

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE GANDÍA

Máster en Ingeniería Acústica

---



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA POLITÉCNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

**ESTUDIO DE LA COLOCACIÓN DE  
UN DIFUSOR SIMÉTRICO EN EL  
AUDITORIO “TONHALLE  
ST.GALLEN”**

*TRABAJO DE FIN DE MÁSTER*

Autor:

**Alejandro de Frutos Capellán**

Director/es:

**D. Francisco Javier Redondo**

**Pastor**

**D. Juan Vicente Sánchez Pérez**

**GANDIA, 2012**



# Estudio de la colocación de un difusor simétrico en el auditorio “Tonhalle St. Gallen”

*Autor:* Alejandro de Frutos Capellán

*Director 1:* D. Francisco Javier Redondo Pastor

*Director 2:* D. Juan Vicente Sánchez Pérez

## *Resumen*

Desde que el año 1909, cuando fue construida, hasta el año 2009, la sala de conciertos de la ciudad de St. Gallen fue criticada por músicos y directores de orquesta por las focalizaciones y por los ecos del escenario. Por motivo de celebración del centenario de su construcción, la ciudad decidió reformar la sala. La instalación de un nuevo tipo de difusor fue el principal cambio. Tras la colocación del difusor, además de la mejora en la características del escenario, hubo una mejora en las características acústicas de toda la sala. Esta mejora entraba en conflicto con las teorías acústicas conocidas en la actualidad. Este trabajo trata de explicar el funcionamiento del difusor y analizar con más profundidad su influencia sobre las propiedades de la sala.

## *Abstract*

The St. Gallen concert hall was inaugurated in 1909. There has always been many issues relating to the stage, such as focusing and flutter echoes. In 2009, a refurbishment of the hall was carried out. The most significant change was the addition of a labyrinth diffuser. Acoustics measurements were made before and after the labyrinth diffuser was installed and showed that the diffuser improved the acoustics at the performance hall. The results were unexpected and happened to be an important contradiction to the classical acoustic knowledge. This work tries to explain how the diffuser works and how it can improve the acoustical characteristics of the hall.



**ÍNDICE**

<b>I. OBJETIVO Y ANTECEDENTES.....</b>	<b>6</b>
<i>I.1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO.....</i>	<i>6</i>
<i>I.2. ESTRUCTURA DE LA TESINA.....</i>	<i>6</i>
<b>II. INTRODUCCIÓN TEÓRICA.....</b>	<b>7</b>
<i>II.1. ACÚSTICA DE SALAS.....</i>	<i>7</i>
<i>II.2. CAMPO LIBRE Y CAMPO CONFINADO.....</i>	<i>9</i>
1) INTRODUCCIÓN.....	9
2) DIFRACCIÓN Y DIFUSIÓN SONORA.....	9
3) REVERBERACIÓN.....	10
<i>II.3. LA DIFUSIÓN ACÚSTICA.....</i>	<i>11</i>
1) INTRODUCCIÓN.....	11
2) DIFUSORES DE SONIDO.....	11
<b>III. DESARROLLO.....</b>	<b>13</b>
<i>III.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....</i>	<i>13</i>
1) DESCRIPCIÓN DE LA SALA.....	14
2) MEDIDAS EN LA SALA.....	15
3) RESULTADO Y ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES.....	16
<i>III.2. CARACTERIZACIÓN DEL DIFUSOR.....</i>	<i>18</i>
1) FABRICACIÓN DE LA MUESTRA.....	18
2) MATERIALES.....	18
3) MONTAJE.....	20
4) TÉCNICA DE MEDIDA.....	22
5) PROCESADO DE LAS MEDIDAS.....	22
6) RESULTADOS OBTENIDOS.....	23
<i>III.3. ESTUDIO DE LA COLOCACIÓN DEL DIFUSOR.....</i>	<i>24</i>
1) CATT-ACOUSTIC.....	24
2) CREACIÓN DEL MODELO INFORMÁTICO.....	24
3) VALIDACIÓN DEL MODELO.....	27
4) ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL DIFUSOR.....	31
<i>III.4. OTRAS CONFIGURACIONES.....</i>	<i>37</i>
<b>IV. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....</b>	<b>43</b>
<b>V. ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>44</b>
<b>VI. ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>45</b>
<b>VII. Bibliografía.....</b>	<b>46</b>

## I. OBJETIVO Y ANTECEDENTES

### I.1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

El sonido percibido en la mayoría de entornos es la combinación del sonido directo proveniente de una fuente, y de las reflexiones indirectas de éste en superficies y objetos. Por ejemplo, en una sala, el sonido directo y las reflexiones provocadas por la pared, el suelo y el techo son las que determinan la calidad de su acústica. La forma de estas superficies influye en el tipo de reflexión, una superficie plana redirige el sonido mientras que una superficie difusora lo dispersa. Las superficies que provocan dicha difusión se denominan *difusores acústicos* o *difusores de sonido*.

Los difusores de sonido pueden mejorar el rendimiento acústico de las salas de diferentes maneras, por ejemplo, aumentando la difusión del campo sonoro, la impresión subjetiva de la 'espacialidad', y la eliminación de ecos y focalizaciones.

Este trabajo trata del análisis de la influencia de la colocación de un difusor simétrico en las características acústicas del auditorio St. Gallen ubicado en Suiza. El difusor instalado en dicha sala tiene un diseño novedoso jamás usado en ninguna sala y ha provocado resultados que contradicen las teorías clásicas acústicas. Para ello se ha realizado una caracterización de un modelo a escala del difusor. Posteriormente se ha creado un modelo informático de la sala y se han realizado simulaciones acústicas mediante el programa Catt-Acoustic, con y sin el difusor, para poder estudiar en profundidad la influencia del mismo. Por último se han realizado simulaciones con diferentes variantes del difusor.

### I.2. ESTRUCTURA DE LA TESIS

El trabajo de fin de master se ha estructurado de la siguiente forma :

En el capítulo segundo se ha realizado una introducción teórica en la que se han descrito el campo de la acústica de salas. Además se han descrito fenómenos físicos acústicos relacionados con este trabajo, para la mejor comprensión de la misma.

En el capítulo tercero se ha descrito las diferentes fases de este trabajo fin de master

En el capítulo cuarto se han reflejado las conclusiones.

## II. INTRODUCCIÓN TEÓRICA

### II.1. ACÚSTICA DE SALAS

Dentro de lo que se denomina acústica arquitectónica encontramos que esta disciplina abarca tres grandes temas:

- Aislamiento acústico: Es el estudio de la protección contra los ruidos y vibraciones en las zonas habitables.
- Acondicionamiento acústico: son las intervenciones que se realizan para adecuar un local a su uso.
- Acústica urbanística: Estudia las intervenciones dirigidas a asegurar la protección frente a ruidos exteriores de las zonas urbanas, según uso.

La acústica de Salas, entorno en el que se halla este trabajo, estudia las exigencias particulares de cada tipo de recinto desde el punto de vista desde el acondicionamiento acústico. Dichas exigencias son muy variadas, y sólo pueden ser formuladas como el resultado de un estudio detallado del proceso sonoro en un recinto dado, los factores que en él influyen y las condiciones que aseguran una recepción del sonido óptima.

El objeto de esta disciplina es proporcionar la máxima calidad acústica al mensaje que emitimos en una sala, ya sea oral o musical. Tradicionalmente, en la acústica de salas, atendiendo al uso de recintos se distinguen tres grupos: salas de audición verbal, salas de audición musical y salas de grabación.

Existen tres teorías que estudian los factores que influyen en la recepción del mensaje emitido:

- Acústica Geométrica: Representa la dirección de avance de las ondas por las curvas que en todo momento son normales a los frentes de onda. Trata de evaluar la distribución del campo acústico mediante trazado de rayos. Se utiliza para el estudio de la distribución de la energía acústica de las primeras reflexiones y del sonido directo, así como para evitar el riesgo de eco de una sala.
- Acústica Estadística: A medida que se propaga el sonido en una sala se producen sucesivas reflexiones y los ángulos que abarca cada rayo son cada vez mayores. Llega un momento en el que estos ángulos abarcan la sala en su totalidad. A partir de este momento es cuando es adecuado un estudio estadístico. Se utiliza para abordar el estudio de la reverberación.

- Acústica Ondulatoria: Las teorías anteriores no tienen en cuenta en comportamiento físico real de tipo ondulatorio del sonido. Esta disciplina se basa en la resolución de la ecuación diferencial de la onda acústica en cada sala, introduciendo sus condiciones específicas de contorno.

La acústica de salas estudia el modo en que el recinto modifica las características del sonido y como dichas modificaciones pueden ser controladas y modificadas con diferentes propósitos. El fenómeno que diferencia la audición en un recinto cerrado de la un ambiente libre de reflexiones es la reverberación, o persistencia del sonido en la sala después de cesar el aporte energético de la fuente sonora. Reverberación y difusión están íntimamente ligadas entre si. El sonido reverberado proveniente de las sucesivas reflexiones sobre las superficies del recinto en cuestión. Cuanto mayor sea la reverberación en un local, mayor será el número de reflexiones antes de que el frente de ondas pierda toda su energía, y por tanto, mayor será el número de direcciones de incidencia, por lo que aumentará su difusión. Por lo tanto, en principio, si la reverberación es elevada, la difusión podrá ser elevada. Si vemos la Fig.1 observamos que la reverberación será mayor cuanto mayor sea el tiempo de reverberación, lo que va ligado a un aumento de la difusión. Sin embargo, las asimetría en las características absorbentes de los cerramientos pueden evitar parcialmente este aumento de la difusión, estableciéndose direcciones preferentes de propagación.

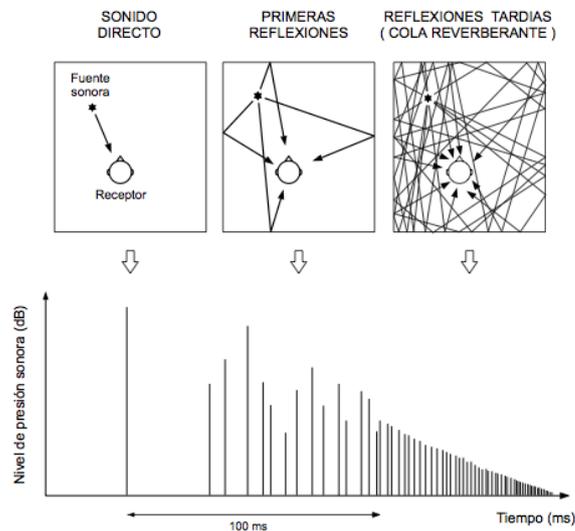


Fig.1. Ecograma asociado a un receptor con indicación del sonido directo, las primeras reflexiones y la cola reverberante

Aún cuando las asimetrías absorbentes del recinto pueden disminuir el grado de difusión, otro fenómeno físico, la reflexión difusa, puede contrarrestar este efecto. Más adelante se profundizará en estos aspectos.

## II.2. CAMPO LIBRE Y CAMPO CONFINADO

### 1) INTRODUCCIÓN

En los procesos de emisión, recepción y propagación del sonido, el tipo de campo acústico en el que ocurren tiene una gran influencia. En acústica se definen dos tipos de campos. Estos son: Campo acústico libre y Campo acústico confinado.

Si el sonido radiado por la fuente omnidireccional, fuente que radia en todas direcciones, no es obstaculizado por ningún objeto, la intensidad acústica varía de acuerdo con el inverso del cuadrado de la distancia ( ec. 1 ). En este caso, se habla de propagación en campo libre, como ocurre en un gran espacio abierto. En los laboratorios de Acústica, estas condiciones de campo libre se consiguen en el interior de una cámara anecoica.

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (1)$$

Por el contrario , en campo acústico confinado, el sonido encuentra obstáculos en su propagación. Estos obstáculos provocan los fenómenos de difracción y reflexión.

### 2) DIFRACCIÓN Y DIFUSIÓN SONORA

El fenómeno de difracción se presenta cuando se interpone en la trayectoria de la onda acústica un obstáculo de dimensiones reducidas en relación con su longitud de onda. En estos casos la onda se comporta como se indica en la Fig. 2 donde la onda tiende a propagarse en todas las direcciones del espacio al alcanzar el extremo de la abertura.

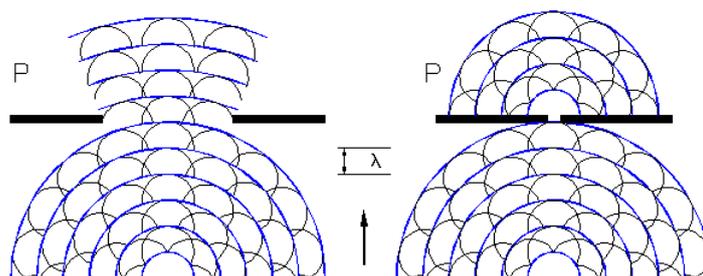


Fig.2. : Fenómeno de difracción sonora

En caso contrario, cuando las dimensiones del obstáculo son mayores, se reproduce el fenómeno de reflexión , Fig. 3.

