez, los parámetros que nos indicarán son: voz, reverberación, ratios, nivel, amplitud, fase, absorción y norma ISO 3382; estos parámetros pueden eliminarse en función de lo que el usuario quiera que aparezca en la tabla.

A continuación se muestra el menú de selección de aquellos parámetros que queremos que aparezcan en la tabla, además del rango de frecuencias y ancho de banda que se desea visualizar.

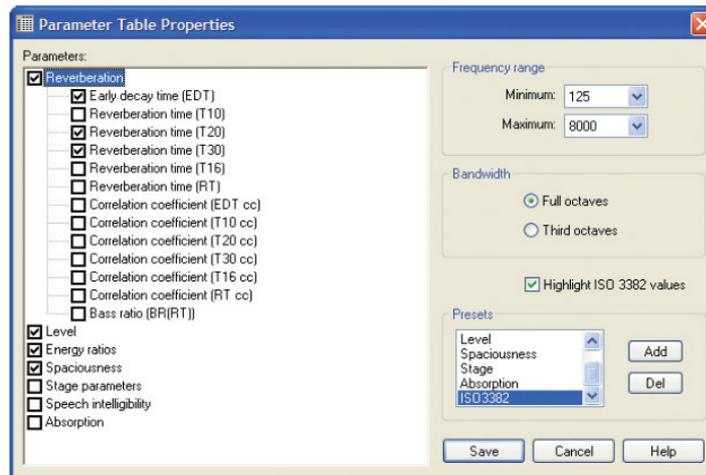


Figura 10.18.- Propiedades de la tabla de parámetros.

Puede observarse además que los parámetros están divididos en siete grupos:

- Reverberación
  - Nivel
  - Tasas de energía
  - Espaciosidad
  - Parámetros de escenario
  - Inteligibilidad
  - Absorción
- **Respuesta al impulso en archivos .wav**

Por último, otra de las muchas ventajas que tiene Dirac es que guarda directamente las respuestas al impulso medidas en el recinto a estudiar en archivos .wav, para ello basta con establecer una ruta, dónde se guardarán todos los archivos de audio.

## 10.7.- Software Matlab

### • Introducción

MATLAB es el nombre abreviado de "MATrix LABoratory". Es un sistema interactivo basado en matrices para cálculos científicos y de ingeniería, pudiendo resolver problemas numéricos relativamente complejos sin escribir un programa en realidad.

Puede trabajar también con números escalares - tanto reales como complejos -, con cadenas de caracteres y con otras estructuras de información más compleja.

Otra de las posibilidades de MATLAB es la realización de una amplia variedad de gráficos en dos y tres dimensiones.



Su lenguaje de programación es una herramienta de alto nivel para desarrollar aplicaciones técnicas. Dispone de un código propio y varias librerías especializadas (toolboxes).

- **El entorno MATLAB**

El entorno de trabajo de MATLAB ha evolucionado mucho desde sus principios, haciéndose más gráfico e intuitivo. Los componentes más importantes del entorno de trabajo de MATLAB son los siguientes:

1.- El Escritorio de Matlab (Matlab Desktop), es la ventana más general de la aplicación. El resto de las ventanas o componentes citadas pueden alojarse en este escritorio o ejecutarse como ventanas independientes. Los componentes alojados en el escritorio pueden aparecer como subventanas independientes o como pestañas dentro de una de las sub-ventanas.

