

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Caracterización, simulación y acondicionamiento de recintos de tamaño pequeño y medio



Grado en Ingeniería
en Tecnologías de Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Autor: Aitor Gartzaron Etxeberria

Tutor: Ricardo San Martín Murugarren

Pamplona, 1 de Julio de 2016

Contenido

Resumen.....	4
Abstract	4
Palabras Clave	4
1-INTRODUCCIÓN.....	5
2-CAMPO SONORO EN RECINTOS	6
2.1-Condicionantes del sonido en un recinto	6
2.1.1-Propagación del sonido en un recinto cerrado.....	6
2.1.2-Sonido reflejado.....	6
2.1.3-Percepción subjetiva de las primeras reflexiones. Ecos	8
2.1.4-Eco flotante.....	9
2.1.5-Modos propios de una sala.....	9
2.2-Efectos Acústicos	11
2.2.1-Absorción del sonido.....	11
2.2.2-Reflexión del sonido.....	12
2.2.3-Difusión del sonido	12
2.3-Teoría Acústica.....	13
2.3.1-Acústica geométrica.....	13
2.3.2-Acústica estadística.....	15
2.3.3-Acústica ondulatoria	16
2.4-Parámetros acústicos.....	16
2.4.1-Temporales	16
2.5-Acústica de salas pequeñas	20
2.5.1-Problemas comunes a todas las salas pequeñas	20
3-PROCESO EXPERIMENTAL	23
3.1-Requisitos de la ISO 3382.....	23
3.2-Requisitos de la EBU-Tech. 3276 2ª Edición	24
3.3-Requerimientos para medición de Modos Propios:	25
3.4-Dispositivo Experimental	25
Para la simulación y análisis:.....	26
4-ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS RECINTOS.....	27
4.1-La Nabe	27
4.1.1-Localización:.....	27

4.1.2-Análisis basado en ISO-3382	30
4.1.3-Análisis basado en EBU Tech. 3276 2ªEdición	33
4.1.4-Análisis de modos propios	41
4.2-Iza	49
4.2.1-Localización:	49
Análisis basado en ISO-3382	52
Análisis basado en EBU Tech. 3276 2ª Edición.....	57
Análisis de los modos propios	62
4.3-Oricin.....	70
4.3.1-Localización:.....	70
4.3.2-Análisis basado en ISO-3382	74
4.3.2.A-Sala de grabación, control y escucha.....	74
4.3.2.B-Sala de grabación de instrumentos de percusión.....	79
4.3.3-Análisis basado en EBU Tech. 3276 2ª Edición	83
4.3.4-Análisis de modos propios	90
4.3.4.A-Sala de grabación, control y escucha.....	90
4.3.4.B-Sala de percusión.....	97
5-Comparación entre salas.....	103
5.1-Basado en ISO-3382	103
5.1.1-Parámetros temporales	103
5.1.2-Parámetros energéticos.....	106
5.2-Basado en EBU-3276.....	108
5.2.1-Tiempo de reverberación.....	108
5.2.2-Respuesta en frecuencia de las salas.....	109
5.2.3-Ruido de fondo de las salas.....	109
6-Simulación de las salas analizadas	111
6.1-Modelado virtual de la sala. SketchUp.	111
6.1.2-Introducción.....	111
6.2-Ajuste manual con ODEON	112
6.2.1-Asignación de los materiales.....	112
6.2.2-Ajuste manual	113
6.3-Análisis del ajuste en frecuencias desajustadas	116
6.3.1-La Nabe	116

6.3.2-Iza	118
6.3.3-Orícin	118
7-Propuestas de acondicionamiento	120
8-Conclusiones y Líneas Futuras	122
9-Bibliografía	124

Resumen

El objetivo de este Trabajo Final de Grado es, por un lado, analizar las propiedades acústicas de una sala multifuncional de tamaño medio y, por otro proponer y evaluar diferentes soluciones de acondicionamiento (no se evalúan) que permitan mejorar su acústica como local de grabación sin limitar los requisitos que las otras funcionalidades de la sala tengan.

Por otro lado se ha realizado el mismo procedimiento en tres recintos de grabación de tamaño pequeño. Dos de nivel profesional y otro de nivel medio. Se comparan los tres y se sacan las conclusiones pertinentes. También se valoran las diferencias entre las propiedades acústicas de habitaciones de tamaño mediano y las de tamaño pequeño.

Abstract

The aim of this End-of-Degree Project is, on the one hand, analyze the acoustic properties of a multi-functional medium-sized room and on the other hand to propose and evaluate different solutions (not evaluated) to improve the acoustics conditions of the room like recording room without limit requirements that the other features of the room have.

Furthermore it was performed the same procedure in three small size recording rooms. Two of them are professional level studios and the two others mid-levels. Comparing the three and relevant conclusions are drawn. The differences between the acoustic properties of medium-sized rooms and small-size rooms are also valued.

Palabras Clave

- Acústica de salas
- Acústica de salas pequeñas
- Análisis acústico de salas
- Salas de grabación
- ODEON
- WinMLS
- Modos propios
- Tiempo de reverberación
- ISO-3382
- Ebu Tech. 3276

1-INTRODUCCIÓN

El objetivo de este TFG es, por un lado analizar en profundidad las propiedades acústicas de una sala multifuncional de tamaño medio y de dos de tamaño pequeño. Para ello se procederá a la toma de medidas en todas ellas, medidas acústicas y geométricas, su posterior procesado y análisis. Una vez analizado se concluirán una serie de recomendaciones para el acondicionamiento de los recintos.

Con la intención de contextualizar todo el análisis de las características acústicas de los recintos, el primer capítulo es una introducción teórica. En este capítulo se explican y describen brevemente los conceptos teóricos necesarios para entender el resto del documento. También se describen los parámetros acústicos con los que se trabaja en el resto del documento.

Las medidas se han realizado siguiendo una serie de recomendaciones especificadas en normas de frecuente utilización. Estas recomendaciones a seguir se describen en un capítulo del presente documento, tanto sus requisitos como sus formas de interpretar los resultados obtenidos, y todas ellas se recogen en la ISO-3382. La medida de parámetros acústicos en recintos viene especificada en la ISO 3382. Por otro lado, para poder analizar con mayor profundidad el tipo de salas de tamaño medio y pequeño que son objeto del trabajo, se ha seguido también una serie de recomendaciones que son aplicables a salas de tamaño pequeño dedicadas a la escucha de material sonoro. Estas recomendaciones se recogen en la EBU Tech. 2º Edición 3276 editada por la *European Broadcasting Union*.

Destacar que el estudio de la acústica de salas, históricamente se ha centrado casi de manera exclusiva en recinto de gran tamaño como auditorios, teatros, salas de conciertos, etc... (existen muchos estudios y herramientas en este campo) dejando el aspecto de la acústica de salas de tamaño pequeño/medio con pocas normativas, estudios teóricos y prácticos.

En acústica no existe una regla de oro que aplicándola tengamos certeza de obtener una acústica ideal ya que cada recinto tiene un comportamiento distinto (dimensiones, geometría, disipación de la energía acústica...). Esta situación de falta de estudios y herramientas para salas pequeñas, añadido a que la acústica en general es algo subjetivo ha generado que *"cada maestrillo tiene su librillo"*. Por lo tanto, es un campo aun por estudiar en profundidad.

2-CAMPO SONORO EN RECINTOS

2.1-Condicionantes del sonido en un recinto

2.1.1-Propagación del sonido en un recinto cerrado

La energía radiada por una fuente sonora en un recinto cerrado llega a un oyente ubicado en un punto cualquiera del mismo de dos formas diferentes: una parte de la energía llega de forma directa (sonido directo), es decir, como si fuente y receptor estuviesen en espacio libre, mientras que la otra parte lo hace de forma indirecta (sonido reflejado), al ir asociada a las sucesivas reflexiones que sufre la onda sonora 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 de los siguientes factores: camino recorrido por el rayo sonoro y grado de absorción de los materiales del recinto.

Cuanto mayor sea la distancia recorrida y más absorbentes sean los materiales empleados, menor será la energía asociada tanto al sonido directo como a las sucesivas reflexiones.

En la Figura 2.1 se puede ver la línea como la llegada del sonido directo al receptor cuya energía sólo depende de la distancia de la fuente a éste. Y en línea continua la llegada del sonido reflejado.

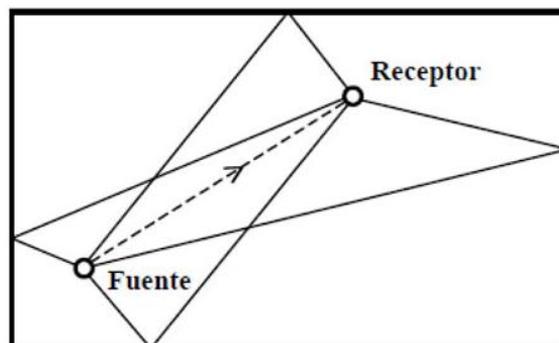


Figura 2.1 – Sonido directo y primeras reflexiones

2.1.2-Sonido reflejado

Se llama sonido reflejado al fenómeno asociado a las sucesivas reflexiones que sufre una onda sonora cuando incide sobre diferentes superficies de un recinto. Es decir, cuando la onda encuentra un obstáculo que no puede traspasar ni rodear, Figura 2.2.

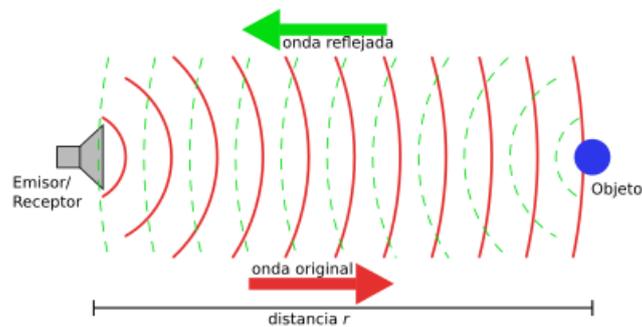


Figura 2.1 – Fenómeno de la reflexión

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, y una segunda formada por reflexiones tardías que constituyen la denominada cola reverberante.

Primeras reflexiones:

En general, las primeras reflexiones presentan un valor energético mayor que la cola reverberante. Estas reflexiones, como depende directamente de la geometría del recinto, son específicas en cada punto y, por tanto, determinan las características acústicas propias de la sala, juntamente con el sonido directo.

Son aquellas que llegan inmediatamente después del sonido directo. Habitualmente de orden de $n \leq 3$. Se habla de orden n cuando el rayo sonoro asociado ha incidido n veces sobre las diferentes superficies del recinto antes de llegar al receptor. Se suele establecer un límite temporal para la zona de primeras reflexiones de aproximadamente 100 ms desde la llegada del sonido directo, aunque dicho valor varía en cada caso concreto en función de la forma y del volumen del recinto.

Reflexiones tardías

También llamadas *cola reverberante*, estas reflexiones generalmente son de orden superior a 3. La densidad es mayor que las primeras al haberse dispersado al chocar con las superficies del recinto. El nivel sonoro es menor ya que con el recorrido del sonido y junto a la absorción de las superficies este es atenuado.

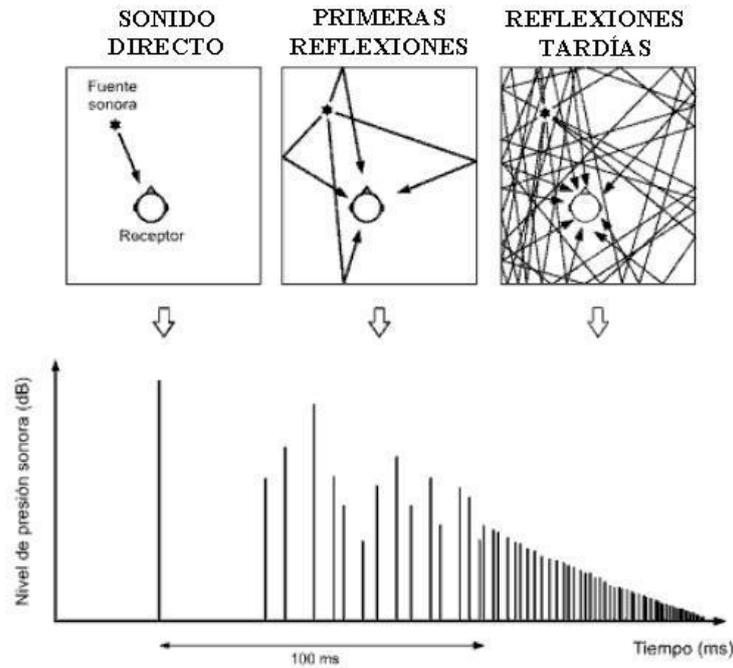


Figura 2.2 – Gráfica de sonido directo, primeras reflexiones y reflexiones tardías a lo largo del tiempo

La representación gráfica temporal de la llegada de las diversas reflexiones acompañadas de su nivel energético correspondiente, se puede observar en la Figura 2.3.

2.1.3-Percepción subjetiva de las primeras reflexiones. Ecos

El eco es un fenómeno que consiste en escuchar un sonido después de haberse extinguido la sensación producida por la onda sonora. Se produce eco cuando la onda sonora se refleja perpendicularmente en una pared.

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. Esto es bueno a la hora de transmitir un mensaje oral ya que eleva su inteligibilidad y las reflexiones aumentan la sensación de sonoridad.

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.

En tal caso, dicha reflexión se denomina eco. El retardo de 50 ms equivale a una diferencia de caminos entre sonido directo y la reflexión de, aproximadamente, 17 m.

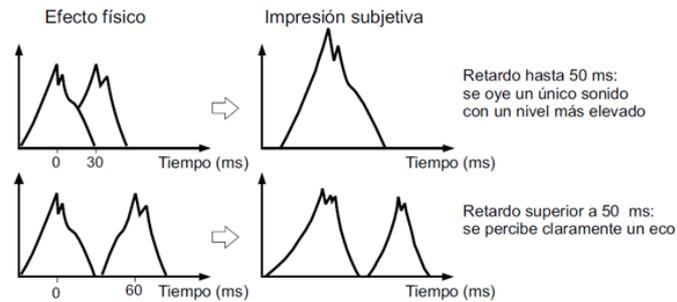


Figura 2.4 – Superposición de sonidos con diferentes retardos e impresión subjetiva asociada.

2.1.4-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.

Produce la recepción del sonido en tiempos iguales interfiriendo con la legitimidad del sonido directo. Nuestro cerebro interpreta estas rápidas y continuas frecuencias como un tono particular. Los problemas más comunes por éste fenómeno son la pérdida de imagen estéreo del sonido, fatiga auditiva, sonido metálico y sonido opaco por mucha reverberación.

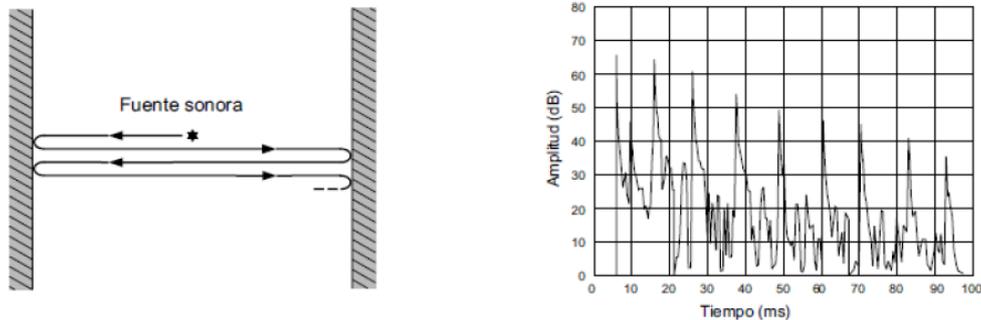


Figura 2.5 – Eco flotante generado por dos superficies paralelas y curva de un eco flotante.

2.1.5-Modos propios de una sala

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. Cada modo propio va asociado a una frecuencia, igualmente denominada frecuencia propia, y está caracterizado por un nivel de presión sonora que varía en función del punto considerado.

El número de modos propios es ilimitado, si bien su distribución a lo largo del eje frecuencial 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 reducidas, por

ejemplo, estudios de grabación.

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:

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

Donde:

L_x , L_y y L_z representan las dimensiones de la sala en metros
k, m, z 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.

Por otra parte, la densidad de modos propios aumenta con la frecuencia. Ello significa que, a partir de una cierta frecuencia, el concepto de coloración del sonido deja de tener sentido, ya que una gran densidad de modos propios es equivalente a la ausencia de éstos, por el hecho que dejan de existir concentraciones discretas de energía.

La fórmula empírica que permite calcular, para cada sala, la frecuencia límite superior a partir de la cual los modos propios tienen una influencia prácticamente nula, es la siguiente:

$$f_{max} = 2000 \sqrt{\frac{T_{mid}}{V}}$$

Donde:

T_{mid} es el valor del tiempo de reverberación
V es el volumen de la sala expresado en m^3

En el caso de recintos grandes, como teatros, salas de conciertos o auditorios, la coloración del sonido a causa de los modos propios es prácticamente nula y, por tanto, no se suele tener en cuenta en la fase de diseño de este tipo de salas.

Según la trayectoria que siguen los frentes de ondas, se pueden clasificar los modos propios de vibración de un recinto rectangular en tres grupos:

- Modos axiales: Aquel formado como resultado de una onda estacionaria fluctuante entre dos superficies $(n_x, 0, 0)$, $(0, n_y, 0)$ y $(0, 0, n_z)$.
- Modos tangenciales: Aquel formado como resultado de la reflexión de una onda estacionaria entre cuatro superficies. $(n_x, n_y, 0)$, $(n_x, 0, n_z)$ y $(0, n_y, n_z)$.
- Modos oblicuos: Los modos oblicuos se forman por la relación de seis o más

superficies de la sala. Cuando la distancia de separación de trazado formado por seis o más superficies de la sala coincide con la longitud de onda de una frecuencia, se forma una onda estacionaria oblicua (n_x, n_y, n_z).

2.2-Efectos Acústicos

La buena acústica de cualquier tipo de recinto, una vez fijado su volumen y definidas sus formas, radica en primer lugar en la elección de los materiales más adecuados para utilizar como revestimientos del mismo, con el objetivo de obtener unos tiempos de reverberación óptimos. Además, según la funcionalidad objetivo del recinto, resulta necesario potenciar la aparición de primeras reflexiones (es el caso de teatros) y/o conseguir una buena difusión del sonido (el caso de salas de conciertos). Estos son los efectos que conseguiremos según qué tipo de materiales utilicemos:

2.2.1-Absorción del sonido

Para la calidad acústica de un recinto, es determinante la reducción de la energía asociada a las ondas sonoras, tanto en su propagación a través del aire, como cuando inciden sobre las superficies límite. Cuando una onda sonora alcanza una superficie, la mayor parte de su energía se refleja, pero un porcentaje de ésta es absorbida por el nuevo medio. Los materiales tienen un coeficiente de absorción que indica la cantidad de sonido que absorbe una superficie en relación con la cantidad de sonido incidente.

Dicha reducción energética, viene dada generalmente por los siguientes elementos: público, sillas, los materiales absorbentes selectivos (resonadores), superficies de la sala susceptibles de entrar en vibración (puertas, ventanas...), el aire y los materiales rígidos no porosos utilizados en la construcción de las paredes y techos de los recintos (hormigón).

Las características de absorción de los materiales absorbentes y de los resonadores dependen no solo de sus propiedades físicas, sino también en gran parte de un sinnúmero de condiciones y de detalles constructivos. Por ello, para realizar cualquier diseño resulta imprescindible disponer de los coeficientes de absorción α obtenidos mediante ensayos de laboratorio. Tipos de materiales en función de su absorción:

- *Materiales resonantes:* Son los que presentan absorción máxima a una frecuencia determinada, la frecuencia de resonancia o propia del material.
- *Materiales porosos:* Absorben más sonido a medida que aumenta la frecuencia.
- *Materiales en forma de panel:* Absorben más sonido a bajas frecuencias.

2.2.2-Reflexión del sonido

El diseño de elementos reflectores, posibilita la aparición de primeras reflexiones, útiles en zonas de público. Estos elementos están constituidos por materiales lisos, no porosos y totalmente rígidos capaces de reflejar la mayor parte de energía sonora que incide sobre ellas.

No todos los recintos necesitan elementos reflectores, pero sí aquellos destinados a la palabra (teatros y salas de conferencia), y la música no amplificada (salas de conciertos sinfónicos). Pero no todas las reflexiones son útiles, ya que dependiendo del uso que se le vaya a dar al recinto, dichas reflexiones deberán actuar en tiempos diferentes. En el caso de salas destinadas a la palabra, serán útiles todas aquellas reflexiones que lleguen al receptor en los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo. Para el caso de recintos destinados a música, se amplía hasta los 80 ms. El aumento de las primeras reflexiones, incrementa la sonoridad y la claridad musical.

2.2.3-Difusión del sonido

La difusión del sonido en una sala se consigue mediante la colocación de elementos expresamente diseñados para dispersar, de forma uniforme y en múltiples direcciones, la energía sonora que incide sobre los mismos.

La existencia de difusión en salas de conciertos significa que la energía de campo reverberante llegará a los oídos de los espectadores por igual desde todas las direcciones del espacio. Ello contribuirá a crear un sonido altamente envolvente y, por lo tanto, a aumentar el grado de impresión espacial existente. Cuanto mayor sea el grado de impresión espacial, mayor será la valoración subjetiva de la calidad acústica del recinto.

En ocasiones, la difusión es también utilizada para eliminar alguna de las anomalías que pueden aparecer. Dichas anomalías pueden aparecer en forma de coloraciones, desplazamiento de la fuente, ecos... Si bien cualquier superficie produce un cierto grado de difusión, la existencia de ornamentación, irregularidades y relieves en las superficies de una sala provoca un notable incremento de la difusión.

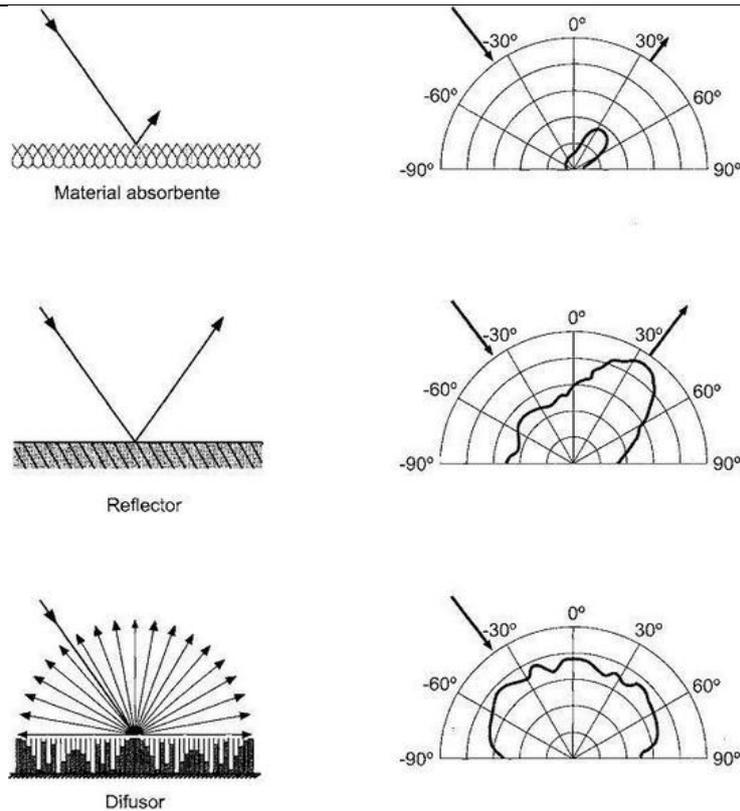


Figura 2.6 – Tipo de materiales y sus efectos acústicos

2.3-Teoría Acústica

Existen tres teorías denominadas acústica geométrica, acústica estadística y acústica ondulatoria. Éstas, constituyen las tres teorías clásicas que hacen posible conocer con rigor el comportamiento del sonido en el interior de un recinto.

2.3.1-Acústica geométrica

La hipótesis elemental de la teoría geométrica consiste en tratar los rayos sonoros como si fueran rayos de luz, es decir considerando que las reflexiones de los mismos sobre las distintas superficies son totalmente especulares y que, por lo tanto, verifican la ley de la reflexión.

Aplica las leyes de la óptica geométrica para deducir la dirección de propagación tras cada incidencia en las diferentes superficies del recinto y se ayuda de los coeficientes de absorción de cada material para calcular la energía perdida en cada reflexión.

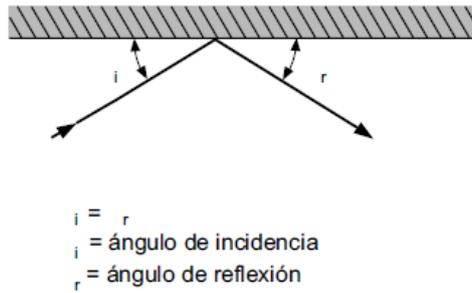


Figura 2.7 – Reflexión especular del sonido

Las leyes de la óptica son las siguientes:

- Ley de la reflexión de la luz. Ley de Snell:

Cuando un rayo de luz incide sobre una superficie reflejante plana el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. En la Figura 2.8, los dos ángulos son iguales, $\hat{i} = \hat{r}$, y ambos rayos permanecen en el mismo plano.

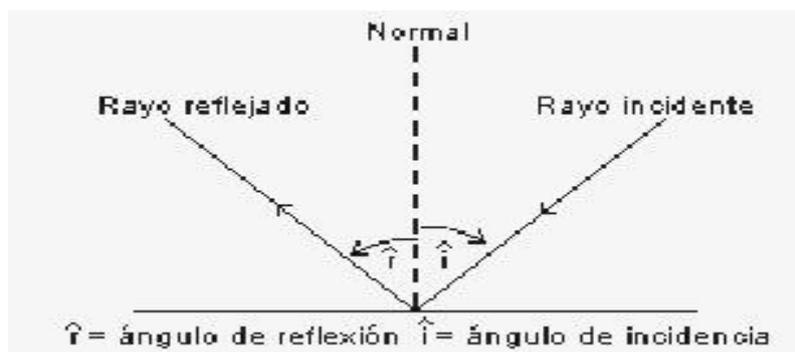


Figura 2.8 – Reflexión de la luz

Este modelo es una aproximación a la realidad ya que sólo en determinadas situaciones se da verdaderamente reflexión especular ya que es necesario que se cumplan los siguientes requisitos:

- Dimensiones grandes en comparación con la longitud de onda del sonido. En caso contrario, en el que las dimensiones son menores o similares a la longitud de onda, la onda sonora rodea la superficie y sigue propagándose como si el obstáculo no existiese. Dicho fenómeno se conoce con el nombre de difracción.
- Superficie lisa y muy reflectante. Si una superficie presenta rugosidades, la reflexión ya no es especular sino difusa, los rayos reflejados van en distintas direcciones debido a la rugosidad de la superficie. En caso que haya reflexión especular, todos los rayos reflejados tienen la misma dirección.

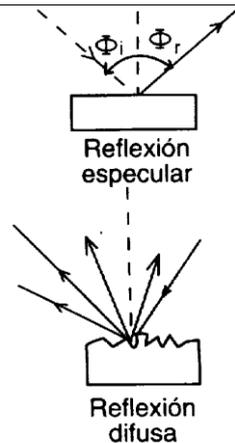


Figura 2.9 - Reflexión especular y reflexión difusa sobre una superficie

Con esta teoría se puede estudiar el sonido directo y las primeras reflexiones. Es solamente válida para medias y altas frecuencias ya que las bajas frecuencias se comportan de manera totalmente diferente. El software de simulación utilizado, ODEON, utiliza esta teoría para la aproximación del campo sonoro real.

2.3.2-Acústica estadística

Esta teoría estudia el comportamiento de la energía acústica en la sala desde una visión estacionaria. Es decir, cuando la fuente sonora comienza a emitir energía acústica en el interior del recinto, los rayos empiezan a propagarse libremente, transcurrido un tiempo que depende de la distancia de la fuente a las superficies del recinto, los rayos sonoros chocan y se producen reflexiones. La energía que se genera en la sala se va absorbiendo por las superficies y la absorción del medio. Cuando el conjunto absorbe la misma energía por unidad de tiempo que la emitida por la fuente, se llega a una situación estacionaria y a partir de ese momento la densidad de energía media que hay en la sala permanece constante.

Parte de la suposición de un campo sonoro uniforme en la sala. El estudio de la cola reverberante se realiza siguiendo la teoría estadística y por lo tanto el estudio del tiempo de reverberación. Para calcular el tiempo de reverberación se emplea principalmente las fórmulas de Sabine, Eyring o Arau-Puchades.

Todas las expresiones para el cálculo del tiempo de reverberación consideran condiciones de campo difuso, que se basa en lo siguiente:

- La fuente sonora emite con la misma intensidad en todas las direcciones.
- Las ondas reflejadas se propagan en todas las direcciones con igual probabilidad.
- La densidad de la energía sonora en un instante de tiempo determinado es la misma en cualquier posición de la sala.
- La energía sonora en un punto se obtiene mediante la suma de las medias

de todas las reflexiones que llegan a dicho punto, sin tener en cuenta las fases.

Es sólo una aproximación de la realidad ya que las reflexiones se distribuyen de manera no uniforme debido a los materiales, dimensiones y formas de la sala. En la realidad se deben considerar las fases de la onda y que las fuentes son un poco directivas.

2.3.3-Acústica ondulatoria

Contempla el fenómeno ondulatorio del sonido. Gracias a esta teoría se podrá estudiar la influencia del dimensionado y las proporciones del recinto en su calidad acústica. El estudio analítico de los modos propios, se realiza a través de la denominada acústica ondulatoria. Ya que éstos son la solución a la ecuación de ondas y ocurren a una frecuencia de resonancia.

2.4-Parámetros acústicos

Para el estudio acústico de una sala es necesario conocer sus propiedades y obtener sus cualidades subjetivas para poder valorar si las características del recinto son adecuadas para el tipo de actividad que se va a desarrollar en él.

Haciendo uso del método de la respuesta impulsiva se podrán obtener los diferentes parámetros acústicos que derivan de esta. El tiempo de reverberación está considerado como un parámetro fundamental que proporciona una descripción del carácter acústico de un recinto, pero con los valores asociados a los demás parámetros obtenidos a partir de la respuesta de impulso se logrará una descripción más detallada del carácter acústico de una sala.

2.4.1-Temporales

A partir del análisis de la curva de decaimiento energético, se han estudiado diferentes parámetros que pueden correlacionarse óptimamente con la impresión subjetiva. Cuantifican el grado de viveza de la sala y dos serán estudiados: El tiempo de Reverberación (T) y Early Decay Time (EDT).

Tiempo de reverberación (T):

Subjetivamente el tiempo de reverberación se interpreta como el tiempo de persistencia de un sonido en un recinto hasta hacerse inaudible. Técnicamente el tiempo de reverberación a una frecuencia determinada es el tiempo, expresado en

segundos, que transcurre desde que el foco emisor se detiene hasta el momento en que el nivel de presión sonora cae 60 dB con respecto a su valor inicial.

Se pueden calificar los recintos en función de su “viveza”. Un recinto vivo tendrá un tiempo de reverberación (T) grande (iglesias, naves industriales...). Por el contrario, un recinto sordo o apagado será aquel que tenga un tiempo de reverberación (T) pequeño (estudios de grabación, locutorios...).

Se puede expresar el T partiendo de un rango dinámico inferior a 60 dB. Si el T se deriva del tiempo en que la curva de decrecimiento alcanza primero 5 dB y 25 dB por debajo del nivel inicial, adquiere el nombre de T_{20} . Si se utilizan valores de decrecimiento entre 5dB y 35dB por debajo del nivel inicial se denomina T_{30} .

El tiempo de reverberación varía con la frecuencia, tendiendo a disminuir a medida que ésta aumenta. Esto se debe, en parte, a la mayor absorción a frecuencias altas de los materiales empleados normalmente para revestir los recintos, así como a la absorción del aire, que especialmente se manifiesta en recintos grandes y a altas frecuencias. Así pues, generalmente, añadir material absorbente en un recinto reduce el nivel de presión sonora de las ondas reflejadas y también el tiempo que tarda en desaparecer el sonido desde que la fuente deja de emitir, el tiempo de reverberación (T).

Early Decay Time (EDT):

El parámetro EDT se define como seis veces el tiempo de transcurre desde que el foco emisor deja de radiar hasta que el nivel de presión sonora cae 10dB. El decaimiento teórico de la energía sonora en una sala sigue una evolución exponencial que se traduce en una línea recta al pasar a escala logarítmica. Dicho decaimiento si se produce con una difusión perfecta del sonido coincidirá con el de T. Pero en la práctica, el EDT puede variar significativamente con respecto al T por una falta de difusión perfecta. Esto se ve en la Figura 2.10.

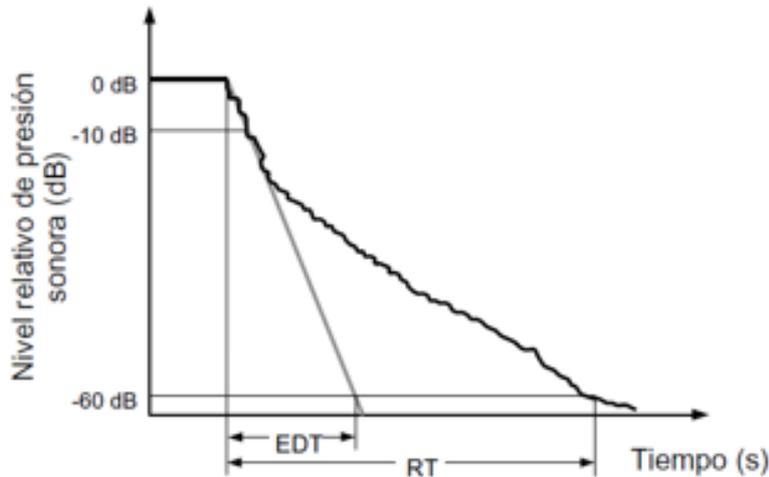


Figura 2.10 – Curva de energía vs. EDT medido en un punto del recinto

Está más relacionado con la impresión subjetiva de viveza que el T usado tradicionalmente. Así pues, el EDT es subjetivamente más importante y está relacionado con la reverberación percibida, mientras que el tiempo de reverberación (T) está más relacionado con las propiedades físicas del recinto. En la Figura 2.11 se pueden ver todos los parámetros temporales idealmente.

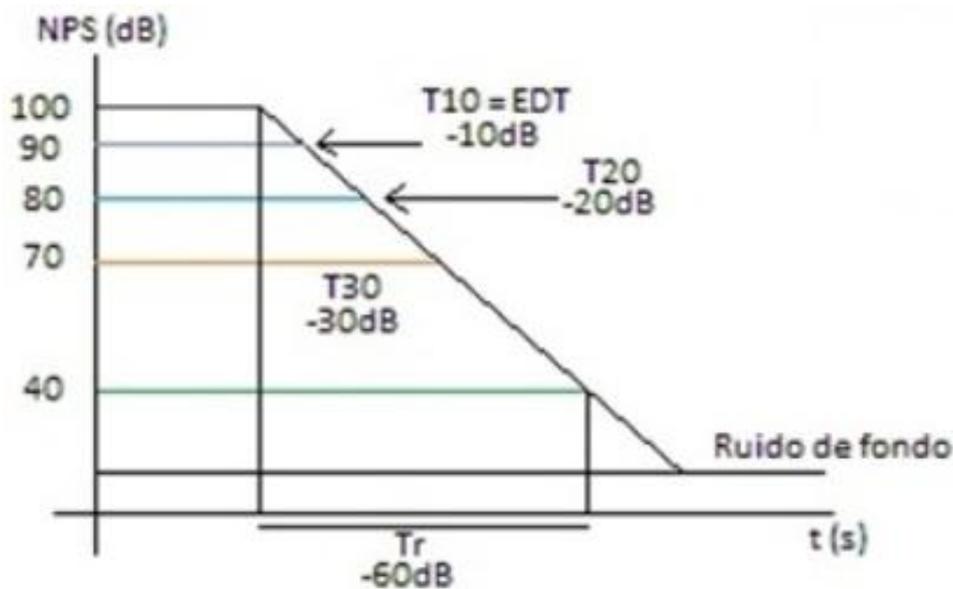


Figura 2.11 – Parámetros acústicos temporales

2.4.2-Energéticos

Estos parámetros acústicos relacionan energía temprana con energía tardía. Están asociados a las primeras reflexiones y la existencia de primeras reflexiones en un punto de la sala produce un aumento de la inteligibilidad y sonoridad. Cuanto mayor

sea el valor de estos parámetros, más elevada será la inteligibilidad en el punto considerado.

Claridad de la voz (C_{50}):

La claridad de la voz (C_{50}) es un parámetro relacionado con la inteligibilidad del mensaje oral. Es la relación entre la energía del sonido que llega al oyente durante los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo, es decir, incluye el sonido directo y las primeras con las que llegan más tarde. Muestra el grado de separación entre los diferentes sonidos de un mensaje oral.

Los valores recomendados en ingeniería acústica para este parámetro están por encima de 2dB. Si el valor calculado de este parámetro está por debajo de 2dB, el mensaje oral resulta confuso. Cuanto mayor sea dicho valor, mejor será la inteligibilidad de la palabra y la sonoridad. Para caracterizar una sala con un único valor, es suficiente utilizar el denominado “*Speech Average*”, que se calcula a partir del C_{50} , con una proporción en que las distintas bandas de frecuencia influyen en la inteligibilidad de la palabra:

$$C_{50}(\textit{speech average}) \cong 0.15 \cdot C_{50}(500) + 0.25 \cdot C_{50}(1k) + 0.35 \cdot C_{50}(2k) + 0.25 \cdot C_{50}(4k) \quad (\textit{dB})$$

Claridad musical (C_{80}):

La claridad musical (C_{80}) indica el grado de separación entre los diferentes sonidos que conforman una composición musical. Nos da información respecto a la cantidad de energía sonora que llega en los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo y la energía que llega con posterioridad.

Un C_{80} alto significa que la energía sonora inmediata es muy superior a la tardía, entonces se dice que el sonido es muy claro. Como valor representativo se utiliza el “*Music Average*” que se calcula de la siguiente manera:

$$C_{80}(\textit{music average}) = \frac{C_{80}(500) + C_{80}(1k) + C_{80}(2k)}{3} \quad (\textit{dB})$$

El margen de valores recomendados cuando la sala está vacía es:

$$-4 \leq C_{80} \leq 0 \text{ dB}$$

Para la sala ocupada, aconseja el siguiente margen de valores:

$$-2 \leq C_{80} \leq 2 \text{ dB}$$

(Estas recomendaciones no son para salas pequeñas)

2.5-Acústica de salas pequeñas

Es difícil expresar las propiedades acústicas de salas pequeñas de forma satisfactoria mediante la medición física. La descripción de las propiedades adecuadas para las salas pequeñas, están en fase de desarrollo. En cambio, la descripción de la acústica de las salas de gran tamaño está mucho más desarrollada, ya que la acústica de salas pequeñas no ha recibido la misma atención.