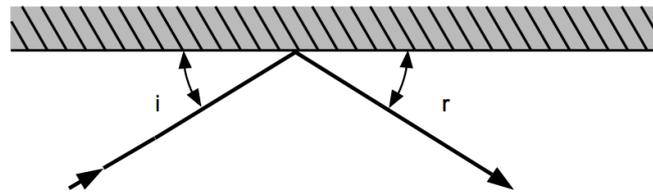


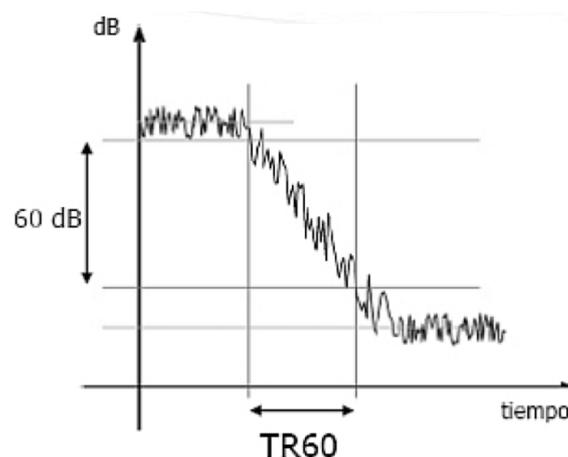
Fig.3. Fenómeno de reflexión sonora

### 3) REVERBERACIÓN

Se define como la persistencia del sonido tras la extinción de la fuente sonora en un espacio cerrado.

La reverberación depende de mayoritariamente del volumen de la sala y del material de las paredes. En grandes espacios con paredes poco absorbentes, como las catedrales, la emisión de un sonido provoca un gran número de ecos, lo que aumenta la reverberación. En espacios pequeños y absorbentes el sonido decae rápidamente, por lo que la reverberación es menor.

La forma para cuantificar la reverberación es el tiempo de reverberación. Éste se define como el tiempo que transcurre desde el instante en que una fuente sonora se interrumpe hasta que su energía decae a  $1/1.000.000$  de su energía original. Esta caída de energía es cuantificada como nivel de presión sonora, que en escala logarítmica corresponde a 60 decibelios, por eso se abrevia como TR-60. Véase la Fig. 4.

Fig.4. Representación del  $T_{60}$ 

En cuanto a la percepción del oído, correspondería al tiempo que tarda un sonido en desaparecer y fundirse entre los sonidos ambientales dentro de un espacio cerrado.

### II.3. LA DIFUSIÓN ACÚSTICA

#### 1) INTRODUCCIÓN

La difusión acústica es el efecto de redistribuir espacialmente la energía acústica que incide sobre una superficie denominada “difusor”.

Los principales beneficios de la difusión acústica son principalmente la homogeneidad del campo sonoro y el aumento de sensación de espacialidad (producido por el aumento de la isotropía del campo sonoro).

#### 2) DIFUSORES DE SONIDO

Son elementos diseñados para reflejar y dispersar el sonido de manera uniforme en sus múltiples direcciones. Pueden ser superficies con diferentes coeficientes de absorción colocadas una al lado de otra o elementos expresamente diseñados para dispersar de forma uniforme y en múltiples direcciones la energía sonora que incide sobre los mismos.

Estos elementos están creados específicamente para márgenes de frecuencias determinados, los cuales condicionan las dimensiones de los mismos.

Los principales difusores acústicos son los siguientes

- Difusor MLS:

Los difusores MLS, Fig.5, están basados en unas secuencias pseudoaleatorias periódicas, denominadas de longitud máxima, que sólo pueden adquirir dos valores diferentes: -1 y +1. Éste se crea partiendo de una superficie lisa y reflectante, la cual se subdivide en tramos de igual anchura. A cada tramo se le asigna un valor de la secuencia pseudoaleatoria. Si el valor asignado es +1, se crea un ranura de profundidad  $\lambda/4$  y de  $\lambda/2$  de longitud. El tamaño de la ranura depende de la  $\lambda$  longitud de onda correspondiente a la frecuencia de diseño. El margen óptimo de funcionamiento de este difusor es de 1 octava a partir de la frecuencia de diseño.

- Difusor QRD

Los difusores QRD, o también llamados de residuos cuadráticos, están formados por un conjunto de ranuras paralelas entre sí cuyas profundidades se obtienen a partir de una secuencia matemática prefijada para una cierta frecuencia. Pueden ser unidimensionales, si hay ranuras en una sola dirección, o bidimensionales, Fig.6. El margen óptimo de funcionamiento es de 3 octavas a partir de la frecuencia de diseño.

- Difusor PRD

Los difusores PRD, Fig.7, son análogos a los difusores QRD excepto que la secuencia generadora es diferente. Por ello no son simétricos, como los QRD.

Una característica destacable es que la reflexión especular que producen es prácticamente nula, por lo que los hace aconsejables como canceladores de ruido.

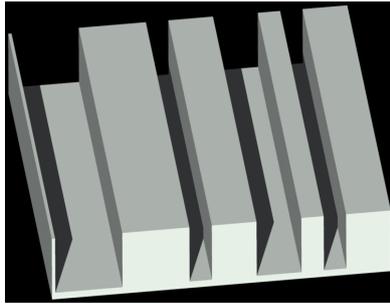


Fig.5. Difusor MLS

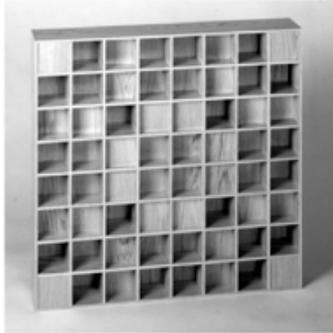


Fig.6. Difusor QRD bidimensional

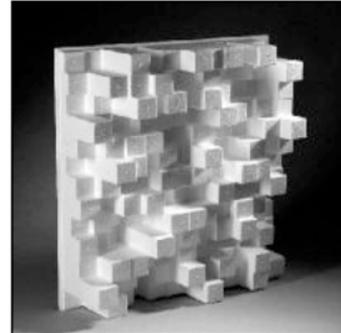


Fig.7. Difusor PRD

### III. DESARROLLO

En este capítulo se ha descrito el proceso llevado a cabo para el análisis de la influencia de la colocación del difusor. Primeramente se ha descrito la situación inicial. Posteriormente se ha analizado acústicamente el difusor acústico colocado en la sala. En tercer lugar se ha creado el modelo informático y se han realizado simulaciones mediante el paquete acústico “ Catt-Acoustic ” para analizar con profundidad la influencia del difusor. Por último, se han realizado simulaciones con variantes del difusor original.

#### III.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El “Tonhalle St. Gallen” es una sala de concierto, aunque por su tamaño se usa como sala para conciertos de cámara, ubicada en las afueras de la ciudad de St.Gallen (Suiza). Esta sala fue inaugurada en el año 1909. Desde sus inicios esta sala ha tenido problemas muchos problemas acústicos, sobre todo en el escenario, debido al alto nivel de sonido, focalizaciones y ecos flotantes [1].

En el año 2009 se reformó la sala. La planificación y la ejecución de la reforma fue llevada a cabo por el estudio de arquitectura Bosshard Vaquer con el asesoramiento del despacho profesional del Dr. Higiní Arau. La reforma consistió principalmente en la instalación de un difusor laberíntico y la colocación de paneles de madera en la pared y en el suelo del escenario, con la finalidad de eliminar las focalizaciones y el eco flotante en el escenario debido a la cúpula y a las paredes.



Fig.8. Tonhalle St. Gallen después de la reforma

## 1) DESCRIPCIÓN DE LA SALA

Los principales datos acústicos de las sala son los siguientes:

Volumen de la Sala [ $m^3$ ]	6100
Numero de espectadores [N]	840
Superficie de audiencia [ $m^2$ ]	588
Volumen por espectador [ $m^3/N$ ]	7,32
Volumen por superficie de audiencia [m]	10,45

Tabla 1: Datos acústicos de la sala

A continuación se muestran los planos de la planta y del perfil de la sala.

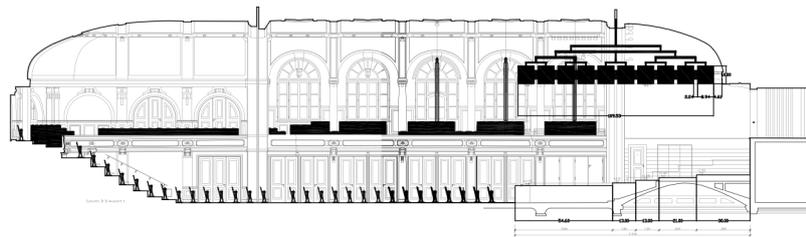


Fig.9. Plano de perfil de Tonhalle St. Gallen

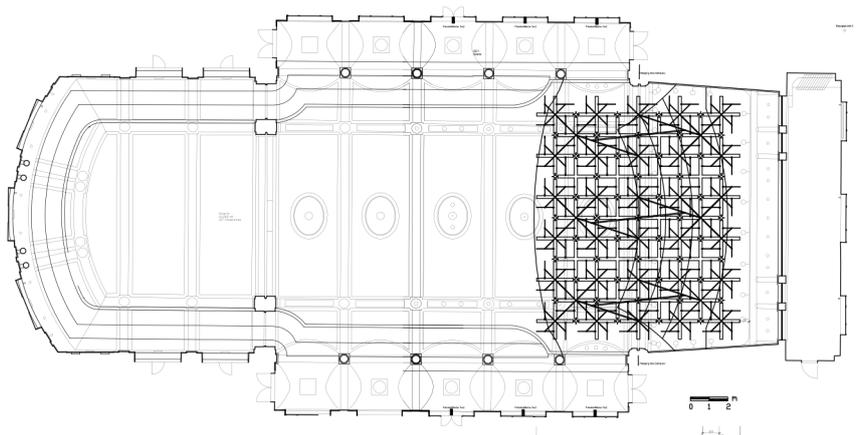


Fig.10. Plano de la planta de Tonhalle St.Gallen

## 2) MEDIDAS EN LA SALA

Dado que el difusor era de novedoso uso en el mundo de la acústica de salas, los autores de la reforma realizaron una serie de medida antes y después de la instalación de la reforma para cerciorarse de que se mejoraban las condiciones acústicas de la sala.

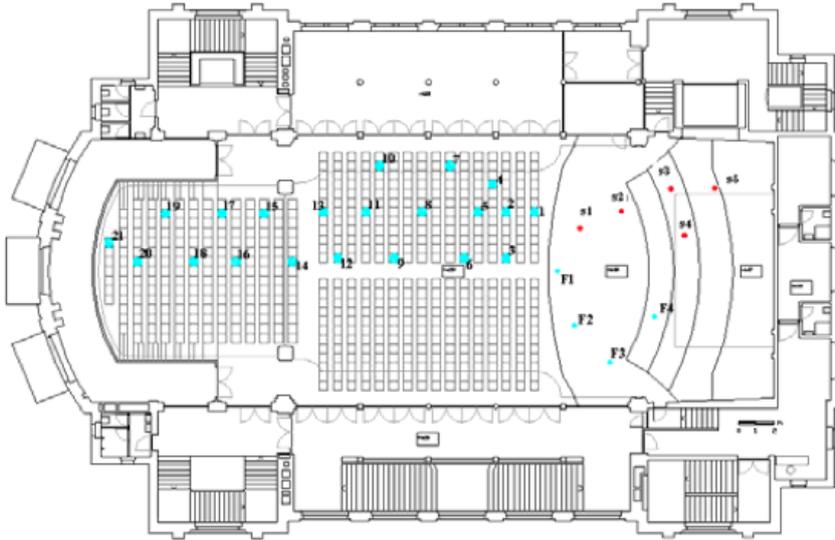


Fig.11. Puntos de fuente y de medida en la sala

Se realizaron 21 medidas, tanto en la sala como en el escenario, con 4 puntos de fuente, Fig.11 y Fig.12. Dichas medidas se realizaron siguiendo las pautas de la norma ISO 3382-1 [2]. Se realizó un promedio de los 4 puntos de fuente. El resultado de las medidas se encuentra en apartado siguiente.

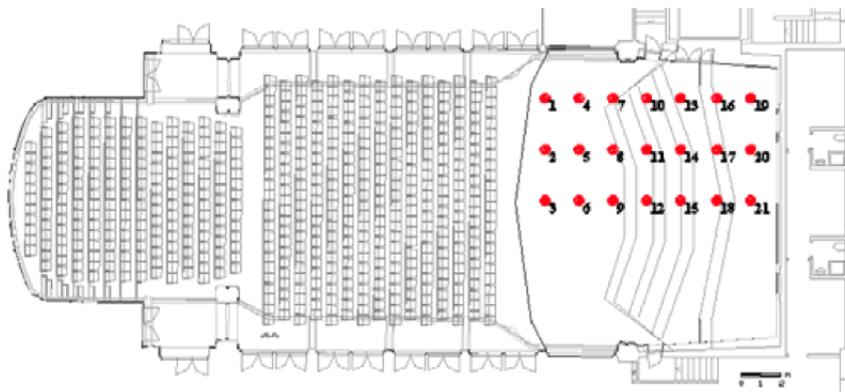


Fig.12. Puntos de medida en el escenario.