2.- Los componentes individuales, orientados a tareas concretas, entre los que cabe destacar:

- Ventana de comandos (Command Window), es la ventana en la que se ejecutan interactivamente las instrucciones de MATLAB y en donde se muestran los resultados correspondientes, si es el caso.
- Ventana de historial de comandos (Command History), ofrece acceso a las sentencias que se han ejecutado anteriormente en la ventana de comandos.
- El espacio de trabajo (Workspace), es el conjunto de variables y de funciones de usuario que en un determinado momento están definidas en la memoria del programa. Para obtener información sobre el espacio de trabajo desde la línea de comandos se pueden utilizar los comandos `who` y `whos`. El segundo proporciona una información más detallada que el primero. Cada función tiene su propio espacio de trabajo, con variables cuyos nombres no interfieren con las variables de los otros espacios de trabajo.
- El directorio actual (Current Directory), los programas de MATLAB se encuentran en ficheros con la extensión `*.m`. Estos ficheros se ejecutan tecleando su nombre en la línea de comandos (sin la extensión), seguido de los argumentos entre paréntesis, si se trata de funciones. No todos los ficheros `*.m` que se encuentren en el disco duro o en otras unidades lógicas montadas en una red local son accesibles sin más. Para que un fichero `*.m` se pueda ejecutar es necesario que esté en el directorio actual (MATLAB mantiene en todo momento un único directorio con esta condición) o que esté en uno de los directorios indicados en el Path de MATLAB. El Path es una lista ordenada de directorios en los que el programa busca los ficheros o las funciones que ha de ejecutar. Muchos de los directorios del Path son propios de MATLAB, pero los usuarios también pueden añadir sus propios directorios, normalmente al principio o al final de la lista.
- La ventana de ayuda (Help).



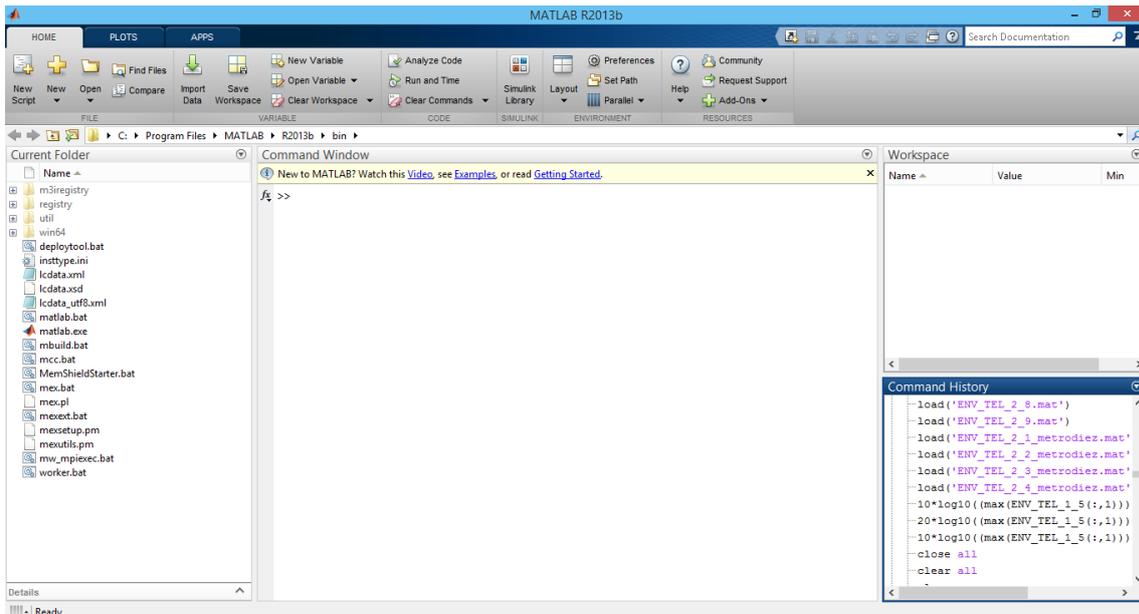


Figura 10.19.- Interfaz de Matlab (Versión R2013b).

- **Ficheros \*.m**

Los ficheros con extensión (.m) son ficheros de texto sin formato (ficheros ASCII) que constituyen el centro de la programación en MATLAB.