El problema central que contribuye a que esto sea así es que las propiedades de la sala pequeña cambian drásticamente en las frecuencias audibles. Esto requiere un enfoque combinado de métodos acústicos diferentes para bajas y altas frecuencias.

Cada sala tiene un comportamiento acústico específico determinado por su forma geométrica, sus dimensiones y su capacidad de disipar la energía acústica. Estas características acústicas de la sala son independientes de las fuentes sonoras que en ella coloquemos. Así pues, si una determinada sala presenta un problema acústico, el problema subsistirá aunque pongamos en ella el equipo de sonido más caro del mercado.

Desde el punto de vista acústico, una sala pequeña es una sala con un volumen inferior a unos 300 m². Esto incluye salas de estar, instalaciones de cine en casa, aulas pequeñas, salas de control y locutorios (en estudios de grabación, radio y televisión), etc.

2.5.1-Problemas comunes a todas las salas pequeñas

El acondicionamiento acústico de las salas pequeñas es diferente al de las grandes. Las salas pequeñas necesitan tratamientos con mayor nivel de absorción en sus materiales si las comparamos con salas grandes. Esto es debido a que sus superficies están muy cerca de los elementos electroacústicos (altavoces, etc...) o de los elementos productores de energía sonora (instrumentos musicales, voz humana, etc...)

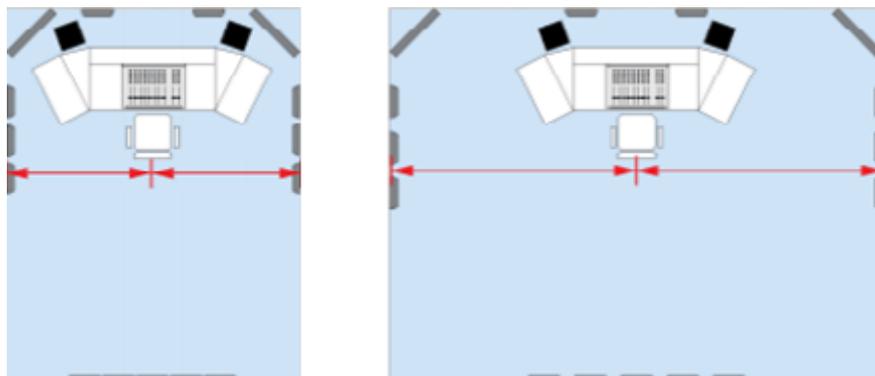


Figura 2.12 – Diferencia visual de tamaños en salas pequeñas.

En salas pequeñas, hay cuatro problemas fundamentales a tener en cuenta que se deben intentar corregir para una acústica óptima:

- Primeras reflexiones: Las primeras reflexiones se producen en las superficies cercanas a los monitores o elementos electroacústicos, como mesas, paredes, suelo y techo, que reflejan el sonido hacia la posición de escucha. Como el trayecto que debe hacer el sonido para alcanzar nuestra posición es más largo que el trayecto del sonido directo que viene de los altavoces, las primeras reflexiones llegan con un pequeño retraso. Estas reflexiones producen fatiga auditiva y alteran la respuesta en frecuencia de la sala, ya que producen el efecto de filtro peine (*comb filter*), resultado de sumar dos señales iguales retardadas.

La colocación de materiales absorbentes, especialmente formulados para tener una elevada absorción sonora, es la mejor manera de minimizar la energía que aportan las primeras reflexiones. Existen varios tipos de materiales de esta clase. Al aplicar absorción únicamente donde es realmente necesaria se evita que el recinto suene demasiado apagado por exceso de absorción. Las salas de control no se deben cubrir con material absorbente más de un 45-70% de la superficie total de paredes y techos.

Para evitar el eco flotante entre el suelo y el techo del estudio, se puede instalar paneles absorbentes.

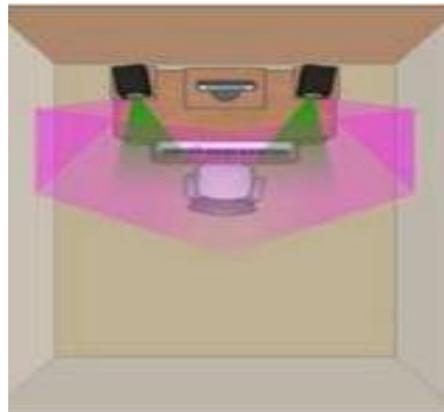


Figura 2.13 – Reflexiones laterales.

- Reflexiones tardías: Las reflexiones tardías son las que llegan a partir de unos 50 ms después del sonido directo. Suelen venir después de que el sonido haya rebotado en varias superficies, o incluso directamente de la pared trasera, si esta se encuentra lo suficientemente alejada. Estas reflexiones se consideran beneficiosas para la calidad acústica de la sala, siempre y cuando sean equiprobables en cualquier dirección. Las salas pequeñas suelen tener muy mala difusión. Contienen pocas superficies con orientaciones aleatorias y no son capaces de reflejar el sonido en muchos ángulos para generar un campo acústico difuso.

La difusión se consigue colocando difusores. Así conseguiremos reflexiones difusas. Se producen cuando la longitud de onda es comparable con la rugosidad y asperezas de los materiales. Las reflexiones difusas se propagan en direcciones aleatorias. Se sitúan principalmente en la parte trasera de la sala. Una sala con buena difusión proporciona una agradable sensación de amplitud y viveza,

evitando que se produzca la desagradable sensación de sala vacía.

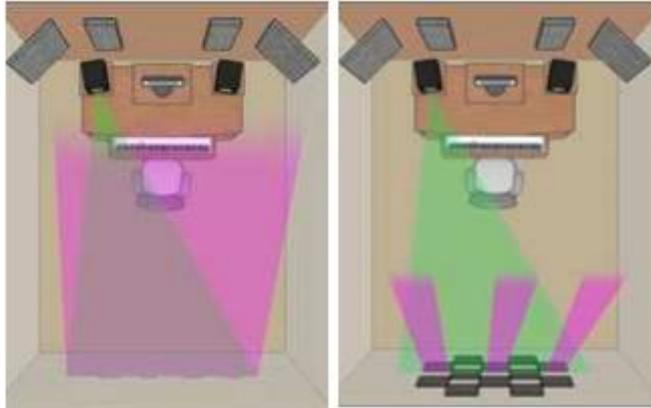


Figura 2.13 – Reflexiones desde pared trasera. Con y sin absorbentes.

- Las resonancias o Modos propios: En las salas pequeñas, las distancias entre las paredes y entre el techo y el suelo son del mismo orden que las longitudes de onda de muchas frecuencias graves reproducidas por los altavoces. Esto es perjudicial ya que modifican bastante la calidad tonal de la sala.

Se recomienda empezar tratando las esquinas con trampas de graves y resonadores.

- Aislar el interior del exterior: Además de acondicionar el locutorio y el control del estudio, se debe aislar el recinto para que no se transmita el sonido entre las salas ni moleste a los vecinos. Esta tarea es conveniente realizarla durante la construcción del recinto, ya que los materiales se suelen colocar empotrados entre las paredes. Lo habitual es el uso de separadores, desacopladores, suelo flotante y falso techo.

3-PROCESO EXPERIMENTAL

Dentro de este apartado se explican los requisitos que la norma ISO 3382 impone en los procedimientos de medición para considerar que éstos están normalizados. También se explican los requisitos y recomendaciones emitidas por la *European Broadcasting Union* sobre las condiciones de escucha para la correcta evaluación de material sonoro. Y Finalmente se explica el procedimiento que utiliza el software WinMLS para el análisis de los modos propios de un recinto. Así pues se describen los equipos utilizados en las medidas, así como los empleados en la simulación además del Software empleado para la misma.

3.1-Requisitos de la ISO 3382

La ISO 3382 impone una serie de requisitos mínimos que se deben tener en cuenta a la hora de medir. Además, establece las condiciones y procedimientos necesarios para que las medidas sean correctas. A continuación se especifican los requisitos establecidos por la ISO 3382.

Requisitos del equipo:

- Medir temperatura y humedad con precisión de $\pm 1^\circ$ y $\pm 5\%$ respectivamente.
- Fuente lo más omnidireccional posible (Tabla1. ISO 3382-1).
- Nivel de fuente con relación señal ruido de -45dBs (para técnicas que no utilicen promediados u otros métodos para mejorar la relación SNR).
- Micrófonos omnidireccionales. Cumplir requisitos de sonómetro de tipo 1 (Norma IEC-61672-1).

Posiciones de medición:

- Fuente:
 - En el lugar donde generalmente se sitúen las fuentes sonoras naturales.
 - Al menos dos posiciones de fuente.
 - A una altura de 1,5 metros del suelo.
 - Al menos 1,5 metros de separación entre fuente y receptor.

- Receptor:
 - Posiciones representativas.
 - Para el Tiempo de Reverberación es importante representar la totalidad del

espacio.

- Alejados entre ellos al menos media longitud de onda, es decir, 2 metros.
- Alejado por lo menos un metro de cualquier superficie reflectante.
- Colocar a una altura de 1,2 metros del suelo.
- Ninguna posición de micrófono debe estar demasiado cerca de la fuente.
- Escoger posiciones que puedan ser susceptibles de producir diferencias, como en escaleras, debajo de palcos, etc.

3.2-Requisitos de la EBU-Tech. 3276 2º Edición

La parte principal de la EBU-Tech. 3276 establece los requisitos básicos para los parámetros del campo acústico. Posteriormente en sus cuatro apéndices da recomendaciones de cómo se pueden cumplir estos requisitos. Se toman esta serie de requisitos que cumplir para la evaluación del recinto como adecuado para la escucha.

Tiempo de reverberación:

- El tiempo de reverberación (TR), debe de ser medido en bandas de 1/3 de octava en el rango de frecuencias de 63 Hz hasta 8kHz. Cumpliendo los requisitos de la ISO 3382.
- Los valores se normalizan con respecto al valor nominal, T_m .
- T_m es el promedio de la medida los tiempos de reverberación en las bandas 1/3 de octava de 200 Hz a 4 kHz.
- T_m también se puede estimar cómo:

$$T_m = 0,25 \cdot \left(\frac{V}{V_0}\right)^{1/3} s$$

Con V el volumen de la sala y V_0 volumen de referencia de 100m³.

- T_m debe estar en el rango: $0,2 s < T_m < 0,4 s$.
- Los cambios de T entre bandas adyacentes no pueden superar unos límites:
 $\Delta T < 0,05 s$ para $200 Hz \leq f \leq 8 kHz$
 $\Delta T < 25\%$ del mayor T para $f \leq 200 Hz$
- $T - T_m$ debe cumplir los límites de tolerancia

Curva de respuesta en frecuencia:

- Se mide el nivel de presión L .
- La medición se realiza en el área de escucha a una altura de 1,2 m del suelo.
- La medición se realiza por bandas de 1/3 de octava con ruido rosa emitido desde el equipamiento electroacústico de escucha del recinto.
- Los valores se normalizan con respecto al valor nominal L_m .
- L_m es el valor medio de los niveles de las bandas de 1/3 de octava con frecuencias centrales de 200 Hz a 4 kHz.
- El límite superior de tolerancia para $L - L_m$ es el valor medio $L_m + 3 dB$
- El límite inferior es $L_m - 3 dB$ hasta 2 kHz y de ese valor $-1 dB$ por octava

a partir de 2 *kHz*.

- Los límites de tolerancia se deben cumplir para cada canal (*R* y *L*) por separado.
- Medición de cada canal por separado.

Ruido de fondo:

- Medir ruido de fondo.
- La medición se realiza en el área de escucha a una altura de 1,2 *m* del suelo.
- Preferiblemente el ruido no debe exceder el nivel de NR 10.
- Bajo ninguna circunstancia debe permitirse que exceda el nivel de NR 15.

3.3-Requerimientos para medición de Modos Propios:

Posiciones de medición:

- Fuente:
 - En una esquina de la sala.
 - En el suelo.
 - Emitiendo Sweep.
- Receptor:
 - Mediciones en las tres dimensiones de la sala (X,Y,Z).
 - En cada eje una medida cada 0,20m a lo largo de una línea recta.
 - Primera posición a 0,20m del límite de la sala.
 - Altura en los ejes X e Y de 1,20m.
 - Eje Z en la intersección de X e Y.

3.4-Dispositivo Experimental

El material con el que se han realizado las medidas para obtener los parámetros derivados de la respuesta es el siguiente.

Para las medidas In-situ:

- PC Toshiba Satellite con interfaz de audio Digidesing VX pocket y provisto con Software WinMLS 2004 Profesional.
- Amplificador Electro Voice Q44-II de 2x450W.
- Conjunto de altavoces AWM D012 formado por 12 altavoces en disposición dodecaédrica.
- Soporte del conjunto de altavoces.

- Micrófono omnidireccional Beyerdynamic MM1.
- Previo Behinger MicroPower PS400
- Soportes de micrófonos.
- Cableado pertinente.
- Telémetro laser Bosch DLE 150.

Para la simulación y análisis:

- PC provisto de software Odeon 13.04
- PC Toshiba Satellite provisto con Software WinMLS 2004 Profesional
- PC provisto con Software Google SketchUp 2016.
- Modelos virtuales del recinto en cuestión realizados con SketchUp.
- PC provisto con Microsoft Excel 2010.

4-ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS RECINTOS

4.1-La Nabe

4.1.1-Localización:

Nombre de la sala: Asociación Cultural “La Nabe”

Dirección: Calle B, Polígono Industrial de Barañáin
31010
Barañáin (Navarra)



Imagen 4.1 - Vista a pie de calle.

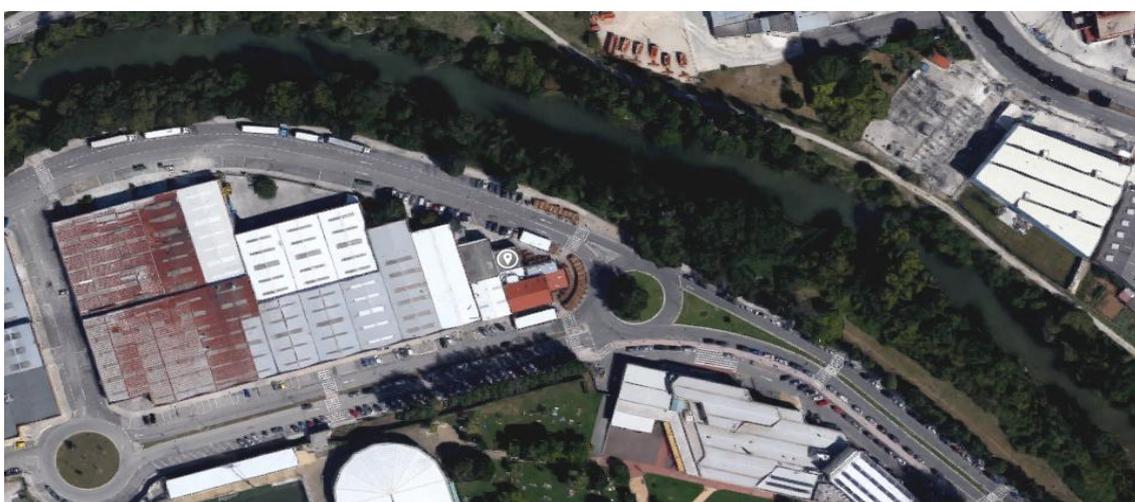


Imagen 4.2 - Vista de ubicación en área industrial.



Imagen 4.3 - Vista de localización en la comarca

Dimensiones:

La sala a analizar tiene las siguientes medidas elementales:
9,10m x 8,10m x 4,50m (Ancho x Largo x Alto)

Volumen aproximado: 331 m³

La localización del local se explica de forma clara en la Imagen 4.1, Imagen 4.2 e Imagen 4.3. Aunque tal y como se puede observar en las imágenes del local (Imagen 4.4, Imagen 4.5) no es una sala paralelepípeda al uso. Se pueden observar un sobre piso, escaleras y diversas estructuras que hacen que los cálculos teóricos basados en salas paralelepípedas sean una aproximación y como tales se tendrán en cuenta.



Imagen 4.4 – Interior del local (piso inferior, desde puerta).



Imagen 4.5 – Interior del local (piso inferior, desde fondo).

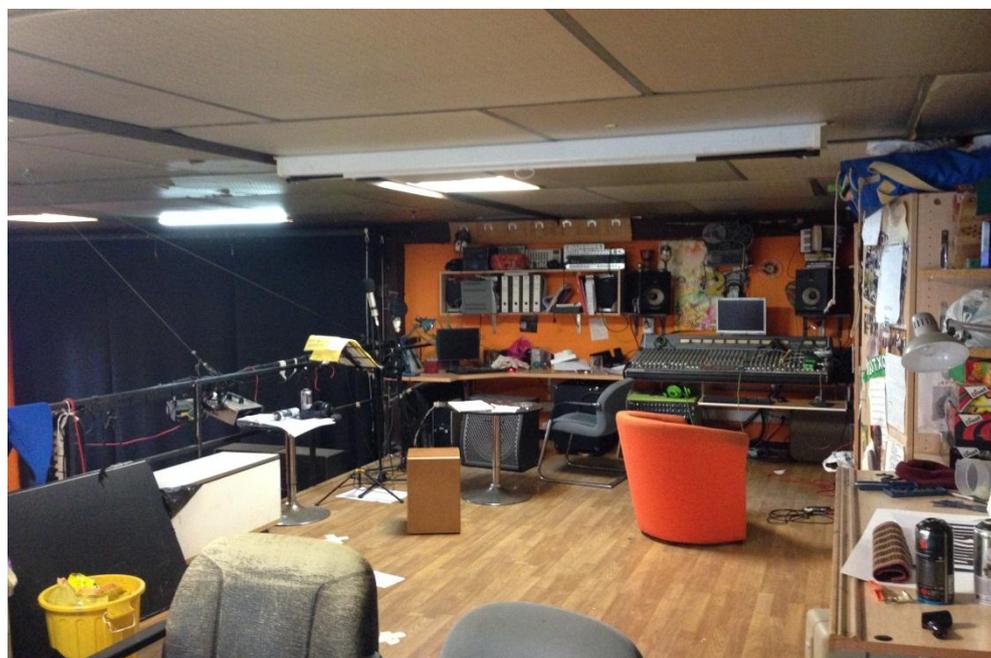


Imagen 4.6 – Interior del local (piso superior).

4.1.2-Análisis basado en ISO-3382

La ISO 3382, además de describir el equipo y especificar número y forma de las mediciones, establece la forma de expresión de los resultados. A continuación se exponen los resultados de los distintos parámetros acústicos.

T_{30}

Según la norma ISO 3382 el tiempo de reverberación puede promediarse espacialmente para dar un valor del conjunto del recinto por frecuencia, haciendo la media aritmética de todas las posiciones de micrófono y fuente. En la Figura 4.1, se representa de manera que se ven la media y los valores máximos y mínimos.

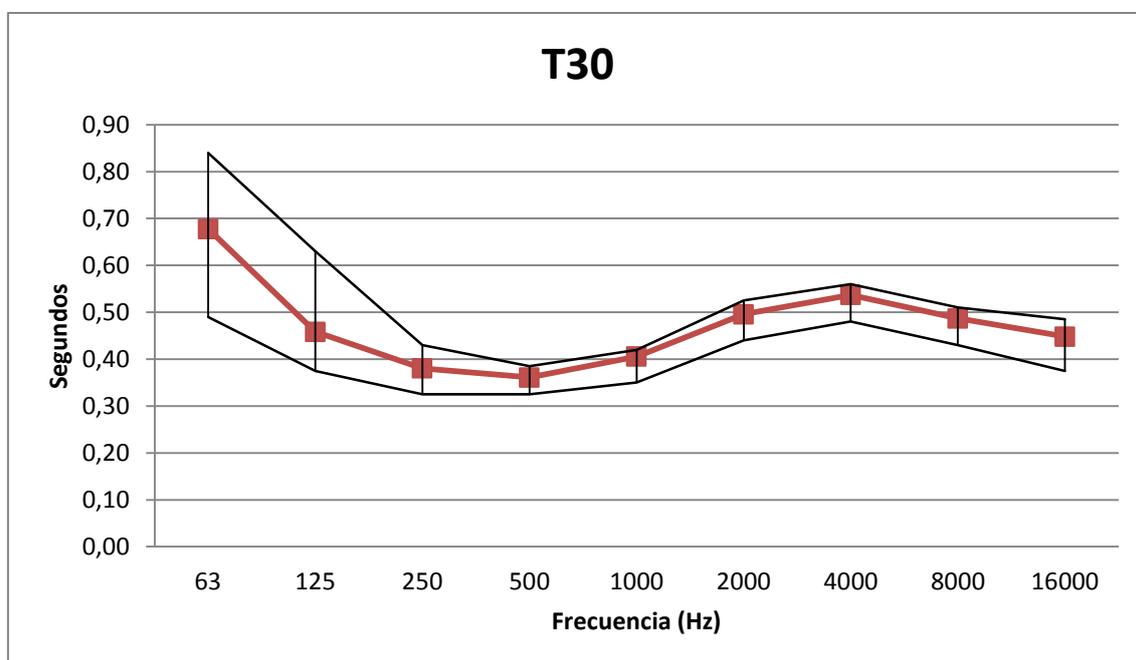


Figura 4.1 – T_{30} promedio de todas las posiciones de receptor y fuente.

De esta forma se han expresado los resultados conforme a la norma. Hay que tener en cuenta que estos vienen de una medición notablemente detallada, teniendo en cuenta que el mínimo que establece la norma es de 6 posiciones de micrófono y una fuente sonora y la medición ha consistido en 18 posiciones de micrófono y 3 de fuente sonora.

Los resultados que se observan son de una sala con un tiempo de reverberación considerablemente bajo. No obstante, la norma establece la forma de caracterizar con un valor único también en frecuencias: T_{30mid} (promediado aritmético de las frecuencias 500 y 1000 Hz). En este caso el resultado es: 0,375 s. Un valor bajo que caracteriza a una sala con poca reverberación, es decir un recinto sordo o apagado. Característica común en los estudios de grabación.

EDT:

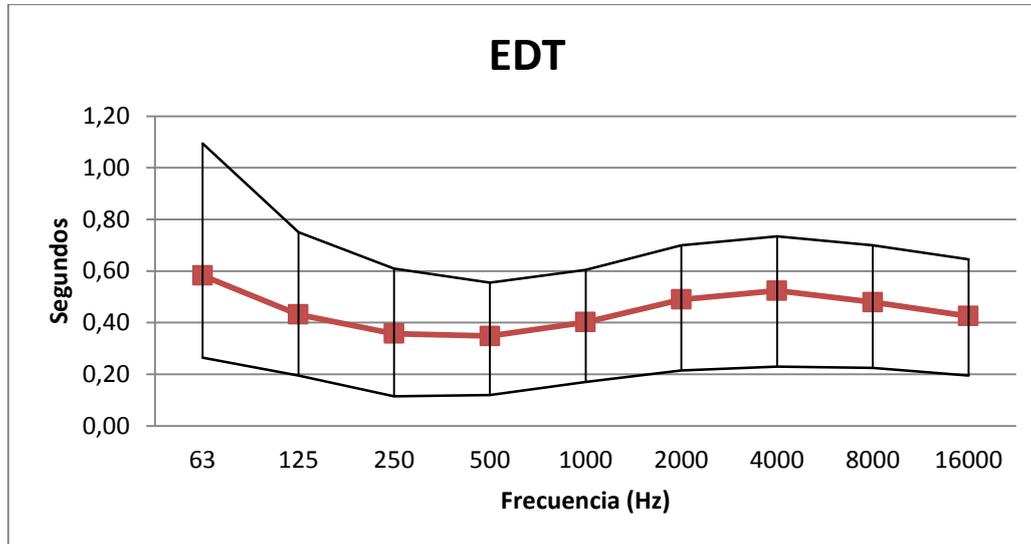


Figura 4.2 – EDT promedio.

En la Figura 4.2, se representa el *Early Decay Time*, más relacionado con la impresión subjetiva de viveza que el T_{30} . Pero como se puede observar ambas gráficas son prácticamente iguales aunque la diferencia más remarcable es que los valores máximos y mínimos de una y otra varían bastante.

Claridad de la voz (C_{50}):

La relación entre la energía del sonido que llega al oyente durante los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo, se muestra en la Figura 4.3 y es un parámetro relacionado con la claridad del mensaje oral.

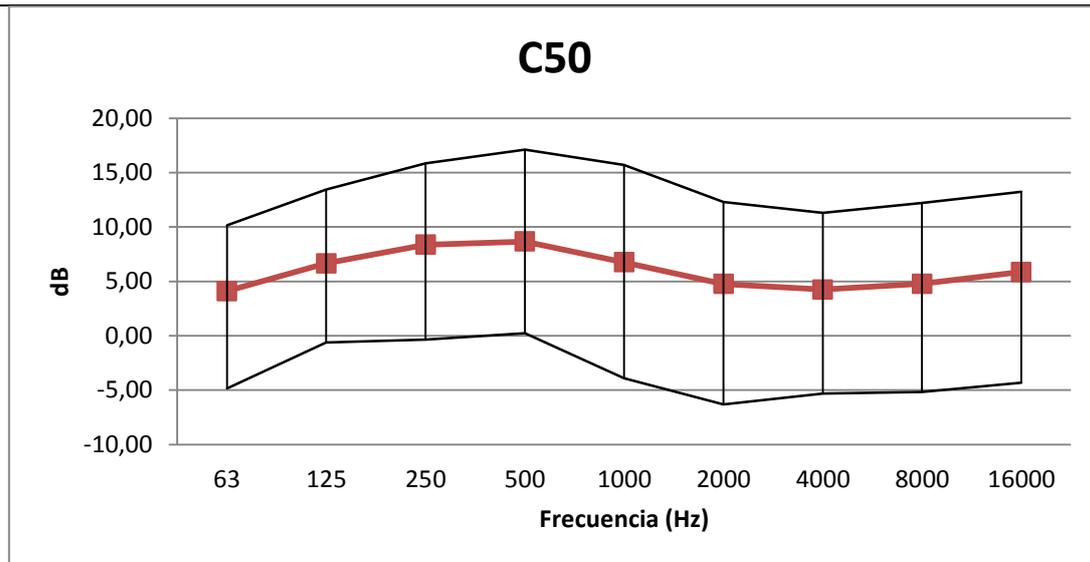


Figura 4.3 – C_{50} , claridad de la voz en el recinto.

Para caracterizar una sala con un único valor, es suficiente utilizar el denominado “*Speech Average*”, que se calcula a partir del C_{50} , con una proporción en que las distintas bandas de frecuencia influyen en la inteligibilidad de la palabra. Para una aceptable inteligibilidad, deberá cumplirse que el “*Speech Average*” ≥ 2 dB. En este caso es igual a 5,73 dB. Por lo tanto cumple el criterio de manera clara, así que se considera una sala con inteligibilidad de la palabra y sonoridad muy buenas.

Claridad musical (C_{80}):

La información respecto a la cantidad de energía sonora que llega en los primeros 80 ms desde la llegada del sonido directo y la energía que llega con posterioridad, da cuenta del grado de separación entre los diferentes sonidos que conforman una composición musical y se caracteriza en la Figura 4.4.

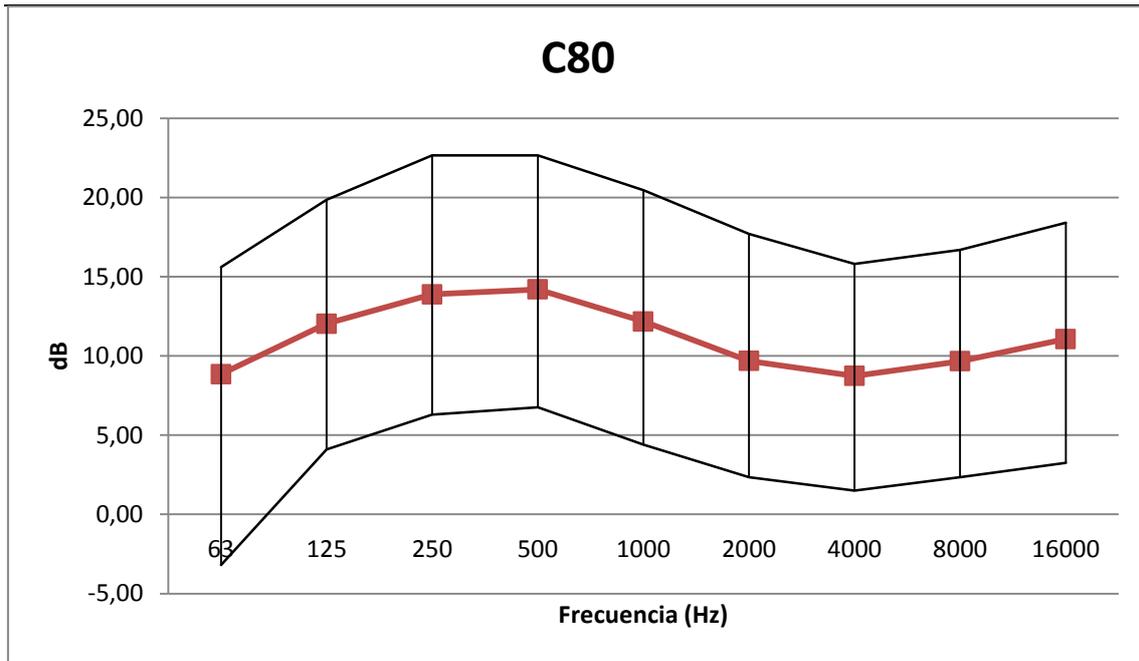


Figura 4.4 – C₈₀, Claridad musical de la sala.

El “*music average*” es igual a 12,02 dB. Está por encima de los valores recomendados tanto para salas vacías y como ocupadas, por lo tanto la energía sonora inmediata es muy superior a la tardía y se puede concluir que el sonido es muy claro.

Reseñar que para los resultados recomendados con los que se han comparado los resultados obtenidos, son para salas de volumen grande, cosa que el recinto bajo análisis no cumple.

4.1.3-Análisis basado en EBU Tech. 3276 2ª Edición

Uno de los criterios para evaluar las salas bajo análisis es la EBU Tech. 3276, que son una serie de condiciones que cumplir para la evaluación de material y programas de sonido, estereofónico y monofónico de dos canales. Se toman estas recomendaciones para evaluar si nuestra sala es un recinto adecuado para la escucha de material sonoro, tanto mediante soporte electro acústico como de forma natural.

Tiempo de reverberación

El primer parámetro a evaluar de acuerdo con la recomendación es el tiempo de reverberación de la sala. El campo reverberante debe de ser lo suficientemente difuso sobre la zona de escucha como para evitar efectos acústicos perceptibles tales como el eco flotante. El tiempo de reverberación es una característica importante del campo reverberante.

El tiempo de reverberación (T), medido en bandas de 1/3 de octava en todo el rango de frecuencias desde 63 Hz hasta 8kHz se representa con color azul en la Figura 4.5 (promedio de los dos altavoces, R y L). Esta representación está normalizada con T_m (valor nominal), que

aplicando la fórmula que se describe en las recomendaciones, basa en el volumen, para esta sala tiene un valor de $T_m=0,37s$. Los límites descritos en la EBU Tech. 3276 (en rojo en la Figura 5) marcan si cumple o no las recomendaciones:

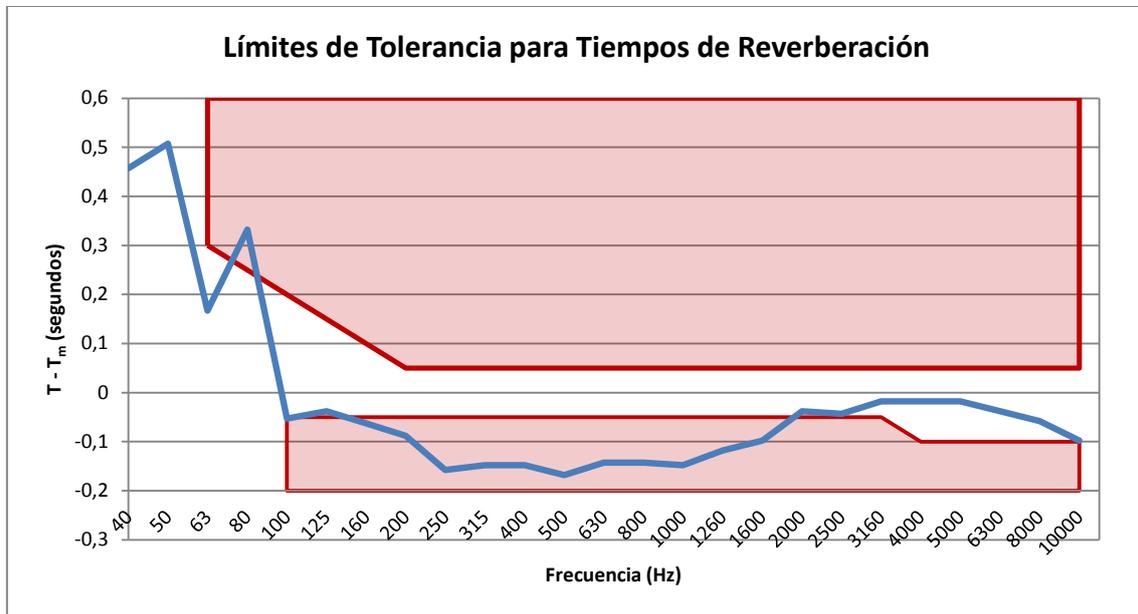


Figura 4.5 – Límites de tolerancia para el Tiempo de Reverberación (EBU Tech. 3276 2ª Edición).

Tal y como se ve en la Figura 4.5, no cumple la recomendación en frecuencias bajas y frecuencias medias. En cambio, sí lo hace en frecuencias altas. Los valores de T incumplen la recomendación por el límite inferior. Por lo tanto se entiende que la sala presenta un T medido inferior al tiempo de reverberación objetivo (T_m), es decir el recinto es menos reverberante de lo esperado por sus dimensiones. Por lo tanto, es una sala poco reverberante para frecuencias entre 100 Hz y 2 kHz, en el punto de escucha que marca la EBU 3276.

En la banda de 80 Hz también sobre pasa los límites, pero esta vez incumpliendo el límite superior. Esto es algo a tener muy en cuenta, ya que, en las bandas graves de 1/3 de octava es donde se encuentran los problemas derivados de resonancias y modos propios y una de sus consecuencias es el aumento el T .

Por otro lado, los límites de variación del tiempo reverberación entre bandas adyacentes que describe la recomendación entre 200 Hz y 8kHz ($<0,05$ s) se cumple salvo en dos casos. En las variaciones entre bandas de 1/3 de octava de 200-250 Hz y 1,6-2kHz. En ambos casos la variación es de 0,06 s. En las de 1/3 de octava inferiores a 200 Hz, el criterio es que la variación sea inferior al 25% del mayor tiempo de reverberación de ambas bandas. El criterio se cumple en todas las bandas salvo en las variaciones entre las bandas de 50-63 Hz y las bandas de 80-100 Hz. En el primer caso, el criterio de variación máximo, se supera por 0,12 s. En el segundo por 0,22 s.

El análisis anterior describe la respuesta en el punto de escucha del equipamiento electro acústico de la sala en su conjunto en base a las recomendaciones antes descritas. Se puede analizar este mismo análisis tomando cada elemento reproductor de material sonoro por separado. En la Figura 4.6 se representan los límites de tolerancia para los tiempos de reverberación del altavoz R y del altavoz L por separado.

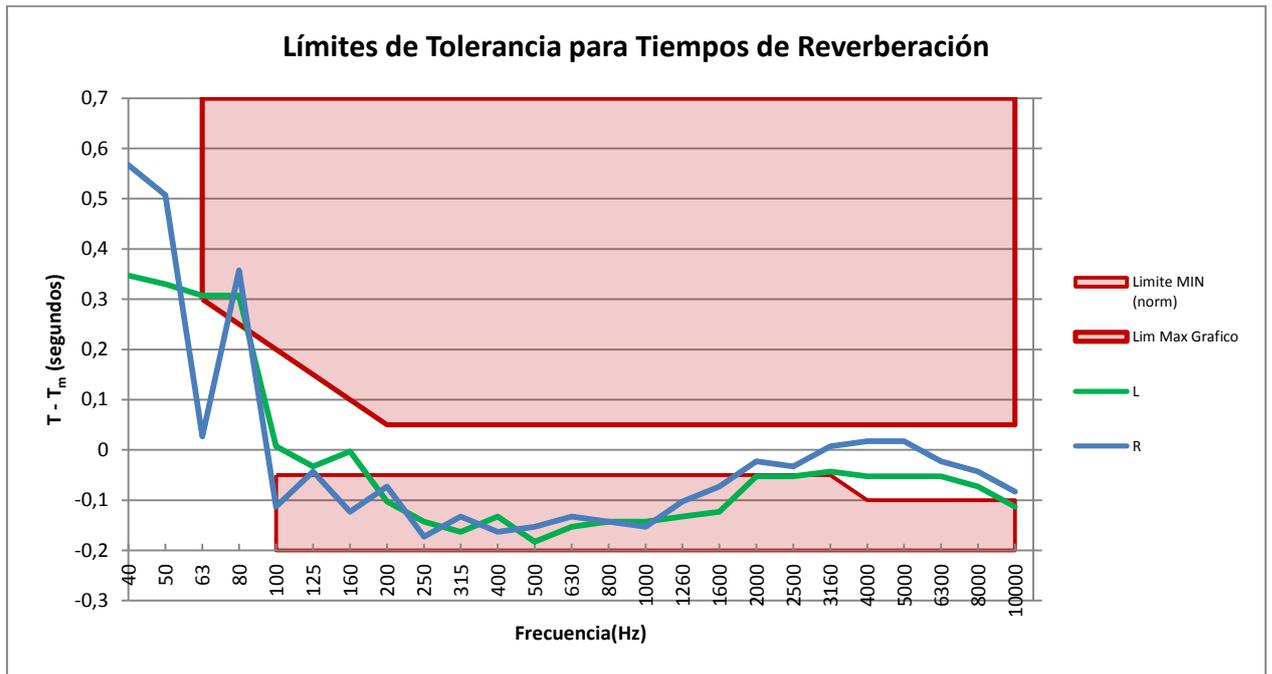


Figura 4.6 – Límites de tolerancia para TR (EBU Tech. 3276). Altavoces R y L.