### 3) RESULTADO Y ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES.

Los parámetros medidos fueron El tiempo de reverberación (RT), tiempo de caída temprana (EDT) y la sonoridad (G). La fila “2009“ hace referencia a la medida antes de la reforma. La fila “2010” , después de la reforma.

- Medida en el escenario

[RT]	T <sub>30low</sub> [s]	T <sub>30mid</sub> [s]	T <sub>30high</sub> [s]
2009	2,16	1,83	1,56
2010	2,30	2,02	1,67
Comparación	0,14	0,19	0,11

Tabla 2: Resultados de medida del RT en el escenario

[ EDT ]	EDT <sub>low</sub> [s]	EDT <sub>mid</sub> [s]	EDT <sub>high</sub> [s]
2009	1,97	1,56	1,34
2010	1,93	1,91	1,57
Comparación	-0,04	0,35	0,23

Tabla 3: Resultados de medida del EDT en el escenario

[ G ]	G <sub>low</sub> [dB]	G <sub>mid</sub> [dB]	G <sub>high</sub> [dB]
2009	9,70	8,30	8,6
2010	6,35	5,8	5,45
Comparación	-3,35	-2,50	-3,15

Tabla 4: Resultados de medida de G en el escenario

- Medida en la sala

[RT]	T <sub>30low</sub> [s]	T <sub>30mid</sub> [s]	T <sub>30high</sub> [s]
2009	2,37	1,92	1,70
2010	2,36	2,08	1,80
Comparación	-0,01	0,16	0,1

Tabla 5: Resultados de medida del RT en la sala

[EDT]	EDT <sub>low</sub> [s]	EDT <sub>mid</sub> [s]	EDT <sub>high</sub> [s]
2009	2,20	1,88	1,60
2010	2,23	2,07	1,68
Comparación	0,03	0,19	0,08

Tabla 6: Resultados de medida del EDT en la sala

[ G ]	$G_{low}$ [dB]	$G_{mid}$ [dB]	$G_{high}$ [dB]
2009	9,50	8	8,3
2010	9,45	9,15	9,45
Comparación	-0,05	1,15	1,15

Tabla 7: Resultados de medida de G en la sala

Analizando los datos de las mediciones en el escenario, se observa una disminución de la sonoridad y un aumento tanto del tiempo de reverberación como del EDT ( Hay una disminución del EDT a bajas frecuencias que puede deberse por la absorción provocada por la madera de la que está fabricada el difusor [1] ) Estos dos hechos proporcionan una mejora en las condiciones acústicas en el escenario.

Por lo que respecta a la sala, se observa un aumento de las tres magnitudes medidas para medias y altas frecuencias. La absorción del material del difusor provoca que el aumento en frecuencias bajas se nulo o incluso negativo. Estos resultados contradicen dos teorías clásicas.

La primera de ella es el tiempo de reverberación según Sabine. El tiempo de reverberación es proporcional al volumen de la sala e inversamente proporcional a la absorción total de la sala. En principio, el volumen de Tonhalle St.Gallen no se modificó, y la absorción ( si se cuenta la introducida pr el difusor ) aumentó. Por lo que el TR debería disminuir, en lugar de aumentar.

La segunda teoría es la introducida por R.W.Young. Este autor afirma que al aumentar el número de reflexiones en una sala (N), se aumenta en factor D ( $D=10N*\alpha$ ) que provoca una disminución del tiempo de reverberación ( $T=60/D$ )

### III.2. CARACTERIZACIÓN DEL DIFUSOR

A la vista de los resultados obtenidos tras la reforma de la sala se ha decidido caracterizar dicho difusor. La caracterización del difusor se ha realizado utilizando el método el cámara reverberante. Este método sigue las pautas impuestas por la norma ISO/DIS 17497-1 Parte 1 [3].

#### 1) FABRICACIÓN DE LA MUESTRA

Para la caracterización del difusor, Fig. 13, se ha fabricado un modelo a escala 1:10. El modelo a escala tiene forma circular para cumplir los requisitos de la norma.

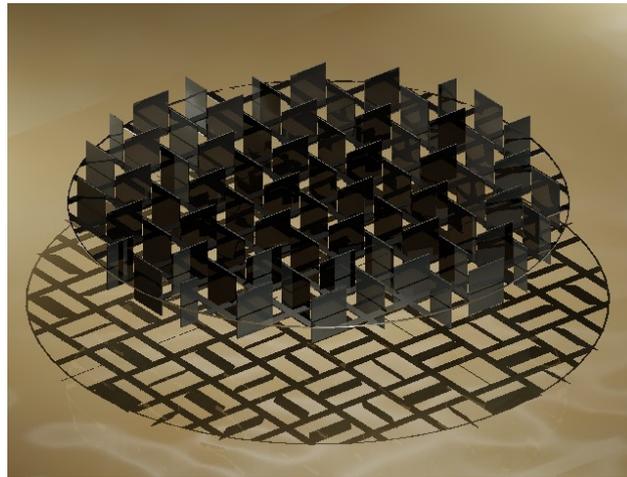


Fig.13. Modelo a escala del difusor

#### 2) MATERIALES

Para llevar a cabo las mediciones se ha utilizado un PC con procesador Pentium IV con un sistema CLIO, Fig.14, del fabricante de equipos para mediciones acústica *Audiomática*, y su respectiva licencia de software.

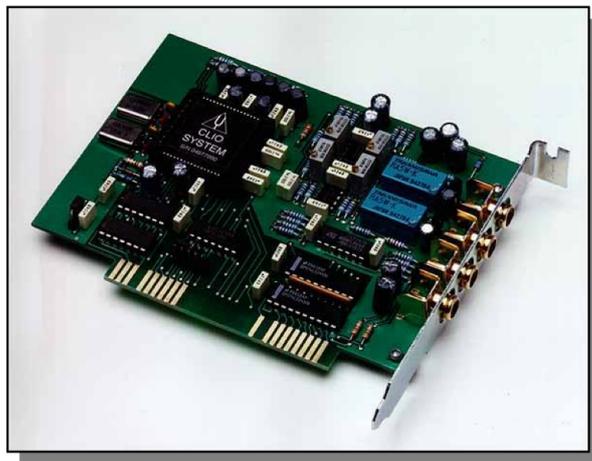


Fig.14. Interface HR-2000

Este sistema está dotado de dos salidas y dos entradas de audio que trabajan de forma simultánea en tiempo real, lo que se conoce como configuración “full duplex”, lo que nos permite generar una señal de test y recibir la señal que retorna tras incidir en el difusor, la cual utilizaremos para analizar la respuesta acústica del mismo.

Para captar esta señal de retorno el sistema está dotado de un micrófono electret MIC 01, Fig. 15, perfectamente calibrado. Este modelo es específico para realizar mediciones por su respuesta plana en el rango de frecuencias de 20 Hz a 20 KHz.



Fig.15. Micrófono MIC-01

Para emitir la señal de test generada por el ordenador utilizamos un monitor de estudio activo de la marca Genelec modelo 8030A, Fig. 16, que presenta una respuesta plana en la banda de frecuencias de 58Hz - 22kHz.



Fig.16. Genelec modelo 8030A

Y por último se hizo uso de una cámara reverberante a escala , cuyas medidas se representan en la Fig. 17.

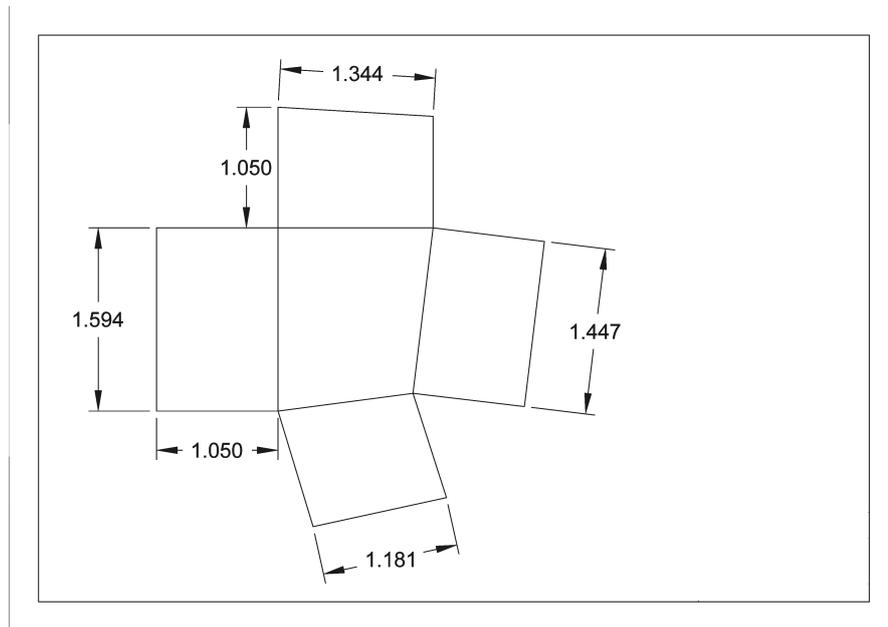


Fig.17. Medidas de la cámara reverberante a escala

### 3) MONTAJE

El difusor, a diferencia de muchos otros difusores, no se va a colocar pegado a ninguna pared ni techo, si no que se va a colocar suspendido de éste último a una distancia de 2.5 metros. Para simular las condiciones de funcionamiento, se ha construido un buje, que unido a un pie de micrófono, eleva el modelo a escala del suelo para poder conseguir las mismas condiciones de funcionamiento del modelo real. Este hecho ha obligado la utilización de unas barras rigidizadoras que eviten la flexión del difusor por el su propio peso, Fig 18.



Fig.18. Buje colocado en el difusor para poder unir el pie de micrófono

En la Fig.19 se muestra al difusor con el pie de micrófono dentro de la cámara reverberante a escala.



Fig.19. Modelo a escala unido a la estructura, en la cámara reverberante a escala

#### 4) TÉCNICA DE MEDIDA

La técnica de medida utilizada para la caracterización del difusor ha sido la MLS. La MLS es esencialmente una técnica de medida de la respuesta impulsiva de un sistema lineal. A partir de esta medida es capaz de derivar muchas características de un sistema acústico. El esquema de la medida de la respuesta impulsiva de un sistema lineal usando señales MLS se muestra en la Fig.20

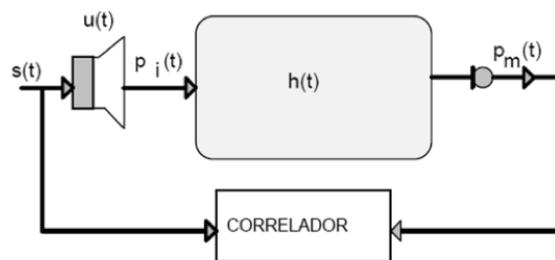


Fig.20. Medida de la respuesta impulsiva por el método MLS

Al introducir una señal MLS en un sistema acústico, como puede ser la cámara reverberante con todos los objetos que contiene, obtenemos la respuesta a dicho sistema. Aplicando un algoritmo obtenemos la respuesta al impulso del sistema.

#### 5) PROCESADO DE LAS MEDIDAS

El procesado de las mediciones en cámara reverberante se ha realizado mediante el programa Matlab. Dicho procesado sigue los siguientes pasos:

- a) Lectura de los datos para cada una de las configuraciones de medida.
- b) Filtrado de las señales para trabajar en las bandas de frecuencias de estudio.
- c) Obtención del tiempo de reverberación a partir de la suma acumulada de dichas señales.
- d) Calculo de los coeficiente “alfa” y obtención del coeficiente de difusión.