Existen dos tipos de ficheros \*.m, los ficheros de comandos (llamados scripts en inglés) y las funciones. Los primeros contienen simplemente un conjunto de comandos que se ejecutan sucesivamente cuando se teclea el nombre del fichero en la línea de comandos de MATLAB o se incluye dicho nombre en otro fichero \*.m. Un fichero de comandos puede llamar a otros ficheros de comandos. Si un fichero de comandos se llama desde de la línea de comandos de MATLAB, las variables que crea pertenecen al espacio de trabajo base de MATLAB, y permanecen en él cuando se termina la ejecución de dicho fichero.

Las funciones permiten definir funciones enteramente análogas a las de MATLAB, con su nombre, sus argumentos y sus valores de retorno. Los ficheros \*.m que definen funciones permiten extender las posibilidades de MATLAB.

- **Utilización de MATLAB en el Proyecto**

El software matemático MATLAB se ha utilizado para la elaboración de todos los algoritmos necesarios para la creación de las interfaces, tanto la de usuario como la de estudio.

\*[Todos los programas elaborados bajo entorno MATLAB se encuentran en el subdirectorio “Programación en Matlab” del DVD adjuntado a la memoria].

# CAPÍTULO 11:

## PRESUPUESTO

### 11.1.- Introducción

El presupuesto que se presenta en este capítulo abarca todo el periodo de realización del trabajo técnico desde el establecimiento de las condiciones del trabajo a realizar, con la elección de medidas, estudio, cálculos, simulaciones, etc., hasta los gastos derivados de la redacción de la memoria. El presupuesto se divide en los siguientes apartados:

- Tiempo empleado en la realización del proyecto técnico.
- Amortización del material instrumental e informático.
- Seguros.
- Presupuesto final.

### 11.2.- Tiempo empleado en la realización del trabajo

El tiempo empleado en la realización del proyecto se subdivide en varias fases diferenciadas.

- **Fase I. Obtención práctica de la respuesta al impulso binaural.**

Se incluye en esta fase la metodología a seguir en cuanto a la posición de la fuente sonora, la medición de la distancia entre los puntos medidos en el recinto, además del montaje realizado para ello, con la utilización del software correspondiente y la posterior recogida de datos.

- **Fase II. Estudio, análisis y valoración de los datos.**

Una vez se dispuso de la totalidad de las medidas, se corroboraron los resultados obtenidos para la posterior auralización.

- **Fase III. Procesado de los datos.**

En esta fase se modificaron las respuestas al impulso binaurales obtenidas mediante Matlab, con el propósito de eliminar los datos residuales o redundantes de las respuestas y conseguir simplificar la información obtenida para hacer más eficiente la posterior auralización.

- **Fase IV. Interfaz virtual.**



Se desarrolló un simulador programado en Matlab, mediante el que de forma virtual se colocó un oyente y una fuente para así experimentar como sería la percepción en prácticamente cualquier localización del recinto.

En la siguiente tabla adjunta se recoge una estimación del total de horas dedicadas a cada una de las fases anteriormente descritas.

FASE	TIEMPO EMPLEADO (HORAS)
I. Obtención práctica de la respuesta al impulso binaural	15
II. Estudio, análisis y valoración de los datos	20
III. Procesado de los datos	72
IV. Interfaz virtual	56
<b>TOTAL</b>	<b>163</b>

Tabla 11.1.- Horas empleadas en cada fase.