Ambos tiempos de reverberación normalizados (R y L) con referencia a T_m son semejantes. La mayor diferencia se encuentra en altas frecuencias, esto debido a la distinta posición relativa de ambos con respecto a las superficies del recinto. Apuntar que la medición en el caso del altavoz L para la banda de 1/3 de octava de 50 Hz no presentó valor, por algún tipo de fallo en el proceso de medición. Para que el gráfico no quedara ausente para 40 Hz, se ha dado para 50 Hz el valor medio de 40 Hz y 63 Hz.

En la Figura 4.7 se presenta por un lado la curva antes comentada, realizada usando los altavoces y el equipamiento electro acústico del recinto para reproducir material sonoro y por otro lado la curva obtenida de las medidas realizadas para la caracterización acústica del recinto cumpliendo los requisitos de la ISO 3382. Ambas normalizadas con el criterio antes comentado del valor nominal T_m y limitadas por los mismos valores recomendados.

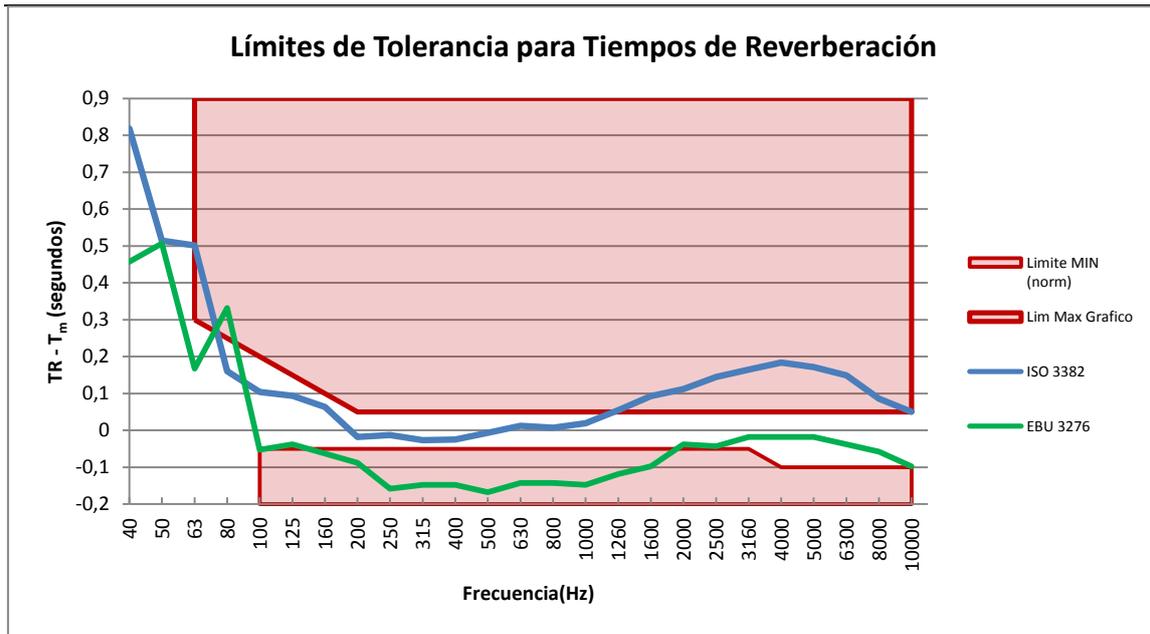


Figura 4.7 – Límites de Tolerancia para Tiempo de Reverberación. EBU Tech. 3276 vs. ISO 3382.

Se aprecia una diferencia considerable entre las dos curvas de tiempo de reverberación. La curva de tiempo de reverberación de la ISO 3382 cumple los criterios de EBU para bajas y medias frecuencias (excepto en 63 Hz). No en cambio para altas frecuencias. Es decir, presenta una sala más reverberante de lo que lo hace la EBU 3276 y con valores más cercanos al T_m , que en definitiva es el valor objetivo de la sala en base a su volumen.

Curva de respuesta en frecuencia de la sala

La curva de respuesta de la sala se define como la respuesta del nivel de presión sonora producido por el altavoz para cada frecuencia. La señal para esta medición se realiza con ruido rosa y por 1/3 de octava. Esta curva de respuesta en frecuencia es un importante criterio para la evaluación mutua del altavoz y de la sala de escucha, por la tanto para la evaluación de las condiciones de escucha. Se corresponde correctamente con la sensación subjetiva del sonido reproducido por el soporte electro acústico del recinto.

Los límites de tolerancia para las curvas de respuesta en frecuencia, se obtienen asumiendo el valor medio L_m como el valor medio de los niveles de las bandas de 1/3 de octava con frecuencias centrales de 200 Hz a 4 kHz. Los límites de tolerancia se deben cumplir para cada canal (R y L) por separado. Por lo tanto hay un L_m distinto para R y L. Para el altavoz R el $L_m = 80,79$ dB y $L_m = 81,07$ dB para L.

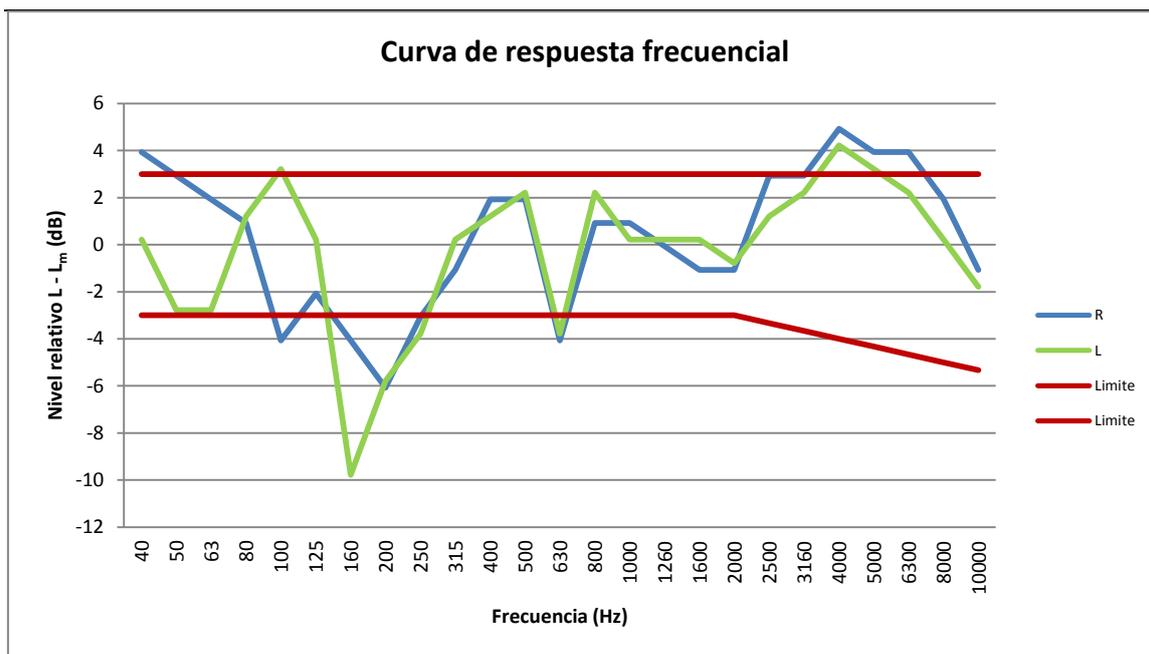


Figura 4.8 – Límites de tolerancia para la curva de respuesta operacional de la sala.

Viendo la Figura 4.8, se puede apreciar que tanto la respuesta en frecuencia del altavoz L como del R, para frecuencias medias y altas, son prácticamente idénticas y que se mantienen aceptables con los límites de tolerancia. En cambio, en la zona de bajas frecuencias se puede apreciar que ambos altavoces presentan respuestas significativamente distintas y en algún caso claramente fuera de los límites de tolerancia, con máxima desviación de aproximadamente -10 dB con el valor medio definido con anterioridad.

Puede ser difícil cumplir los límites de tolerancia para las curvas de respuesta en frecuencia para frecuencias bajas, especialmente en salas pequeñas. Esto se debe arreglar mediante el tratamiento acústico de la sala y/o ajustando las posiciones tanto de los altavoces como del punto de escucha. Cuando con estos métodos no se consiga la linealidad de la curva de la respuesta en frecuencia, puede ser necesaria la ecualización del sonido reproducido, es decir, ajustar la respuesta de los altavoces o de los monitores utilizados para la reproducción.

Este ajuste debe llevarse a cabo utilizando ecualizadores externos. Para evitar la degradación de la calidad de la reproducción, la ecualización debe realizarse con cuidado. Suele ser aconsejable hacer las correcciones solamente en el rango de bajas frecuencias ($f < 300 \text{ Hz}$), lo cual es exactamente lo que el caso analizado necesita. Los dos canales deben de ser ajustados de la misma manera.

Nivel de escucha

El nivel de escucha de referencia, $L_{LISTref}$, caracteriza la sensibilidad de un canal de reproducción. Es usado para ajustar la ganancia de referencia (0 dB) para el ajuste del nivel en sesiones de escucha. Cada canal de reproducción, generalmente, tiene en un controlador de volumen y puede ser un dispositivo complejo que incluye amplificadores, filtros y otros elementos. Es recomendable que este equipamiento cumpla el anexo 3 de la EBU Tech. 3276, donde se describen recomendaciones generales que debe cumplir una sala de escucha o

control de material acústico normal.

La señal de ruido rosa será la señal con la que se alimenta cada canal de reproducción por separado. Es decir, el nivel RMS de la señal de prueba, es el "Nivel de señal de alineación". Se establece como dicho nivel para la medición $L_{LIS\text{Tref}} = 82$ dB, ajustado a lo que dictan las recomendaciones.

La diferencia de los niveles entre los dos canales no debe exceder de 1 dB. Tal y como se observa en la Figura 4.9, los niveles de R y L. Las diferencias de 0 dB y 1 dB son aceptables, en cambio las diferencias superiores a 1 dB no respetan la recomendación. Como se observa el altavoz L tiene un nivel de 80,52 dB y el R de 81,4 dB. Por lo tanto cumplen la recomendación. Aunque aquí se intuye un problema que se aborda en el apartado siguiente con el altavoz R.

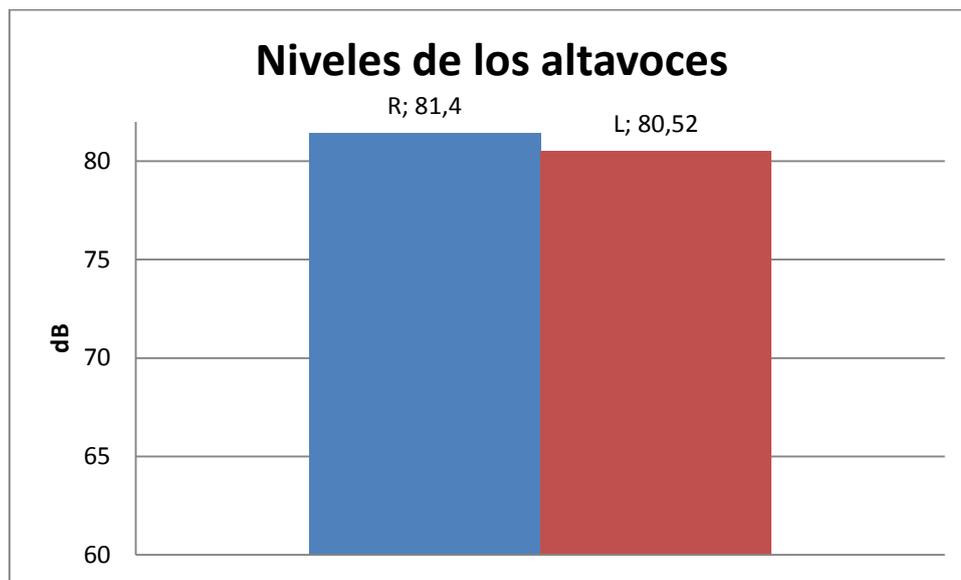


Figura 4.9 – Niveles de cada altavoz.

Dimensiones para la escucha

La sala presenta un volumen aproximado de 331m^3 . En el anexo 2 la EBU Tech. 3276 recomienda ciertas características que debe de tener una sala de escucha a nivel de tamaños y dimensiones. Marca como área mínima del suelo 40 m^2 . El recinto cumple esta recomendación. La superficie de suelo total es de $108,9\text{ m}^2$.

Su recomendación para el volumen es que debe ser inferior a los 300 m^3 . Este es un punto que la sala no cumple. Aunque estas recomendaciones de las dimensiones son generales y el límite no es una línea roja, se puede decir que se encuentra en el límite de cumplir o incumplir esta recomendación. Por otro lado, las proporciones de la sala deben de estar bajo uno límites, para asegurar una distribución razonablemente uniforme de las bandas de baja frecuencia. Límites de proporciones que este recinto cumple.

Ruido de Fondo

En este apartado de la EBU Tech. 3276 se mide el nivel de presión sonora del ruido de

fondo continuo, como puede ser el de sistemas de aire acondicionado o de otras fuentes externas o internas.

El ruido de fondo medido de no debería de ser ni impulsivo, ni cíclico, ni tonal. El ruido preferiblemente no debe de exceder el *NR10*. Y bajo ninguna circunstancia debe permitirse ruido de fondo que exceda el nivel de *NR15*. En la Tabla 4.1 se puede ver los valores de *NR10* y de *NR15*.

	Frecuencias (Hz)								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
NR 10	62,2	43,4	30,7	21,3	14,5	10	6,6	4,2	2,3
NR 15	65,6	47,3	35	25,9	19,4	15	11,7	9,3	7,4

Tabla 4.1 – Valores de las curvas NR10 y NR 15

La sala analizada, presenta un claro problema en este apartado que fue percibido en el momento de tomar las medidas sin necesidad del análisis de los datos obtenidos. El problema radica en el *altavoz R* que provoca un ruido alto.

Para dar cuenta de ello y que en los datos quedara evidencia de ello, se realizaron medidas con dicho altavoz encendido produciendo ruido y con el altavoz apagado. Por otro lado, analizando el altavoz, se apreció que si se apantallaba el lado derecho de alguna manera con algo (mano de persona, objeto, etc...) en contacto directo con el suelo, el ruido se reducía apreciablemente. Por ello se realizó otra medición con dicho apantallamiento para evaluar posibles diferencias. También hay que comentar que aparte de este ruido eléctrico aparecía un acoplamiento de una emisora de radio comercial que tiene su punto de emisión cerca de la sala.

En la Figura 4.10 se puede ver de color rojo los límites de tolerancia recomendados (*NR10* y *NR15*) y de colores verdes y azulados las mediciones antes descritas:

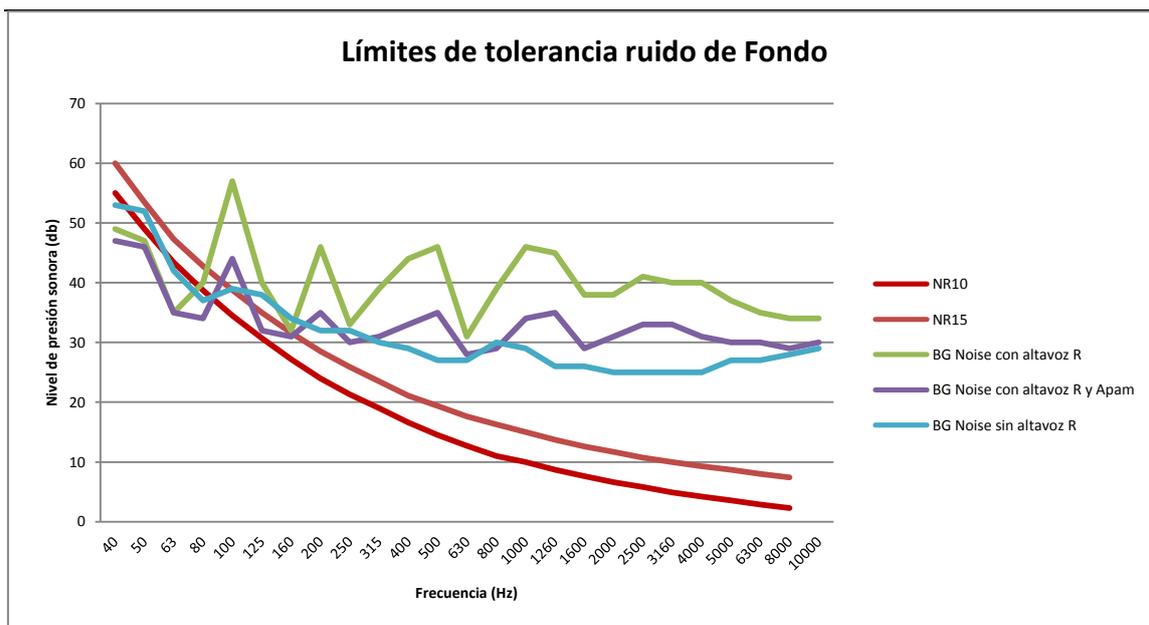


Figura 4.10 – Ruidos de fondo y curvas NR10 y NR15.

Tal y como se puede ver en la Figura 4.10 el ruido de fondo, los valores medidos de todos los casos antes descritos supera notablemente ambos límites que marca la recomendación EBU Tech 3276 2ª Edición en las franjas de medias y altas frecuencias. A bajas frecuencias, todas las variantes del ruido de fondo estudiadas están por debajo de la curva NR 15 de forma clara. La curva NR 10 en cambio se cumple salvo una excepción a una determinada banda frecuencial.

También se puede apreciar cómo el ruido que provoca el *altavoz R* tiene la misma forma para las distintas frecuencias en los casos de apantallamiento y no apantallamiento, con valores más alto como es natural en el caso de no apantallamiento. Presentan unos máximos muy destacables a determinadas frecuencias. Esto da buena cuenta en las bandas de 1/3 de octava en las que el altavoz provoca mayor contribución de ruido.

Por otro lado, en el caso de la medición de ruido de fondo con el altavoz problemático apagado, se puede apreciar que la curva es más plana y de menos variabilidad por 1/3 de octava que las anteriormente analizadas. Y también es de una forma similar a las dos curvas de limitación, aunque como las anteriores, también las sobrepase.

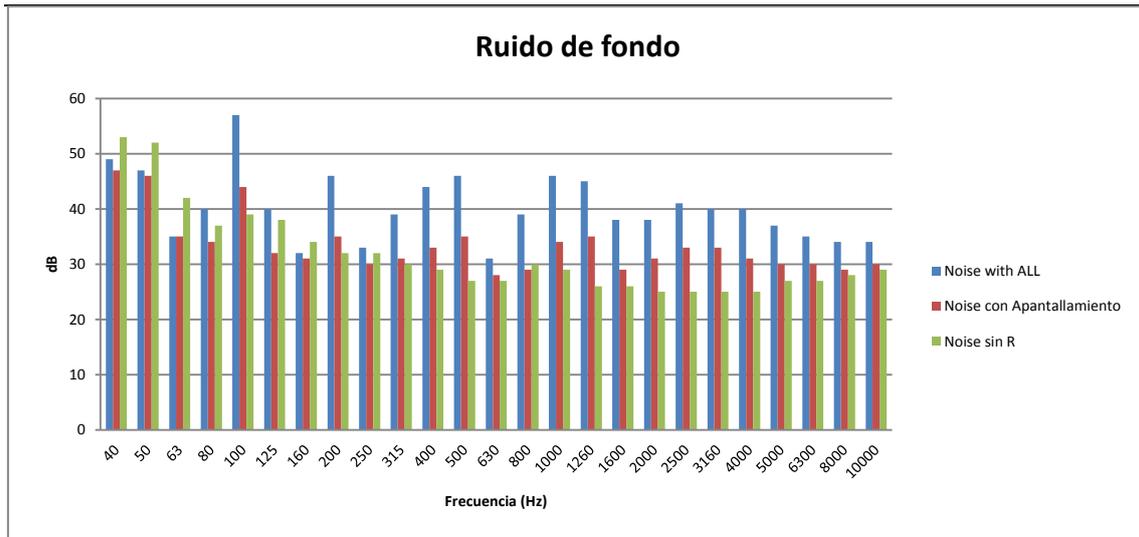


Figura 4.11 – Niveles de ruido de fondo.

Hay que dejar constancia también de que el emplazamiento en el que se encuentra la sala es un entorno ruidoso, ya que está localizada en un polígono industrial. Esto y su poco aislamiento acústico con el exterior hacen que cualquier ruido propio del ambiente industrial o del tránsito de tráfico pesado y ligero ha afectado claramente en que las curvas obtenidas de las mediciones sobrepasen los límites recomendados.

Para solucionar el problema se podría valorar la opción de aumentar el aislamiento acústico de la sala con el exterior, pero siendo una opción relativamente cara económicamente no es la opción más recomendable. Por ello se recomienda que para hacer uso acústico de la sala tanto para sesiones de escucha a la hora de mezclar o masterizar grabaciones o a la hora de realizar grabaciones, hacerlo en un horario en el cual el ruido industrial sea el mínimo.

Tal y como recomienda la EBU Tech 3276 en su primer anexo, la colocación es un factor muy importante. El posicionamiento en base a estas recomendaciones es correcto en lo que respecta a altura desde el suelo, ángulo de inclinación máxima con respecto al punto de escucha (y el posicionamiento del mismo). Cumple todas las recomendaciones, pero la recomendación de que los altavoces no deben de estar instalados en la pared y deben de estar situados como mínimo a 1 m de la pared, no la cumple. Este sería un punto a corregir.

En cuanto al problema que genera el altavoz ruidoso, se podrían barajar varias opciones para intentar bajar su contribución de ruido. La primera de ellas sería intentar ingeniar un elemento de apantallamiento fijo y ajustar la posición del altavoz, buscando su menor aportación de ruido. La segunda cambiar el cableado que puede ser también lo que esté siendo origen del problema. Y por último sería cambiar de altavoces.

4.1.4-Análisis de modos propios

El análisis de los modos propios del recinto se divide en dos partes. En primer lugar un cálculo teórico mediante las herramientas teóricas para su cálculo y en segundo lugar la medición in situ de los mismo mediante la herramienta que ofrece el software WinMLS para

ello.

Cálculo teórico

Con las anteriores herramientas de cálculo teórico explicadas en el capítulo teórico, se obtienen la estimación de los modos propios que tendrá el recinto:

Ancho	Largo	Alto	C	Volumen	Superficie	Tmid (estimación)	Coef. Absorción
9,10	8,10	4,50	340	331,7	302,2	0,6	0,3
Frecuencia Limite						84 Hz	

Tipo	Frecuencia (Hz)
2	19
2	21
1	28
2	37
2	38
2	42
1	42
1	43
1	43
1	46
0	47
1	53
2	56

Tipo	Frecuencia (Hz)
1	56
1	56
0	57
0	59
1	60
2	63
1	66
1	68
0	68
1	70
0	71
1	73
1	73

Tipo	Frecuencia (Hz)
2	75
2	76
0	76
1	78
1	78
1	78
0	80
0	81
0	82
1	84
2	84
1	84
1	84

Dónde:

Tipo 0 modo oblicuo
 Tipo 1 modo tangencial
 Tipo 2 modo axial

Se puede ver, como era de esperar, que los modos propios a tener en cuenta se encuentran a frecuencias bajas. La frecuencia máxima es 85 Hz y en base a estos cálculos se considerarán las frecuencias mayores como ausentes de modos propios que repercutan negativamente en la acústica del recinto.

En conclusión, los cálculos teóricos previos a la medición revelan que aproximadamente hay que fijarse en frecuencias inferiores a 85 Hz. No obstante, hay que considerar estos cálculos como lo que son, una aproximación. Ya que parten de ciertas suposiciones de partida ideales. Y que este es un límite que no hay que entender como línea roja que los modos propios dejan de repercutir progresivamente aumenta la frecuencia y no es un umbral absoluto.

Cálculo práctico (medición)

El software utilizado para la realización de las medidas ha sido WinMLS. Este software ofrece un formato concreto para la medición de los modos propios.

El método trata en tomar mediciones a lo largo de un eje (línea recta) en cada una de las tres dimensiones espaciales (x, y, z). Por lo tanto, se obtendrá la respuesta en frecuencia a lo largo de del eje para cada dimensión. En la representación espectral de los resultados que nos presenta el programa hay que fijarse en una disposición concreta de los resultados de obtenidos para el conjunto de receptores. Donde se vea que hay mayor diferencia de nivel, es decir mayor anchura del conjunto de curvas. Será a esas frecuencias donde se pueden originar problemas a nivel acústico para cada dimensión ya que serán frecuencias a las que se encuentran mayores cambios de nivel en el correspondiente eje. Con los resultados teóricos obtenidos previamente, se podrá analizar ciertas frecuencias de manera concreta, que en el modelo ideal son las de los modos, para verificar si esto es así en la realidad.

: Root of Frequency Response Magnitude - Root

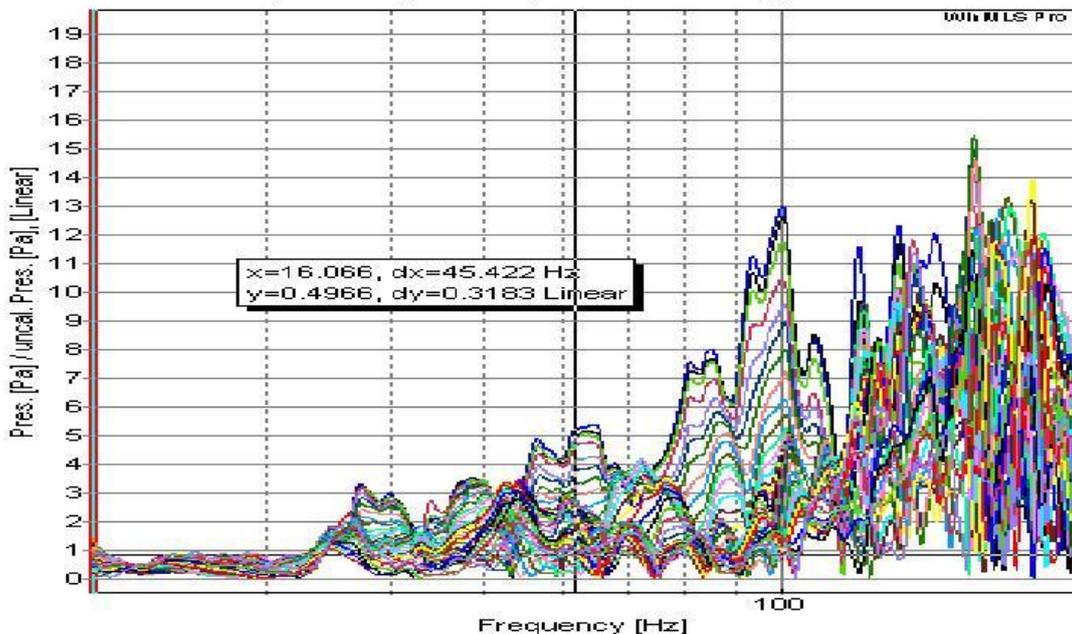


Figura 4.11 – Representación de resultados de un eje del Software WinMLS.

El software da como resultado una superposición de todas las medidas realizadas a lo largo de cada eje (x, y, z). Estas se representan por frecuencia. Se puede ver un ejemplo de esta representación en la Figura 4.11. Colocando el cursor en las frecuencias de interés calculadas en el modelo ideal o buscando zonas anchas y/o estrechas del gráfico se representará el nivel sonoro de esa frecuencia a lo largo del eje en cuestión. Los resultados (gráficas, etc...) se presentan en las Figuras 4.12, 4.13 y 4.14 ordenados por ejes:

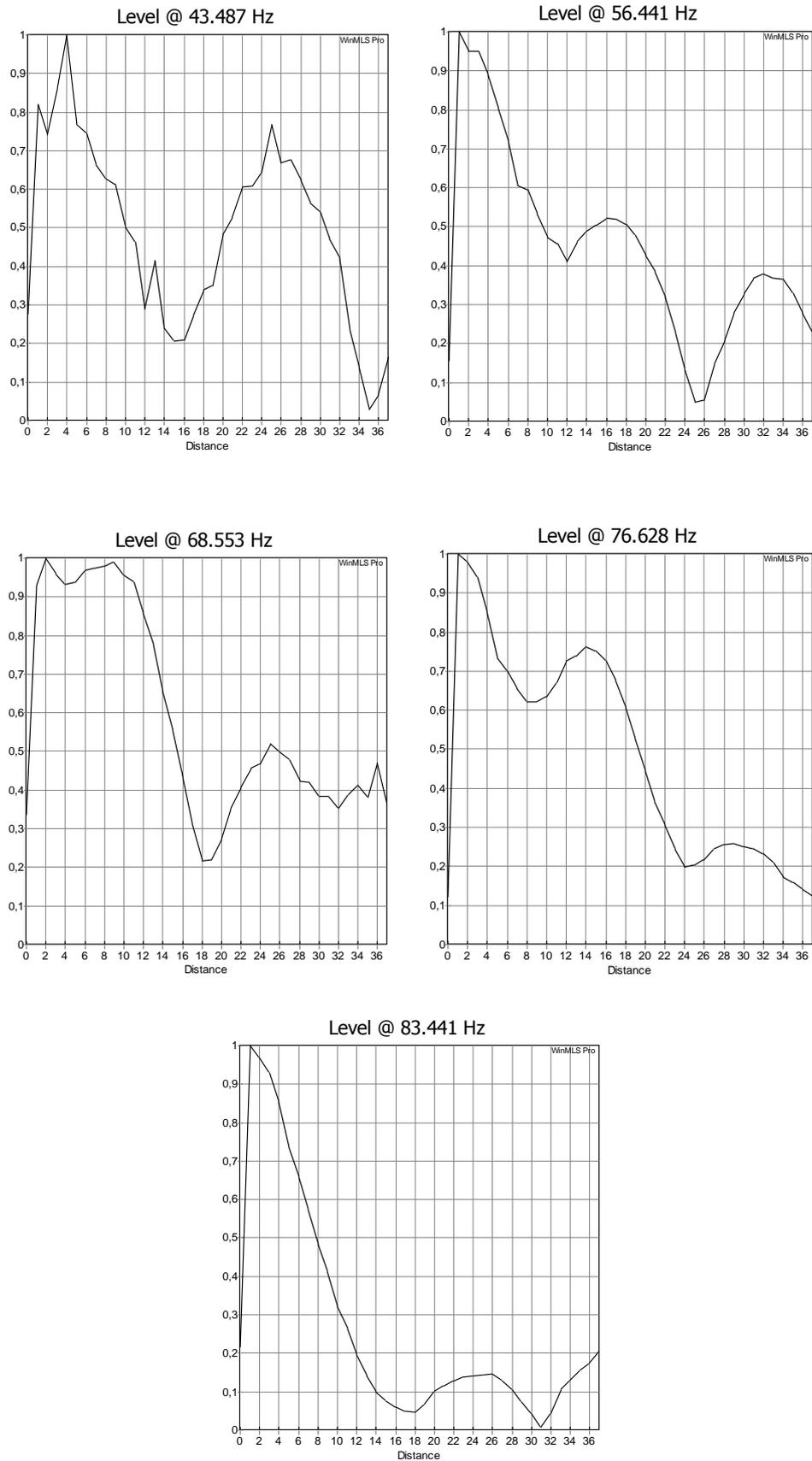
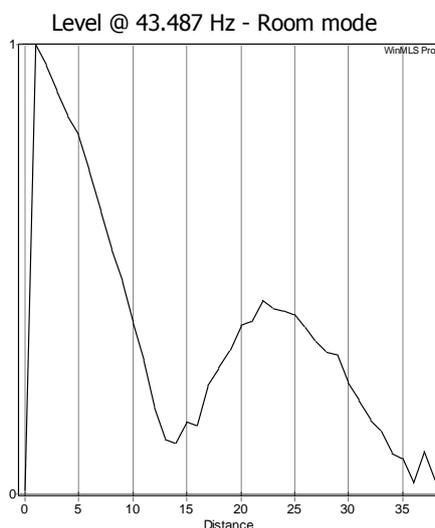


Figura 4.12 – Gráficas del eje X para las frecuencias de interés.

Tal y como se puede apreciar en las cinco frecuencias que se han analizado donde los modos propios son visibles, el cambio de nivel sonoro en base al cambio de posición (distancia respecto a la pared de referencia) a lo largo del eje son apreciables. Ese fenómeno es el que va a provocar que el oyente perciba cambio (disminución o aumento de nivel) a determinadas frecuencias al cambiar de posición en el recinto. Anotar que el eje horizontal la distancia se refiere a las posiciones, es decir cada posición es $+0,20\text{ m}$ respecto a la pared origen en ese eje. El eje vertical aparece normalizado de 0 a 1. Como para cada frecuencia es una normalización distinta, se ha buscado el nivel de presión sonora en los máximos y mínimos, mirando sus espectros frecuenciales para cuantificar mejor las diferencias, se pueden observar en la Tabla 4.2. Como se puede observar son diferencias de nivel muy grandes para todas las frecuencias analizadas. Diferencias en torno a 20-30 dB solo con cambiar la posición de escucha.

Frecuencia (Hz)	MAX		MIN	
	Receptor	Nivel (dB)	Receptor	Nivel (dB)
43,48	4	87	35	64
56,44	1	90	25	60
68,55	2 y 9	89	18	67
76,62	2	90	36	72
83,44	1	94	31	53

Tabla 4.2 – EjeX.



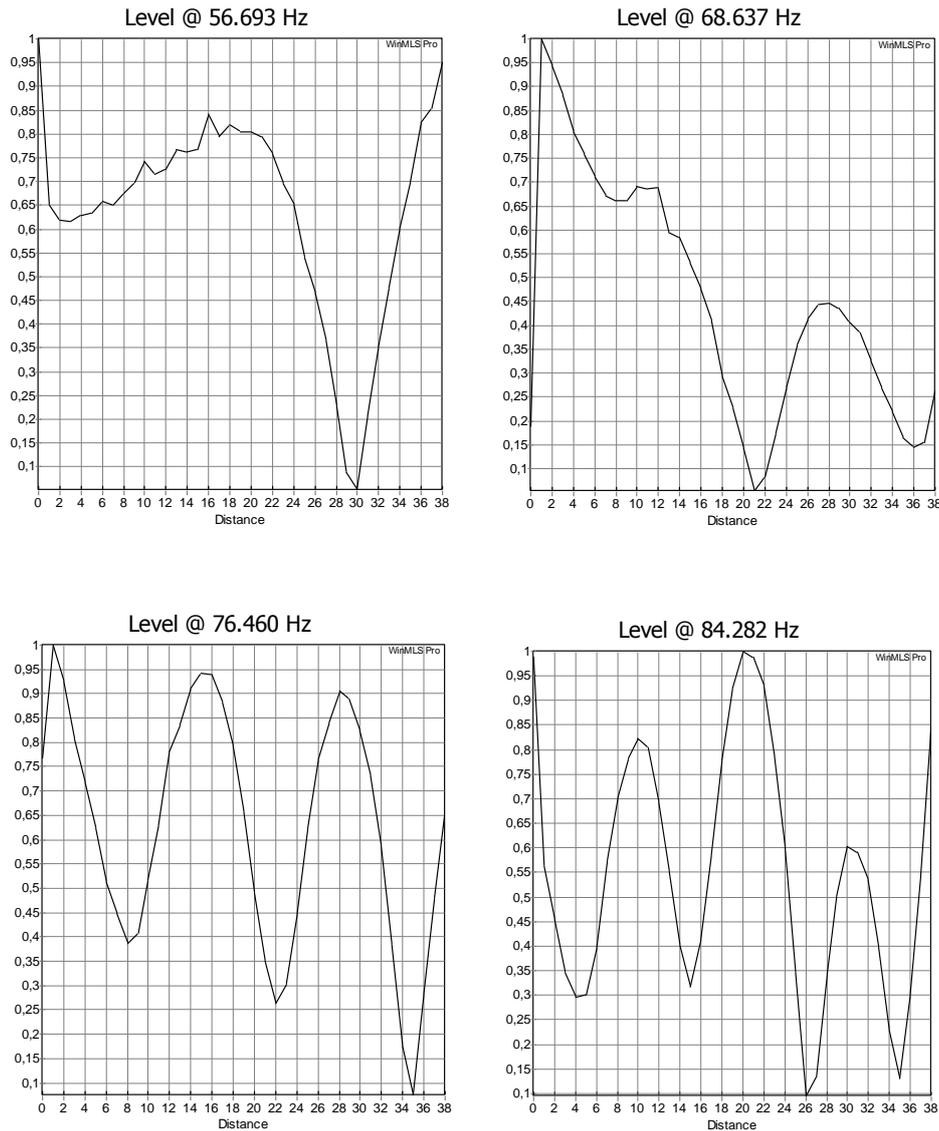


Figura 4.13 – Gráficas del eje Y para las frecuencias de interés.

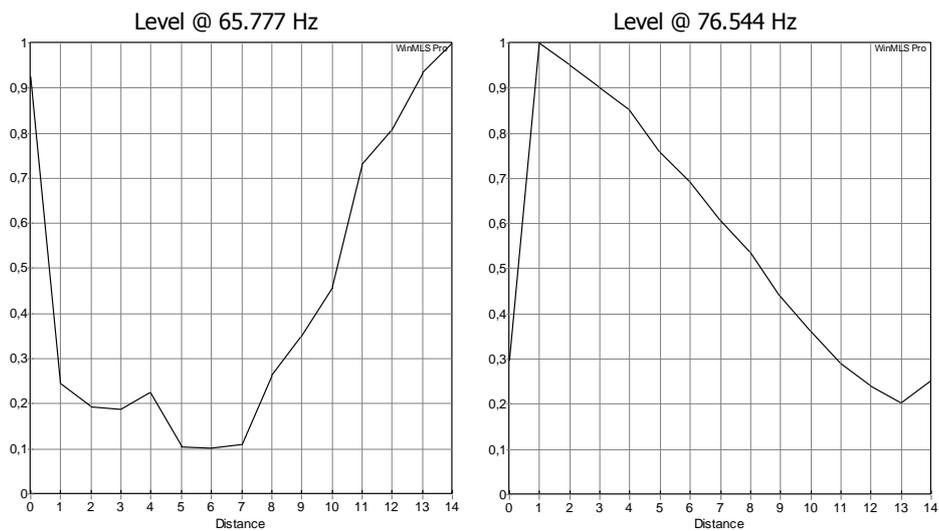
De la misma forma que se ha analizado el eje X, el eje Y presenta situaciones parecidas. Aunque se aprecia que la forma de onda estacionaria que se consigue es más parecida a la ideal (sinusoidal), esto se debe a que la medición a lo largo del eje X se introducía en la parte inferior del sobre piso, deformando la forma de la onda y alejándola de la ideal. Cosa que no pasa en el caso del eje Y, ya que la geometría es contante a lo largo de este eje.