## 6) RESULTADOS OBTENIDOS.

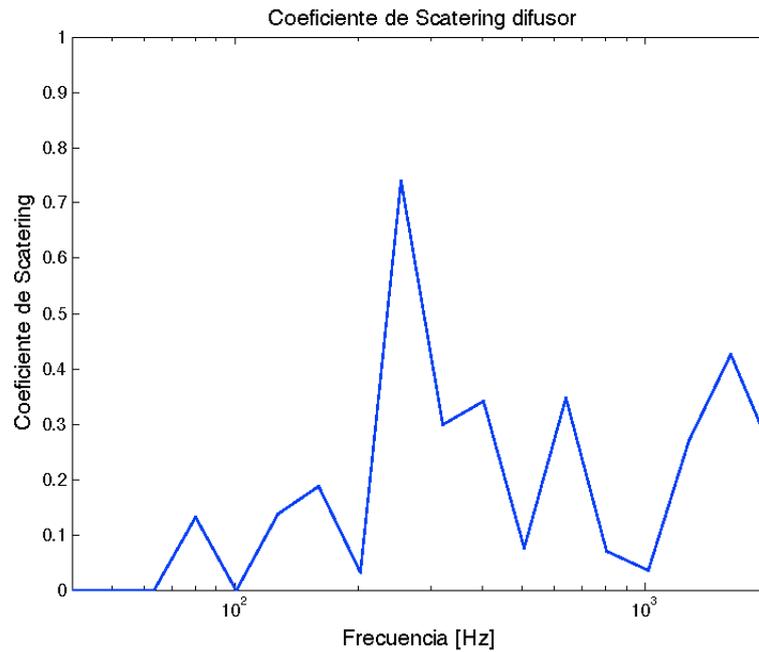


Fig.21. Coeficiente de scattering del modelo real

En vista de los resultados obtenidos en el experimento, analizando la gráfica del coeficiente de difusión con respecto a la frecuencia, Fig.21, podemos decir que el difusor de baja frecuencia. En concreto el prototipo de este estudio se comporta de forma satisfactoria para el rango de frecuencias entre 200 y 300 Hz, que es donde tiene el máximo. Además se observan picos a 600 y 1600 Hz que puede ser debidos a algunos componentes estructurales del propio difusor.

### III.3. ESTUDIO DE LA COLOCACIÓN DEL DIFUSOR

Tras la caracterización del difusor y concluyendo que éste tiene capacidades difusoras, se ha procedido al estudio de la influencia de la colocación del difusor en la sala. Para ello, tal y como se ha descrito en la introducción de este capítulo, se ha creado un modelo informático de la sala con el que realizar simulaciones con el programa Catt-acoustic.

A continuación se ha realizado una introducción al programa Catt-acoustic. Posteriormente se han descrito las fases de creación y de validación del modelo informático. Por último se ha estudiado la influencia de la colocación del difusor en el auditorio.

#### 1) CATT-ACOUSTIC

Catt-acoustic es un programa de simulación basado en acústica geométrica [4]. Permite estudiar virtualmente el comportamiento acústico de una sala (pueden ser importadas de CAD) antes de construirla, con el beneficio que ello conlleva.

Catt-acoustic ofrece tres tipos de predicciones:

- Mapeado del área de audiencia: Esta predicción se basa en el trazado de rayos. En ella se traza mediante una escala de color el valor de diversos parámetros acústicos.
- Caracterización de la zona temprana: Caracterización de las reflexiones tempranas de la sala. Basado en el modelo de fuente imagen.
- Caracterización completa: Caracterización completa de la sala mediante ecogramas. Éstos puede usarse para la auralización y para la estimación de parámetros.

#### 2) CREACIÓN DEL MODELO INFORMÁTICO

Los modelo informáticos que usa el programa Catt-acoustic se pueden crear manualmente en el propio programa o en usar cualquier programa de Cad para diseñarlos y posteriormente importarlos al programa. En este caso, debido a la complejidad del modelo, se ha optado por la segunda opción. El programa elegido ha sido AutoCad.

El modelo que se importe mediante un programa de Cad debe ser creado a partir de comandos *3D cara*. Dicho comando solo permite la creación de superficies planas, lo que dificulta el diseño de la sala y obliga a una simplificación del mismo. El modelo se ha creado a partir de los propios planos del estudio de arquitectura encargado de la reforma de la sala (Fig.9 y Fig. 10). El resultado se muestra en las Fig. 22 y Fig. 23

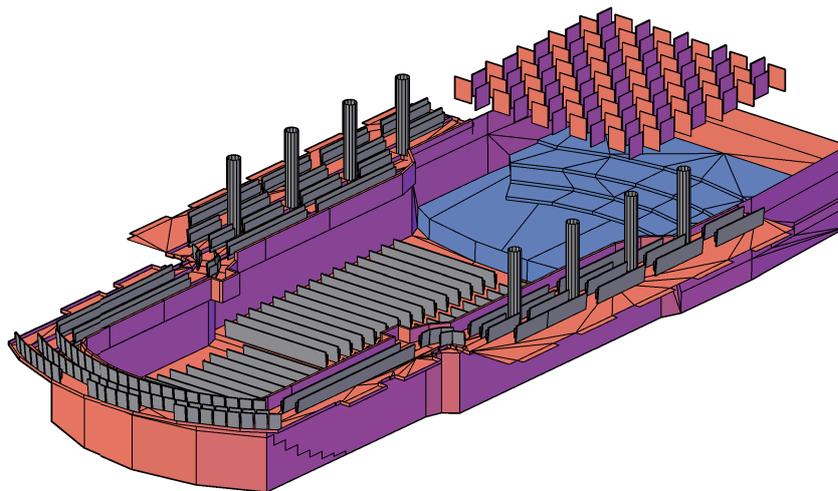


Fig.22. Vista del modelo informático sin cúpula realizado con Autocad

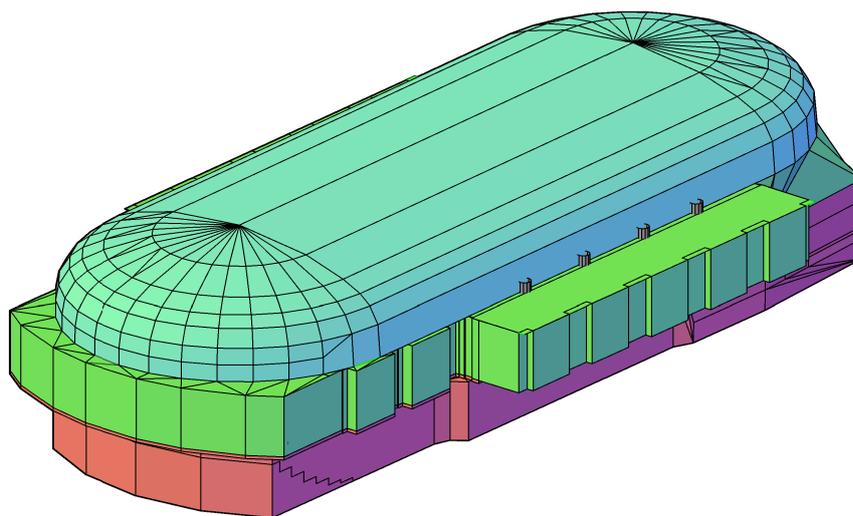


Fig.23. Vista del modelo informático completo realizado con Autocad

Una vez se ha creado el modelo en Autocad, se ha importado al programa Catt-acoustic. Para ello se ha hecho uso del plugin “dxf2geo” que permite exportar un archivo dxf , generado por autocad, a un archivo de lectura de Catt-acoustic ( Fig.24.)

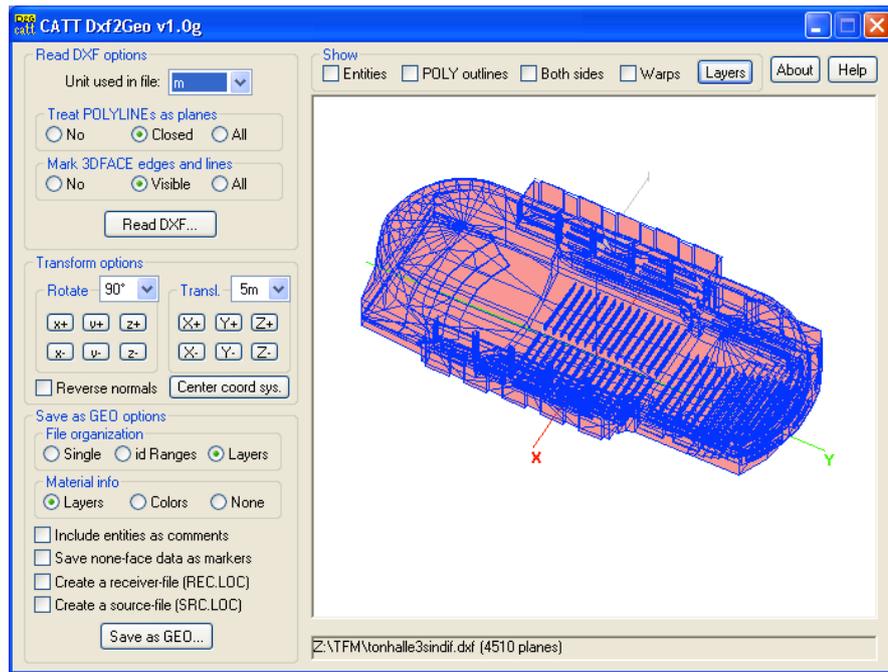


Fig.24. Modelo importado con el plugin dxf2geo

A continuación se muestra el resultado final

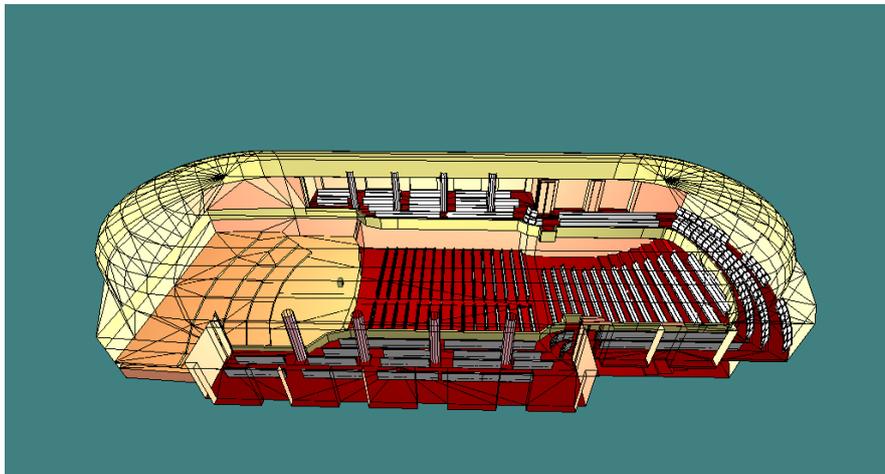


Fig.25. Modelo final importado a Catt Acoustic

### 3) VALIDACIÓN DEL MODELO

Una vez se ha importado el archivo al formato .geo, se ha introducido el modelo en el software Catt-Acoustic para comprobar que la geometría se ha exportado correctamente. Para ello se ha realizado un análisis de pérdidas, con la finalidad de comprobar que el recinto es un recinto cerrado, Fig.26. Dado que las pérdidas son menores al 3 % el modelo informático se ha considerado válido.

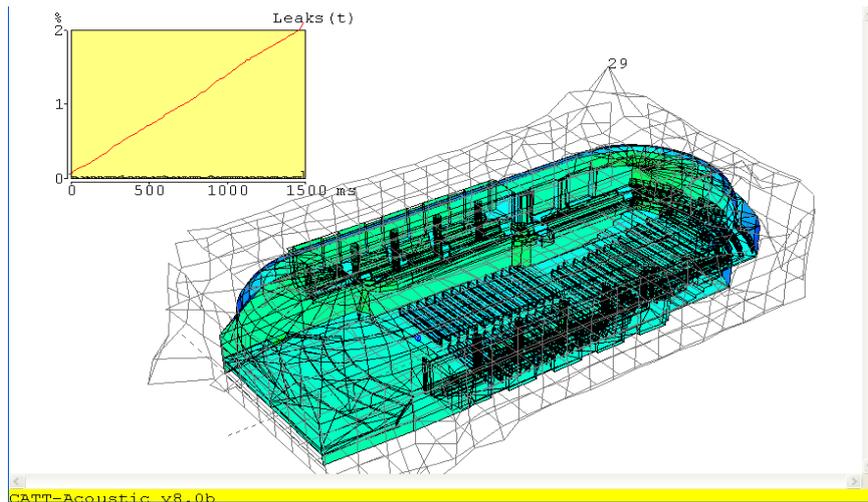


Fig.26. Comprobación de las pérdidas del modelo.

Además se ha comparado las cualidades acústicas del modelo informático con las del auditorio. Para ello se han realizado simulaciones utilizando los puntos de medida , Fig.27, y los resultados de las mediciones realizadas in situ, tanto en la sala como en el escenario (apartado III.1.2). Los datos de los coeficientes de absorción se han obtenido de la bibliografía [5], [6] y [7].

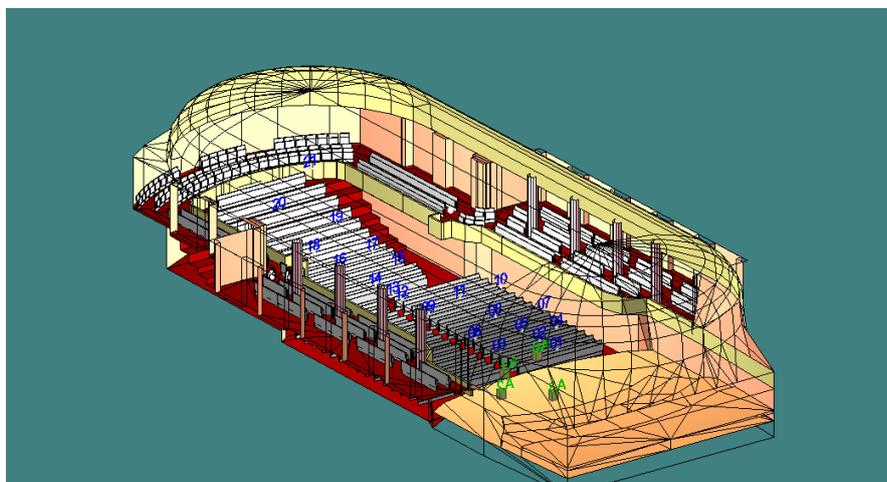


Fig.27. Puntos de medida

Los resultados de la comparación se muestran a continuación. La fila “ medida “ hace referencia a la medida real, la fila “ modelo “ hace referencia al resultado de la medición del modelo informático.