Las horas empleadas en cada fase constituyen las horas que el ingeniero ha dedicado en la realización de cada una. Para calcular el salario del ingeniero hemos consultado una baremación publicada por el Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos de Telecomunicación (COITT). Para su cálculo se aplica la siguiente fórmula:

$$H = Hn * 65 + He * 78 \quad (\text{Ec } 10.1)$$

Siendo H = Honorarios, Hn = Horas en jornada normal (de lunes a viernes) y He = Horas fuera de la jornada normal. Además estos honorarios tendrán una reducción en función del número de horas aplicando los siguientes coeficientes:

COSTE	FACTOR CORRECTOR (C)
Hasta 36	1
Exceso de 36 hasta 72	0.9
Exceso de 72 hasta 108	0.8
Exceso de 108 hasta 144	0.7
Exceso de 144 hasta 180	0.65
Exceso de 180 hasta 360	0.6



COSTE	FACTOR CORRECTOR (C)
Exceso de 360 hasta 510	0.55
Exceso de 510 hasta 720	0.5
Exceso de 720 hasta 1080	0.45
Exceso de 1080	0.4

Tabla 11.2.- Coeficientes reductores.

El número de horas de trabajo realizadas para desarrollar todo el proyecto asciende a 163 horas normales de trabajo.

En función de las horas totales se deberán aplicar los diferentes coeficientes reductores vistos en la tabla 11.2. De manera que el tiempo empleado una vez aplicado los coeficientes se reduce a:

Total del tiempo aplicando coeficientes reductores:  $36*1 + 36*0,9 + 36*0,8 + 36*0,7 + 19*0,65 = 134,75$  horas.

Estas horas supondrían un coste total de:  $134,75 * 65 = 8.758,75$  €.

Esas horas implicarían una tarifa por tiempo de ejecución de **OCHO MIL SETECIENTOS CINCUENTA Y OCHO EUROS CON SETENTA Y CINCO CÉNTIMOS (8.758,75 €)**.

### 11.3.- Amortización del material instrumental e informático

Los sistemas empleados para poder realizar las distintas fases del proyecto tienen distintas naturalezas, razón por la que los hemos agrupado en: material instrumental y material informático. Cada uno de los elementos tiene un coste y un periodo de vida útil, generalmente muy superior al tiempo empleado en una tarea concreta. El cálculo del coste imputado a este proyecto técnico se hará mediante la siguiente ecuación:

$$Cuota\ anual = \frac{valor\ de\ adquisición - valor\ residual}{número\ de\ años\ de\ vida\ útil} \quad (Ec\ 10.2)$$

El valor de adquisición es el valor invertido en la adquisición del instrumento o herramienta considerada. La vida útil es el número de años durante el que se estima que el instrumento o herramienta conserva un provecho pleno y competitivo. El valor residual es el valor que se estima que tendrá el instrumento o herramienta al final de su vida, el valor típico fijado es de un 5% de su valor de adquisición.

Una vez obtenida la cuota anual, se dividirá entre el número de días totales en un año para obtener la cantidad equivalente por día. Por último, esa cantidad se multiplicará por el número de días que se ha utilizado el equipo.

EQUIPO	CAD (€)	VR (€)	VU (años)	CA (€)	TU (días)	AM (€)
Sonómetro RION NL-18	4.230,00	211,5	5	803,7	5	11,06
Calibrador B&K 4231	1.300,00	65,00	5	247,00	8	5,41
Amplificador AP600 y Altavoz BP012	4.377,00	218,85	5	831,63	13	29,62
Sistema Inalámbrico SHURE EP2TRE215	575,00	28,75	5	109,25	5	0,15
2 x Micrófono Behringer ECM8000	100,00	5,00	5	19,00	3	0,16
Interfaz AKAI EIE pro	195,00	9,75	5	37,05	3	0,30
<b>TOTAL</b>						46,70

Tabla 11.3.- Presupuesto del material instrumental.

PROGRAMA	CAD (€)	VR (€)	VU (años)	CA (€)	TU (días)	AM (€)
Microsoft Windows 7	100,00	5,00	5	19,00	15	0,78
Microsoft Windows 8.1	159,00	7,95	5	30,21	15	1,24
Microsoft Office 2013	539,00	26,95	5	102,41	5	1,40
Matlab R2013b	2.000,00	100,00	5	380,00	15	15,62
Dirac 4.0	3.500,00	175,00	5	665,00	15	27,33
PC portátil medidas	275,00	13,75	5	52,25	15	2,15
PC portátil	420,00	21,00	5	79,80	20	4,37
<b>TOTAL</b>						52,89

Tabla 11.4.- Presupuesto del material informático.