De la misma forma se pueden apreciar cambios de nivel en la Tabla 4.3. Como en el eje X vuelven a salir diferencias de nivel importantes, en torno a 20 dBs y para la frecuencia de 55,44 Hz 41 dB, que es un cambio de nivel muy grande. Fijarnos que los máximos están concentrados en las posiciones iniciales o finales generalmente, es decir las más cercanas a la pared, los mínimos se encuentran en posiciones más centrales aunque los más pequeños más cercanos a la puerta metálica. Si queremos evitar estas zonas de muy poco nivel, lo mejor es buscar posiciones alejadas a la puerta.

Frecuencia (Hz)	MAX		MIN	
	Receptor	Nivel (dB)	Receptor	Nivel (dB)
43,48	1	89,6	36	64,2
56,44	1 y 38	87	30	46,7
68,6	2	87,1	21	63,2
76,4	2	88,5	35	65,3
84,28	20	87,3	26	65

Tabla 4.3 – EjeY.

Por último se representan las frecuencias obtenidas en el eje Z que es el que menos va a interesar para el análisis ya que el cambio de alturas no va a ser una cuestión que vaya a generar preocupación a la hora de grabar instrumentos y voces, ya que por lo general es algo que se realiza a una distancia de entre 1,20 y 1,80 m. Por otra parte reseñar la imposibilidad de abarcar todo el eje desde el suelo hasta el techo con los recursos disponible para la medición. Se ha conseguido abarcar una altura de 3 m, un 78% de la altura total del local.



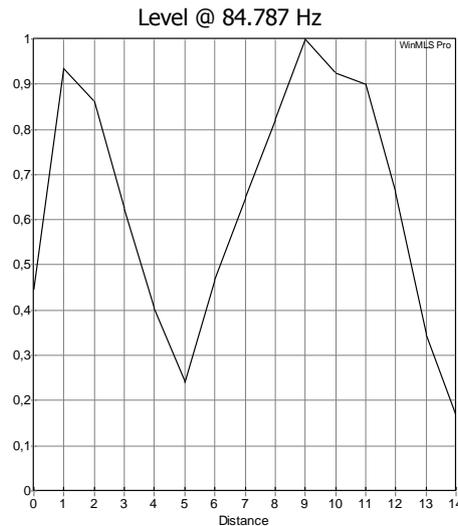


Figura 4.14 – Gráficas del eje X para las frecuencias de interés.

En la Tabla 4.4 se representan los niveles máximos y mínimos de las frecuencias estudiadas.

Frecuencia (Hz)	MAX		MIN	
	Receptor	Nivel (dB)	Receptor	Nivel (dB)
65	14	76,3	5, 6 y 7	54
76	1	90	13	74,3
84	1 y 9	87,7	5	69,1

Tabla 4.4 – Eje Z.

La única frecuencia que debe de ser fuente de precaución al cambiar de posición en el eje Z es la de 84 Hz aproximadamente, que como se puede apreciar en el gráfico anterior, a una altura de 1,00m presenta 69,1 dB de nivel y a 1,80 m del suelo se dispara a 87,7 dB. Siendo un cambio de nivel considerable. Realmente lo interesante es que no aparecen modos propios en alturas de interés como pueden ser 1,20m o 1,60m salvo en la frecuencia de 65 Hz que tenemos mínimo a esa altura, algo a considerar.

En conclusión, la zona frecuencial más propensa a presentar problemas modales en este recinto es aproximadamente entre 60 Hz y 85Hz. Para combatir este problema acústico y de esta forma que la calidad sonora no dependa excesivamente del punto donde se realice la escucha para estas frecuencias, y no percibir con mayor intensidad de la que realmente tiene que tener al posicionarse en un punto donde se sitúe un máximo o con menor intensidad al situarse donde un mínimo, se pueden realizar varias soluciones. Una de ellas son las *trampas de graves*. Con estos elementos se conseguirá absorber el exceso de energía en bajas frecuencias, y corregir, en parte, los problemas que ocasionan los modos propios. Suelen estar diseñados para instalarlos en las esquinas de la sala o en las aristas traseras de los altavoces.

4.2-Iza

4.2.1-Localización:

Nombre de la sala: Salas de ensayo y grabación de Iza

Dirección: Calle San Martín, 4

31170

Iza, Cendea de Iza (Navarra)



Imagen 4.7 - Vista a pie de calle

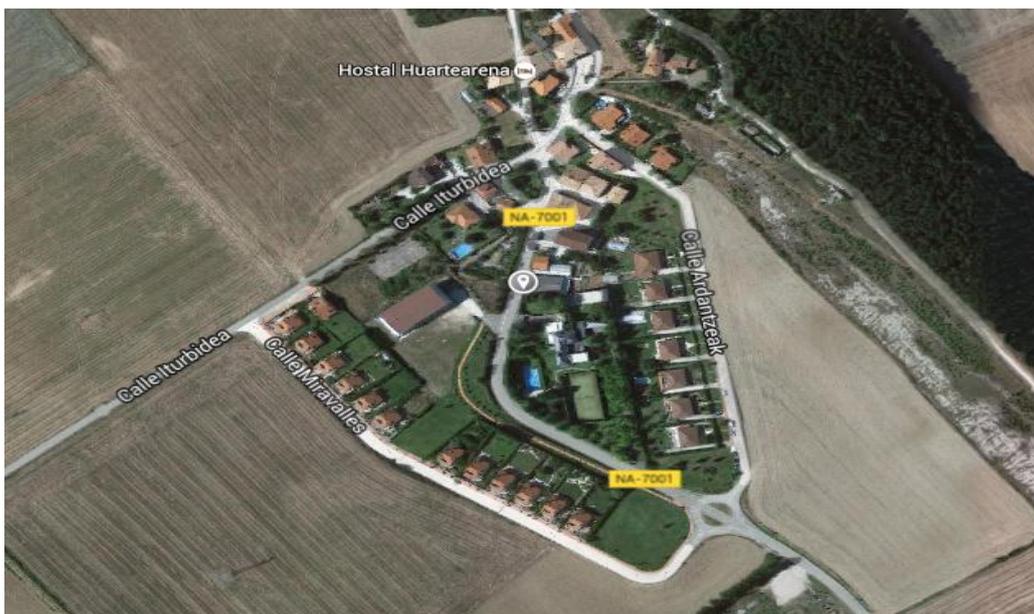


Imagen 4.8 - Localización del recinto en el pueblo

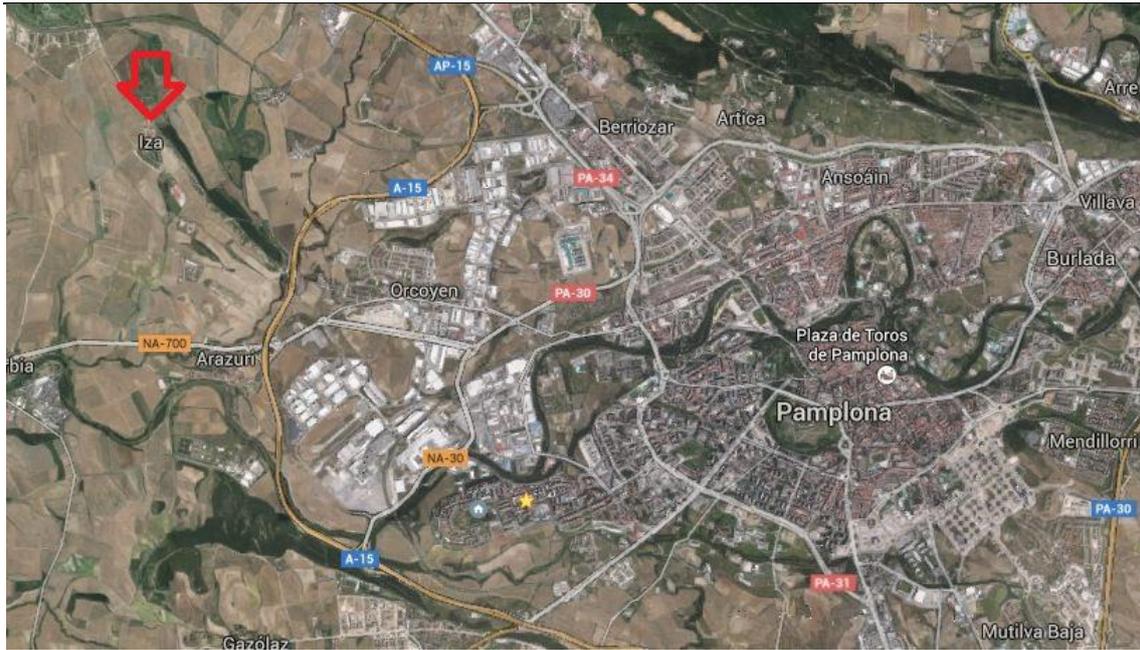


Imagen 4.9 - Situación de la población en la comarca

Dimensiones:

El recinto a analizar cuenta con dos salas. Una sala de grabación y ensayo musical y otra segunda sala de control y escucha.

La sala de grabación tiene las siguientes medidas aproximadas (ya que no es una sala paralelepípeda):

6,30m x 5,80m x 2,50m (Ancho x Largo x Alto)

Volumen aproximado: 91,35 m³

La sala de control y escucha tiene las siguientes medidas aproximadas

4,80m x 6,40m x 2,50m (Ancho x Largo x Alto)

Volumen aproximado: 76,8 m³

La localización del local se explica de forma clara en las Imágenes 4.7-4.9. La sala de grabación, como se puede observar en las imágenes del local (Imagen 4.10 e Imagen 4.11), no es una sala paralelepípeda. Tiene más de cuatro paredes. Dos con forma curva (no plana), otra con un saliente en forma triangular, etc... ninguna de ellas es paralela con ninguna. Los que si son paralelos entre sí son el suelo y el techo. También hay dos puertas (una de salida de la sala y otra de acceso a la sala de control). En cuanto a la sala de control y escucha (Imágenes 4.12 y 4.13), sí que tiene una forma más cercana a una sala paralelepípeda, pero no lo es completamente. Así que, cualquier cálculo donde se suponga recinto paralelepípedo no será más que una aproximación con la realidad.



Imagen 4.10 – Vista de la sala de grabación y ensayo.



Imagen 4.11 – Vista de la sala de grabación y ensayo.



Imagen 4.12 – Vista de la sala de control y escucha.



Imagen 4.13 – Vista de la sala de control y escucha.

Análisis basado en ISO-3382

En este apartado, se describe el análisis de los resultados obtenidos bajo la norma ISO 3382. Este análisis se ha realizado en la sala de grabación ya que es la sala que requiere una caracterización de sus propiedades acústicas. Aquí se exponen por una parte el tiempo de reverberación T_{30} y por otra el resto de parámetros acústicos obtenido.

T_{30} :

La ISO-3382 establece que el tiempo de reverberación puede promediarse espacialmente para dar un valor representativo del conjunto del recinto por frecuencia. Se consigue haciendo la media aritmética de todas las posiciones de micrófono y fuente. En la Figura 4.15, se representa de esa manera y con su rango de variación máximo.

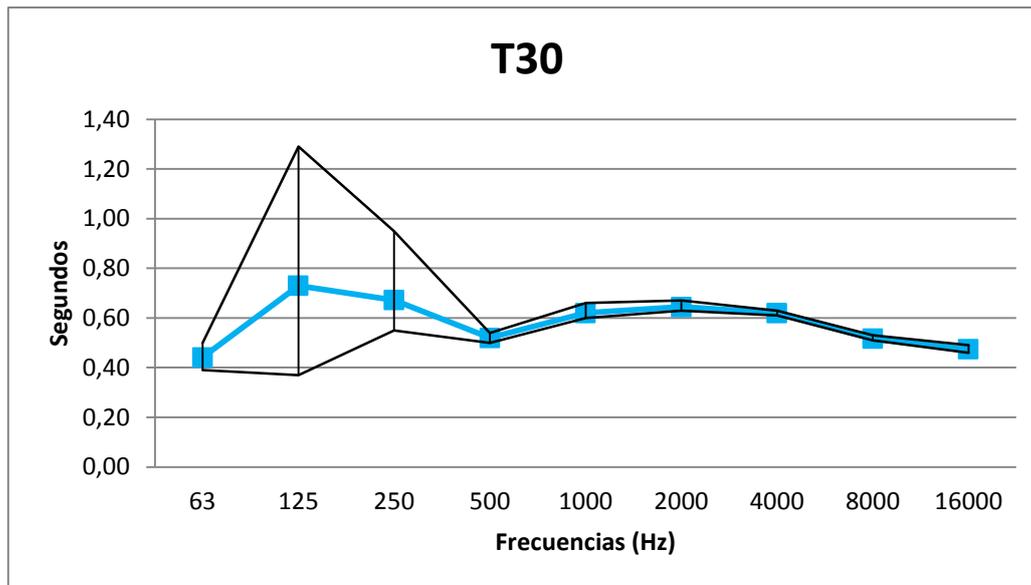


Figura 4.15 – T_{30} promedio de todas las posiciones de receptor y fuente y rango de variación.

El mínimo que establece la norma es de 6 posiciones de receptor y una de fuente sonora, la medición realizada ha consistido en 9 posiciones de receptor y una de fuente. Por lo tanto, aunque la sala sea de una dimensiones pequeñas, ha sido una medición que cumple la norma ISO-3382.

Se observa que el rango de variación es prácticamente nulo para 500 Hz y bandas frecuenciales superiores. Los rangos de variación son considerables para las bandas de 125 Hz y 250 Hz. Indicativo de que la frecuencia a la que a sala y los elementos que en ella se encuentran (instrumentos musicales y percusión) resuenan en estas frecuencias. También puede ser resultado de algún tiempo de eco flotante entre techo y suelo.

Por otro lado, la norma establece como valor único el promediado aritmético de las frecuencias de 500 y 1000 Hz. En esta sala $T_{30mid} = 0,57$ s. Un valor de tiempo de reverberación bajo, es decir, es una sala con poca reverberación, es decir sorda o apagada. Propiedad que interesa para salas de grabación que es el caso. Aunque sería interesante conseguir un T_{30} sensiblemente inferior ya que es una sala de pequeñas dimensiones.

EDT:

En la Figura 4.16, se representa el EDT (*Early Decay Time*) promedio con su rango máximo de variación. Este parámetro más relacionado con la impresión subjetiva de la viveza que el T_{30} . Comparando ambas gráficas, se observa que la viveza subjetiva es considerablemente inferior, para frecuencias bajas y prácticamente igual para frecuencias medias y altas.

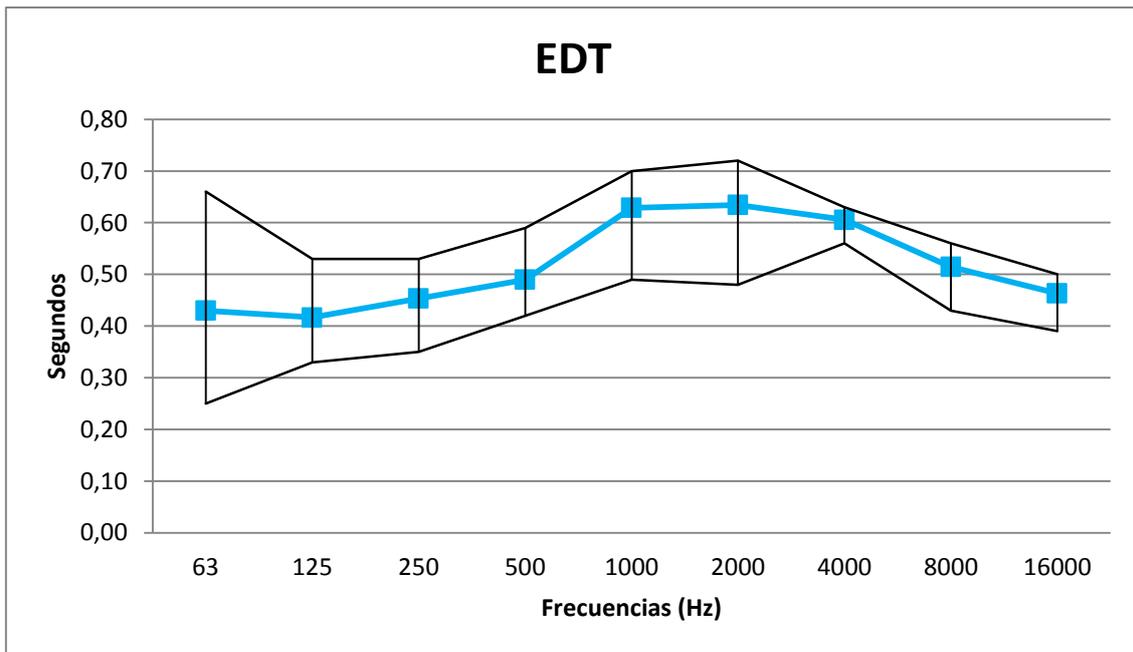


Figura 4.16 – EDT promedio.

Viendo estos valores tan dispares de T_{30} y EDT para la banda frecuencial de 125 Hz, se va a analizar la curva del T_{20} para analizar con mayor detalle el tiempo de reverberación de esta sala. El T_{20} , en la Figura 4.17, es un parámetro más destinado a salas de poco volumen para comparar niveles de presión sonora y para medidas de corrección de aislamiento acústico en edificación. Como esta sala es de poco volumen puede ser el parámetro adecuado para la caracterización del tiempo de reverberación. Mejor que el EDT, ya que no caracteriza el tiempo de reverberación de forma subjetiva y más adecuado a las dimensiones de la sala que el T_{30} , más destinado a salas de volúmenes altos (auditorios etc...).

Analizando la Figura 4.17, se observa que el rango de variación es aceptable y una curva considerablemente plana y más acorde a lo esperado de una sala de estas características. Sala de poca viveza, aunque se podría conseguir menor viveza y una curva más plana bajando los tiempos de reverberación para las bandas frecuenciales 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz con valores más cercanos a 0,50 s.

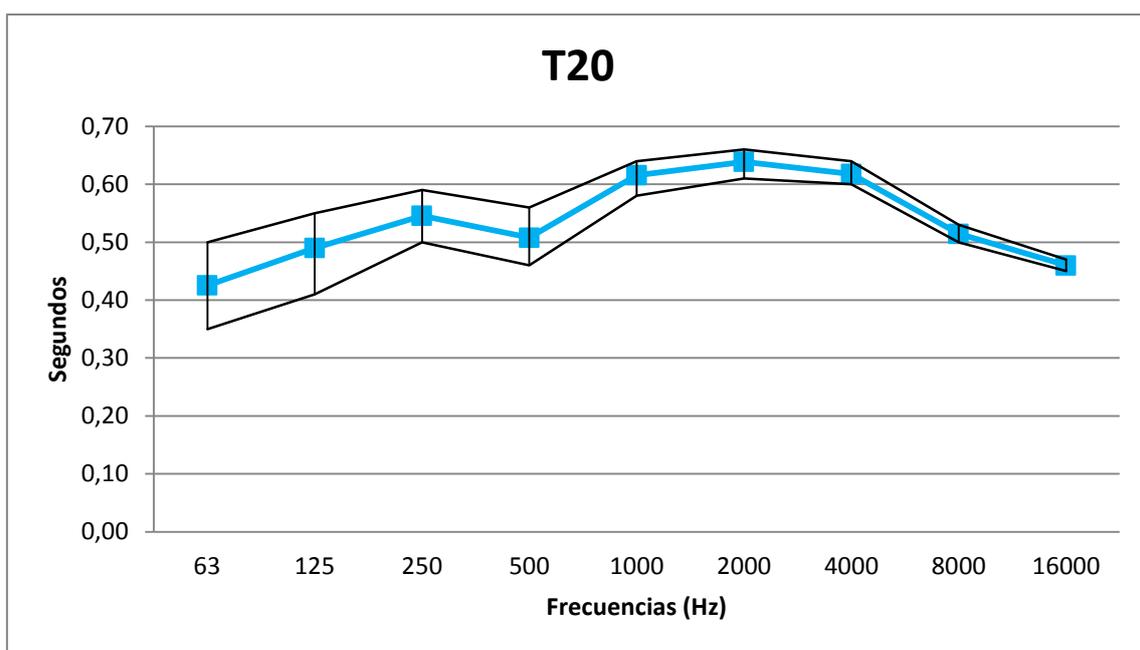


Figura 4.17 – T₂₀ promedio y su rango de variación.

Claridad vocal (C₅₀):

La claridad del mensaje oral se caracteriza con la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo es decir, incluye el sonido directo y las primeras con las que llegan más tarde. Este parámetro es el C₅₀ y está representado en la Figura 4.18 con su rango de variación máximo.

La manera de caracterizar la sala más abreviada es con el valor “Speech Average”, una proporción del C₅₀ de las distintas bandas de frecuencia que influyen en la inteligibilidad de la palabra. En este caso es igual a 4,06 dB.

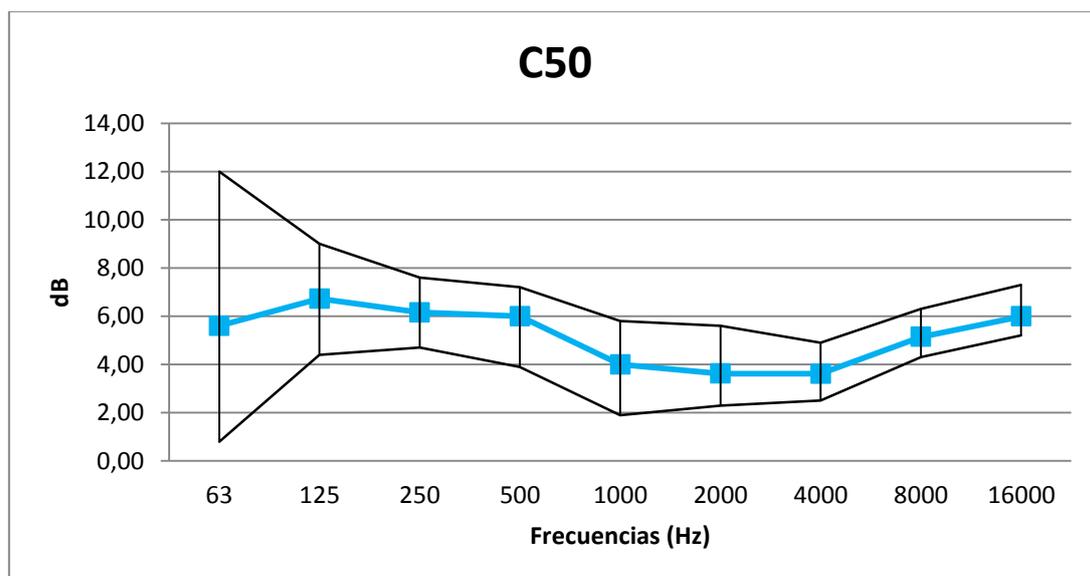


Figura 5.18 – C₅₀, claridad de la voz en la sala.

Para una inteligibilidad aceptable, se debe cumplir un Speech Average mayor o igual a 2 dB. Por lo tanto cumple la norma de manera clara, así que se considera una sala con inteligibilidad de palabra y sonoridad muy buenas. Era un resultado de esperar dado que las dimensiones de la sala son muy reducidas.

Claridad musical (C_{80}):

El parámetro C_{80} , que se puede visualizar en la Figura 4.19, da información del grado de separación entre los diferentes sonidos que conforman una composición musical.

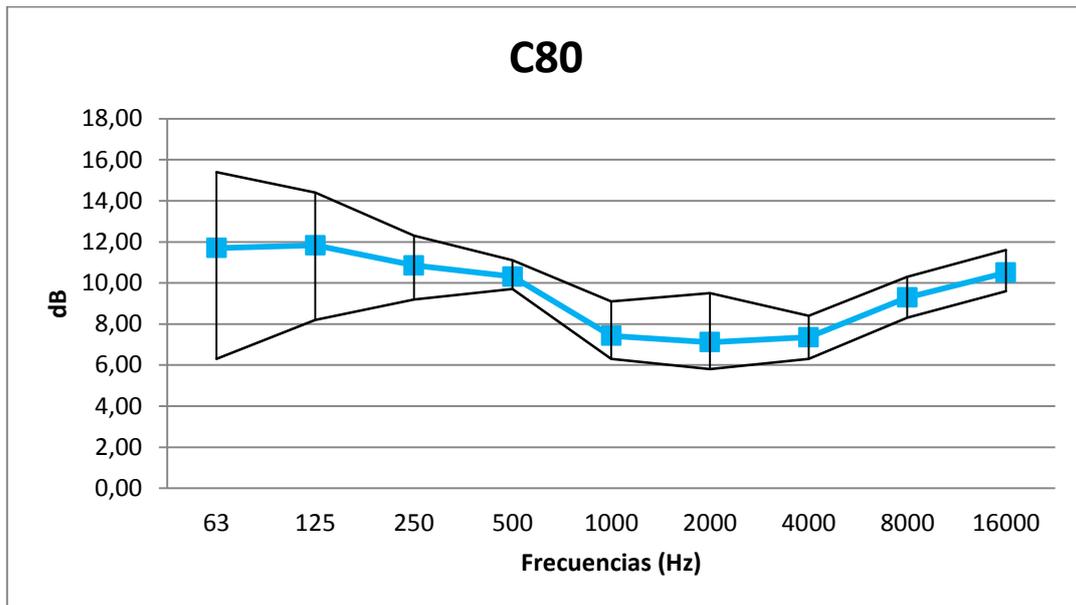


Figura 4.19 – C_{80} . Claridad musical promedio con su rango de variación máximo.

El *Music Average* (valor único representativo) es igual a 8,28 dB. Por lo tanto, la energía sonora inmediata es muy superior a la tardía, es decir, el sonido es muy claro. Resultado natural para una sala pequeña como es el caso.

Análisis basado en EBU Tech. 3276 2ª Edición

La sala del local destinada a la escucha y control (Imágenes 6 y 7), ha sido evaluada bajo las recomendaciones que recogen la EBU Tech. 3276, unas recomendaciones para las salas destinadas a la evaluación de material y programas de sonido.

Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación, que es una de las características más importantes del campo reverberante, es el primer parámetro sobre el que recomienda la EBU Tech. 3276, debe de ser suficientemente difuso sobre la zona de escucha de tal modo que se eviten los efectos acústicos no deseados como el eco flotante. En la Figura 4.20 se representa el tiempo de reverberación (T) promedio de los dos altavoces (R y L) en color azul desde 63 Hz hasta 8kHz por bandas de tercio de octava y en rojo los límites descritos por la EBU Tech.

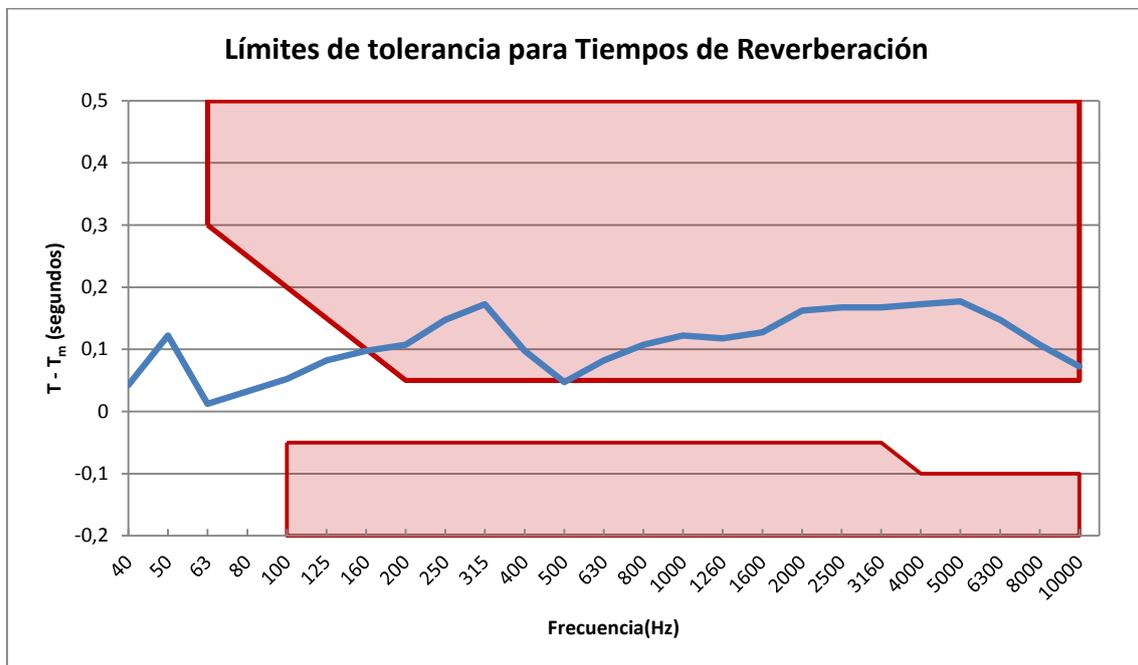


Figura 4.20 – Límites de tolerancia para el tiempo de reverberación (EBU Tech. 3276 2ª Edición).

La representación está normalizada con T_m (valor nominal), que se consigue aplicando una fórmula que recoge la recomendación basada en el volumen de la sala. Esta sala tiene un $T_m = 0,23s$.

Se puede observar que cumple la recomendación para frecuencias muy bajas. Para el resto de frecuencias los valores T incumplen la recomendación sobrepasando el límite superior, lo que describe un T medido superior al tiempo de reverberación objetivo (T_m). Es decir, que la sala es más reverberante de lo esperado por sus dimensiones. Por lo tanto, la EBU Tech. 3276 dice que es una sala reverberante para frecuencias superiores a 160 Hz en el punto de escucha.

Por otro lado, la EBU describe unos límites de variación entre bandas adyacentes. $<0,05 s$ entre 200 Hz y 8 kHz y variación inferior al 25% del tiempo de reverberación mayor de

ambas bandas. El primer límite se incumple entre las variaciones de las bandas de 250 Hz a 630 Hz y entre la banda de 6300 y 8000 Hz. Todas ellas sobre pasan el límite por 0,01-0,03 s. El segundo límite, se incumple entre la banda de 125-160 Hz y 160-200 Hz. En el resto las variaciones entre bandas adyacentes son aceptables por la recomendación EBU Tech. 3276.

El análisis anterior se ha realizado con el aporte sonoro del equipo electro acústico de la sala en su conjunto. A continuación se realiza el mismo análisis pero tomando cada elemento reproductor por separado. En la Figura 4.21, se representan los límites de tolerancia para los tiempos de reverberación del altavoz RR y del altavoz L por separado.

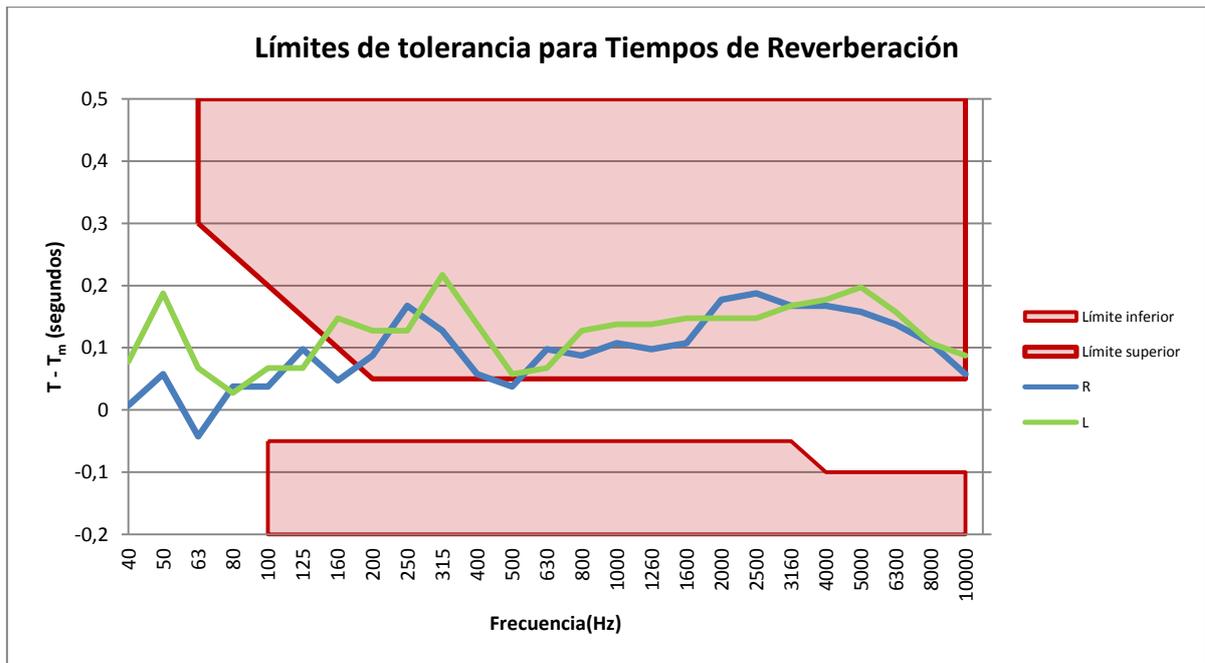


Figura 4.21 – Límites de tolerancia para T (EBU Tech. 3276). Altavoces R y L.

Ambos altavoces presentan tiempos de reverberación normalizados con referencia T_m semejantes. Siendo un poco más reverberante el altavoz L que el R para casi todas las frecuencias. Pero totalmente asumible, ya que las diferencias no son grandes. Al igual que en análisis anterior con el promediado de ambos altavoces, incumplen la recomendación en frecuencias a partir de 160 Hz. Para corregir esta situación habría que buscar diferentes opciones como mayor absorción de la sala para frecuencias medias y altas.

Curva de respuesta en frecuencia de la sala

La curva de respuesta en frecuencia representa la respuesta que presenta la sala para cada frecuencia. Se reproduce ruido rosa por los altavoces y se evalúa por bandas de 1/3 de octava. Esta curva es un importante criterio para la evaluación de la sala de escucha y por lo tanto para la evaluación de las condiciones de escucha. Se corresponde con la sensación subjetiva del sonido reproducido por el equipo electro acústico de la sala.

Los niveles que se representan en la Figura 4.22, se obtienen mediante un promediado de los niveles con el valor medio L_m (valor medio de los niveles de las bandas desde 200 Hz

hasta 4kHz). Los límites de tolerancia los deberán cumplir tanto el altavoz R como el L por separado. Por lo tanto tendremos dos valores L_m , uno por cada altavoz. Para el R $L_m = 69$ dB y para el altavoz L, $L_m = 69,7$ dB.

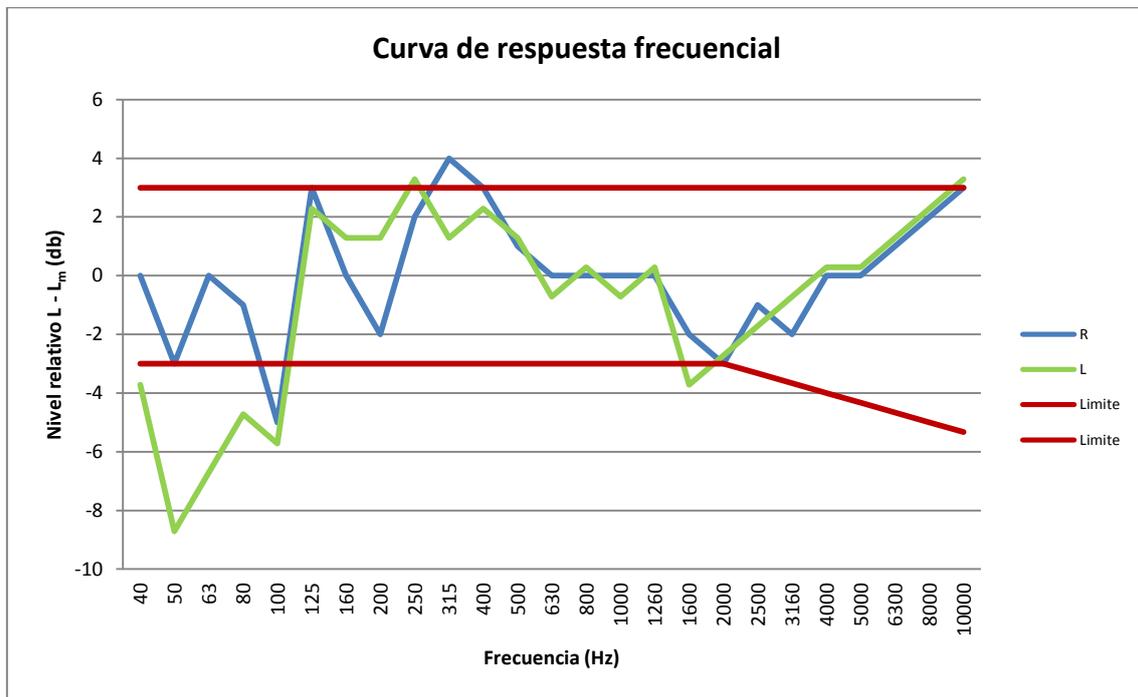


Figura 4.22 – Límites de tolerancia para la curva de respuesta de la sala (EBU Tech. 3276).

Las respuestas frecuenciales de ambos altavoces son prácticamente iguales para frecuencias medias y altas. Y se mantienen dentro de los límites de tolerancia. En bajas frecuencias, el altavoz L supera los límites de tolerancia. En ocasiones puede ser difícil cumplir los límites de tolerancia en bajas frecuencias, especialmente en salas pequeñas, como es el caso. Esta situación se puede compensar ajustando las posiciones tanto de los altavoces como del punto de escucha incluso puede ser necesaria ajustar la respuesta de los altavoces para conseguir una curva más plana y que cumpla los límites de tolerancia recomendados por la EBU Tech. No obstante los resultados de esta sala no son para nada alarmantes y la necesidad de estas correcciones no es primordial.

Nivel de escucha

El nivel de escucha de referencia, $L_{LISTref}$, es usado para ajustar la ganancia de referencia (odB) para el ajuste del nivel en sesiones de escucha. Cada canal (con todo el dispositivo complejo de los elementos como pueden ser amplificadores, filtros, etc...) tiene un controlador de volumen. En el aspecto de niveles de escucha, es recomendable que el equipo cumpla el anexo 3 de la EBU Tech. 3276, donde se describen las recomendaciones generales.