[RT]	T <sub>30low</sub> [s]	T <sub>30mid</sub> [s]	T <sub>30high</sub> [s]
2009 <sub>medida</sub> [Sala]	2,37	1,92	1,70
2009 <sub>modelo</sub> [Sala]	2,29	1,94	1,69
Comparación [%]	3,19	-1,20	0,49
2009 <sub>medida</sub> [Escenario]	2,16	1,83	1,56
2009 <sub>modelo</sub> [Escenario]	2,23	1,87	1,62
Comparación [%]	-3,01	-1,91	-3,86
2010 <sub>medida</sub> [Sala]	2,36	2,08	1,80
2010 <sub>modelo</sub> [Sala]	2,29	2,05	1,83
Comparación [%]	3,18	1,44	-1,39
2010 <sub>medida</sub> [Escenario]	2,30	2,02	1,67
2010 <sub>modelo</sub> [Escenario]	2,25	2,05	1,70
Comparación [%]	2,18	-1,49	-1,80

Tabla 8: Comparación de resultados de RT de la simulación.

[ EDT ]	EDT <sub>low</sub> [s]	EDT <sub>mid</sub> [s]	EDT <sub>high</sub> [s]
2009 <sub>medida</sub> [Sala]	2,20	1,88	1,60
2009 <sub>modelo</sub> [Sala]	2,24	1,87	1,50
Comparación [%]	-1,79	0,51	6,47
2009 <sub>medida</sub> [Escenario]	1,97	1,56	1,34
2009 <sub>modelo</sub> [Escenario]	2	1,52	1,38
Comparación [%]	-1,52	2,56	-3,37
2010 <sub>medida</sub> [Sala]	2,23	2,07	1,68
2010 <sub>modelo</sub> [Sala]	2,285	2,125	1,635
Comparación [%]	-2,70	-2,66	2,68
2010 <sub>medida</sub> [Escenario]	1,93	1,91	1,57
2010 <sub>modelo</sub> [Escenario]	1,96	1,865	1,515
Comparación [%]	-1,55	2,10	3,19

Tabla 9: Comparación de resultados de EDT de la simulación.

<b>Sonoridad [ G ]</b>	<b>G<sub>low</sub> [dB]</b>	<b>G<sub>mid</sub> [dB]</b>	<b>G<sub>high</sub> [dB]</b>
2009 <sub>medida</sub> [Sala]	9,50	8	8,3
2009 <sub>modelo</sub> [Sala]	10,06	9,99	9,86
Comparación [%]	-5,39	-19,03	-15,31
2009 <sub>medida</sub> [Escenario]	9,7	8,3	8,6
2009 <sub>modelo</sub> [Escenario]	10,06	9,99	9,86
Comparación [%]	-3,71	-20,34	-14,62
2010 <sub>medida</sub> [Sala]	9,45	9,15	9,45
2010 <sub>modelo</sub> [Sala]	10,5	9,9	9,45
Comparación [%]	-11,11	-8,20	0,00
2010 <sub>medida</sub> [Escenario]	6,35	5,8	5,5
2010 <sub>modelo</sub> [Escenario]	8,30	8,64	8,61
Comparación [%]	-30,71	-48,88	-56,45

Tabla 10: Comparación de resultados de G de la simulación.

Por lo que respecta a los resultados de las tablas del tiempo de reverberación y del EDT, la desviación máxima es del 6,47 % lo que nos indica que los materiales utilizados en el modelo informática se asemejan a los usados en la realidad.

Por otro lado la sonoridad tiene una diferencia mayor. Esto puede deberse a dos motivos, el primero de ellos es la no modelización total de la reforma realizada en el escenario. La reforma del escenario consistió, además del cambio de materiales, en la instalación de unos paneles debe principalmente a la fuente utilizada para la simulación. Estos paneles no han sido simulados debido a las restricciones del programa informático, éste permite modelos informáticos con un número de planos no superior a 5000 y el modelo estaba formado por 4952. El otro motivo puede deberse a que los altavoces utilizados durante la medición in situ no se corresponden con los usados en la simulación. El hecho de no tener información sobre las características acústicas de los altavoces utilizados en la medición in situ, impedía usar altavoces de características similares en la simulación.

Los materiales utilizados en el modelo informático han sido los siguientes. El coeficiente de absorción está indicado en % para las frecuencias de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 KHz, 2KHz y 4KHz.

<b>SUPERFICIE</b>	<b>Material</b>	<b>Coefficiente de absorción</b>
Asientos	--	<35 45 57 61 59 55>
Columnas	Mármol	< 1 1 1 1 2 2 >
Paredes	Yeso	<2 2 2 2 2 2>
Pared 1º piso	Madera	<19 14 9 6 6 7>
Balcón	Yeso	<2 2 2 2 2 2>
Cúpula	Yeso	<2 2 2 2 2 2>
Suelo	Parquet	<4 4 7 6 6 7>
Escenario	Madera contrachapada	<28 22 17 9 10 11>
Difusor	Madera	<19 14 9 6 6 7>

Tabla 11: Coeficientes de absorción utilizados para la simulación

Una vez validado el modelo, se ha procedido al estudio de la influencia del difusor.

#### 4) ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL DIFUSOR

Para el estudio de la influencia del difusor, se han colocado 98 receptores por toda la sala, Fig.28, y 90 receptores en el escenario. Por lo que respecta a la fuente, se ha colocado una en las siguientes coordenadas ( 0, 2.3, 3.2 ). Se ha realizado la simulación con y sin difusor.

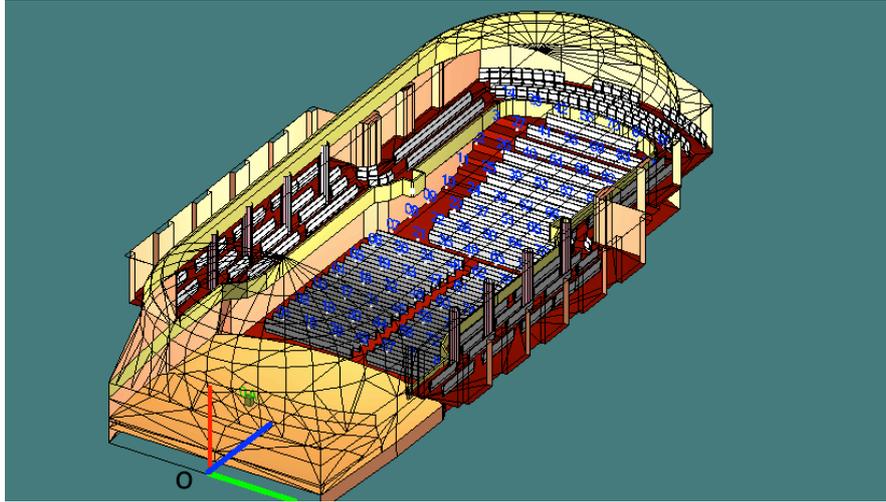


Fig.28. Puntos de medida en la sala

Las magnitudes estudiadas han sido el nivel de presión sonora ( SPL ) y el tiempo de reverberación (RT). Para cada una de ellas se ha analizado su homogeneidad en cada parte del auditorio ( Sala y escenario ) y si hay un aumento o disminución de la magnitud. Además, se han insertado gráficos de las situaciones más representativas.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- Nivel de presión sonora en la sala

MAGNITUD	FRECUENCIAS [Hz]					
SPL [dB]	125	250	500	1000	2000	4000
Homogeneidad	+			-		
Variación de magnitud	=					

Tabla 12: Estudio del SPL en la sala

La variación de la magnitud permanece constante en toda la sala. Hay un aumento de la homogeneidad del nivel de presión sonora para las frecuencias de 125 a 1000 Hz. A partir de 2000 Hz el difusor provoca resultados negativos. Cabe destacar que en todos los casos, el difusor disminuye en nivel SPL de la zona central de la sala, esto se observa en la Fig.29. El origen de coordenadas está representado en la figura anterior

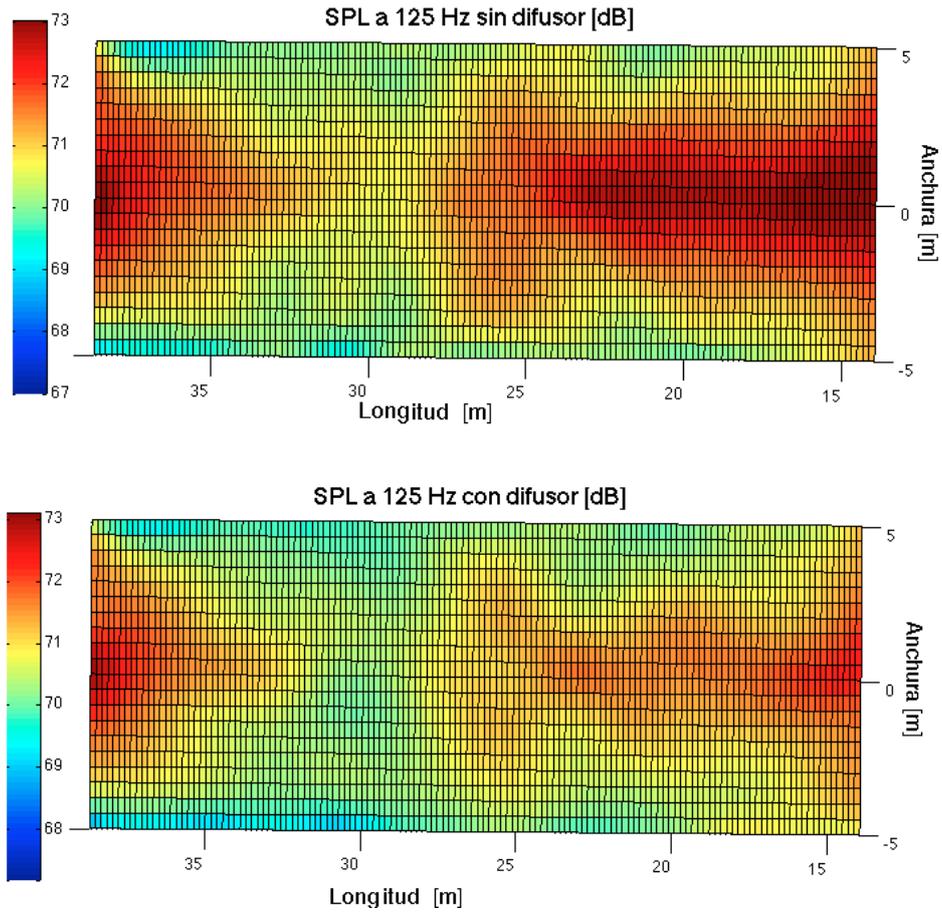


Fig.29. SPL a 250 Hz en la sala sin y con difusor

- Tiempo de reverberación en la sala

MAGNITUD	FRECUENCIAS [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
RT						
Homogeneidad	+					
Variación de magnitud	-		+			

Tabla 13: Estudio del RT en la sala

Analizando los resultados se observa que la frecuencia de 250 Hz no sigue la tendencia de las medidas in situ, ya que en dichas medidas, el RT a 250 Hz aumentaba. Dicha disminución es de 3 centésimas de segundo. En la Fig. 30 se ve como la homogeneidad del RT a 125 Hz provoca un aumento de la homogeneidad y una disminución del tiempo de reverberación