Siendo:

- CAD: Cuota de adquisición.
- VR: Valor residual.
- VU: Años de vida útil.
- CA: Cuota anual.
- TU: Tiempo de uso, medido en meses.
- AM: Amortización.



Los programas informáticos usados en la realización de este proyecto técnico tienen dos finalidades principales: proceso de los datos y tratamiento de textos. Para la primera se ha utilizado la herramienta Matlab R2013b y para el tratamiento de texto el Microsoft Word 2013, que forma parte del paquete informático denominado Microsoft Office.

La amortización total asciende a **NOVENTA Y NUEVE EUROS CON CINCUENTA Y NUEVE CÉNTIMOS (99,59 €)**.

### 11.4.- Seguros

En este apartado se incluye la parte correspondiente a este trabajo de la cotización a la Seguridad Social como trabajador autónomo.

La base de cotización aplicada es de 875,70 € y la cuota mensual corresponde al 29,8% de dicha base, por lo que la cantidad a pagar al mes es de 260,96 €.

La realización del Trabajo ha llevado un total de 30 días, por lo que el importe correspondiente asciende a exactamente una mensualidad, es decir, **DOSCIENTOS SESENTA EUROS CON NOVENTA Y SEIS CÉNTIMOS (260,96 €)**.

### 11.5.- Presupuesto final

Para el cálculo del presupuesto final, en primer lugar obtendremos “el presupuesto antes de impuestos” como resultado de la sumatoria de la totalidad de los apartados anteriores.

CONCEPTO	SUBTOTAL (€)
Trabajo tarifado por tiempo	8.758,75
Amortización de equipos y software	99,59
Seguro	260,96
<b>TOTAL</b>	<b>9.119,30</b>

*Tabla 11.5.- Presupuesto total antes de impuestos.*

Al “presupuesto antes de impuestos” se le debe aplicar un cargo por impuestos en la Comunidad Autónoma de Canarias, esto es, el I.G.I.C (Impuesto General Indirecto de Canarias) que asciende a un 5%. Con esto el presupuesto final queda de la siguiente forma:

CONCEPTO	SUBTOTAL (€)
Presupuesto antes de impuestos	9.119,30
IGIC 7 %	638,51

<b>TOTAL</b>	9.757,81
--------------	----------

*Tabla 11.6.- Presupuesto final.*

El presupuesto total asciende a **NUEVE MIL SETECIENTOS CINCUENTA Y SIETE EUROS CON OCHENTA Y UN CÉNTIMOS (9.757,81 €)**.