La diferencia de los niveles entre los dos canales no debe exceder de 1 dB. Las diferencias de 0dB y 1 dB son aceptables. Diferencias mayores equivalen a no cumplir la recomendación. Tal y como se observa en la Figura 4.23, los altavoces cumplen esta recomendación.



Figura 4.23 – Niveles de cada altavoz y diferencia entre ellos.

Dimensiones para la escucha

La sala de control presenta un volumen aproximado de $76,8 \text{ m}^3$. La EBU Tech. 3276 en su anexo 2 recomienda qué dimensiones debe de tener una sala de escucha. Marca como área mínima de suelo los 40 m^2 , para salas de escucha normales y 30 m^2 para las de alta calidad. La sala cumple los dos requisitos, ya que la superficie total de suelo es de $30,72 \text{ m}^2$.

Recomienda un volumen inferior a 300 m^3 y la sala, que es de $76,8 \text{ m}^3$, cumple la recomendación en lo que respecta a volumen. Por lo tanto en el aspecto de dimensiones, la sala cumple con la recomendación.

Ruido de fondo

La EBU Tech. 3276 analiza en este apartado el nivel de presión sonora provocado por el ruido de fondo continuo, como puede ser el sistema de aire acondicionado, los equipos electrónicos que estén funcionando en la sala o incluso de fuentes externas a la misma.

La recomendación dice que el ruido de fondo medido en el punto de escucha, no debería de ser ni impulsivo, ni cíclico, ni tonal y que no debe exceder la curva de NR10. Y bajo ningún concepto debe permitirse un ruido de fondo que exceda el nivel de la curva NR15 (menos restrictivo que el NR10). En la Tabla 4.5 se ven los valores del NR10 y NR15.

	Frecuencias (Hz)									
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
NR 10	62,2	43,4	30,7	21,3	14,5	10	6,6	4,2	2,3	
NR 15	65,6	47,3	35	25,9	19,4	15	11,7	9,3	7,4	

Tabla 4.5

En la Figura 4.24 se puede ver los límites descritos en la Tabla 4.5 en rojo y en color verde y azul las medidas de ruido de fondo realizadas. Verde para la medida realizada con el equipo de la sala encendido, y azul para la medida realizada con el equipo apagado.

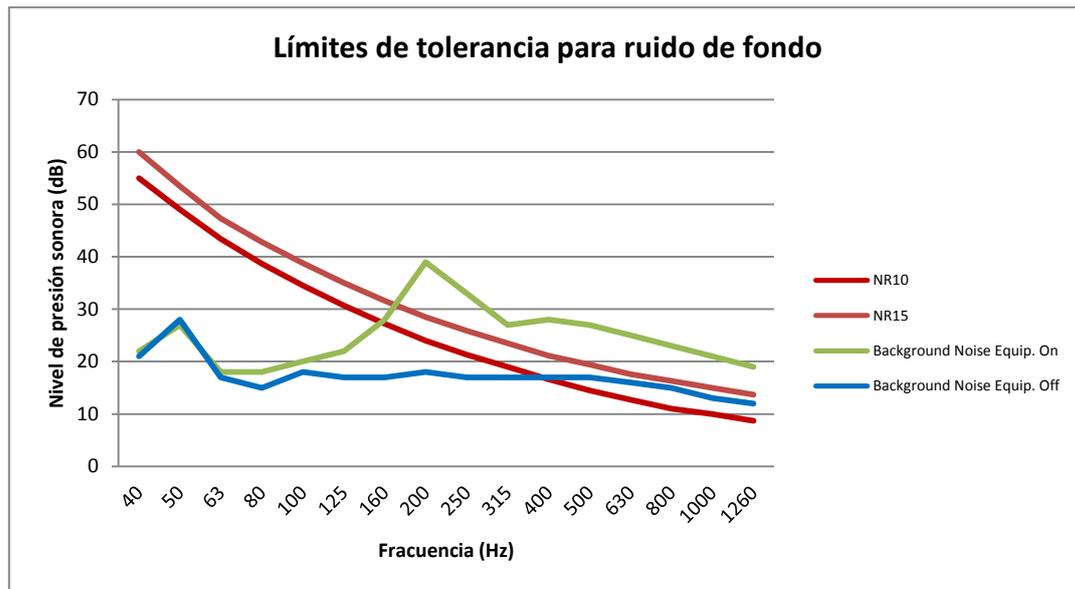


Figura 4.24 – Ruidos de fondo y curvas de NR10 y NR15.

Como se puede apreciar en la Figura 4.24, los dos ruidos de fondo medidos son muy diferentes el uno del otro. Queda claro el ruido que aporta el equipo de la sala de escucha, y a qué frecuencias su aporte es mayor. Siempre por encima del ruido con todo apagado, como era de esperar, y con un claro pico de nivel de presión a 200 Hz y el típico de la red eléctrica a 50 Hz (este último para ambos casos).

Los dos ruidos de fondo incumplen la recomendación de no exceder la curva de NR 10 para frecuencias medias. Con equipo encendido, la curva menos restrictiva se supera en 160 Hz y con el equipo apagado esta misma curva no es superada. Queda clara constancia del aporte de ruido del equipo no es nada recomendable, por ello para estos tipos de sala se recomienda aislar o instalar en un recinto a parte los elementos que mayor ruido pueden aportar, como las torres de ordenador, etc...

Destacar que tampoco son niveles en ningún caso alarmantes ya que el ruido está siempre por debajo de 30 dB (salvo en el pico antes comentado de 200 Hz), así que tampoco debe de ser una cuestión en la que plantear cambios y gastos económicos para la mejora de la sala, dado el uso privado y aficionado que tiene en la actualidad. Si se quisiera destinar a un nivel de uso altamente profesional como estudio de grabación, esta mejora sería fundamental para la mejora de la sala.

Por otro lado, el posicionamiento de los altavoces y el oyente son un factor a tener muy en cuenta. La EBU Tech. 3276 trata este aspecto en su primer anexo. En esta sala el

posicionamiento es correcto en lo que respecta la altura del punto de escucha. También cumple la recomendación de que los altavoces deben de estar situados como mínimo a 1 metro de la pared. Un punto a corregir en la posición de los altavoces es que no deben de situarse justo sobre la mesa de trabajo si no que siempre con una elevación respecto a la misma, por un tema de reflexiones del sonido reproducido con la mesa.

Por lo tanto se dan por válidas las medidas de ruido de fondo.

Análisis de los modos propios

El análisis de los modos propios del recinto se divide en dos partes. En primer lugar un cálculo teórico mediante las herramientas teóricas para su cálculo y en segundo lugar la medición in situ de los mismo mediante la herramienta que ofrece el software WinMLS para ello. Este análisis se ha realizado en la sala de grabación y no en la de escucha, ya que en esta sala es donde los modos propios más van a afectar dada su función.

Cálculo teórico

Con las anteriores herramientas de cálculo teórico explicadas en el capítulo teórico, se obtienen la estimación de los modos propios que tendrá el recinto:

Ancho	Largo	Alto	C	Volumen	Superficie	Tmid (estimación)	Coef. Absorción
6,30	5,80	2,50	340	91,4	133,6	0,6	0,3
Frecuencia Limite						162 Hz	

Tipo	Frecuencia (Hz)
2	27
2	29
1	40
2	54
2	59
1	61
1	65
2	68
1	73
1	74
0	79
1	80
2	81
1	86
1	87
2	88
1	90
0	92

Tipo	Frecuencia (Hz)
1	92
0	94
1	100
1	103
0	105
1	106
2	108
0	110
1	111
1	112
0	114
2	117
1	120
1	120
0	121
1	123
0	124
1	128

Tipo	Frecuencia (Hz)
1	129
0	131
2	135
1	136
2	136
0	138
1	138
0	138
1	139
1	139
1	139
0	140
0	142
1	142
0	146
1	146
2	147
1	147

Tipo	Frecuencia (Hz)
1	148
1	149
0	149
0	151
1	151
0	154
0	155
1	156
0	158
0	158
1	158
1	159
0	161
1	161
1	162
2	162
1	162
0	162

Dónde:

Tipo 0	modo oblicuo
Tipo 1	modo tangencial
Tipo 2	modo axial

Se puede ver, como era de esperar, que los modos propios a tener en cuenta se encuentran a frecuencias bajas. La frecuencia máxima es 162 Hz y en base a estos cálculos se considerarán las frecuencias mayores como ausentes de modos propios que repercutan negativamente en la acústica del recinto.

En resumen, los cálculos teóricos previos a la medición revelan que aproximadamente hay que fijarse en frecuencias inferiores a 162 Hz. No obstante, hay que considerar estos cálculos como lo que son, una aproximación. Ya que parten de ciertas suposiciones de partida ideales. Y que este es un límite que no hay que entender como línea roja que los modos propios dejan de repercutir progresivamente aumenta la frecuencia y no es un umbral absoluto.

Cálculo práctico

El software utilizado para la realización de todas las medidas ha sido WinMLS. Este software ofrece un formato concreto para la medición de los modos propios.

El método trata en tomar mediciones a lo largo de un eje (línea recta) en cada una de las tres dimensiones espaciales (x, y, z). Por lo tanto se obtendrá la respuesta en frecuencia a lo largo de del eje para cada dimensión.

: Root of Frequency Response Magnitude - Room

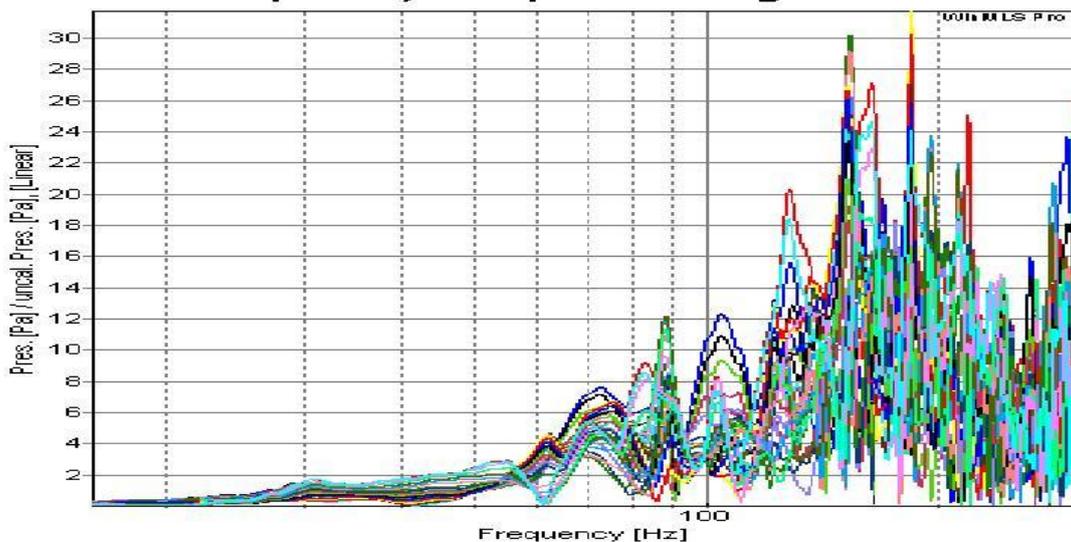
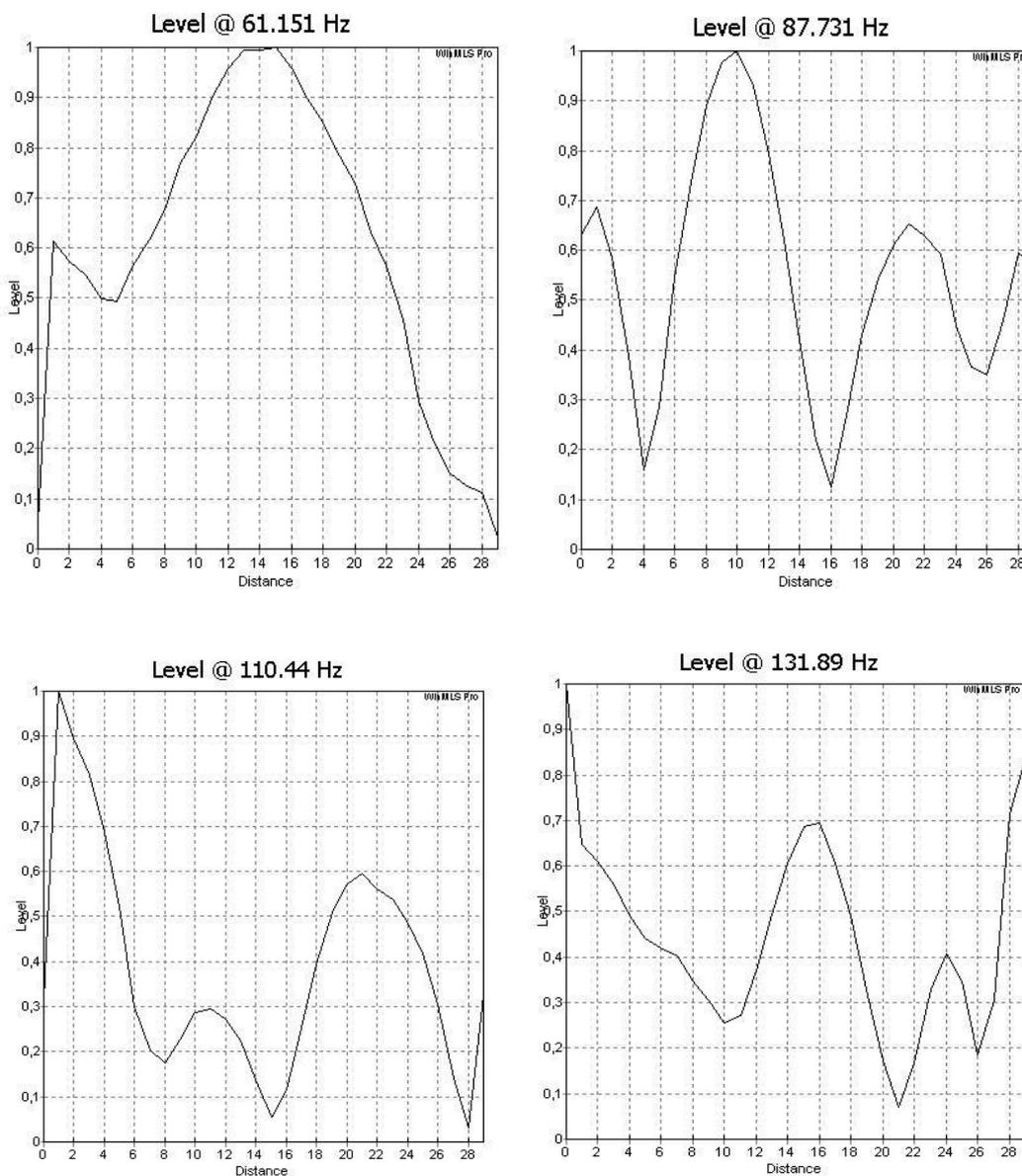


Figura 4.25 – Representación gráfica de los resultados por cada eje (en este caso el eje X) de WinMLS.

En la representación espectral de los resultados, Figura 4.25, hay que fijarse en una disposición concreta de los resultados de obtenidos para el conjunto de receptores. Donde se vea que hay mayor diferencia de nivel, es decir mayor anchura del conjunto de curvas. Será a esas frecuencias donde se pueden originar problemas a nivel acústico para cada dimensión ya que serán frecuencias a las que se encuentran mayores cambios de nivel en el correspondiente eje. Con los resultados teóricos obtenidos previamente, se podrá analizar ciertas frecuencias de manera concreta, que en el modelo ideal son las de los modos, para verificar si esto es así en la realidad.

Colocando el cursor sobre las zonas de mayor diferencia de nivel y guiándonos por las frecuencias calculadas teóricamente, se obtienen las siguientes gráficas (Figura 4.26, 4.27 y 4.28) correspondientes a las frecuencias de interesa de cada eje.



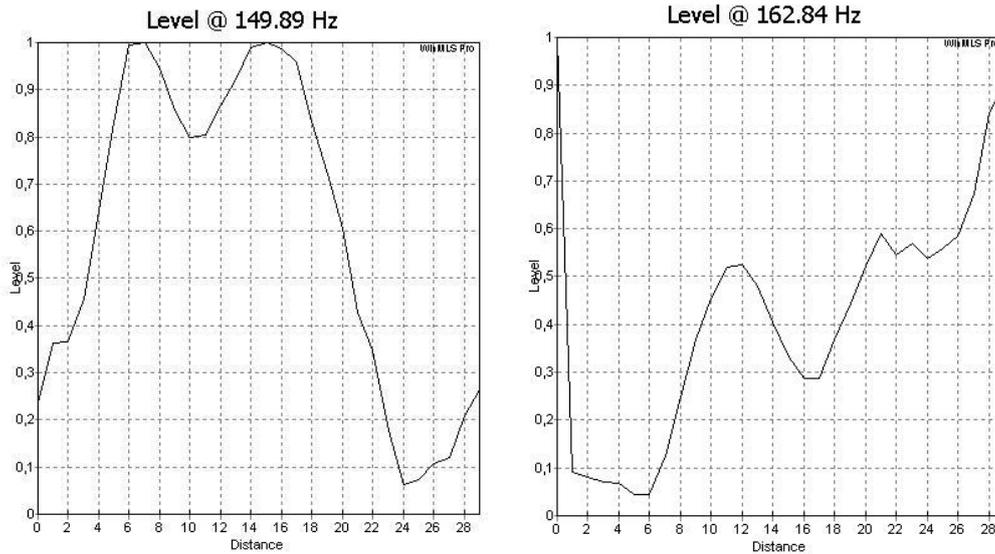
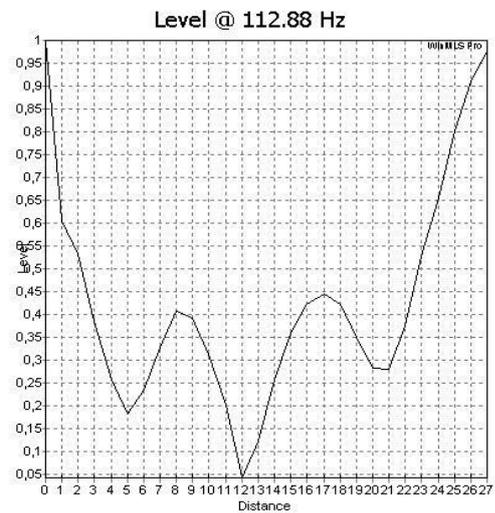
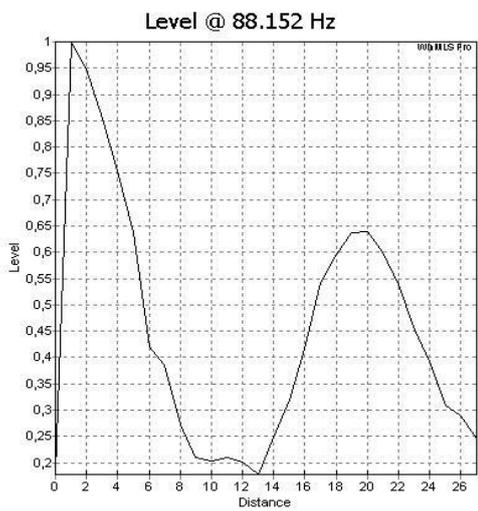
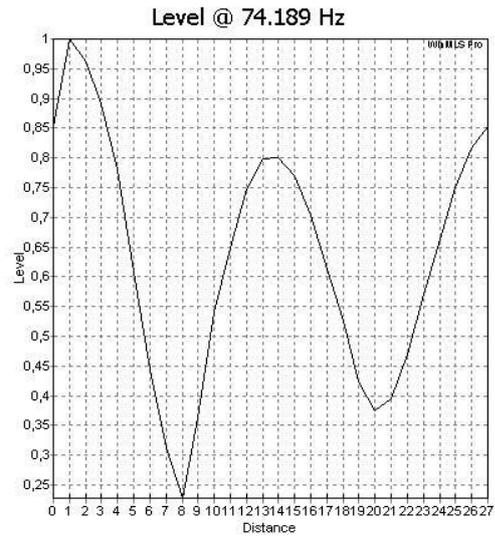
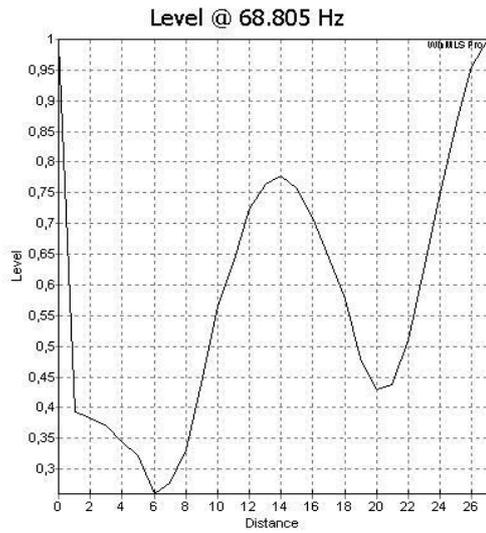


Figura 4.26 – Gráficas del eje X para las frecuencias analizadas.

Tal y como se puede apreciar en las 6 frecuencias analizadas, los modos propios no son perfectos, no se ven ondas estacionarias perfectas. Esto es porque la sala analizada está lejos de ser una sala paralelepípeda, donde los modos propios son más cercanos al modelo ideal. Pero aunque no aparezcan de forma clara y gráfica las ondas estacionarias, se sigue viendo el fenómeno que provoca que la existencia grandes cambios sonoros (disminución o aumento de nivel) a determinadas frecuencias al cambiar de posición en el recinto. El eje vertical aparece normalizado de 0 a 1, y puede ser que para cada frecuencia es una normalización sea equivalente a diferentes cambios de nivel, por lo tanto, se ha buscado el nivel de presión sonora en los máximos y mínimos, mirando sus espectros frecuenciales para cuantificar mejor las diferencias, se pueden observar en la Tabla 4.6. Como se puede observar son diferencias de nivel muy grandes para todas las frecuencias analizadas. Diferencias en torno a 20-30 dB solo con cambiar la posición de escucha. Remarcar que los máximos se encuentran generalmente muy cerca de las paredes, pero en el caso de 87 Hz el máximo se encuentra a 2 metros de la pared, y el mínimo a 1,2 m de este, así que es una frecuencia bastante problemática ya que hay una diferencia de 29,8 dB en tan solo 1,2 m.

Frecuencia (Hz)	MAX		MIN	
	Receptor	Nivel (dB)	Receptor	Nivel (dB)
61	15	89,9	28	61,6
87	10	98,5	16	68,7
110	1	97,1	15	70,3
131	28	102,2	21	78,9
149	7	104,3	24	80
162	28	104	6	77

Tabla 4.6 – Eje X



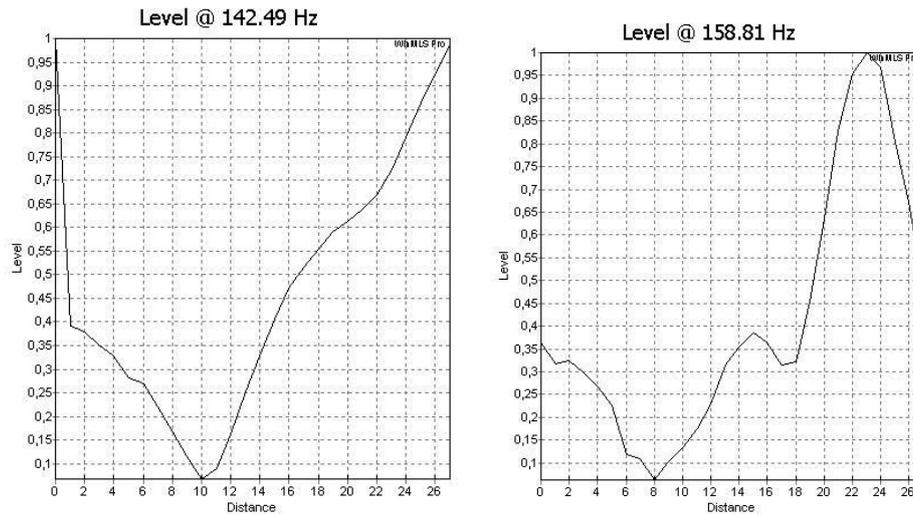


Figura 4.27 – Gráficas del eje Y para las frecuencias de interés.

De la misma forma que para el eje X, el análisis para el eje Y nos dice que esta vez no hay máximos absolutos en la zona central del eje, se encuentran todos en los extremos. Por lo tanto en la zona central del eje Y sólo tendremos mínimos absolutos para las frecuencias analizadas pero habrá que compararlas con los máximos relativos cercanos. Los niveles se pueden observar en la Tabla 4.7.

Frecuencia (Hz)	MAX		MIN	
	Receptor	Nivel (dB)	Receptor	Nivel (dB)
68,8	26	96	6	81
74,1	1	94,8	8	82
88,1	1	96,3	12	53,1
112,88	26	101,3	5	73,1
142,5	26	110,3	10	83,1
158,8	23	105,4	8	80,3

Tabla 4.7 – Eje Y.

Las diferencias entre los máximos y los mínimos oscilan entre 20-30 dB por lo general. Con casos extremos de más de 40 dB para 88 Hz o 15 dB para 68 Hz. En el caso del mínimo de 88 Hz tiene un nivel muy inferior a los otros mínimos, es un modo propio muy pronunciado en esa posición a esa frecuencia. Los máximos relativos que se encuentran en las zonas centrales, y por ello cercanos a los mínimos absolutos, por lo general no tienen mucho menor nivel que el máximo absoluto, en casos máximos no llegan a 10 dB menos que los máximos absolutos, por ello el eje vertical no representa una normalización lineal.

Por último, se representa el eje Z, en el que el análisis se centra en analizar las alturas importantes como pueden ser de 1,20m a 1,80m.

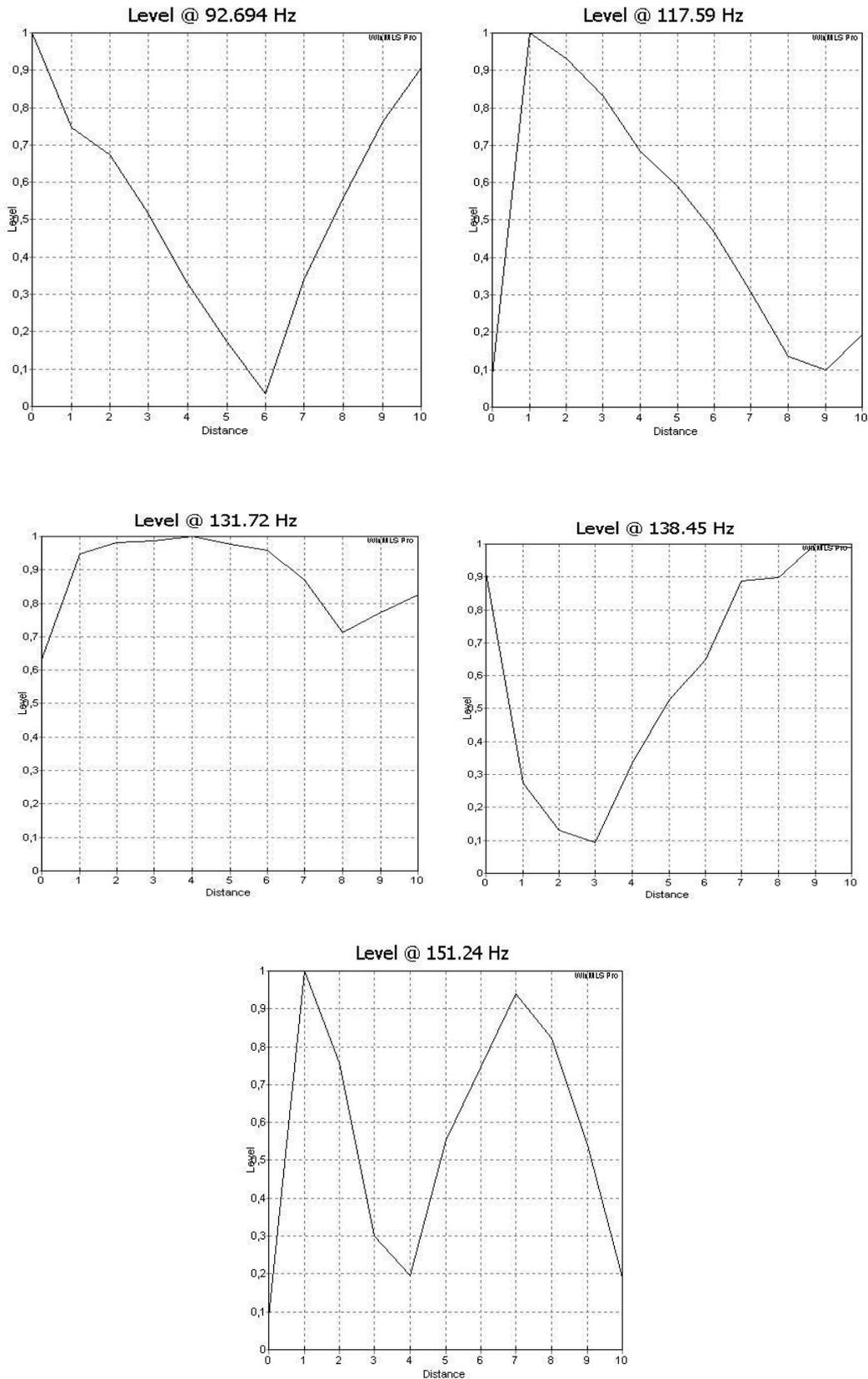


Figura 4.28 – Gráficas del eje Z para las frecuencias de interés.

En la Tabla 4.8 se representan los niveles máximos y mínimos de la Figura 14.

Frecuencia (Hz)	MAX		MIN	
	Receptor	Nivel (dB)	Receptor	Nivel (dB)
92,6	1	98,5	6	63,4
117,59	1	95,9	9	69,7

Tabla 5.8 – Eje Z.

Únicamente se han analizado los niveles de dos frecuencias porque cumplían el criterio que hemos marcado de alturas anteriormente. Son diferencias entre 25-36 dB muy considerables, pero respecto a máximos situados a 0,2m del suelo. Así que, no existe un grave problema con modos propios en el eje Z ya que en la altura de interés las diferencias de nivel, aunque existen, son diferencias asumibles.

En conclusión, las frecuencias más problemática de esta sala para los modos propios son de 65 a 135 Hz. Para combatir este problema acústico y así mejorar la calidad sonora de la sala, se pueden instalar trampas de graves en sitios como esquinas o la utilización de resonadores. También se podría recomendar ondular de alguna manera el techo para que no sea paralelo con el suelo, colocando paneles inclinados o algún tipo de falso techo rugoso. Por otro lado, las aristas donde se juntan paredes y techo se podrían modificar para evitar ángulos de 90°. Todas son maneras para crear son recinto sonoro más difuso y evitar aparición de ondas estacionarias.

4.3-Oricin

4.3.1-Localización:

Nombre de la sala: Estudio de grabación de Mikel Salas

Dirección: Calle General
31396
Oricin (Navarra)



Imagen 4.14 – Vista a pie de calle.

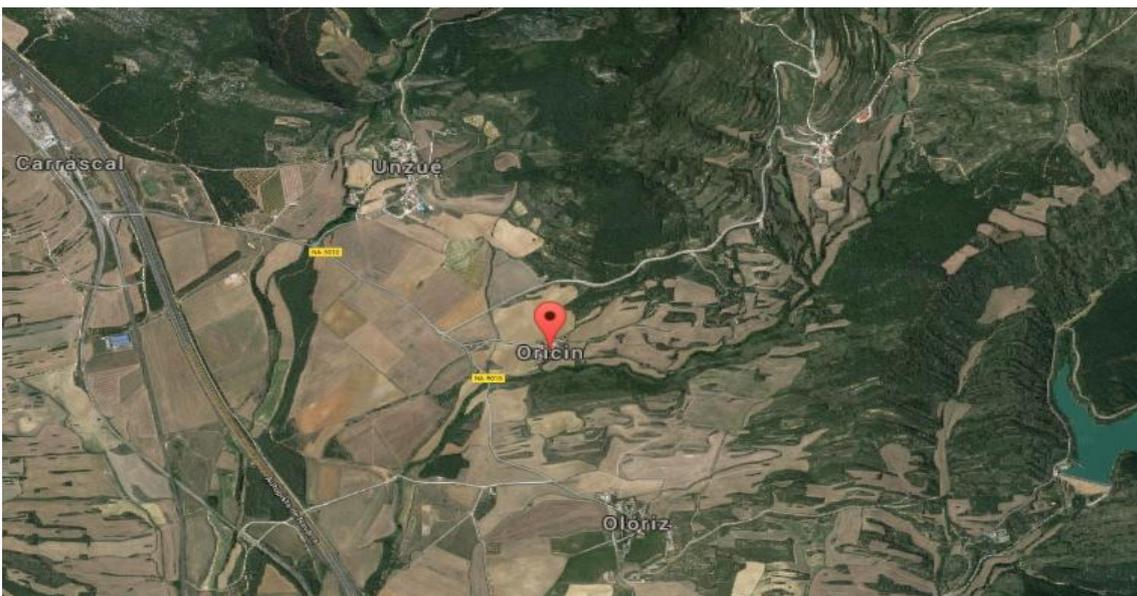


Imagen 4.15 – Localización en el valle.



Imagen 4.16 – Localización en la Comunidad Foral de Navarra.

Dimensiones:

El recinto cuenta con dos salas. Una sala destinada a la grabación, control y escucha. Y otra sala destinada a la grabación de instrumentos de percusión.

La sala de grabación, control y escucha tiene las siguientes dimensiones aproximadas (ya que no es una sala paralelepípeda):

3,70m x 6,80 m x 2,70 m (Ancho x Largo x Alto)

Volumen aproximado: 68 m³

La sala de percusión tiene las siguientes dimensiones aproximadas:

5,40m x 4,00m x 2,95m (Ancho x Largo x Alto)

Volumen aproximado: 63, 72 m³

La ubicación del recinto se detalla visualmente de forma clara en las Imágenes 4.14-4.16. La sala de grabación y control, como se observa en las imágenes del local (Imágenes 4.17 y 4.18), no es una sala paralelepípeda. El techo es en forma de “dos aguas”, las paredes con puertas no son paralelas entre sí, etc... En cuanto a la sala de percusión (Imagen 4.19) pasa algo similar. Tiene forma rectangular y las paredes opuestas son paralelas entre sí, pero el techo tiene inclinación y no es paralelo con el suelo.

Así que, cualquier cálculo donde se suponga un recinto paralelepípedo no será más que una aproximación a la realidad.



Imagen 1.17 – Sala de grabación, control y escucha



Imagen 4.18 - Sala de grabación, control y escucha



Imagen 4.19 – Sala de grabación de instrumentos de percusión.

4.3.2-Análisis basado en ISO-3382

En este apartado, se describe el análisis de los resultados obtenidos bajo la norma ISO 3382. Este análisis se ha realizado a las dos salas, y que ambas son salas de grabación que requieren una caracterización de sus propiedades acústicas. En primer lugar se analiza la sala de grabación, control y escucha.

4.3.2.A-Sala de grabación, control y escucha

T_{30} :

La norma ISO-3382 dice que el tiempo de reverberación (T) puede promediarse especialmente para dar un valor representativo del conjunto del recinto por frecuencia. Se consigue haciendo la media aritmética de todas las posiciones de micrófono y fuente, en este caso una posición de fuente y 9 de micrófono. En la Figura 4.29, se representa el T_{30} marcado con su rango de variación máximo.

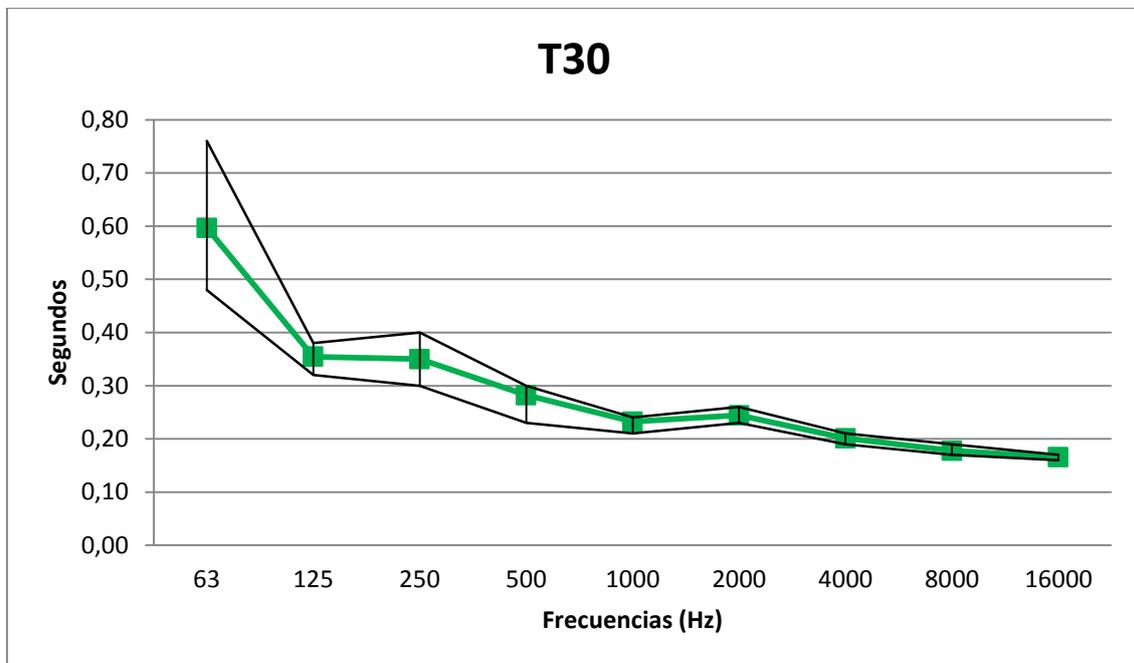


Figura 4.29 – T_{30} promedio de todas las posiciones de receptor y fuente y su rango de variación.

La norma establece el número mínimo de posiciones de receptor en 6. El mínimo de posiciones para la fuente es de uno. Así pues, la medición realizada en esta sala, cumple la norma ISO-3382 en lo que ha requisitos se refiere.

Analizando la Figura 4.29 se observa que el rango de variación máximo es prácticamente nulo para todas las frecuencias altas. La variación es mayor para frecuencias bajas y medias, aunque sigue siendo una variación muy pequeña. Para la banda de 250 Hz $\pm 0,05$ segundos y para 63 Hz, la variación más amplia, $\pm 0,15$ segundos. Aunque sean las variaciones con mayor amplitud, son rangos muy pequeños, por lo tanto es una sala con un tiempo de reverberación muy uniforme.