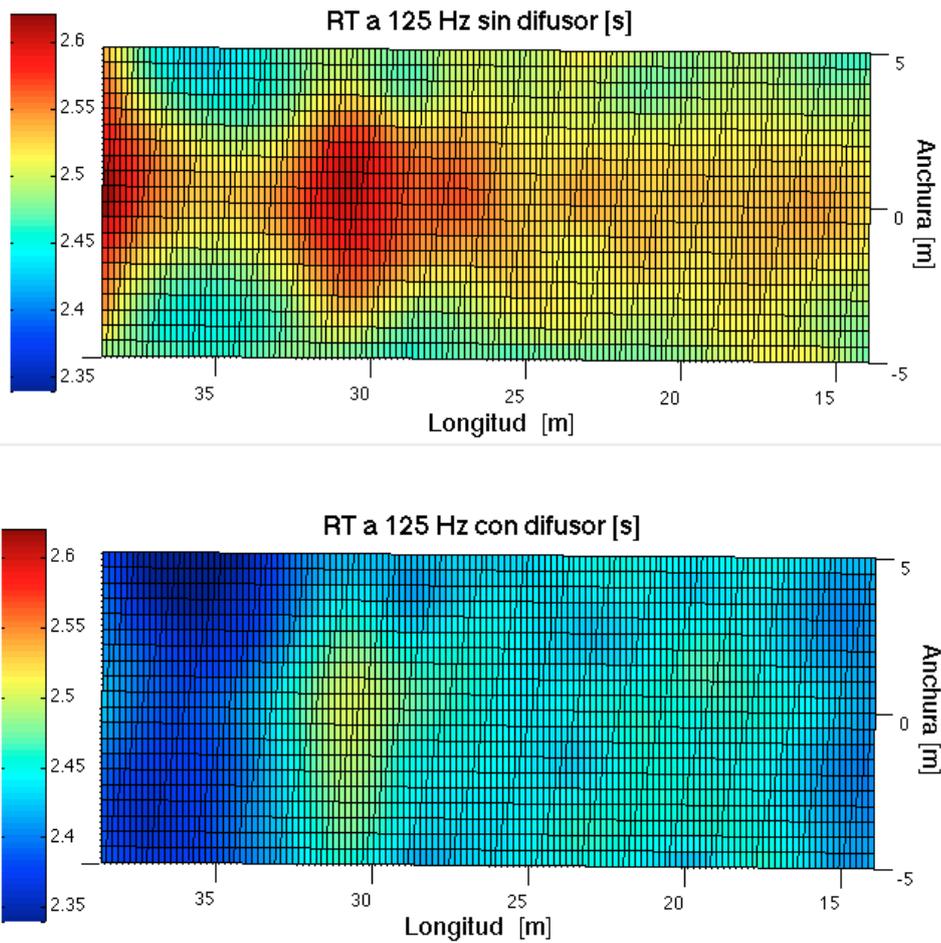


Fig.30. RT a 125 Hz en la sala sin y con difusor

En la Fig.31 se ve como la homogeneidad del RT a 500 Hz provoca un aumento de la homogeneidad y un aumento del tiempo de reverberación.

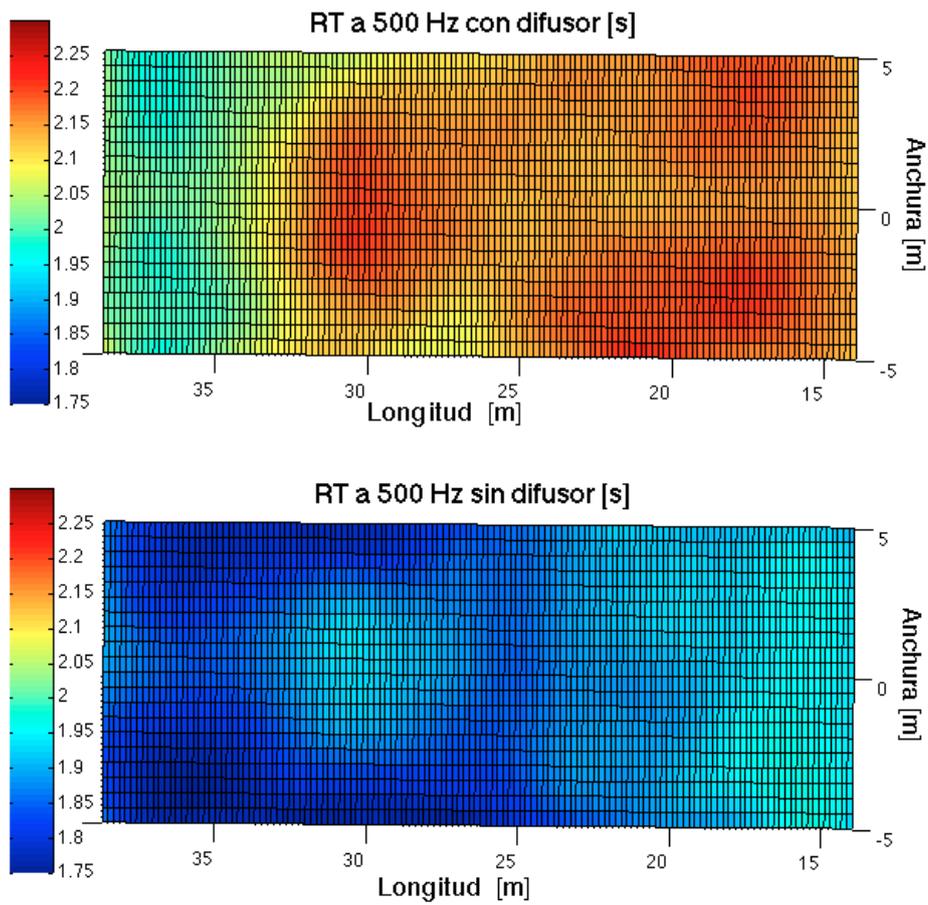


Fig.31. RT a 500 Hz en la sala sin y con difusor

- Nivel de presión sonora en el escenario

La Fig.32 muestra la colocación de los receptores en el escenario. El centro de coordenadas sigue siendo el mismo que en el caso de la sala.

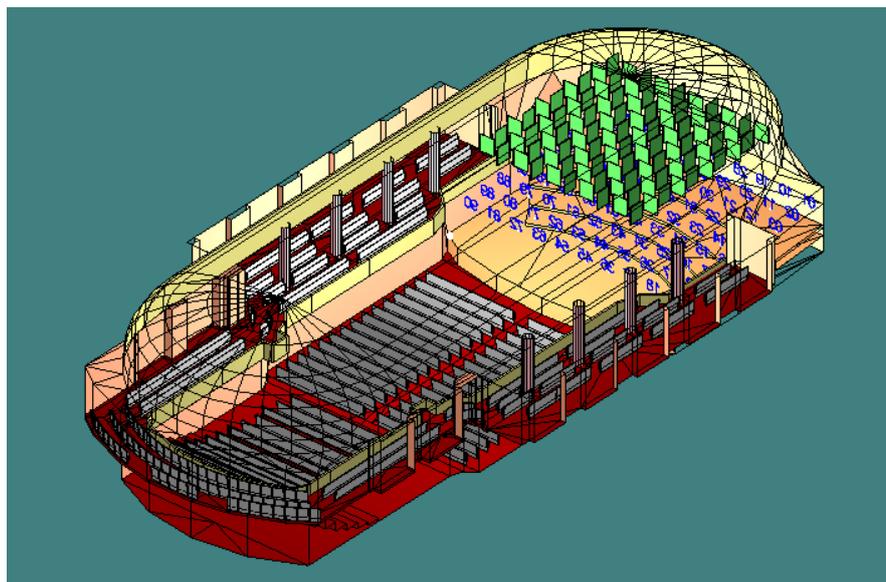


Fig.32. Puntos de medida en el escenario

El comportamiento del nivel de presión sonora en el escenario es muy similar al ocurrido en la sala. El difusor provoca un aumento de la homogeneidad desde 125 hasta 1000 Hz. En la Fig.33 se observa este comportamiento a 125 Hz.

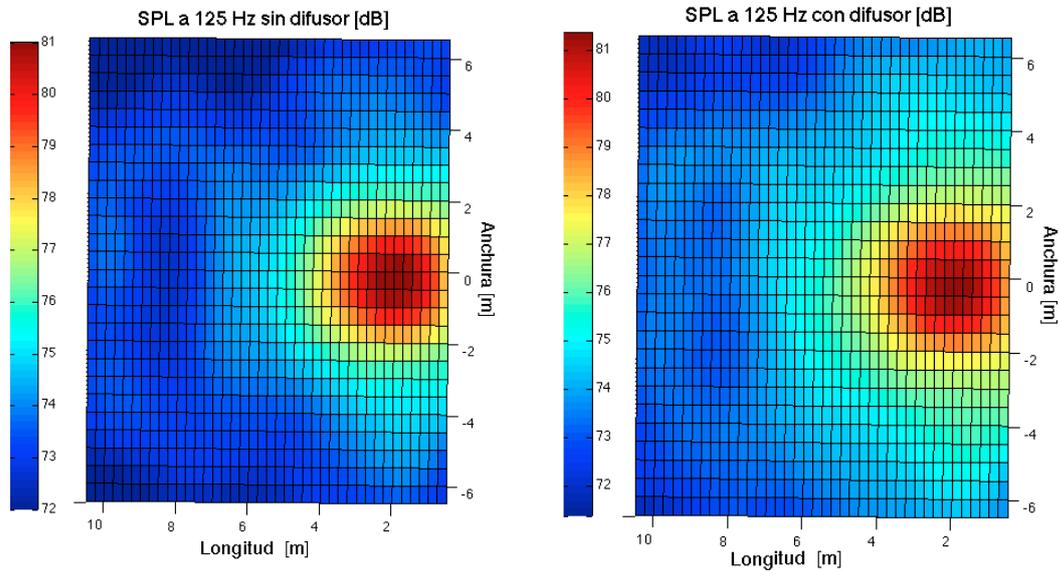


Fig.33. SPL a 125 Hz en el escenario sin y con difusor

- Tiempo de reverberación en el escenario

MAGNITUD	FRECUENCIAS [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
RT						
Homogeneidad	+	+	=	=	=	=
Variación de magnitud	-	+	+	+	+	+

Tabla 15: Estudio del RT en el escenario

En este caso, la frecuencia de 125 Hz es la única que no cumple la tendencia de las medidas realizadas in situ. Hay una disminución de 0.03 s. En la Fig.34 se observa la influencia del difusor a 125 Hz. En la Fig.35 se observa dicha influencia a 250 Hz

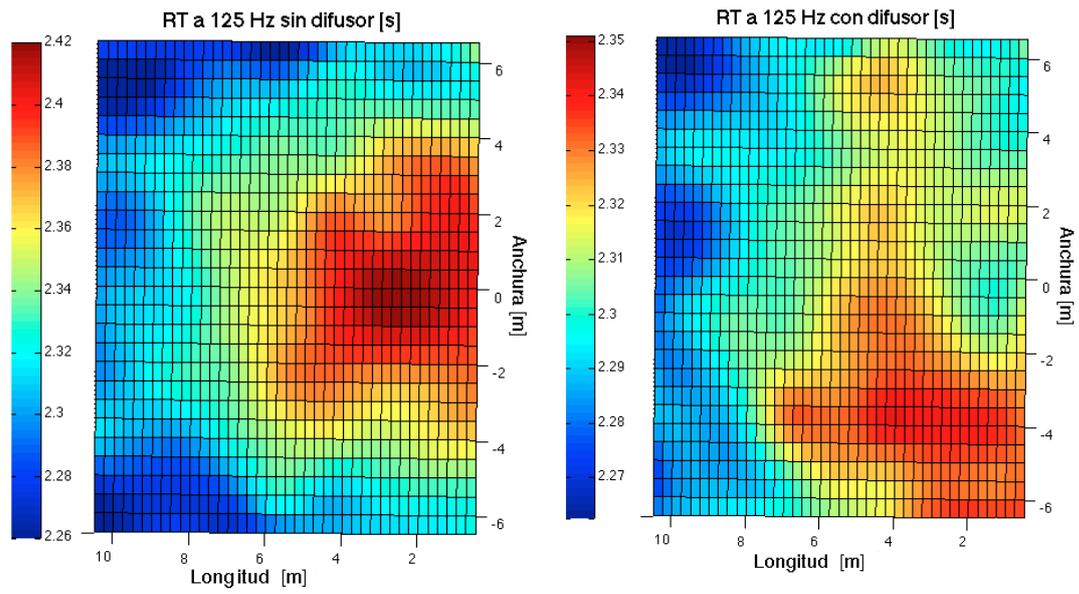


Fig.34. RT a 125 Hz en el escenario sin y con difusor

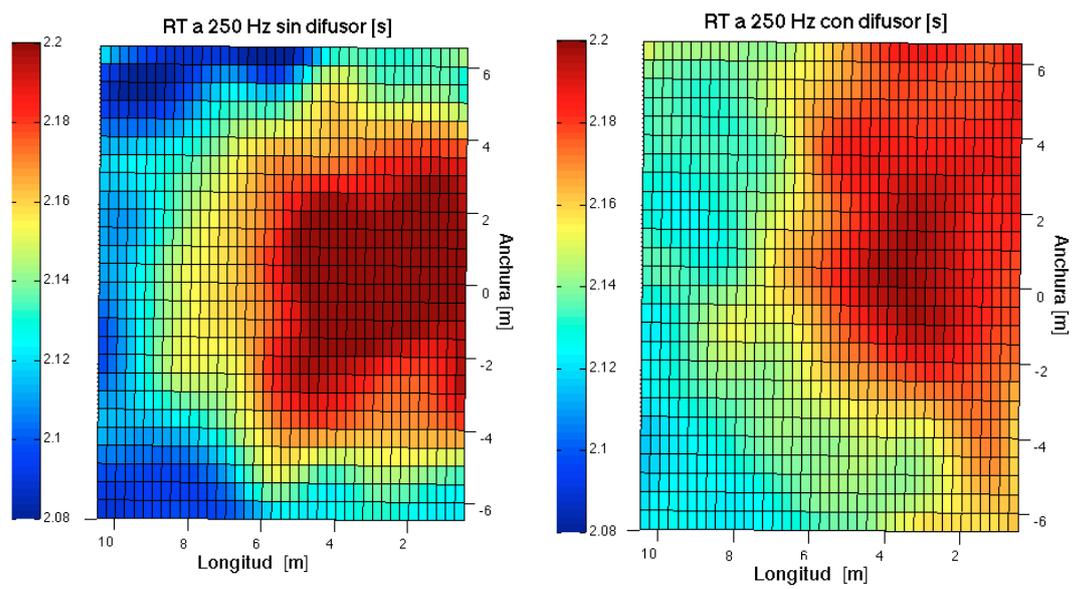


Fig.35 RT a 250 Hz en el escenario sin y con difusor

### III.4. OTRAS CONFIGURACIONES

Además del estudio de la influencia del difusor en su configuración inicial, se han realizado simulaciones con otras configuraciones del difusor laberíntico. Se han optado por dos ramas, el giro del difusor y el aumento del mismo. Se ha realizado el estudio con un difusor un 20 % mayor y con un difusor girado 45° con respecto al original. Se han colocado receptores tanto en la sala como en el escenario. En las Fig.36 y en la Fig.37 se ilustran las dos variantes.