## Índice de figuras

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
Figura 2.1.- Reflectograma con la distinción de sus tres zonas características	22
Figura 2.2.- Ejemplo de llegada del sonido directo y de las primeras reflexiones a un receptor	23
Figura 2.3.- Ley de la reflexión especular	23
Figura 2.4.- Superposición de sonidos con diferentes retardos e impresión subjetiva asociada	24
Figura 2.5.- Relación entre sonido retardado e inteligibilidad de la palabra (zonas características)	25
Figura 2.6.- Izquierda, eco flotante surgido al colocar la fuente sonora entre dos paredes paralelas, lisas y muy reflectantes. Derecha, curva energía-tiempo (ETC) ilustrativa de la existencia de eco flotante	26
Figura 2.7.- Distribución de niveles SPL normalizados asociados a un modo propio de una sala	26
Figura 2.8.- Evolución teórica de la presión sonora en un punto de un recinto al conectar y, posteriormente, desconectar una fuente sonora: a) escala lineal; b) escala semilogarítmica	28
Figura 2.9.- Evolución del nivel relativo total de presión sonora en función de la distancia a la fuente sonora normalizada con respecto a la distancia crítica	30
Figura 2.10.- Gráficas de niveles relativos totales de presión sonora correspondientes a una sala "viva", a una sala intermedia y a una sala "apagada"	30
Figura 2.11.- Curva ETC y curva utilizada para el cálculo del TR, obtenida como resultado de la integración de la ETC	34
Figura 3.1.- Esquema de los modelos posibles de auralización	35
Figura 3.2.- Proceso de auralización	37
Figura 3.3.- Convolución mediante el método de solape-suma	39
Figura 3.4.- Pantalla del EASE, con vista del modelo 3D de un recinto	40
Figura 3.5.- Pantalla del DIRAC mostrando una respuesta binaural al impulso	41
Figura 3.6.- Método de auralización empleado en el TFG.	42
Figura 4.1.- Comparación entre ruido rosa y ruido blanco (escala en dB)	44
Figura 4.2.- a) Representación temporal de una señal MLS con $N = 3$ . b) Representación temporal de la autocorrelación de una señal MLS. Su valor máximo es igual a $L$	46
FIGURA 4.3.- ARRIBA, SEÑAL MLS. CENTRO, BARRIDO LINEAL. ABAJO, BARRIDO EXPONENCIAL	49
Figura 4.4.- Arriba, espectro del barrido exponencial (Pueden observarse las resonancias que se producen a partir de los 3 kHz). Abajo, espectro del barrido lineal con filtro rosa	50
Figura 4.5.- Barrido lineal filtrado por la entrada de audio del portátil utilizado para las medidas	50
Figura 5.1.- Esquema de conexionado del sistema de medidas de campo	52
Figura 5.2.- Esquema de conexionado del sistema de medidas para simulación binaural	53
Figura 6.1.- Forma de calcular el EDT	56
Figura 6.2.- Izquierda, forma de calcular el T20. Derecha, forma de calcular el T30	57
Figura 6.3.- SNR	57
Figura 6.4.- INR	58

Figura 6.5.- Esquema de las hojas de cálculo correspondientes a cada posición de micrófono	58
Figura 6.6.- Esquema de las hojas de cálculo con los parámetros globales del recinto por cada señal de excitación usada	59
Figura 6.7.- Esquema del Salón de Actos de la EITE	61
Figura 6.7.1.- Vista del Salón de Actos de la EITE desde butacas traseras	62
Figura 6.7.2.- Vista del Salón de Actos de la EITE desde el escenario	62
Figura 6.8.- Esquema del Salón de Actos de la EIIC	66
Figura 6.8.1.- Vista del Salón de Actos de la EIIC desde las butacas traseras	67
Figura 6.8.2.- Izquierda, vista del Salón de Actos de la EIIC desde el escenario. Derecha, vista lateral	67
Figura 6.9.- Esquema del Salón de Actos de la EA	71
Figura 6.9.1.- Vista del Salón de Actos de la EA desde las butacas traseras	72
Figura 6.9.2.- Vista lateral del Salón de Actos de la EA con detalle de la pared trasera	72
Figura 6.10.- Esquema de la Sala de Conferencias del ISTIC	76
Figura 6.10.1.- Vista de la Sala de Conferencias del ISTIC desde la parte trasera	77
Figura 6.10.2.- Vista de la Sala de Conferencias del ISTIC desde el escenario	77
Figura 6.11.- Esquema del Aula Magna del ISTIC	81
Figura 6.11.1.- Vista del Aula Magna del ISTIC desde el altar	82
Figura 6.11.2.- Vista del Aula Magna del ISTIC desde la parte trasera	82
Figura 6.11.3.- Izquierda, vista lateral del Aula Magna del ISTIC. Derecha, vista del techo	83
Figura 6.12.- Respuesta binaural al impulso del salón de actos de la EITE (TEL_2_3.wav).	87
Figura 6.13.- Respuesta binaural al impulso del salón de actos de la EA (ARQ_2_5.wav)	88
Figura 6.14.- Respuesta binaural al impulso del Aula Magna del ISTIC (AMT_2_3.wav)	88
Figura 7.1.- Esquema de procesado de las BRIR	89
Figura 7.2.- Respuesta binaural al impulso correspondiente al archivo TEL_1_3.wav	91
Figura 7.3.- Vista general del programa marcar2RT1.m con la señal TEL_1_3.wav visualizada (Canal 1)	91
Figura 7.4.- Elección del punto de inicio para buscar las primeras reflexiones	92
Figura 7.5.- Ampliación de la BRIR (Tel_1_3.wav, canal 1) con las marcas verdes indicadoras de las primeras reflexiones	93
Figura 7.6.- Sonido Directo extraído de TEL_1_3.wav	94
Figura 7.7.- Primeras Reflexiones extraídas de TEL_1_3.wav	95
Figura 7.8.- Cola reverberante extraída de TEL_1_5.wav	96
Figura 7.9.- Coherencia espectral entre el filtro medido y sintetizado de TEL_1_3.wav	97
Figura 7.10.- Punto elegido por un usuario (marcado con una cruz roja) y las distancias de éste respecto a las posiciones de micrófono	101
Figura 7.11.- Punto elegido por un usuario (marcado con una cruz roja) y las distancias de éste respecto a las posiciones de micrófono	102
Figura 7.12.- Pantalla de bienvenida de "Auryn"	103
Figura 7.13.- Pantalla de selección del recinto de "Auryn"	104