La norma también establece como valor único de tiempo de reverberación el promediado aritmético de las frecuencias de 500 y 1000 Hz. En este caso, $T_{30mid} = 0,25$ s. Un valor de tiempo de reverberación muy bajo, es decir, es una sala con poca reverberación. Es una sala apagada. Propiedad que interesa mucho en lo que a salas de grabación se refiere, por lo tanto, es una sala con un tiempo de reverberación perfecto para la grabación.

EDT:

En la Figura 4.30, se representa el EDT (*Early Decay Time*) promedio con su rango máximo de variación. Este parámetro más relacionado con la impresión subjetiva de la viveza que el T_{30} .

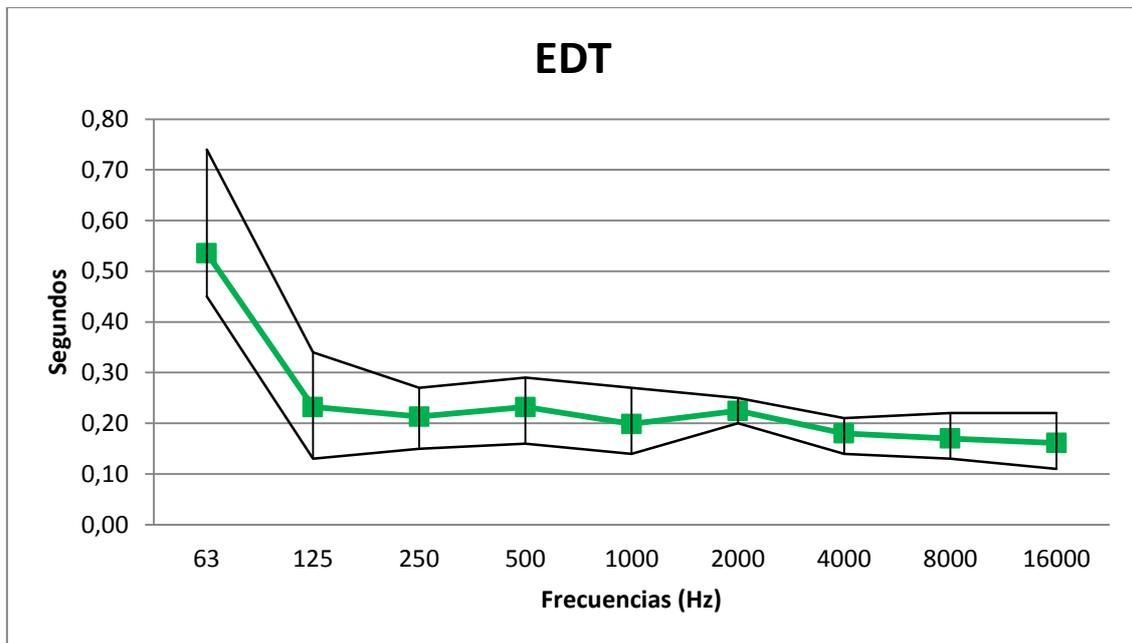


Figura 4.30 – EDT promedio y su rango de variación máximo.

Se observa en la Figura 4.30, una mayor variación en los valores del EDT sobre todo para frecuencias altas, aunque son variaciones que no se desvían mucho del valor promedio. La variación en frecuencias bajas es mayor que para el resto de frecuencias, pero unas variaciones totalmente asumibles. Los valores del EDT, igual que los del T_{30} , describen una sala muy apagada con un tiempo de reverberación subjetivo muy bajo.

El T_{20} , en la Figura 4.31, es un parámetro más destinado a comparar niveles en salas de poco volumen que el T_{30} y como esta sala tiene un volumen pequeño puede ser el parámetro más adecuado en lo que el tiempo de reverberación se refiere para caracterizar la sala en este aspecto. El EDT caracteriza la sensación subjetiva del tiempo de reverberación y el T_{30} se utiliza a salas de volúmenes grandes.

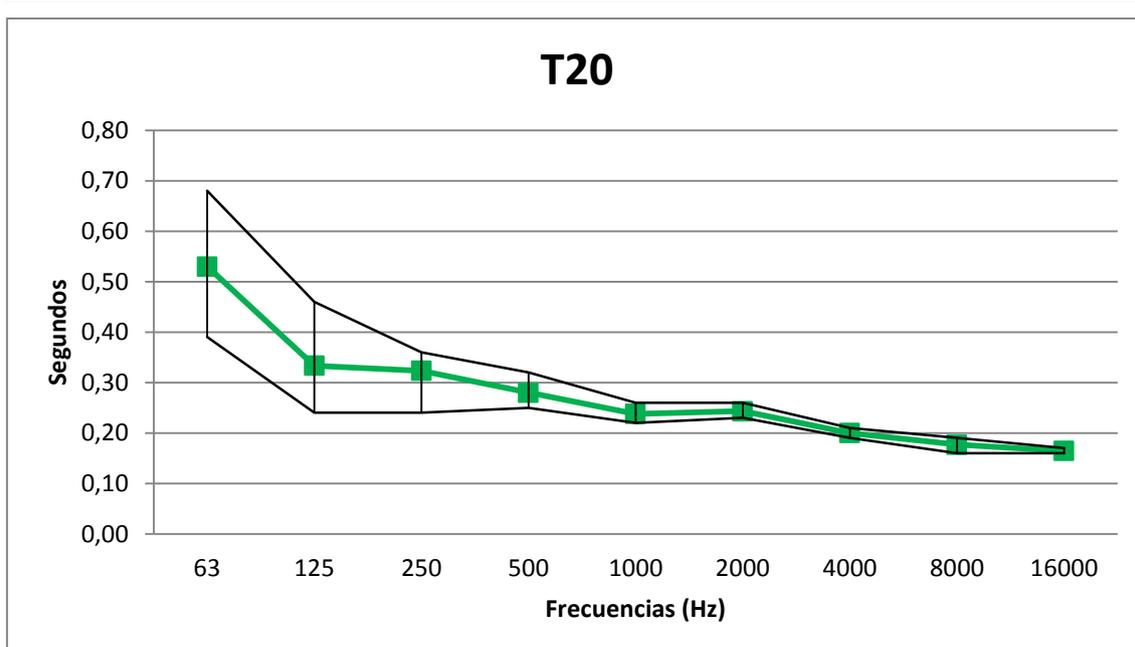


Figura 4.31 – T₂₀ promedio y su rango máximo de variación.

En la Figura 4.31 se observa que el T₂₀ describe una sala muy apagada y con un tiempo de reverberación muy bajo, al igual que se ha visto con los parámetros anteriores. Con un valor único promedio de T_{20mid} = 0,26 s. que es un tiempo de reverberación realmente bajo.

En la Figura 4.32, observamos los parámetros anteriores presentados en la misma gráfica. El T₃₀ y el T₂₀ son prácticamente iguales, un poco menos reverberante el último para frecuencias bajas. El EDT en cambio es sensiblemente diferente a los dos parámetros anteriores, lo que nos describe una sensación subjetiva de viveza más apagada o menos reverberante de lo que realmente es.

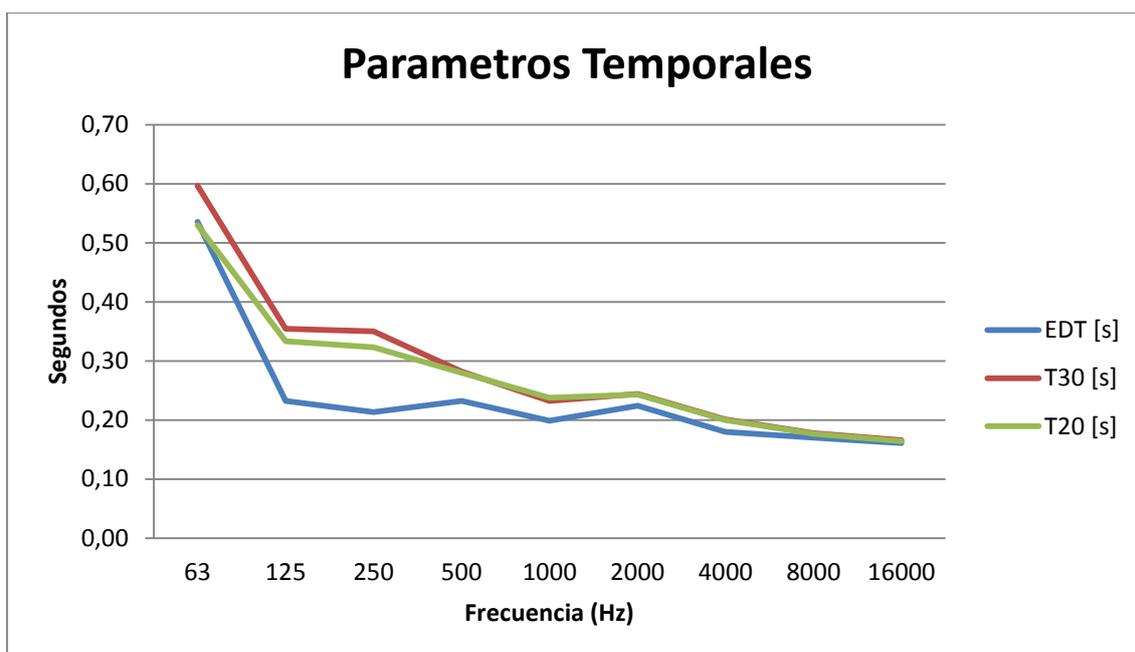


Figura 4.32 – Parámetros acústicos que describen el tiempo de reverberación (T).

Claridad vocal (C_{50}):

La claridad del mensaje oral se caracteriza con la relación entre la energía sonora que llega al oyente durante los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo es decir, incluye el sonido directo y las primeras con las que llegan más tarde. Este parámetro es el C_{50} y está representado en la Figura 4.33 con su rango de variación máximo.

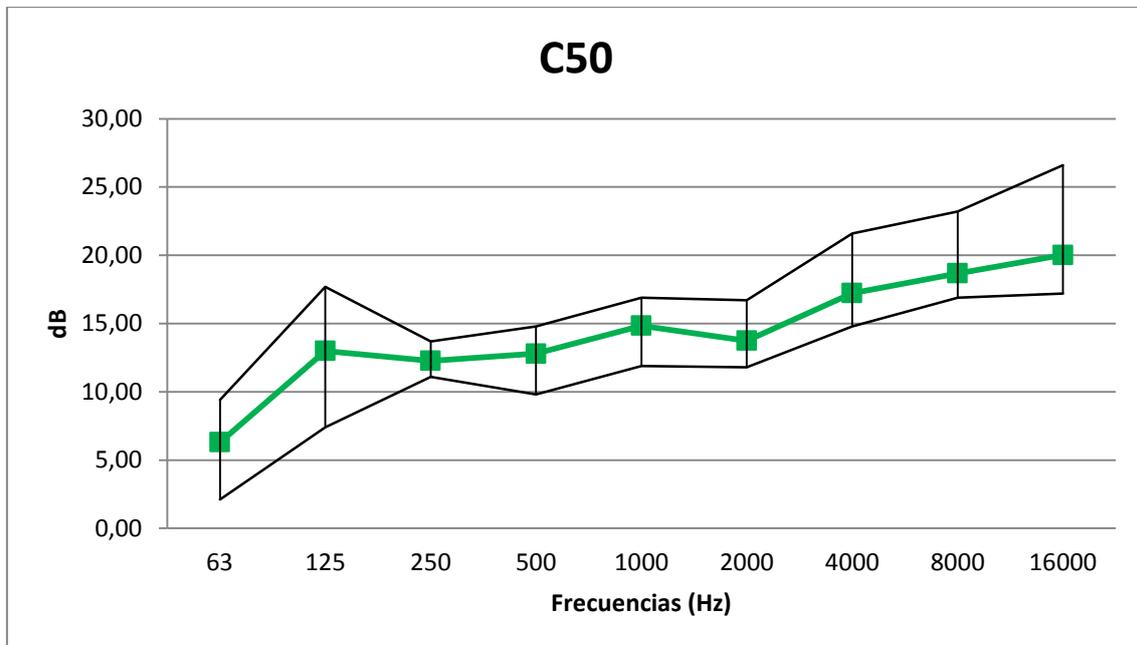


Figura 4.33 – C_{50} , claridad de la voz en la sala.

La sonoridad es mayor para frecuencias altas que para frecuencias bajas y se mantiene una variación máxima más o menos parecida para todas las frecuencias. Tiene valores altos, siempre por encima de 5 dB.

De manera más abreviada, el valor "*Speech Average*", que es el valor único que caracteriza el C_{50} , que en esta sala es igual a 14,74 dB. Esta sala tiene una inteligibilidad aceptable, ya que el "*Speech Average*" es mayor a 2 dB. La sala cumple la norma y se considera una sala con inteligibilidad de palabra y sonoridad muy buenas. Es un resultado lógico dado las dimensiones reducidas de la sala.

Claridad musical (C_{80}):

El parámetro C_{80} , que se puede visualizar en la Figura 4.34, da información del grado de separación entre los diferentes sonidos que conforman una composición musical.

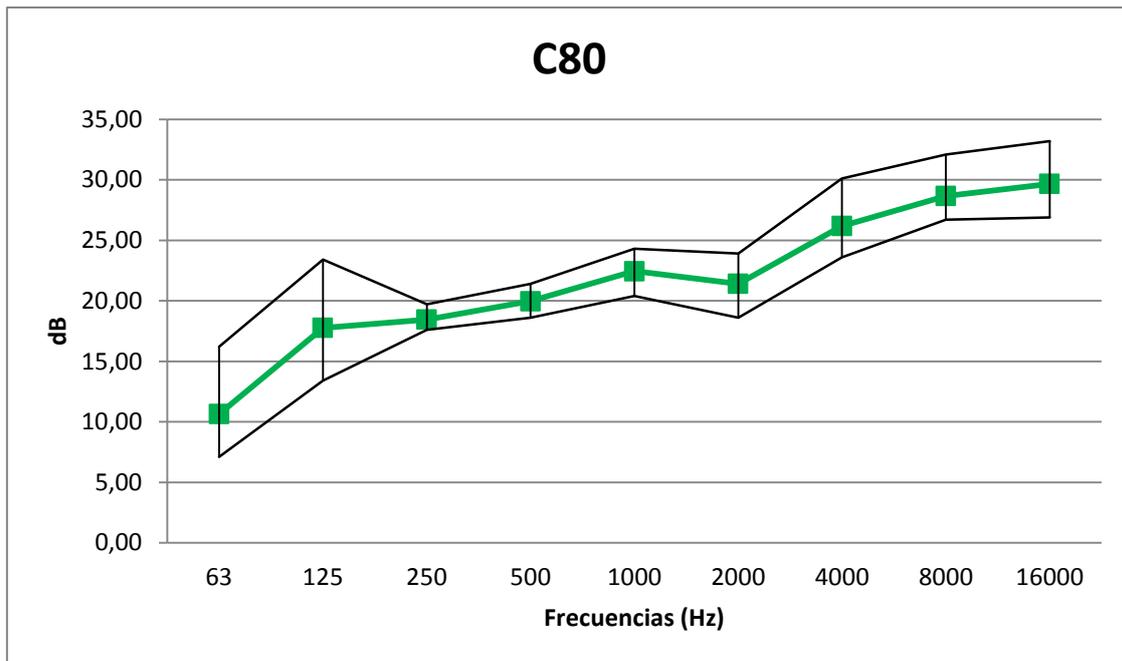


Figura 4.34 – C_{80} , Claridad musical promedio y su rango de variación máximo.

En esta sala, la mayor claridad musical corresponde a las frecuencias altas, aunque el C_{80} presenta valores altos para todas las bandas frecuenciales. El menor es de 10,64 dB para 63 Hz, que es un valor considerablemente alto.

El “*Music Average*” es el valor único y representativo del C_{80} y en esta sala es igual a 21,28 dB. El sonido es muy claro, ya que la energía sonora inmediata es muy superior a la tardía. Un resultado esperado para salas de tamaño pequeño como es el caso.

4.3.2.B-Sala de grabación de instrumentos de percusión

T₃₀:

La medición de esta sala, se ha realizado cumpliendo los requisitos mínimos de 6 posiciones de receptor y una de fuente que establece la ISO-3382. Se ha medido con una posición de fuente en 9 posiciones distintas de receptor. En la Figura 4.35 se representa el promedio espacial del T_{30} para la sala de percusión.

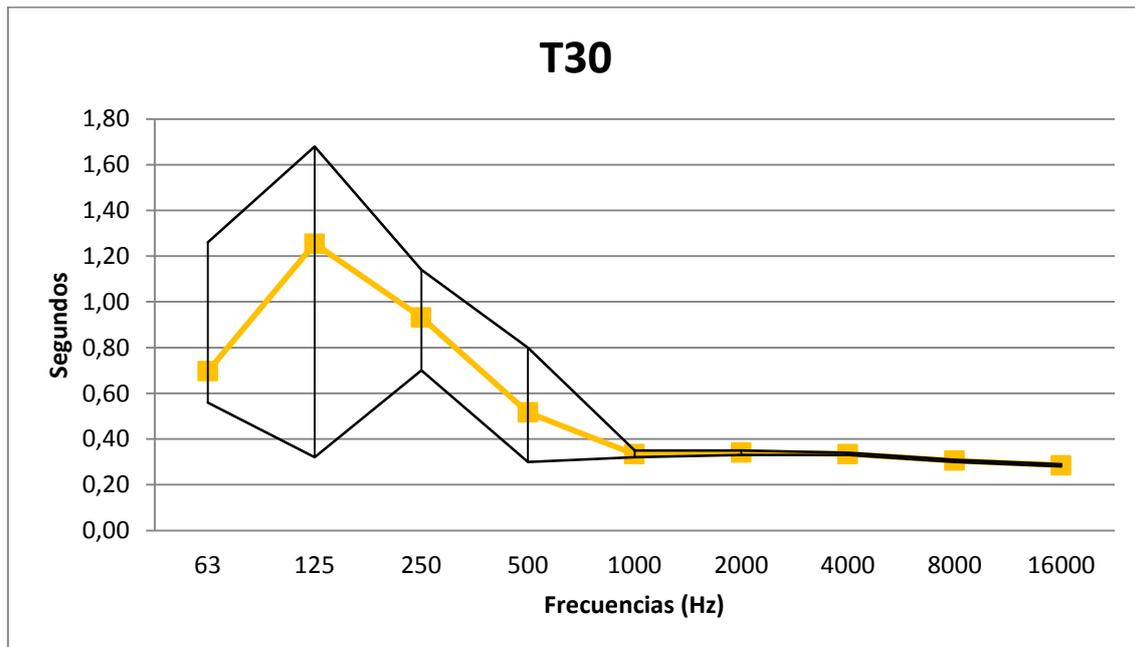


Figura 4.35 – T_{30} promedio y rango máximo de variación.

Se puede ver en la Figura 4.35 que el rango de variación es nulo para frecuencias medias y altas, y considerable para frecuencias bajas, sobre todo para las bandas de 63 Hz y 125 Hz. Para estas frecuencias donde la variación máxima es alta y a su vez los tiempos de reverberación son también más altos que en las otras frecuencias, puede ser indicativa de que tanto la sala como los elementos de percusión que hay en ella, resuenan a estas frecuencias.

El valor único, resultado del promediado del T_{30} a las frecuencias de 500 y 1000 Hz, que establece la norma en esta sala es $T_{30mid} = 0,43$ s. Tiempo de reverberación bajo, es decir, una sala con poco reverberante. Pero ya sabemos que esto para las frecuencias de 63, 125, 250 Hz no es así. En estas frecuencias el tiempo de reverberación se llega a disparar por ejemplo hasta a 1,20 para 125 Hz (y superiores en valores máximos). Valores que hace de la sala una sala reverberante para frecuencias bajas.

EDT:

En la Figura 4.36, se representa el EDT (*Early Decay Time*) promedio con su rango máximo de variación. Este parámetro más relacionado con la impresión subjetiva de la viveza que el T_{30} .

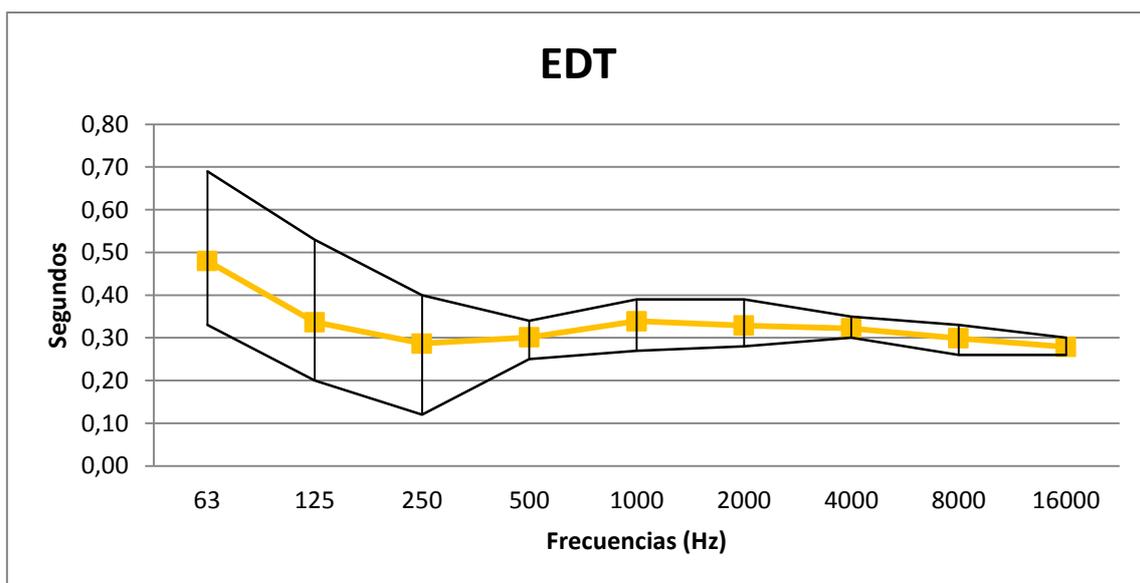


Figura 4.36 – EDT promedio y su variación máxima.

Se puede observar que la curva es considerablemente plana en torno a 0,30 s salvo en la frecuencia más grave. La impresión subjetiva del tiempo de reverberación que representa el EDT presenta una sala poco reverberante y relativamente apagada.

Tanto el T_{30} como el EDT, no son parámetros especialmente utilizados para la caracterización de salas de dimensiones pequeñas. Para ello se utiliza el T_{20} , que se puede visualizar en la Figura 4.37.

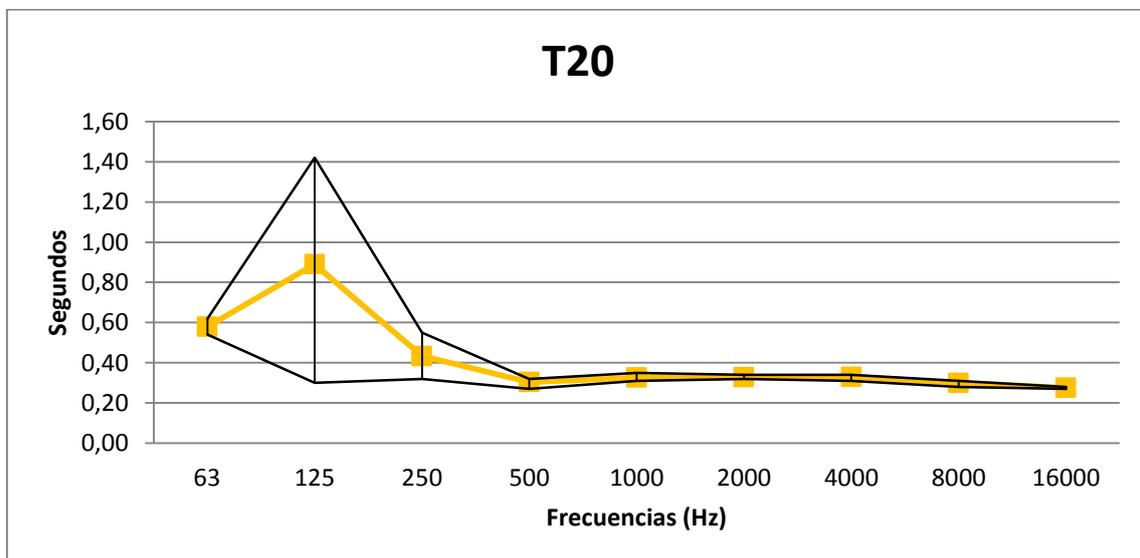


Figura 4.37 – T_{20} promedio y su rango de variación.

Al igual que el T_{30} , el T_{20} presenta una banda de frecuencias muy reverberante por encima de todas las demás, la de 125 Hz, subiendo a valores promedio en torno a 0,90 s con máximos de 1,40 s. Cuando los valores para otras frecuencias están por debajo de 0,40 s y para frecuencias graves, 63 y 250 Hz, 0,58 s y 0,43 s respectivamente. Por lo tanto, o la frecuencia 125 Hz es la resonante de la sala o de algún instrumento de percusión y al sonido tiene un mayor tiempo de persistencia en la sala a esta frecuencia.

En la Figura 4.38 se puede observar la diferencia de los tres parámetros temporales analizados con anterioridad, donde se ve claramente los tres modos de caracterizar el tiempo de reverberación de una sala. El T_{30} es el que más reverberante presenta la sala y el EDT el que menos viveza le da.

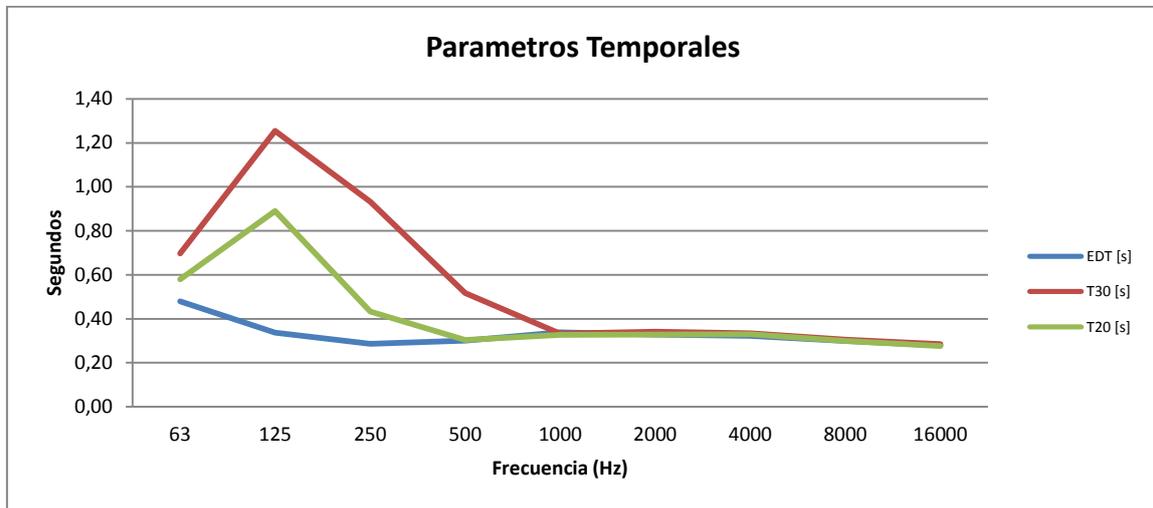


Figura 4.38 – Parámetros acústicos temporales de la sala de grabación de percusión.

Claridad vocal (C_{50}):

La claridad del mensaje oral se caracteriza con la relación de la energía sonora directa y la que llega al oyente en los primeros 50 ms. Este parámetro, el C_{50} , se representa en la Figura 4.39.

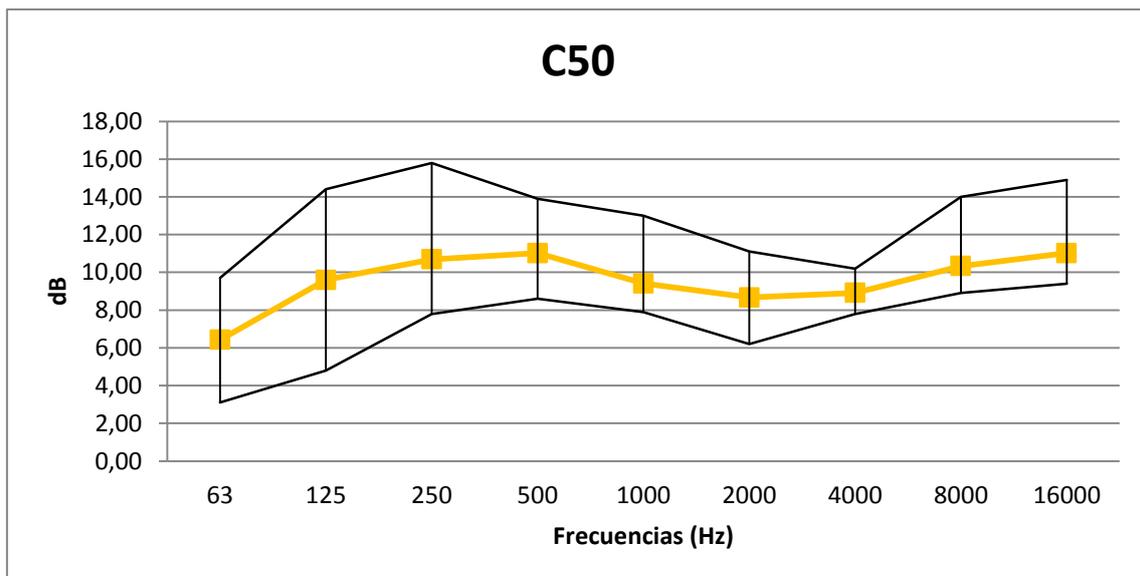


Figura 4.39 – C_{50} , claridad de la voz en la sala.

La forma más abreviada para caracterizar la inteligibilidad de la palabra, y la forma en la que la ISO-3382 dice, es con el valor "Speech Average" que en este caso es igual a 9,27 dB.

Para que la inteligibilidad de la palabra y sonoridad sean aceptables, este valor debe de ser mayor o igual a 2 dB. Por lo tanto la sala cumple la norma y se puede considerar una sala con una inteligibilidad de palabra y sonoridad muy buenas.

Claridad musical (C_{80}):

El parámetro C_{80} , que se puede visualizar en la Figura 4.40, da información del grado de separación entre los diferentes sonidos que conforman una composición musical.

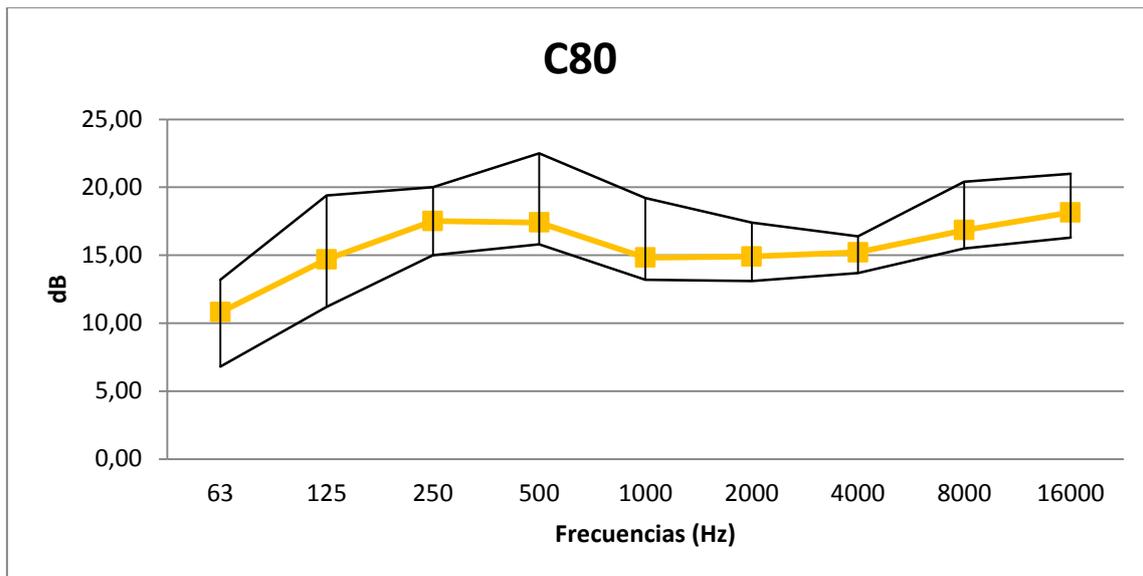


Figura 4.40 – C_{80} , Claridad musical promedio y su rango de variación máximo.

El valor representativo único, el *Music Average*, es igual a 15,71 dB. Con este resultado, se puede decir que la energía sonora inmediata es muy superior a la tardía y por lo tanto el sonido es muy claro. Resultado normal para una sala con las dimensiones como esta.

4.3.3-Análisis basado en EBU Tech. 3276 2º Edición

La sala del local destinada a la escucha y control (Imágenes 4 y 5), ha sido evaluada bajo las recomendaciones que recogen la EBU Tech. 3276, unas recomendaciones para las salas destinadas a la evaluación de material y programas de sonido.

Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación, que es una de las características acústicas más importantes, es el primer parámetro sobre el que recomienda la EBU Tech. 3276. Debe de ser suficientemente difuso sobre la zona de escucha de tal modo que se eviten los efectos acústicos no deseados como el eco flotante. El equipo de reproducción de la sala, en este caso, es un equipo muy completo, con diferentes tipos de altavoces. Concretamente cuenta con 3 pares de altavoces distintos. Los llamaremos "5.1", "Yamaha" y "Lavadora".

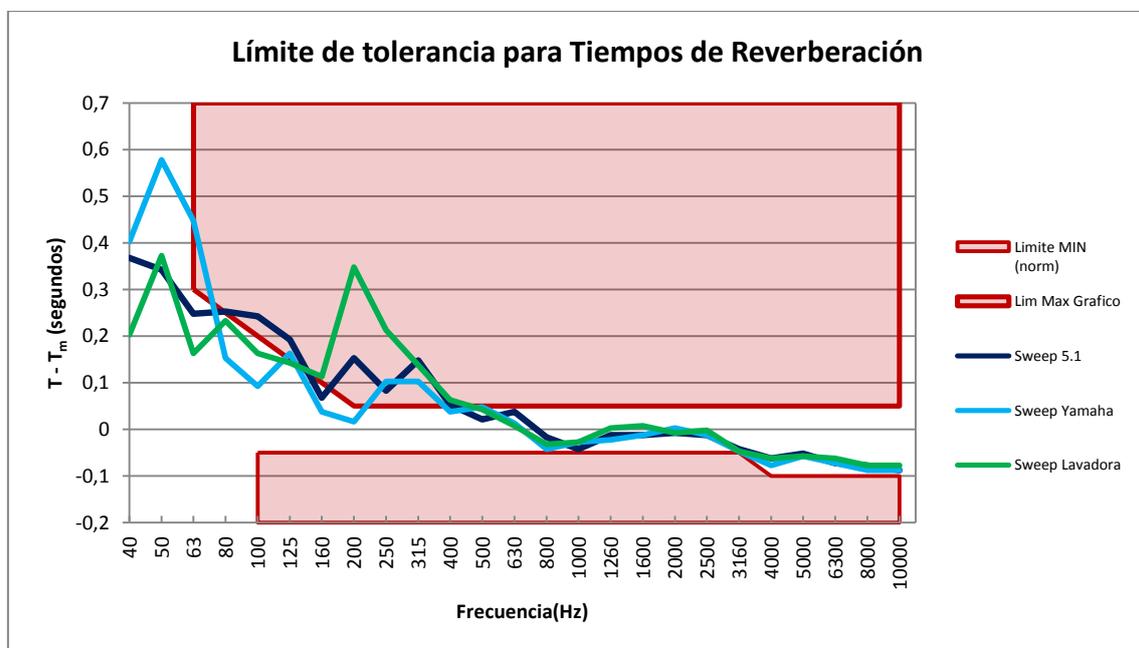


Figura 4.41 – Límites de tolerancia para el T de los tres tipos de altavoces de la sala.

En la Figura 4.41 se representa el tiempo de reverberación (T) promedio de los tres tipos de altavoces en colores azul claro, azul oscuro y verde desde 63 Hz hasta 8kHz por bandas de tercio de octava y en rojo los límites descritos por la EBU Tech. 3276 2º Edición.

Se puede observar que son prácticamente iguales para frecuencias medias y altas (≥ 400 Hz) y además a estas frecuencias cumple los límites de tolerancia que da la recomendación EBU Tech. 3276. En general para frecuencias inferiores los tres tipos de altavoces cumplen los límites salvo entre las frecuencias de 160 y 400 Hz, donde los tres tipos incumplen los límites. Para analizar cada tipo de altavoz más concretamente y también comparar la aportación de cada canal por separado. A continuación se analiza cada tipo de altavoz por separado.

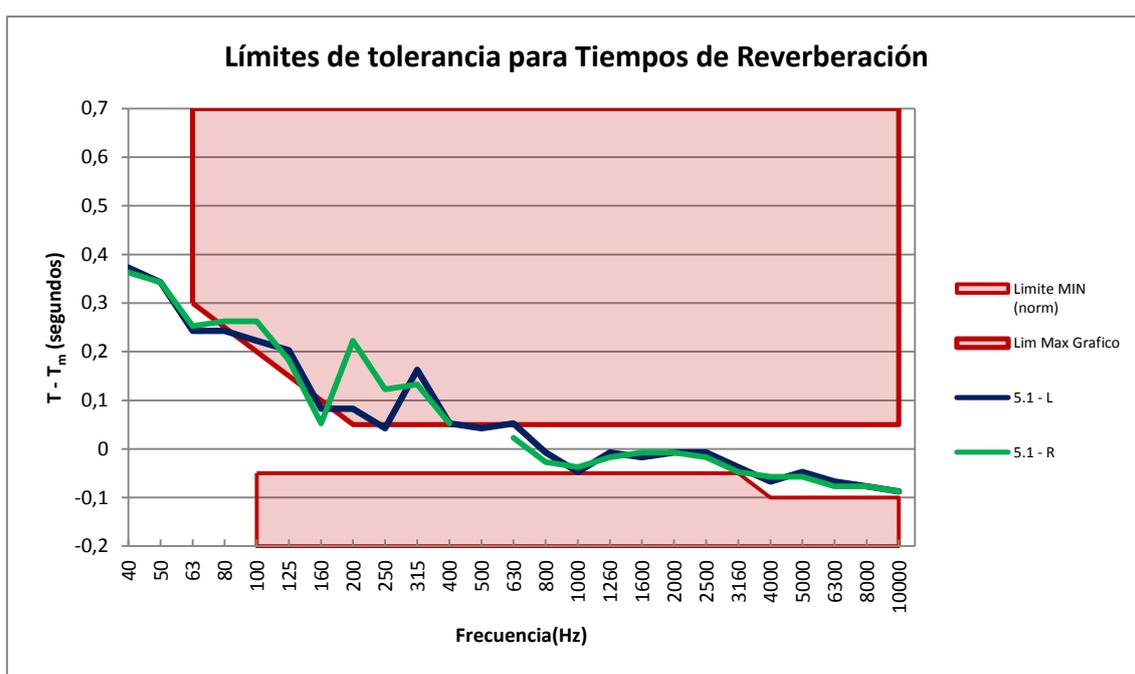


Figura 4.42 – Límites de tolerancia de T para altavoces 5.1 (R y L).