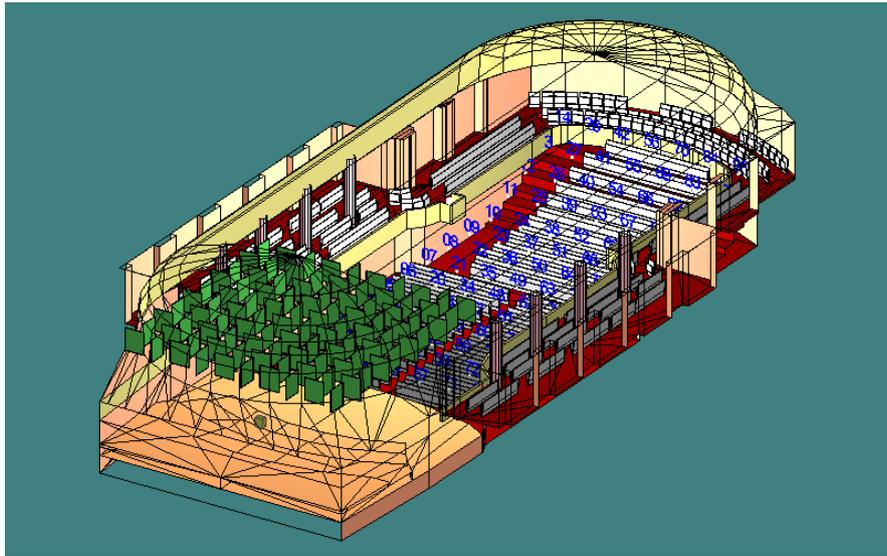


Fig.36. Configuración con el difusor 20% más grande

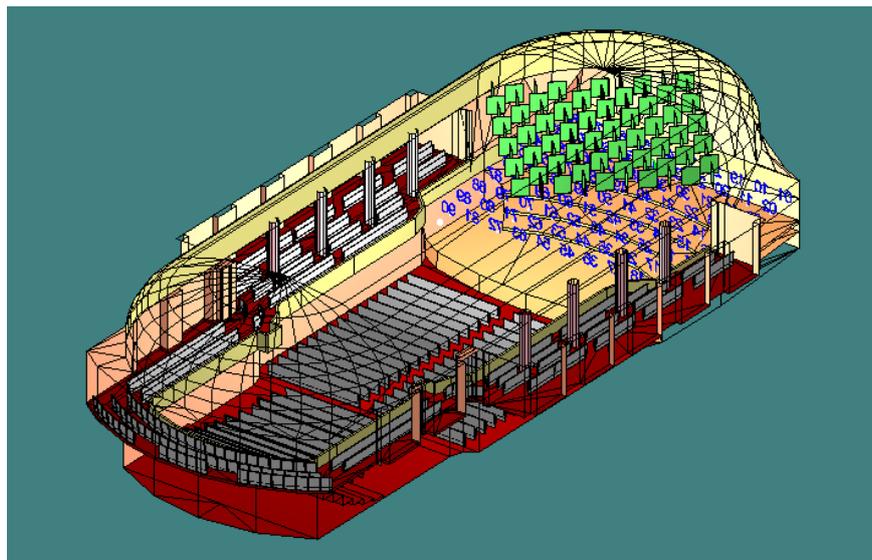


Fig.37. Configuración con el difusor girado 45°

De las misma manera que el apartado anterior, se ha analizado cómo las diferentes configuraciones influyen en el tiempo de reverberación y en el nivel de presión sonora, tanto en el escenario como en la sala. Para cada magnitud se ha analizado su variación y su homogeneidad.

- Medidas en el escenario

	MAGNITUD	FRECUENCIAS [Hz]					
AUMENTO DIFUSOR	RT [s]	125	250	500	1000	2000	4000
	Homogeneidad	=	-	+	+	+	=
	Variación de magnitud	+	-	+	=	-	-
		FRECUENCIAS [Hz]					
GIRO DIFUSOR	RT [s]	125	250	500	1000	2000	4000
	Homogeneidad	+	+	+	+	-	+
	Variación de magnitud	+	-	+	+	-	+

Tabla 16: Estudio del RT en el escenario para otras configuraciones del difusor

Por lo que respecta al tiempo de reverberación, se observa un comportamiento “ positivo “ de las dos variantes simuladas a 500 y 1000 Hz. En la Fig.38 se muestra dicho resultado.

	MAGNITUD	FRECUENCIAS [Hz]					
AUMENTO DIFUSOR	SPL [dB]	125	250	500	1000	2000	4000
	Homogeneidad	+				=	=
	Variación de magnitud	=					
		FRECUENCIAS [Hz]					
GIRO DIFUSOR		125	250	500	1000	2000	4000
	Homogeneidad	+				=	=
	Variación de magnitud	=					

Tabla 17: Estudio del SPL en el escenario para otras configuraciones del difusor

Por otro lado, la influencia de las diferentes configuraciones alternativas, con respecto a la configuración original, en el nivel de presión sonora es muy pequeña, tanto para la homogeneidad como en la variación en dB.

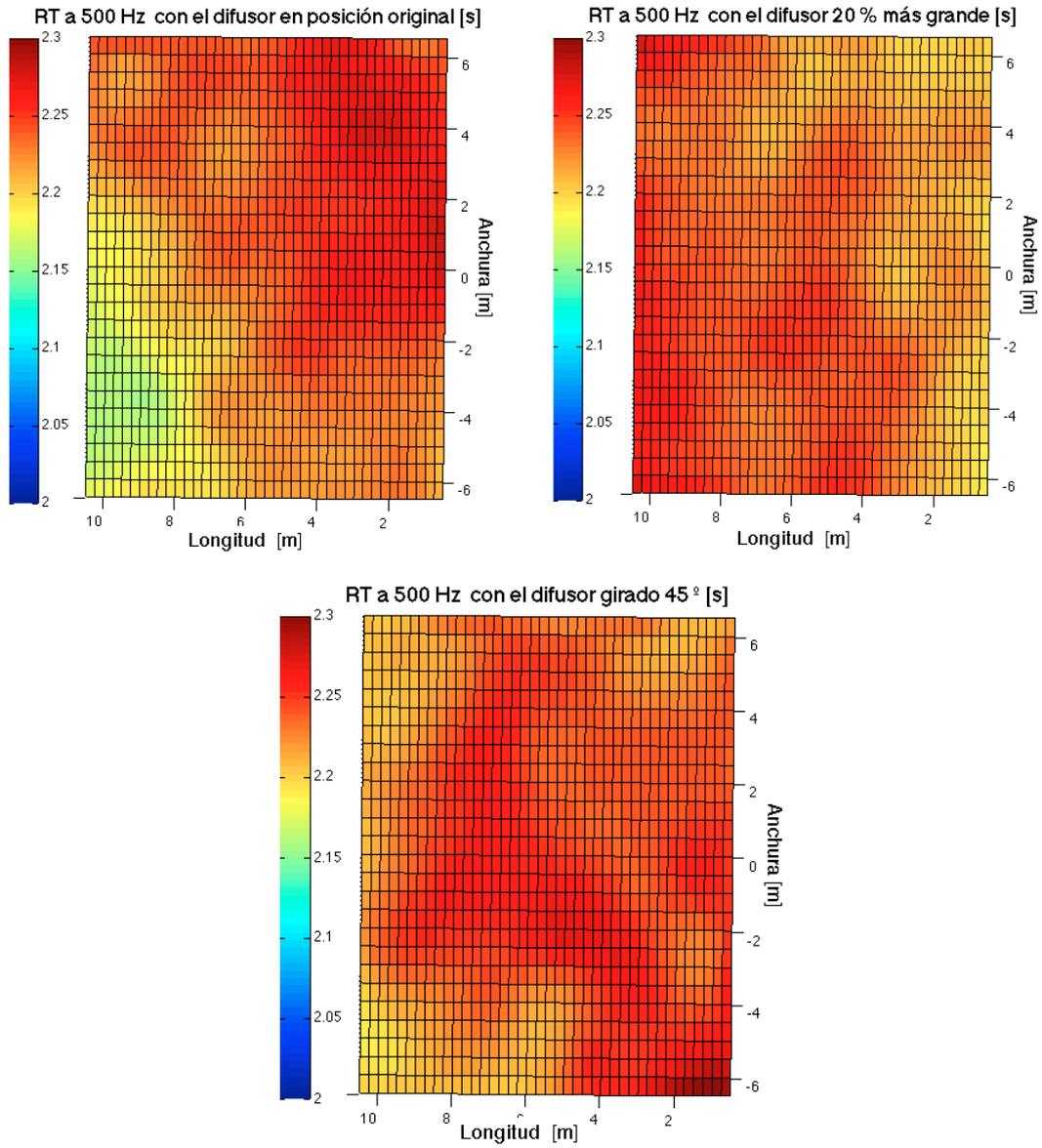


Fig.38. RT a 500 Hz en el escenario para las 3 configuraciones

- Medidas en la sala

	MAGNITUD	FRECUENCIAS [Hz]					
AUMENTO DIFUSOR	RT [s]	125	250	500	1000	2000	4000
	Homogeneidad	-	+	+	=	=	+
	Variación de magnitud	-					+
		FRECUENCIAS [Hz]					
GIRO DIFUSOR		125	250	500	1000	2000	4000
	Homogeneidad	-	-	-	+	=	+
	Variación de magnitud	-					

Tabla 18: Estudio del RT en el escenario para otras configuraciones del difusor

Por lo que respecta al tiempo de reverberación, se produce una disminución de éste a lo largo de toda la sala. La homogeneidad del tiempo de reverberación es algo más variante. Destaca el caso a 500 Hz, el aumento del difusor provoca una notable mejoría de la homogeneidad del RT. Con el difusor girado, esta mejoría sólo se produce en la primera mitad de la sala ( Fig. 39 )

	MAGNITUD	FRECUENCIAS [Hz]					
AUMENTO DIFUSOR	SPL [dB]	125	250	500	1000	2000	4000
	Homogeneidad	+	-				
	Variación de magnitud	-	-	-	=	-	-
		FRECUENCIAS [Hz]					
GIRO DIFUSOR		125	250	500	1000	2000	4000
	Homogeneidad	+	+	-			
	Variación de magnitud	-					

Tabla 19: Estudio del SPL en el escenario para otras configuraciones del difusor

La influencia en el nivel de presión sonora son menos apreciables. Los valores numéricos indican que la homogeneidad y el valor de la magnitud son casi constantes, la variaciones que se indican son de bajo valor porcentual, de igual manera que en el escenario. Si se observan las gráficas ( Fig.40) se ve cómo el aumento de tamaño del difusor provoca un cambio en la forma de la focalización de la parte delantera de la sala, dejando constante la focalización de la parte trasera. En cambio, el giro de difusor tiene influencia en ambas focalizaciones.