Figura 7.14.- Pantalla de auralización de "Auryn"	105
Figura 7.15.- Detalle del modelo 3D del recinto con las marcas indicadoras de las posiciones de fuente (cruz) y de micrófono (círculo)	106
Figura 7.16.- Pantalla de ayuda de "Auryn"	107
Figura 10.1- Estructura general de un sonómetro	116
Figura 10.2.- Behringer ECM8000	117
Figura 10.3.- Izquierda, diagrama de directividad del ECM8000. Derecha, su respuesta en frecuencia en el eje	117
Figura 10.4.- Calibrador Brüel & Kjaer 4231	118
Figura 10.5.- SHURE EP2TRE215	118
Figura 10.6.- AKAI EIE pro	119
Figura 10.7.- Amplificador CESVA AP600	119
Figura 10.8.- Altavoz omnidireccional BP012	120
Figura 10.9.- Distribución frecuencial del BP012	120
Figura 10.9.- ASUS Eee PC 1015PD	121
Figura 10.10.- HP Pavilion g6-2356ss	121
Figura 10.11.- Conexión de equipos para la excitación del recinto	122
Figura 10.12.- Ventana principal del Dirac	123
Figura 10.13.- Calibración mediante un cable mini-jack conectado en bucle	123
Figura 10.14.- Calibración completada correctamente	124
Figura 10.15.- Menú de ajustes del proceso de medida	124
Figura 10.16.- Respuesta al impulso binaural (2 canales). Ventana con el menú y la barra de herramientas	125
Figura 10.17.- Tabla creada por Dirac con algunos parámetros calculados a partir de la respuesta al impulso	124
Figura 10.18.- Propiedades de la tabla de parámetros	126
Figura 10.19.- Interfaz de Matlab (Versión R2013b)	128