En la Figura 4.42, se observa que los altavoces R y L del tipo 5.1 sobrepasan el límite recomendado sobre todo en bajas frecuencias y a partir de la banda de 630 Hz cumple la recomendación de EBU 3276 en lo que al tiempo de reverberación se refiere.

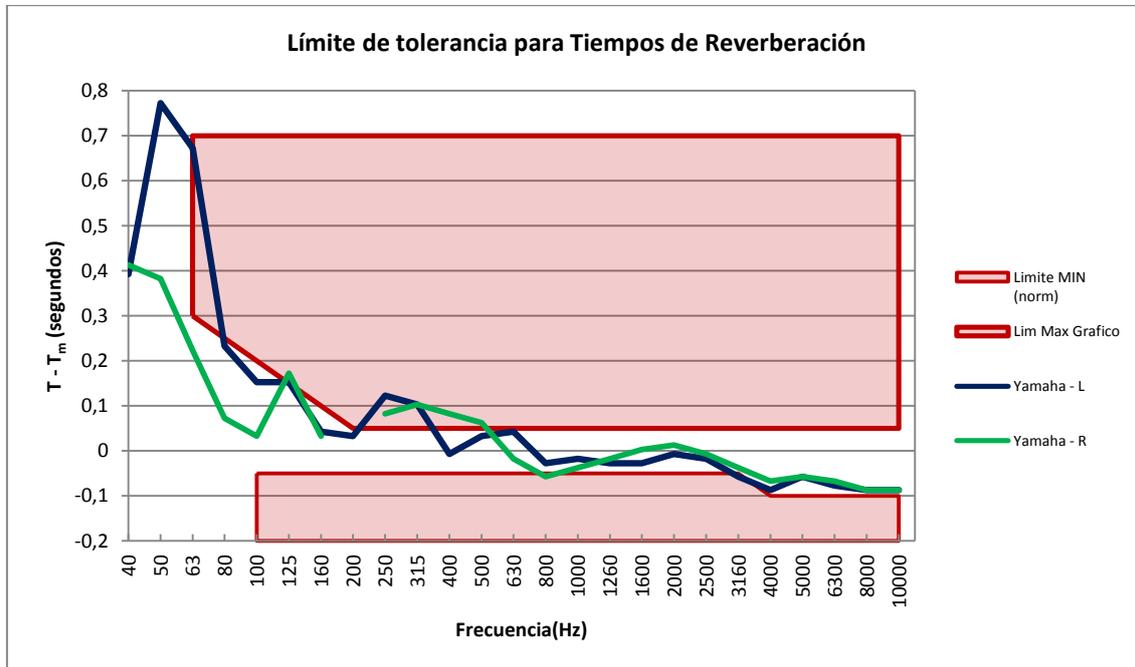


Figura 4.43 – Límites de tolerancia de T para altavoces Yamaha (R y L).

En la Figura 4.43, los caracterizados son los dos altavoces Yamaha. Se observa que cumplen la recomendación pero el altavoz L presenta un pico muy elevado y con mucha diferencia con el altavoz R. Esto puede deberse a un error en la medición. En general, es una

sala que con los altavoces adecuados (como estos y los anteriores) cumple la recomendación.

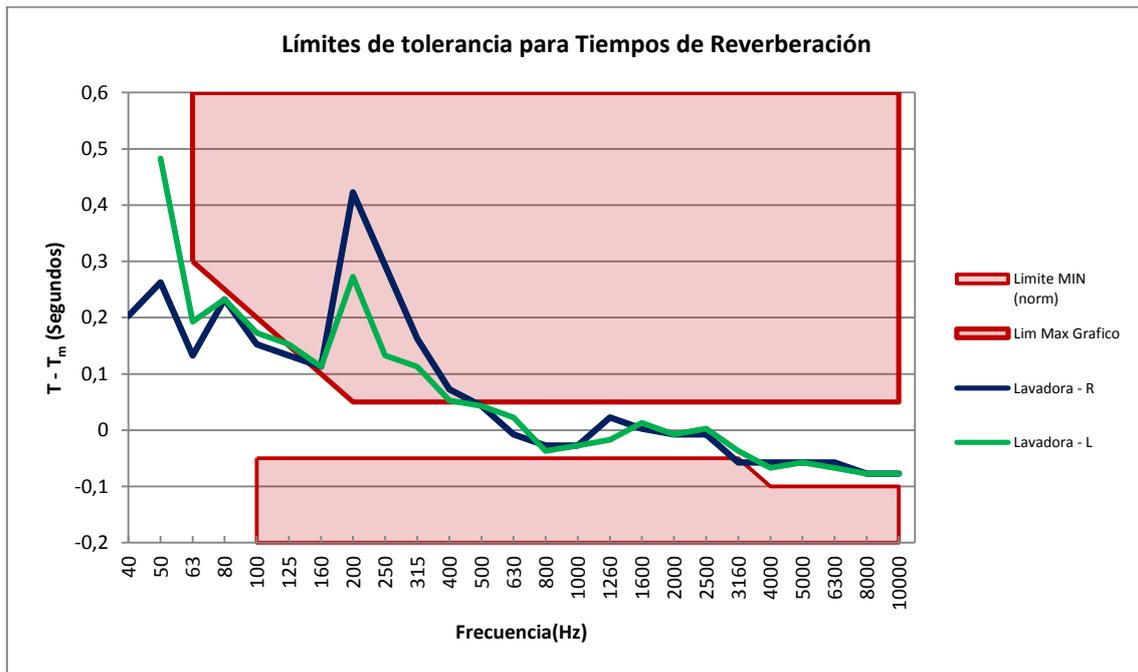


Figura 4.44 – Límites de tolerancia de T para altavoces Lavadora (R y L).

Por último, con los altavoces *Lavadora* (Figura 4.44) la sala cumple la recomendación de reverberación, aunque estos produzcan un pico para 200 Hz.

En conclusión, es una sala muy adecuada para la escucha y el control de material sonoro, ya que por lo general cumple la recomendación de la EBU 3276 en este aspecto y presenta un tiempo de reverberación bajo, es decir, es una sala apagada, que es lo que se busca en salas de este tipo.

Curva de respuesta en frecuencia de la sala

La curva de respuesta en frecuencia representa la respuesta que presenta la sala para cada frecuencia. Es un importante criterio para la evaluación de la sala de control y escucha. Se corresponde con la sensación subjetiva del sonido reproducido por el equipo electro acústico. Al igual que en el anterior parámetro analizaremos la curva de respuesta de la sala para cada tipo de altavoz con los que cuenta la misma. En primer lugar, en la Figura 4.46, se representa la respuesta que presentan los altavoces R y L del tipo 5.1. De ambos obtenemos una respuesta frecuencial de sala similar. Ajustándose a la recomendación EBU 3276 para frecuencias superiores a 500 Hz. Sobrepasan la recomendación por 1 dB en frecuencias medias-bajas. Pero para frecuencias muy bajas (inferiores a 63 Hz) la respuesta en frecuencia se dispara, generando una curva que no es plana para estas frecuencias. Curva plana que cumple para el resto del espectro frecuencial.

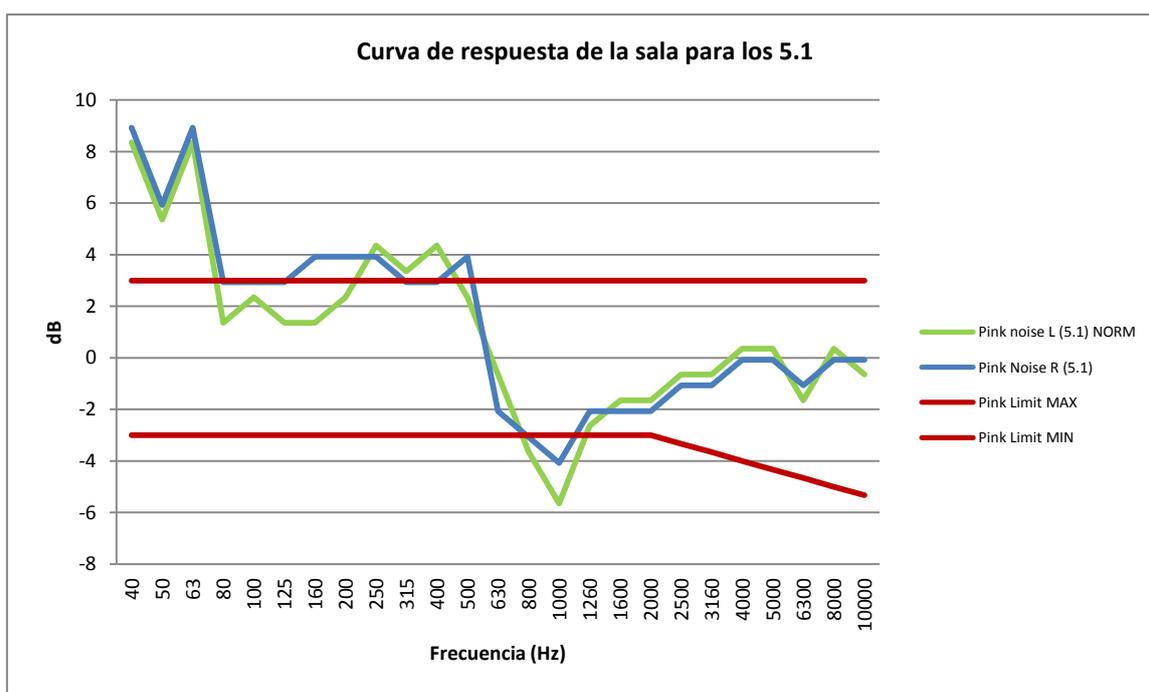


Figura 4.45 – Límites de tolerancia para la respuesta de la sala en frecuencia (Altavoces 5.1).

En la Figura 4.46, se representa la respuesta de la sala para los altavoces Yamaha. Una respuesta muy plana y acorde a la recomendación EBU Tech 3276, salvo para bajas frecuencias donde incumple la recomendación. Aunque son altavoces que su finalidad es reproducir medias y altas frecuencias así que no es nada reseñable.

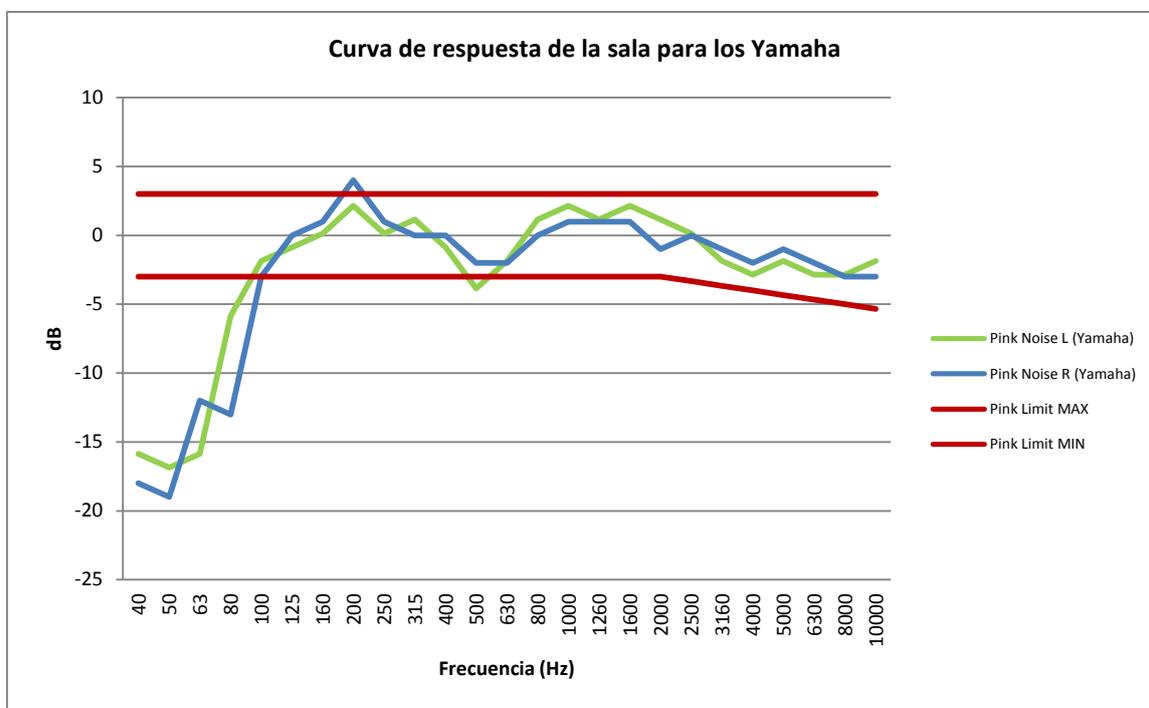


Figura 4.46 - Límites de tolerancia para la respuesta de la sala en frecuencia (Altavoces Yamaha).

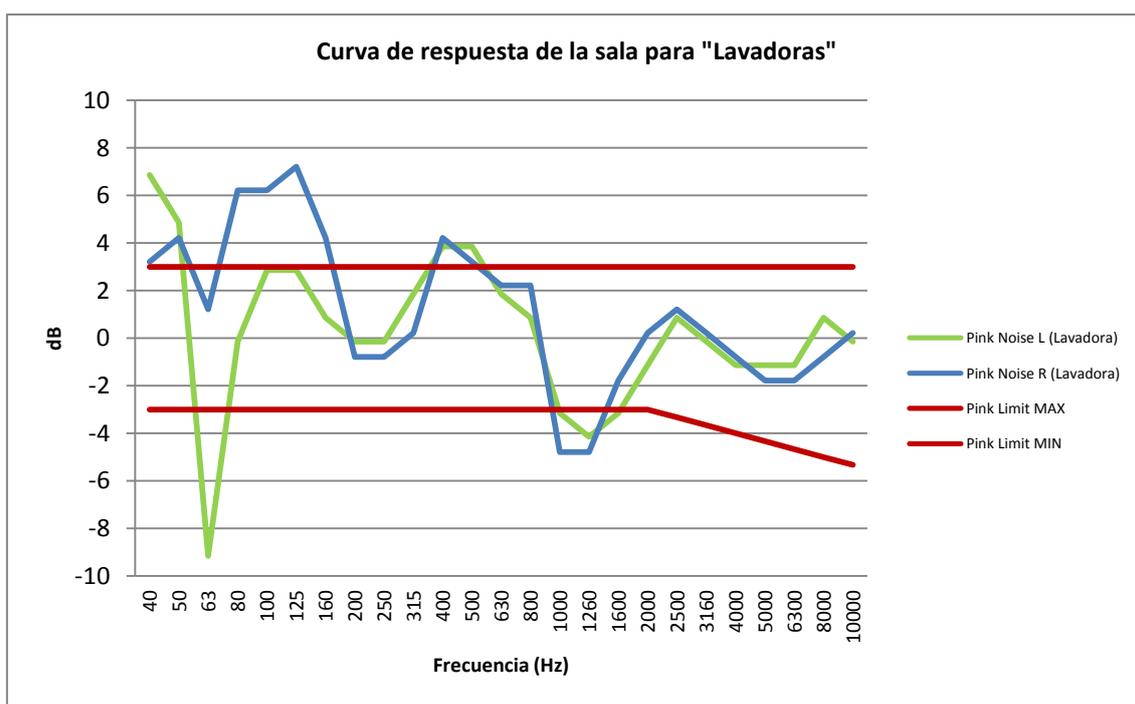


Figura 4.47 - Límites de tolerancia para la respuesta de la sala en frecuencia (Altavoces Lavadora).

Las curvas de los altavoces R y L son similares, y salvo dos casos puntuales y por pocos dBs cumplen la recomendación. Hay que destacar el pico del L para la frecuencia de 63 Hz y la franja de 63-160 Hz que incumple el R. En estas frecuencias los dos altavoces presentan formas distintas. Por otro lado en las partes que cumplen la recomendación destacar que no es una curva plana, sino que tiene variaciones por frecuencia.

Nivel de escucha

Es recomendable que el equipamiento cumpla el anexo 3 de la EBU 3276 donde se describen recomendaciones generales que debe cumplir una sala de escucha o de control de material acústico.

La diferencia de nivel entre los dos canales no debe exceder 1 dB de diferencia. En las Figuras 4.48, 4.49 y 4.50 se ve la comparativa de los niveles de los tres tipos de altavoces.

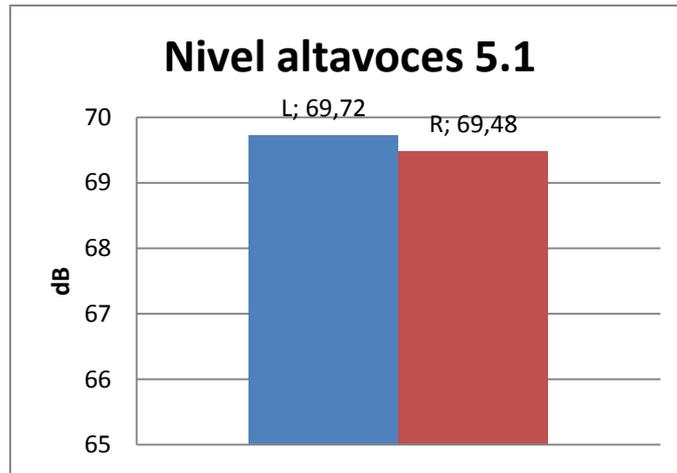


Figura 4.48 – Diferencia de niveles de altavoces 5.1 L y R.

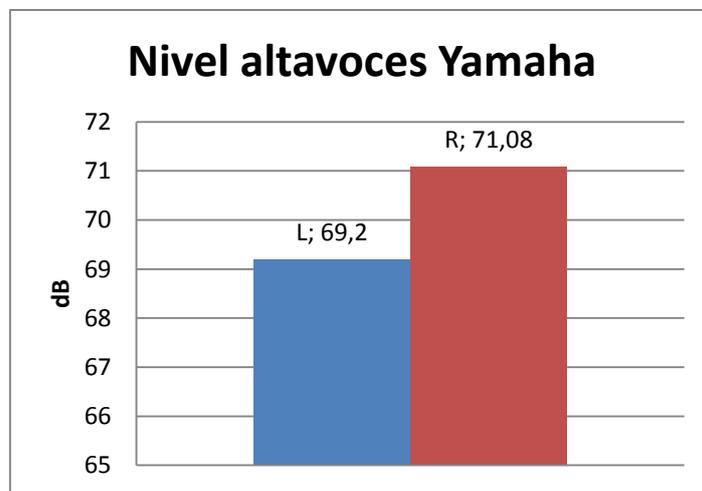


Figura 4.49 - Diferencia de niveles de altavoces Yamaha L y R.

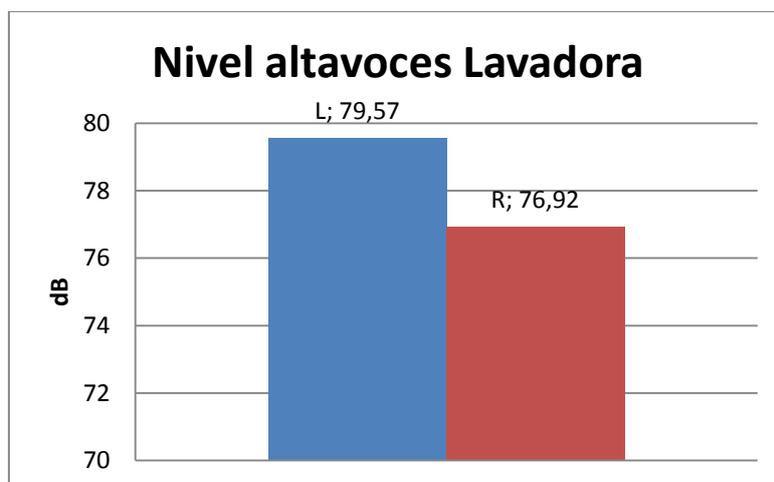


Figura 4.50 – Diferencia de niveles de altavoces Lavadora L y R.

Como se puede observar el único tipo de altavoz que cumple con la recomendación de no exceder en más de 1 dB la diferencia de nivel es el del tipo 5.1. Los otros dos tiempos de altavoces incumplen esta recomendación. Posiblemente pueda deberse a que la medida de un canal y la del otro se hicieran con diferentes volúmenes y no con el mismo como deben de realizarse. En cualquier caso es una recomendación no es una norma de obligatorio cumplimiento pero bastaría con compensar los volúmenes de los canales y asegurarse de que están al mismo nivel, mediante las unidades de control de ganancia etc... de las que dispone el equipamiento de la sala.

Dimensiones para la escucha

La sala presenta un volumen aproximado de 68 m³. En el anexo 2 la EBU 3276 recomienda ciertas proporciones en las dimensiones para una sala de escucha. En primer lugar, recomienda un volumen inferior a 300 m³, esta sala cumple esta primera recomendación.

El área mínima para el suelo de 40 m² para una sala de escucha normal y 30m² para una sala de escucha de alta calidad. En el caso de esta sala el área es de aproximadamente de 23,31 m², por lo que no cumple esta recomendación por 7 m². No cumplir esta recomendación no es grave. El tamaño de una sala de audición será determinado tanto por los aspectos operacionales como por los aspectos acústicos. En cualquier caso, el volumen no debe superar los 300 m³.

Por otro lado las proporciones de las tres dimensiones de la sala deben de estar en un rango recomendado, para asegurar una distribución uniforme de las bandas de baja frecuencia. La sala cumple las proporciones recomendadas.

Así pues consideramos que la sala presenta unas dimensiones adecuadas aunque no cumpla con exactitud las recomendaciones secundarias de la EBU 3276 en este apartado.

Ruido de fondo

Medir el nivel de presión sonora del ruido de fondo continuo, como puede ser el de sistemas de aire acondicionado o de fuentes externas de ruido es importante para describir la calidad de escucha de la sala.

La EBU 3276 recomienda que el ruido de fondo debería de ser ni impulsivo, ni cíclico ni tonal. El ruido no debe de exceder el nivel de NR10 y bajo ninguna circunstancia el nivel de NR15. En la Tabla 4.9 se puede ver los valores de estas dos curvas.

	Frecuencias (Hz)								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
NR 10	62,2	43,4	30,7	21,3	14,5	10	6,6	4,2	2,3
NR 15	65,6	47,3	35	25,9	19,4	15	11,7	9,3	7,4

Tabla 4.9

En la Figura 4.51 se observa la medición de ruido realizada. La sala presenta un ruido de fondo muy aceptable (y cumpliendo los límites recomendados) para bajas frecuencias.

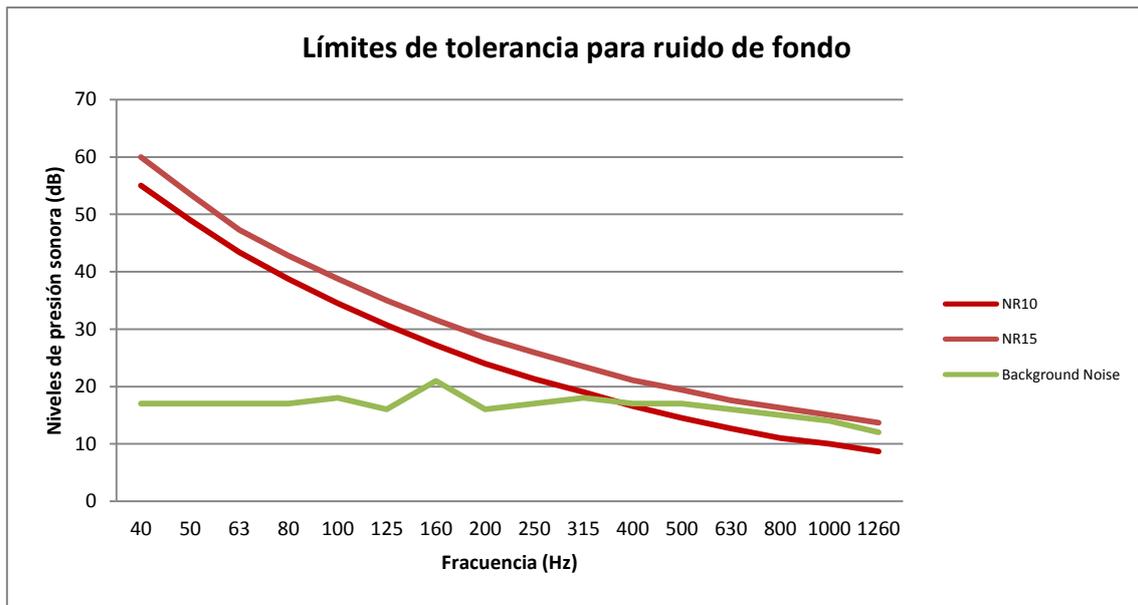


Figura 4.51 – Ruido de fondo y curvas NR10 y NR15

Estas son normalmente las frecuencias en la que suelen encontrarse ruidos de fondo considerables producidos por el funcionamiento de los equipos que suelen encontrarse en este tipo de salas. Elementos que no aportan ruido en esta sala al encontrarse los más ruidosos de ellos en una pequeña sala adyacente. Una medida perfecta que tiene su reflejo en un ruido muy bajo.

Por otro lado, el ruido de la sala supera la curva NR 10 límite en medias frecuencias, pero no debe de ser algo preocupante, ya que en ningún momento toma valores superiores a los de la curva NR 15, que es realmente muy poco ruido y un silencio muy considerable.

4.3.4-Análisis de modos propios

El análisis de los modos propios de la sala se divide en dos partes. Primero el cálculo teórico mediante las herramientas teóricas descritas en capítulos anteriores. La segunda parte es la medición in situ de estos modos propios mediante una herramienta software (WinMLS) específica para ello. Este recinto tiene dos salas en las que es interesante analizar este aspecto de la acústica de salas, por lo tanto el análisis será para las dos salas (por separado).

4.3.4.A-Sala de grabación, control y escucha

Cálculo teórico

A continuación se presentan los resultados del cálculo teórico y de esta manera se tiene una estimación de los modos propios que se encuentran en esta sala (tanto de la cantidad como de las frecuencias de los mismos).

Ancho	Largo	Alto	C	Volumen	Superficie	Tmid (estimación)	Coef. Absorción
3,70	6,80	2,70	340	67,9	107	0,4	0,25
Frecuencia Limite						155 Hz	

Tipo	Frecuencia (Hz)
2	25
2	46
2	50
1	52
2	63
1	68
1	68
2	75
1	78
1	80
0	82
1	88

Tipo	Frecuencia (Hz)
2	92
0	93
1	95
1	98
2	100
1	105
0	108
1	110
1	111
0	114
1	118
1	119

Tipo	Frecuencia (Hz)
0	122
2	125
2	126
0	127
1	128
1	133
1	134
0	134
1	135
1	136
0	136
2	138

Tipo	Frecuencia (Hz)
1	140
1	140
0	143
1	147
1	147
0	147
0	150
2	150
1	152
0	154
0	154
1	155

Dónde:

- Tipo 0 modo oblicuo
- Tipo 1 modo tangencial
- Tipo 2 modo axial

Se ve cómo los modos se encuentran concentrados a bajas frecuencias. La frecuencia máxima teórica es 155 Hz y se considerarán las frecuencias mayores como ausentes de modos propios que repercutan negativamente a la acústica del recinto. Es decir, el cálculo teórico dice que hay que fijarse en frecuencias inferiores a 155 Hz a la hora de analizar los resultados de las medidas in situ tomadas. Este es un límite que no se debe de entender como una línea roja ya que lo modos propios dejan de repercutir negativamente en la acústica de una sala de manera progresiva.

Cálculo práctico (medición)

El método utilizado trata en tomar mediciones a lo largo de un eje (línea recta) en cada una de las tres dimensiones espaciales (x, y, z). Por lo tanto se obtendrá la respuesta en frecuencia a lo largo de del eje para cada dimensión. En la representación espectral de los resultados que nos presenta el programa (Figura 4.52) hay que fijarse frecuencias a las que se encuentran mayores cambios de nivel en el correspondiente eje, es decir, mayor anchura del conjunto de curvas.

: Root of Frequency Response Magnitude - Room

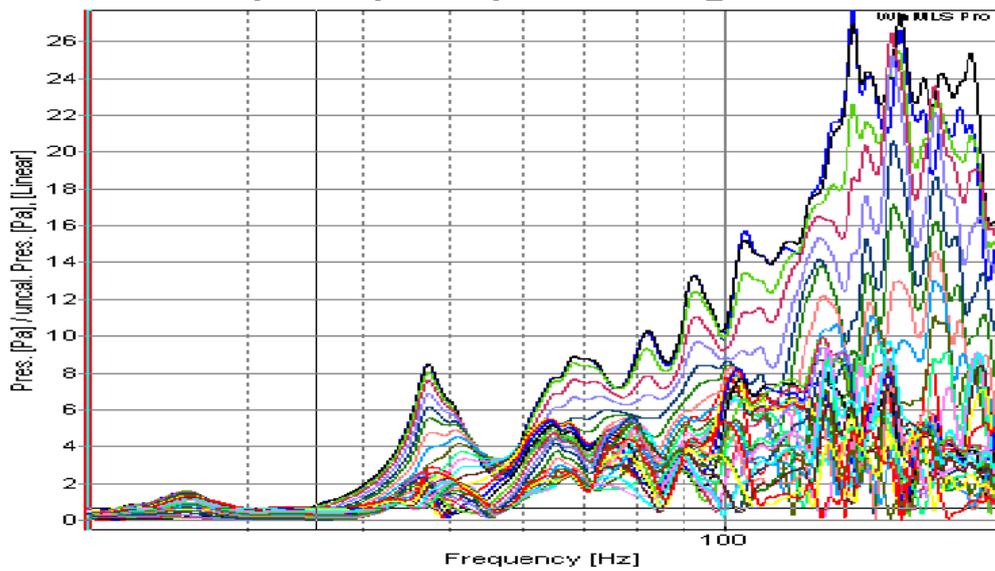
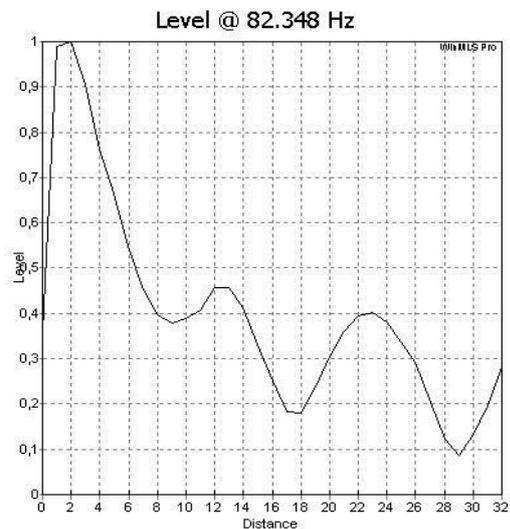
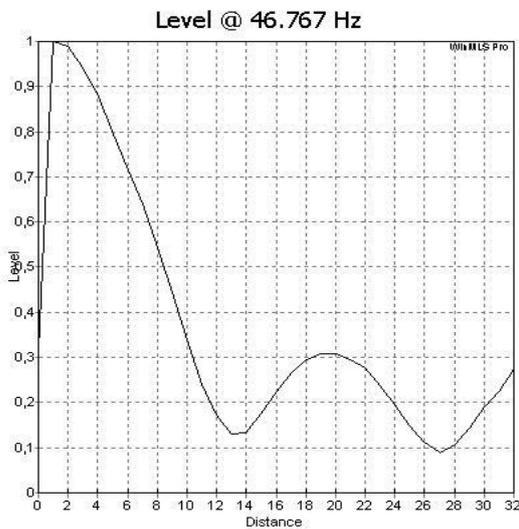


Figura 4.52 – Representación de resultados de un eje que presenta WinMLS.

Colocando el cursor en las frecuencias calculadas teóricamente y los lugares donde el ancho de la gráfica es mayor, se eligen las frecuencias analizadas. Los resultados de las gráficas para cada frecuencia de interés en cada eje se representan en las Figuras 4.53, 4.54 y 4.55 ordenadas por ejes:



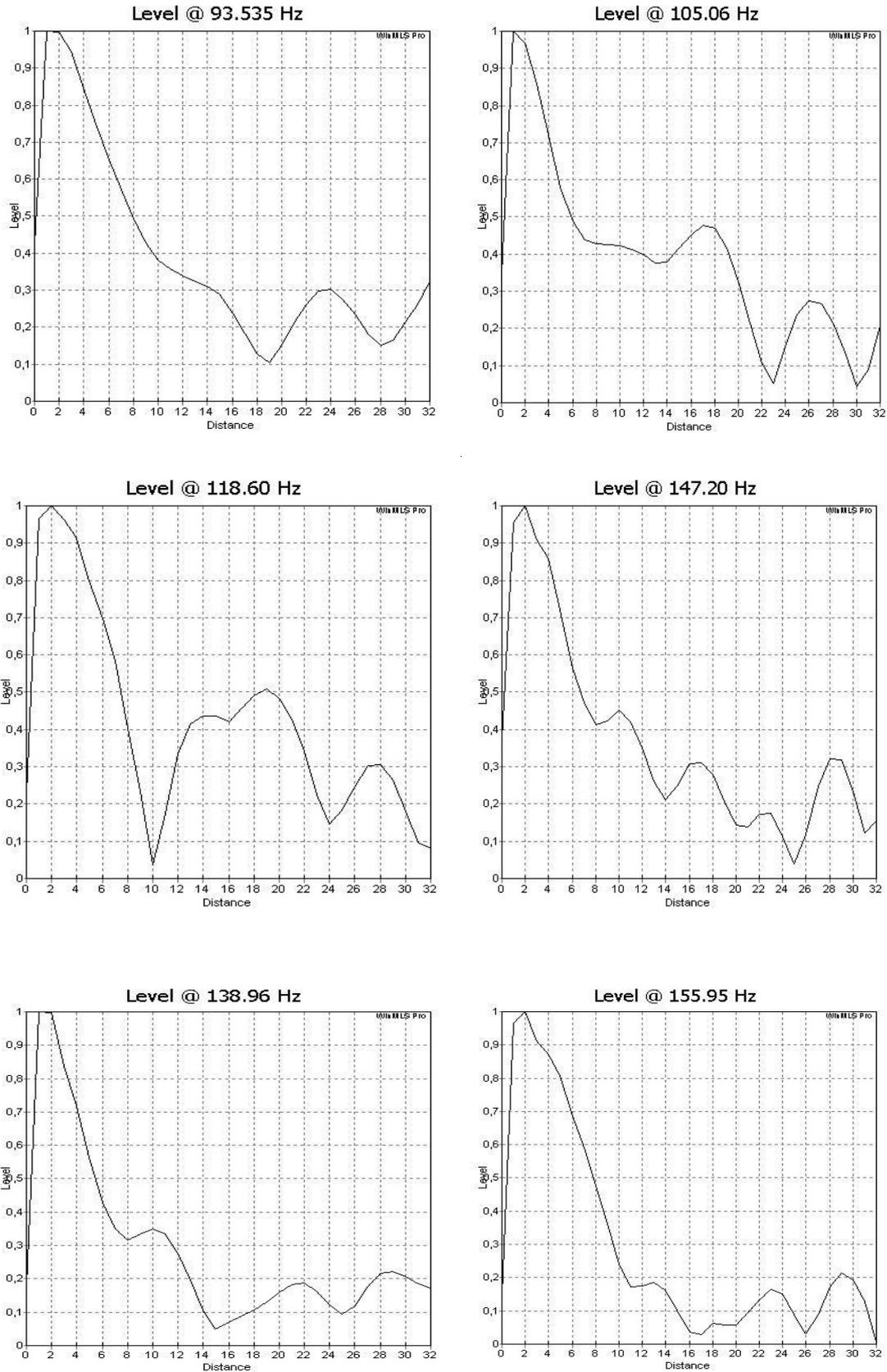


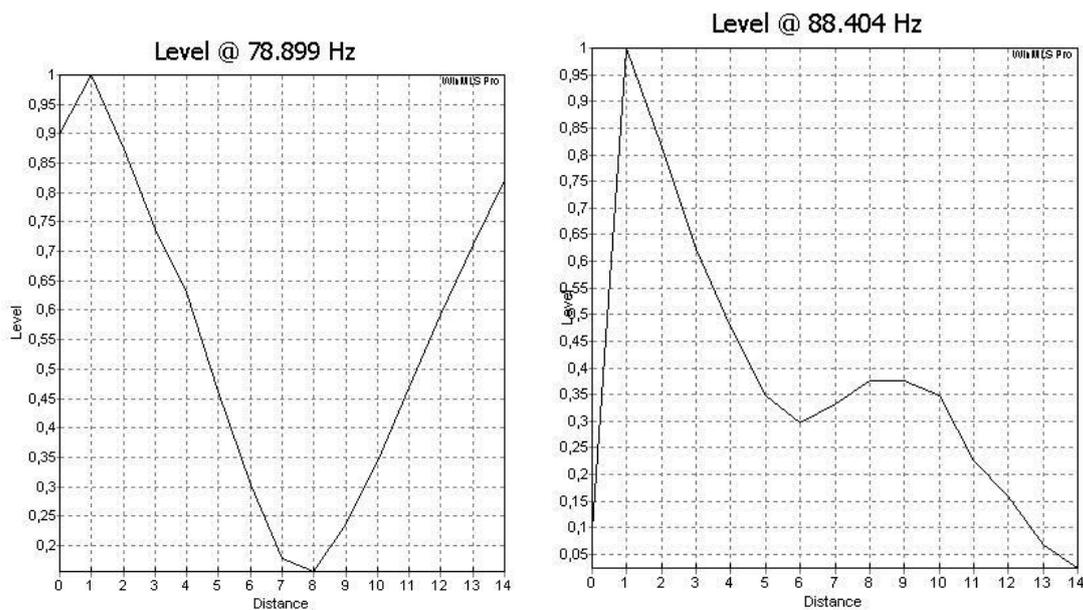
Figura 6.53 – Gráficas del eje X para las frecuencias de interés.