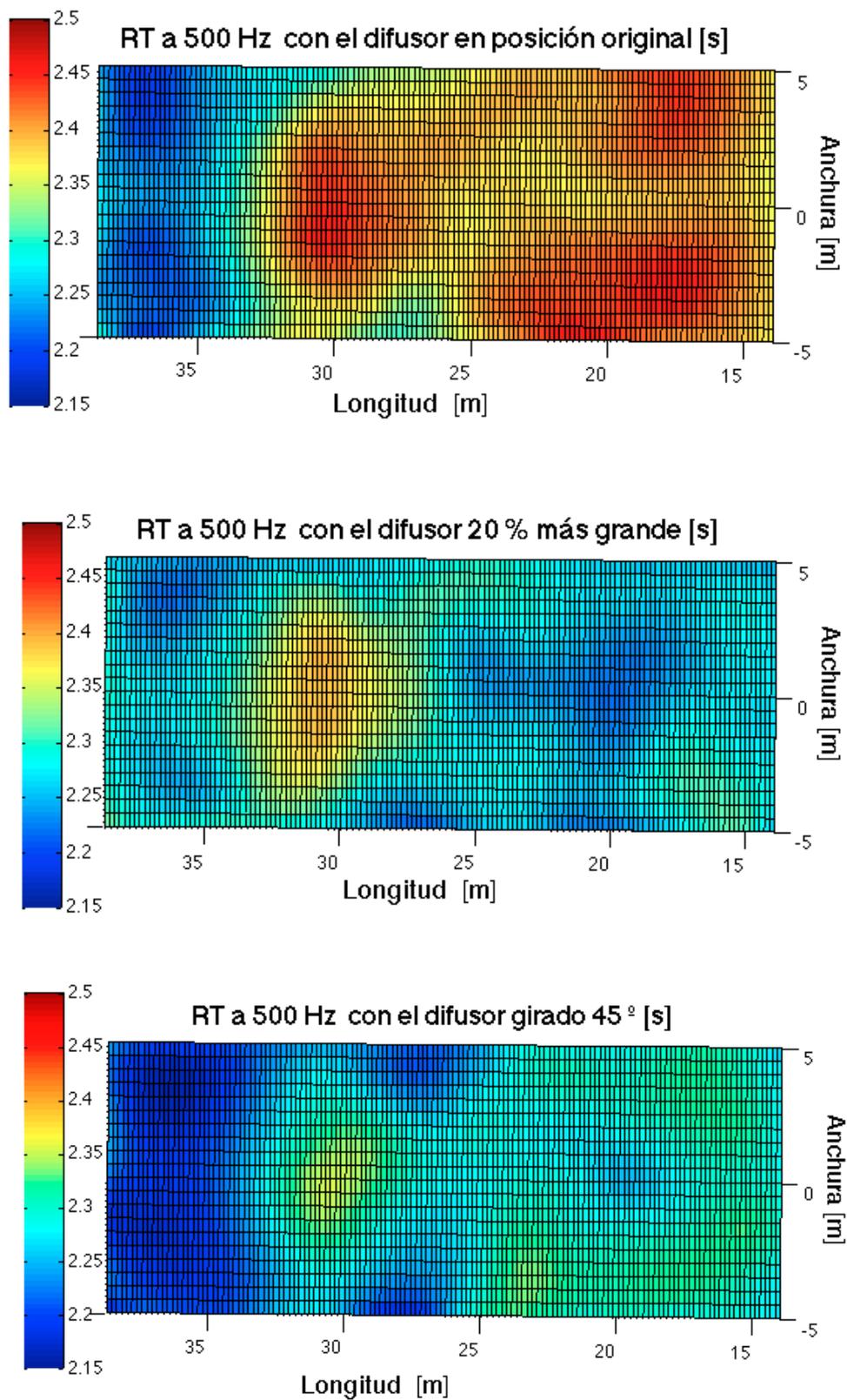


Fig.39. RT a 500 Hz en la sala para las 3 configuraciones

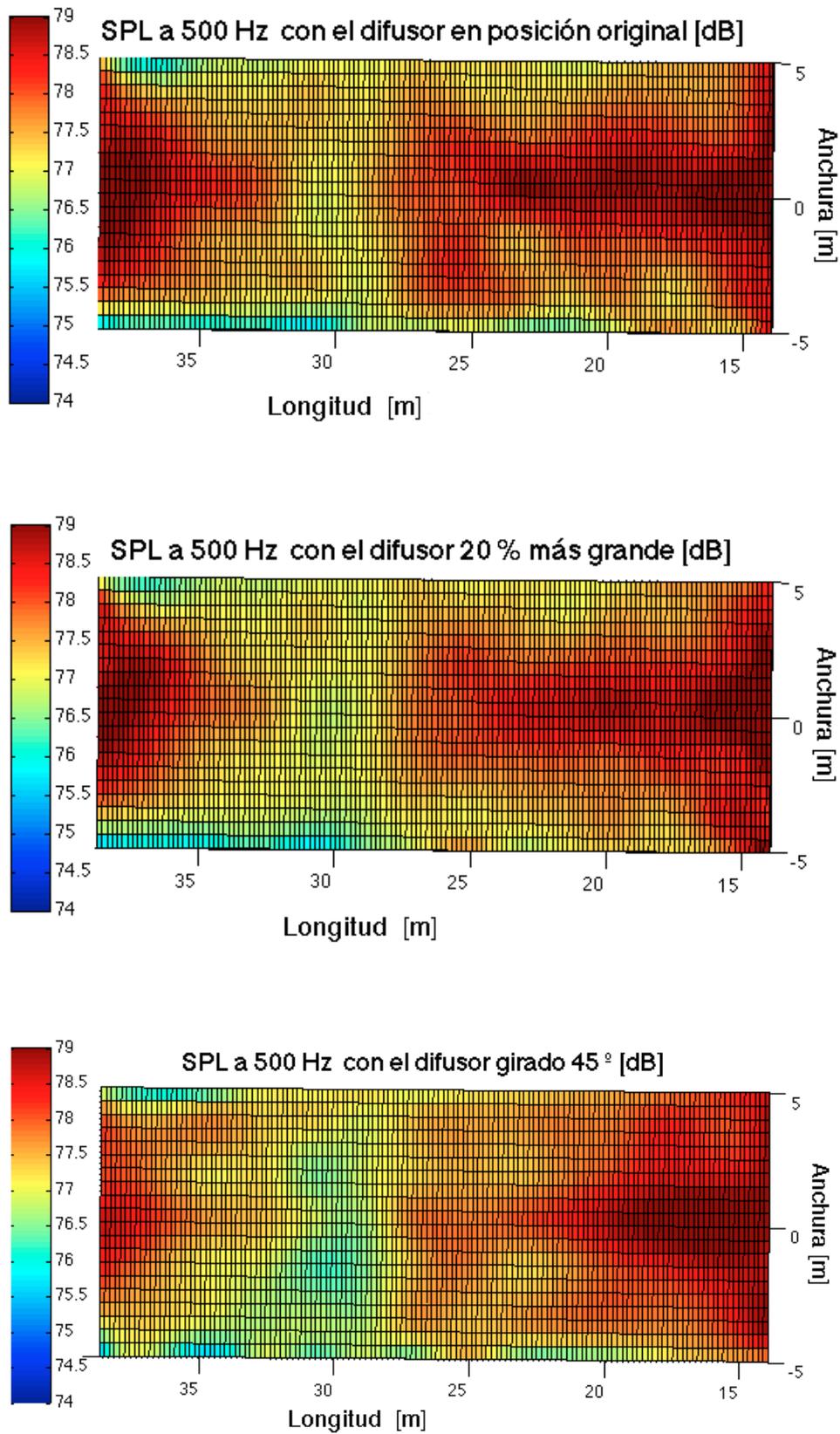


Fig.40. SPL a 250 Hz en la sala para las 3 configuraciones

#### **IV. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS**

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo se puede afirmar que el difusor laberíntico colocado en el auditorio de St.Gallen proporciona una mejoría de las características acústicas de la sala, sobretodo en el aumento del tiempo de reverberación.

El nuevo concepto de difusor laberíntico ofrece una nueva vía para la mejora de las propiedades acústicas de salas. Su bajo precio, en comparación con otros métodos, y proporciona una alternativa a los métodos actuales.

El uso de este nuevo tipo de difusor en otras salas requiere un mayor conocimiento de su funcionamiento, ya que hoy en día, éste no está claro. Para ello, es necesario un estudio mucho mas profundo sobre este tipo de difusores.

## V. ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1. Ecograma asociado a un receptor con indicación del sonido directo, las primeras reflexiones y la cola reverberante.....	8
Fig.2. : Fenómeno de difracción sonora .....	9
Fig.3. Fenómeno de reflexión sonora .....	10
Fig.4. Representación del $T_{60}$ .....	10
Fig.5. Difusor MLS .....	12
Fig.6. Difusor QRD bidimensional .....	12
Fig.7. Difusor PRD.....	12
Fig.8. Tonhalle St. Gallen después de la reforma.....	13
Fig.9. Plano de perfil de Tonhalle St. Gallen .....	14
Fig.10. Plano de la planta de Tonhalle St.Gallen .....	14
Fig.11. Puntos de fuente y de medida en la sala.....	15
Fig.12. Puntos de medida en el escenario. ....	15
Fig.13. Modelo a escala del difusor.....	18
Fig.14. Interface HR-2000.....	18
Fig.15. Micrófono MIC-01.....	19
Fig.16. Genelec modelo 8030A.....	19
Fig.17. Medidas de la cámara reverberante a escala .....	20
Fig.18. Buje colocado en el difusor para poder unir el pie de micrófono .....	21
Fig.19. Modelo a escala unido a la estructura, en la cámara reverberante a escala .....	21
Fig.20. Medida de la respuesta impulsiva por el método MLS.....	22
Fig.21. Coeficiente de scattering del modelo real .....	23
Fig.22. Vista del modelo informatico sin cúpula realizado con Autocad .....	25
Fig.23. Vista del modelo informatico completo realizado con Autocad.....	25
Fig.24. Modelo importado con el plugin dxf2geo .....	26
Fig.25. Modelo final importado a Catt Acoustic.....	26
Fig.26. Comprobación de las pérdidas del modelo. ....	27
Fig.27. Puntos de medida .....	27
Fig.28. Puntos de medida en la sala .....	31
Fig.29. SPL a 250 Hz en la sala sin y con difusor.....	32
Fig.30. RT a 125 Hz en la sala sin y con difusor.....	33
Fig.31. RT a 500 Hz en la sala sin y con difusor.....	34
Fig.32. Puntos de medida en el escenario.....	34
Fig.33. SPL a 125 Hz en el escenario sin y con difusor.....	35
Fig.34. RT a 125 Hz en el escenario sin y con difusor.....	36
Fig.35 RT a 250 Hz en el escenario sin y con difusor.....	36
Fig.36. Configuración con el difusor 20% más grande.....	37
Fig.37. Configuración con el difusor girado 45° .....	37
Fig.38. RT a 500 Hz en el escenario sin para las 3 configuraciones.....	39
Fig.39. RT a 500 Hz en la sala para las 3 configuraciones .....	41
Fig.40. SPL a 250 Hz en la sala para las 3 configuraciones.....	42

## VI. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Datos acústicos de la sala.....	14
Tabla 2: Resultados de medida del RT en el escenario .....	16
Tabla 3: Resultados de medida del EDT en el escenario.....	16
Tabla 4: Resultados de medida de G en el escenario.....	16
Tabla 5: Resultados de medida del RT en la sala .....	16
Tabla 6: Resultados de medida del EDT en la sala .....	16
Tabla 7: Resultados de medida de G en la sala .....	17
Tabla 8: Comparación de resultados de RT de la simulación. ....	28
Tabla 9: Comparación de resultados de EDT de la simulación.....	28
Tabla 10: Comparación de resultados de G de la simulación.....	29
Tabla 11: Coeficientes de absorción utilizados para la simulación.....	30
Tabla 12: Estudio del SPL en la sala .....	31
Tabla 13: Estudio del RT en la sala.....	32
Tabla 15: Estudio del RT en el escenario .....	35
Tabla 16: Estudio del RT en el escenario para otras configuraciones del difusor.....	38
Tabla 17: Estudio del SPL en el escenario para otras configuraciones del difusor.....	38
Tabla 18: Estudio del RT en el escenario para otras configuraciones del difusor.....	40
Tabla 19: Estudio del SPL en el escenario para otras configuraciones del difusor.....	40

## VII. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Higiní Arau-Puchades, Increasing the Acoustic Volume of Performance Spaces without Altering the Internal Dimensions
- [2] Standard ISO 3382, (2009)
- [3] ISO/DIS 17497-1 — Measurement of the sound scattering properties of surfaces — Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room. ISO. 2001
- [4] CATT-Acoustic v8 - User's manual
- [5] Trevor J. Cox, Peter D'Antonio. Acoustic Absorbers and Diffusers
- [6] Leo Beranek, Concert and Opera Halls - How They Sound
- [7] Lennart Karlen, Akustik i rum och byggander.  
Antoni Carrión Isbert, Diseño acústico de espacios arquitectónicos  
Robert. W. Young, J. Acoustical Society of America, (1959), Vol. 31, no 7, p 912-921  
Audiomatica. “CLIO electrical & acoustical test. User's manual. V.4.0”. Audiomatica  
[www.ruvegaudio.com/images/pdf/MLS.pdf](http://www.ruvegaudio.com/images/pdf/MLS.pdf). “La señal MLS (Maximum length sequence)”.