## Índice de tablas

<b><u>Tablas</u></b>	<b><u>Páginas</u></b>
Tabla 2.1.- Márgenes de valores recomendados de $TR_{mid}$ en función del tipo de sala (recintos ocupados)	31
Tabla 6.1.- Parámetros acústicos globales del salón de actos de la EITE	65
Tabla 6.2.- Parámetros acústicos globales del salón de actos de la EIIC	70
Tabla 6.3.- Parámetros acústicos globales del salón de actos de la EA	75
Tabla 6.4.- Parámetros acústicos globales de la sala de conferencias del ISTIC	80
Tabla 6.5.- Parámetros acústicos globales del Aula Magna del ISTIC	86
Tabla 6.6.- Parámetros acústicos globales de los recintos bajo estudio	86
Tabla 7.1.- Tiempos de mezcla de los recintos elegidos para simular	92
Tabla 11.1.- Horas empleadas en cada fase	130
Tabla 11.2.- Coeficientes reductores	131
Tabla 11.3.- Presupuesto del material instrumental	132
Tabla 11.4.- Presupuesto del material informático	132
Tabla 11.5.- Presupuesto total antes de impuestos	133
Tabla 11.6.- Presupuesto final	134



## Índice de gráficas

<b>Gráficas</b>	<b>Páginas</b>
Gráfica 6.1.- Valores del EDT del salón de actos de la EITE	63
Gráfica 6.2.- Valores del T20 del salón de actos de la EITE	63
Gráfica 6.3.- Valores del T30 del salón de actos de la EITE	63
Gráfica 6.4.- Valores del RT del salón de actos de la EITE	64
Gráfica 6.5.- Valores de la INR del salón de actos de la EITE	64
Gráfica 6.6.- Valores de la SNR del salón de actos de la EITE	64
Gráfica 6.7.- Valores del coeficiente medio de absorción y del RT por frecuencia del salón de actos de la EITE	65
Gráfica 6.8.- Valores del EDT del salón de actos de la EIIC	68
Gráfica 6.9.- Valores del T20 del salón de actos de la EIIC	68
Gráfica 6.10.- Valores del T30 del salón de actos de la EIIC	68
Gráfica 6.11.- Valores del RT del salón de actos de la EIIC	69
Gráfica 6.12.- Valores de la INR del salón de actos de la EIIC	69
Gráfica 6.13.- Valores de la SNR del salón de actos de la EIIC	69
Gráfica 6.14.- Valores del coeficiente medio de absorción y del RT por frecuencia del salón de actos de la EIIC	70
Gráfica 6.15.- Valores del EDT del salón de actos de la EA	73
Gráfica 6.16.- Valores del T20 del salón de actos de la EA	73
Gráfica 6.17.- Valores del T30 del salón de actos de la EA	73
Gráfica 6.18.- Valores del RT del salón de actos de la EA	74
Gráfica 6.19.- Valores de la INR del salón de actos de la EA	74
Gráfica 6.20.- Valores de la SNR del salón de actos de la EA	74
Gráfica 6.21.- Valores del coeficiente medio de absorción y del RT por frecuencia del salón de actos de la EA	75
Gráfica 6.22.- Valores del EDT de la sala de conferencias del ISTIC	78
Gráfica 6.23.- Valores del T20 de la sala de conferencias del ISTIC	78
Gráfica 6.24.- Valores del T30 de la sala de conferencias del ISTIC	78
Gráfica 6.25.- Valores del RT de la sala de conferencias del ISTIC	79
Gráfica 6.26.- Valores de la INR de la sala de conferencias del ISTIC	79
Gráfica 6.27.- Valores de la INR de la sala de conferencias del ISTIC	79
Gráfica 6.28.- Valores del coeficiente medio de absorción y del RT por frecuencia de la sala de conferencias del ISTIC	80
Gráfica 6.29.- Valores del EDT del Aula Magna del ISTIC	83
Gráfica 6.30.- Valores del T20 del Aula Magna del ISTIC	84
Gráfica 6.31.- Valores del T30 del Aula Magna del ISTIC	84
Gráfica 6.32.- Valores del RT del Aula Magna del ISTIC	84
Gráfica 6.33.- Valores de la INR del Aula Magna del ISTIC	85
Gráfica 6.34.- Valores de la SNT del Aula Magna del ISTIC	85
Gráfica 6.35.- Valores del coeficiente medio de absorción y del RT por frecuencia del Aula Magna del ISTIC	85