Como se puede ver en las seis frecuencias elegidas no se ven modos propios perfectos o ondas estacionarias sinusoidales ideales. Pero es apreciable el cambio de nivel sonoro cuando se cambia la posición a lo largo del eje. Esto va a provocar oír con diferentes volúmenes la misma frecuencia en distintos puntos de la sala. En la Tabla 4.10 se cuantifican estos cambios de nivel con valores concretos ya que el eje vertical que proporciona el software es un eje normalizado. Las diferencias entre los máximos y los mínimos para las distintas frecuencias oscilan entre 20 dB y 30 dB aproximadamente. Diferencias a tener en cuenta ya que son diferencias grandes de nivel.

Frecuencia (Hz)	MAX		MIN	
	Receptor	Nivel (dB)	Receptor	Nivel (dB)
46,7	1	99,1	27	73,7
82	2	98	29	70,7
93	2	100,3	19	82,7
105	1	101,1	30	78,4
118	2	100,1	10	85
138	2	102,8	15	82,7
147	2	102,1	25	81,2
155	2	103,3	17	78

Tabla 4.10 – Eje X.

Las posiciones de los máximos absolutos son muy cercanas a la pared. Por lo tanto tendremos es recomendable comparar la diferencia de nivel de los mínimos con los máximos relativos cercanos a ellos. Lo que se observa en ese caso es que las diferencias anteriores en el peor de los casos no se reducen ni en 10 dB, lo que quedan diferencias de 15-25dB. En casos más favorables con máximos relativos menos elevados de nivel la diferencia se ve reducida hasta aproximadamente los 10dB. Mucho más asumibles.



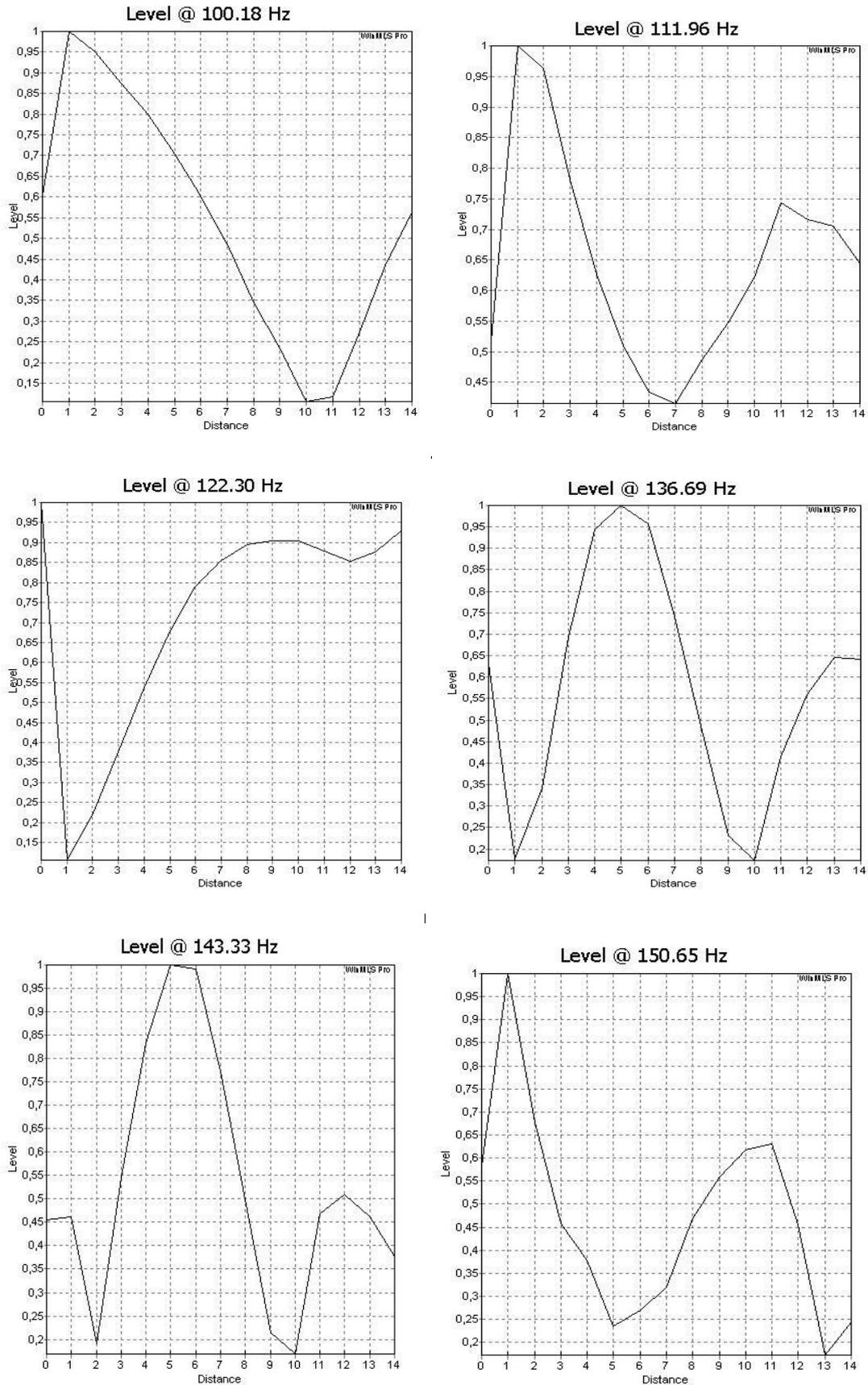


Figura 4.54 - Gráficas del eje Y para las frecuencias de interés.

De la misma forma que en el eje X se ven situaciones parecidas salvo en dos frecuencias donde los máximos absolutos ya aparecen en las zonas centrales del eje. Para verlo cuantitativamente se puede ir a la Tabla 4.11. Te estos resultado se puede decir que 136 Hz y 143 Hz son las frecuencias más peligrosas ya que tienen un máximo a 1 metro de la pared, y a 2 de la pared tienen un mínimo, es decir en un metro tenemos un cambio de nivel de 10 dB y de 15,5 dB respectivamente. Diferencias considerablemente altas y muy cercanas entre sí.

Frecuencia (Hz)	MAX		MIN	
	Receptor	Nivel (dB)	Receptor	Nivel (dB)
78	1	91	8	76
88	1	92,3	13	64
100	1	92	10	72
111	1	86,6	7	78,1
122	10	92,8	1	73,7
136	5	90,3	10	80
143	5	94,3	10	78,8
150	1	97,1	5	74,9

Tabla 4.11 – eje Y

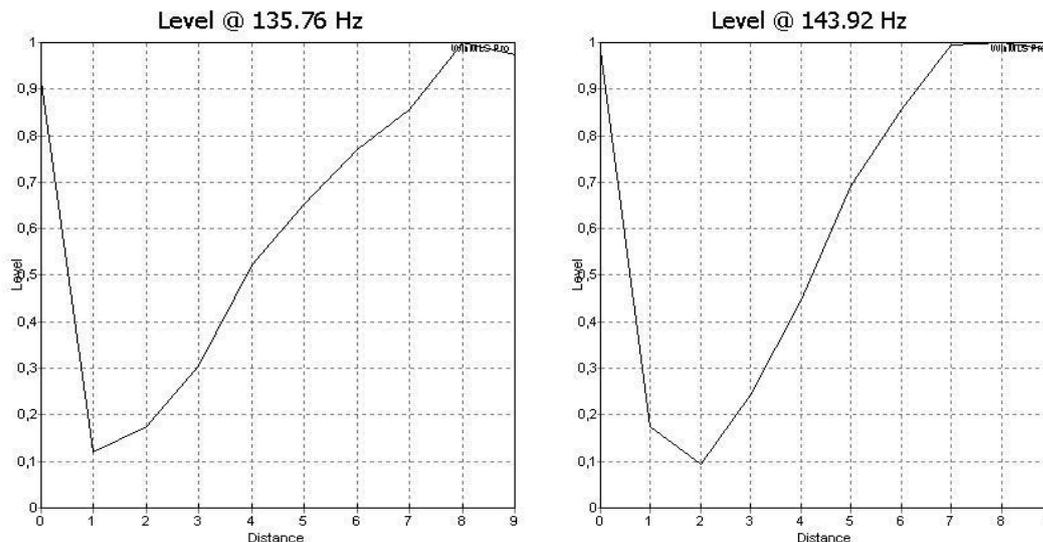


Figura 4.56 - Gráficas del eje Z para las frecuencias de interés.

Por último el eje Z, el que menos va a interesar para el análisis ya que el cambio de alturas no va a ser una cuestión que vaya a generar preocupación a la hora de grabar instrumentos y voces, ya que por lo general es algo que se realiza a una distancia de entre 1,20 y 1,80 m. En la Figura 26 se ven las dos frecuencias que tenían un mayor cambio de nivel. Pero este se produce entre alturas muy cercanas al suelo, las de menor nivel, y niveles altos las alturas a las que interesa esto mismo. Por lo tanto el eje Z no es algo que nos preocupe en esta sala.

Frecuencia (Hz)	MAX		MIN	
	Receptor	Nivel (dB)	Receptor	Nivel (dB)
135	8	92	1	59
143	7	92,3	2	71,7

Tabla 6.12 – Eje Z.

En resumen, las frecuencias más a tener en cuenta van a ser de 100 Hz a 140 Hz. En ellas en varias dimensiones se encuentran diferencias de nivel grandes en puntos centrales de la sala, tanto para el eje X como para el Y.

4.3.4.B-Sala de percusión

Cálculo teórico

A continuación se presentan los resultados del cálculo teórico y de esta manera se tiene una estimación de los modos propios que se encuentran en esta sala (tanto de la cantidad como de las frecuencias de los mismos).

Ancho	Largo	Alto	C	Volumen	Superficie	Tmid (estimación)	Coef. Absorción
5,40	3,90	2,95	340	62,1	97,0	0,4	0,25
Frecuencia Limite						162 Hz	

Tipo	Frecuencia (Hz)
2	31
2	44
1	54
2	58
2	63
1	66
1	72
1	77
0	79
1	85
2	87
1	93

Tipo	Frecuencia (Hz)
2	94
0	96
1	104
1	105
1	108
0	109
1	111
2	115
0	119
1	119
0	122
1	123

Tipo	Frecuencia (Hz)
2	126
0	127
1	129
2	131
1	131
1	133
1	135
0	138
1	138
0	141
1	143
1	145

Tipo	Frecuencia (Hz)
1	145
0	145
0	146
0	148
1	149
1	153
0	155
0	156
2	157
0	158
1	161
1	163

Dónde:

- Tipo 0 modo oblicuo
- Tipo 1 modo tangencial
- Tipo 2 modo axial

La frecuencia máxima en base a estos cálculos es de 162 Hz y se considerarán las frecuencias mayores como ausentes de modos propios que repercutan negativamente en la acústica del recinto.

En conclusión, los cálculos teóricos previos a la medición revelan que

aproximadamente hay que fijarse en frecuencias inferiores a 162 Hz. No obstante, hay que considerar estos cálculos como lo que son, una aproximación. Ya que parten de ciertas suposiciones de partida ideales. Y que este es un límite que no hay que entender como línea roja que los modos propios dejan de repercutir progresivamente aumenta la frecuencia y no es un umbral absoluto.

Cálculo práctico (medición)

El software utilizado para la realización de las medidas ha sido WinMLS. Este software ofrece un formato concreto para la medición de los modos propios. Cuya utilización ya se ha descrito para la otra sala de este mismo recinto.

: Root of Frequency Response Magnitude - Room

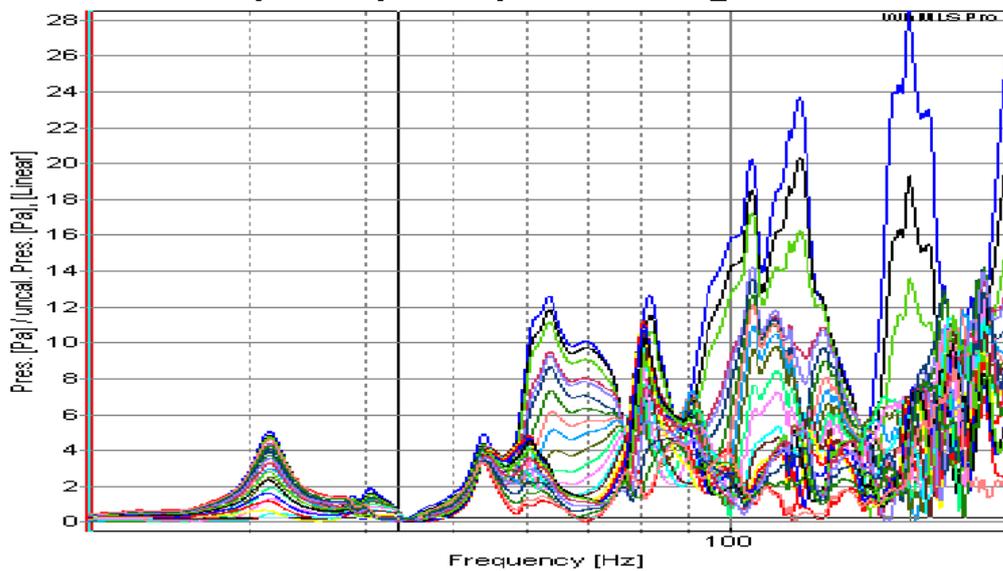


Figura 4.57 – Representación de resultados de un eje del Software WinMLS para esta sala.

Se puede ver la representación de las medidas en la Figura 4.57. Buscando las frecuencias donde esta representación es más ancha, es decir, con mayor diferencia de nivel, se han obtenido las gráficas de las Figuras 4.58, 4.59 y 4.60, ordenadas por ejes.

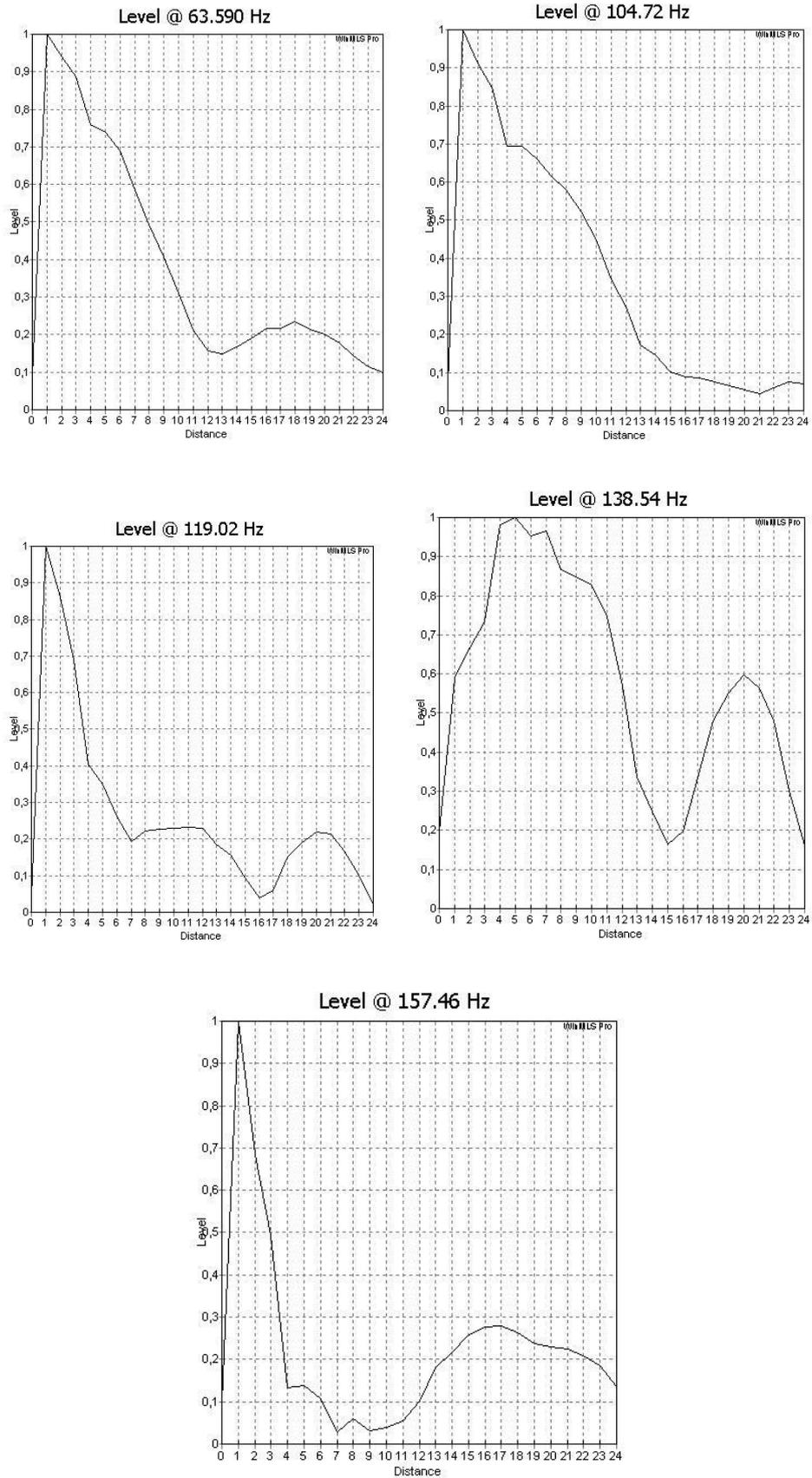
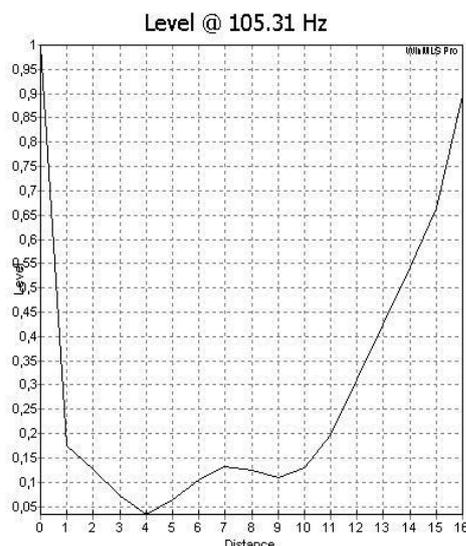
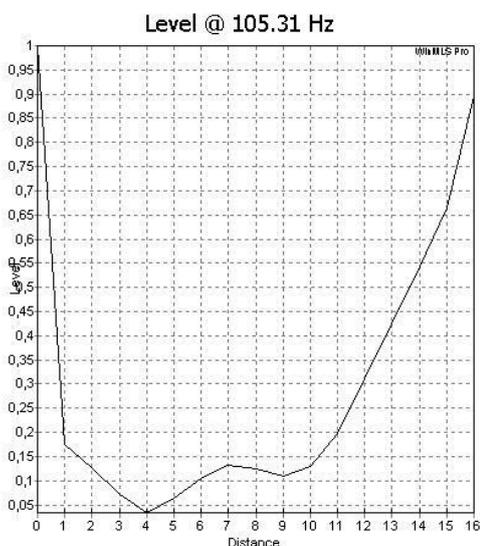
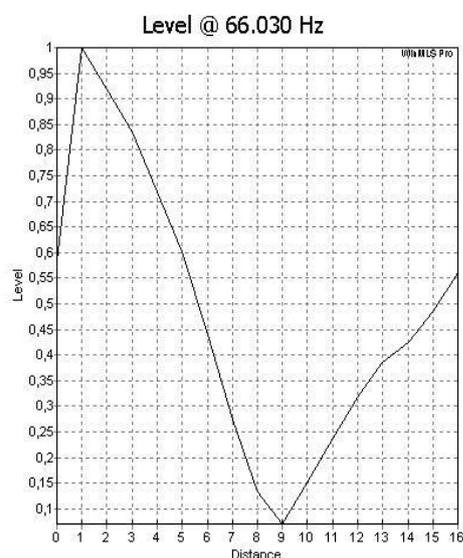
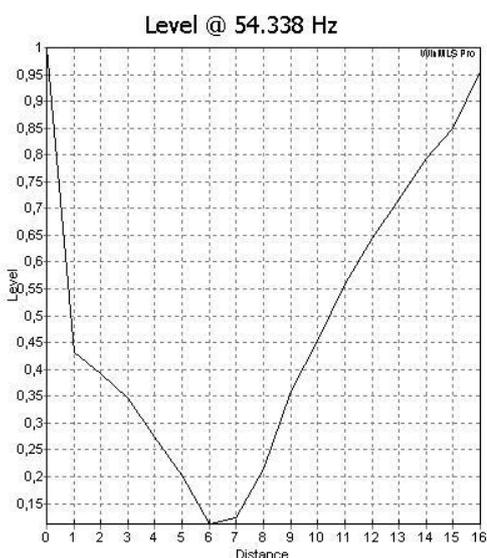


Figura 4.58 – Eje X.

La representación gráfica da una idea visual de la distribución de nivel por las distintas posiciones pero cuantitativamente no nos da mucha información. Para esto acudir a la Tabla 4.13 donde se ve que las diferencias oscilan entre 20-30 dB. Con el caso más interesante en la frecuencia 138 Hz, que en una distancia de 2 metros tenemos un cambio de nivel de 18,9 dB.

Frecuencia (Hz)	MAX		MIN	
	Receptor	Nivel (dB)	Receptor	Nivel (dB)
63	1	100	13	81,7
104	1	103,1	21	73
119	1	103,2	16	76,4
138	5	93	15	74,1
157	1	104,3	7	85,5

Tabla 4.13 - Gráficas del eje X para las frecuencias de interés.



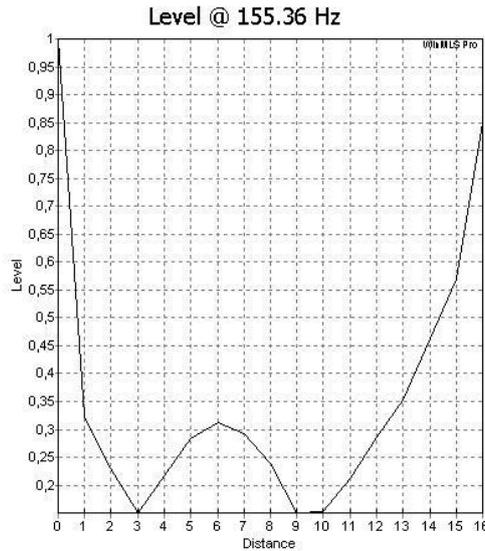


Figura 7 – Eje Y.

El análisis del eje Y, procediendo de la misma manera que con el eje anterior, muestra que en las frecuencias problemáticas elegidas, que no hay máximos ni absolutos ni prácticamente relativos en la zona central del eje. Los máximos se encuentran en los extremos, es decir, en las paredes o muy cerca de ellas. Por lo tanto en la zona central del eje Y sólo tendremos mínimos absolutos para las frecuencias analizadas. Los niveles se pueden observar de una manera cuantitativa en la Tabla 4.14.

Frecuencia (Hz)	MAX		MIN	
	Receptor	Nivel (dB)	Receptor	Nivel (dB)
54	15	92,3	6	74,1
66	1	94	9	70,1
79	16	94	7	87,8
105	16	102,8	4	75,2
155	15	100,3	9	85,1

Tabla 4.14 – Eje Y.

Las diferencias entre los máximos absolutos y los mínimos absolutos oscilan entre los 20 dB y 30 dB aproximadamente. Como en todos los casos anteriores son diferencias grandes. Aunque en este caso al no tener los mínimos absolutos máximos relativos cercanos su aportación negativa no es tan patente como en los casos anteriores.

Por último se representa el eje Z, en el que el análisis se centra en analizar las alturas importantes como pueden ser de 1,20m a 1,80m.

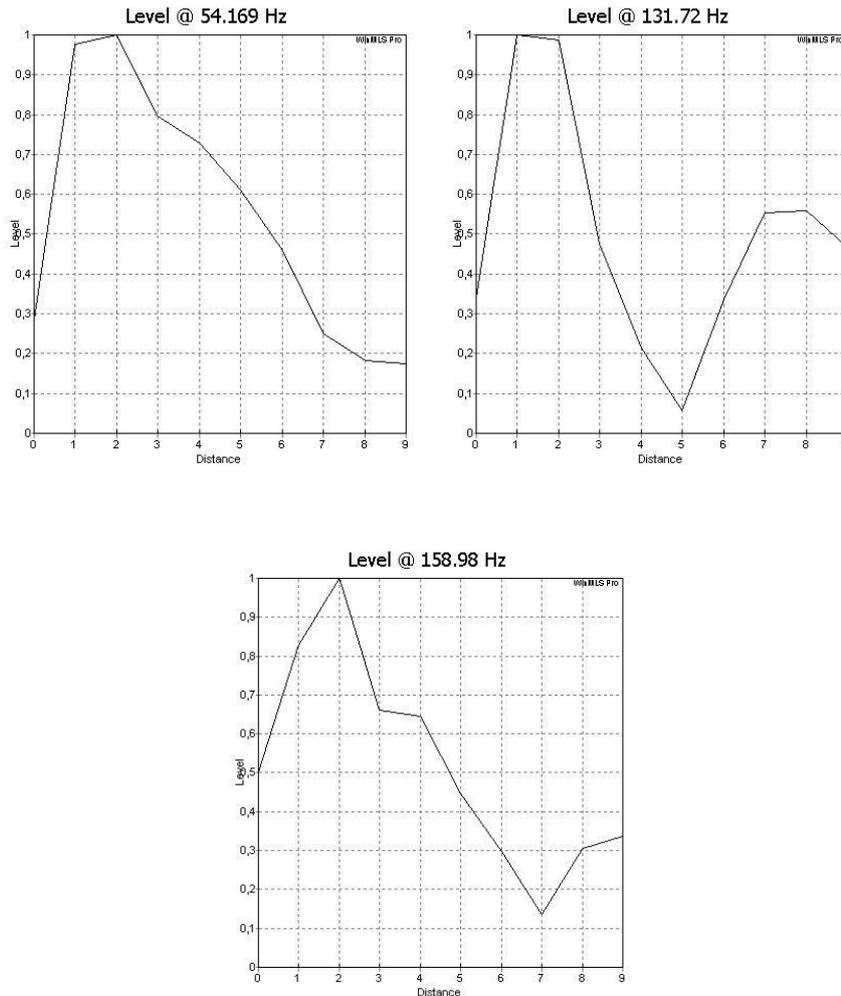


Figura 8 - Gráficas del eje Z para las frecuencias de interés.

En la Tabla 4.15 se representan los niveles de la Figura 30.

Frecuencia (Hz)	MAX		MIN	
	Receptor	Nivel (dB)	Receptor	Nivel (dB)
54	2	99	8	82,3
131	1	94,2	5	74,5
158	2	100,8	7	82,8

Tabla 4.15 – Eje Z.

Se puede apreciar que los mínimos están muy cerca del suelo, y que los mínimos o valores más bajos se sitúan justo en las alturas en las que interesa más este eje. Aun así, son valores que aunque sean mínimos son niveles alrededor de 80dB, por lo tanto considerablemente importantes para su correcta percepción.

En conclusión con esta sala de percusión, las frecuencias más problemáticas en los ejes X e Y, se sitúan en las frecuencias entre 100 y 150 Hz. Se tendrá especial cuidado en esta sala en las zonas centrales de estos dos ejes, zona central de la sala, porque hay se sitúan los mínimos de todas las frecuencias estudiadas. Será un punto que siempre ha tener en cuenta.

5-Comparación entre salas

En este capítulo se comparan los resultados obtenidos de forma experimental en los recintos estudiados que se analizan de forma individual y en profundidad en el capítulo anterior. Para ello se van a utilizar los parámetros acústicos que caracterizan las propiedades propias de una sala a la hora de caracterizarla.

Las medidas que se han comparado en este capítulo son en base al método utilizado para su medición y análisis (ISO-3382, EBU-3276 y análisis de modos propios).

5.1-Basado en ISO-3382

5.1.1-Parámetros temporales

T_{30} :

En la Tabla 5.1 se pueden ver los datos de cada sala para este parámetro. En la Figura 5.1, estos datos se representan para una comparación más intuitiva y visual.

	Frecuencia (Hz)								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
La Nabe	0,68	0,46	0,38	0,36	0,41	0,50	0,54	0,49	0,45
Iza	0,44	0,73	0,67	0,52	0,62	0,64	0,62	0,52	0,47
Oricin (Equipo)	0,60	0,35	0,35	0,28	0,23	0,24	0,20	0,18	0,17
Oricin (Percusión)	0,70	1,25	0,93	0,52	0,33	0,34	0,33	0,31	0,29

Tabla 5.7 – Datos del T_{30} para cada sala.

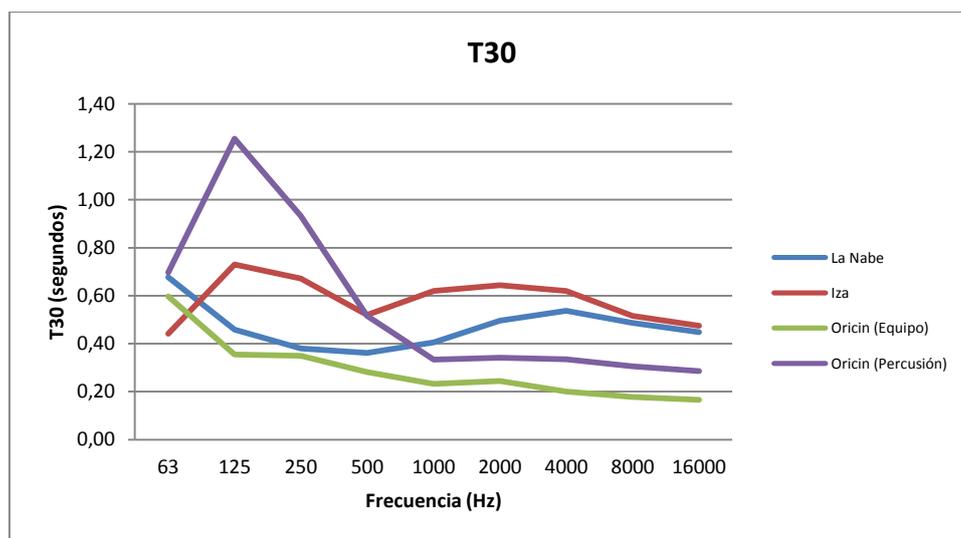


Figura 5.9 – Gráfica del T_{30} para cada sala.

Las primeras impresiones que se sacan a simple vista es que la sala con menor tiempo de reverberación de T_{30} es la sala de escucha y control del recinto de Orícín. El más elevado es el de la sala Iza. Aunque es muy característico el pico que presenta la sala de percusión de Orícín.

La respuesta más adecuada para la grabación de material sonoro es la de menor tiempo. Ya que lo que se busca es que la sala sea lo más apagada posible. Ninguna de ellas tiene un resultado inadecuado para esta práctica.

T₂₀:

En la Tabla 5.2 se pueden ver los datos de cada sala para el T₂₀. En la Figura 5.2, estos datos se representan de manera gráfica.

	Frecuencia (Hz)								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
La Nabe	0,58	0,44	0,38	0,35	0,40	0,49	0,53	0,48	0,43
Iza	0,43	0,49	0,55	0,51	0,62	0,64	0,62	0,51	0,46
Oricin (Equipo)	0,53	0,33	0,32	0,28	0,24	0,24	0,20	0,18	0,16
Oricin (Percusión)	0,58	0,89	0,43	0,30	0,33	0,33	0,33	0,30	0,28

Tabla 5.8 - Datos del T₂₀ para cada sala.

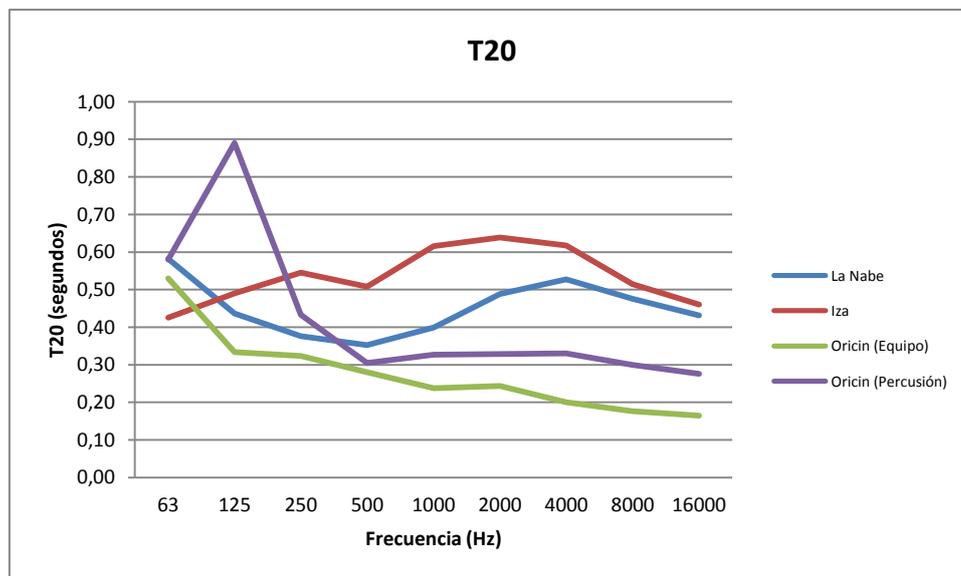


Figura 5.10 - Gráfica del T₂₀ para cada sala.

El T₂₀ es un parámetro muy semejante al T₃₀, pero es un parámetro más adecuado cuando se trata de caracterizar el tiempo de reverberación de una sala pequeña. Dada la semejanza de la definición de los dos parámetros las gráficas de la Figura 1 y 2 son muy parecidas. Lo que se debe de destacar es que en general los tiempos para las bajas frecuencias son sensiblemente inferiores. Para el resto de frecuencias las medidas son prácticamente las mismas.

Del mismo modo, la sala más apagada es la de escucha y control del recinto de Oricin. La problemática de la frecuencia reverberante de la sala de percusión sigue latente. Posiblemente por un tema de resonancia con algún instrumento de percusión. El recinto de La Nabe presenta unos tiempos aceptables para el uso de grabación musical y más teniendo en cuenta que no es un recinto específicamente destinado a ello ya que es una sala de usos múltiples. Podría interesar bajar el tiempo de reverberación para las frecuencias altas, ya que

el tiempo de reverberación tiende a disminuir a medida que la frecuencia aumenta, y así conseguir un tiempo de reverberación más plano, aunque esta característica es un matiz propio de la sala. Por último, la sala de Iza tiene el tiempo de reverberación más alto de las cuatro salas. No es inadecuado para la grabación de material sonoro, aunque es una sala más adecuada para ensayo y no para grabación.

EDT:

En la Tabla 5.3 se pueden ver los datos de cada sala para el EDT. En la Figura 5.3, estos datos se representan de manera gráfica.

	Frecuencia (Hz)								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
La Nabe	0,58	0,43	0,36	0,35	0,40	0,49	0,52	0,48	0,43
Iza	0,43	0,42	0,45	0,49	0,63	0,63	0,61	0,51	0,46
Oricin (Equipo)	0,54	0,23	0,21	0,23	0,20	0,22	0,18	0,17	0,16
Oricin (Percusión)	0,48	0,34	0,29	0,30	0,34	0,33	0,32	0,30	0,28

Tabla 5.9 - Datos del EDT para cada sala.

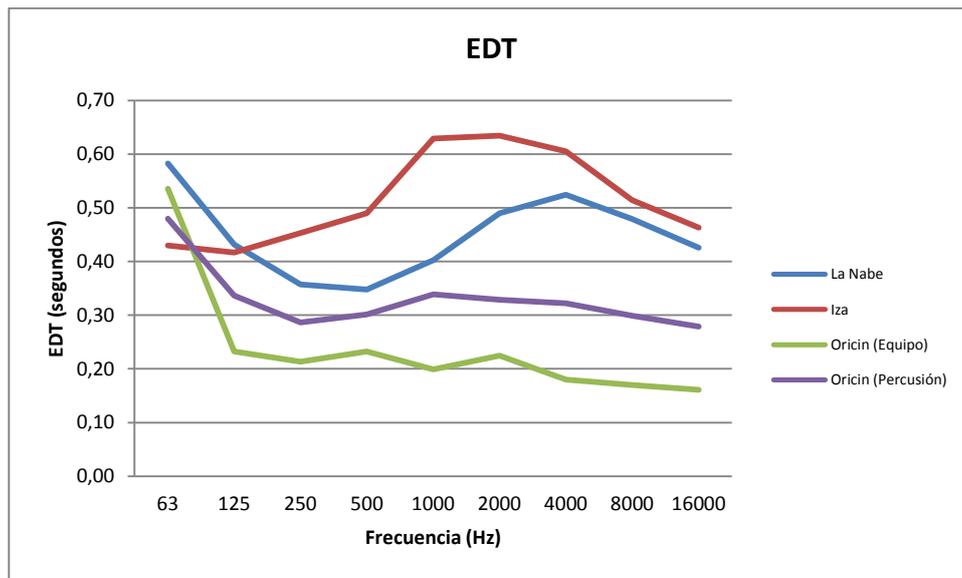


Figura 5.11 - Gráfica del EDT para cada sala.

El EDT es subjetivamente más importante y está relacionado con la reverberación percibida, mientras que el tiempo de reverberación (T_{30} y T_{20}) está más relacionado con las propiedades físicas del recinto.

Las conclusiones son las mismas que para los otros parámetros salvo que en este caso en la sala de percusión el pico que aparecía en los anteriores parámetros desaparece, dejando una curva mucho más atractiva para el uso que se le quiere dar de grabación de percusión. La sala de equipo de Oricin es todavía más apagada para las frecuencias 125, 250 y 500 Hz. Para las otras dos salas este parámetro no revela nada nuevo.

5.1.2-Parámetros energéticos

C_{50} :

El C_{50} es un parámetro relacionado con la inteligibilidad del mensaje oral (claridad de la voz). En la Tabla 5.4 se pueden ver los datos de cada sala para el C_{50} . En la Figura 5.4, estos datos se representan en una gráfica.

	Frecuencia (Hz)								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
La Nabe	4,10	6,66	8,37	8,67	6,76	4,77	4,25	4,78	5,87
Iza	5,60	6,72	6,16	6,00	4,00	3,62	3,61	5,14	5,99
Oricin (Equipo)	6,30	12,99	12,27	12,80	14,84	13,74	17,22	18,68	20,02
Oricin (Percusión)	6,422	9,600	10,689	11,022	9,411	8,667	8,911	10,333	11,022

Tabla 5.10 - Datos del C_{50} para cada sala.

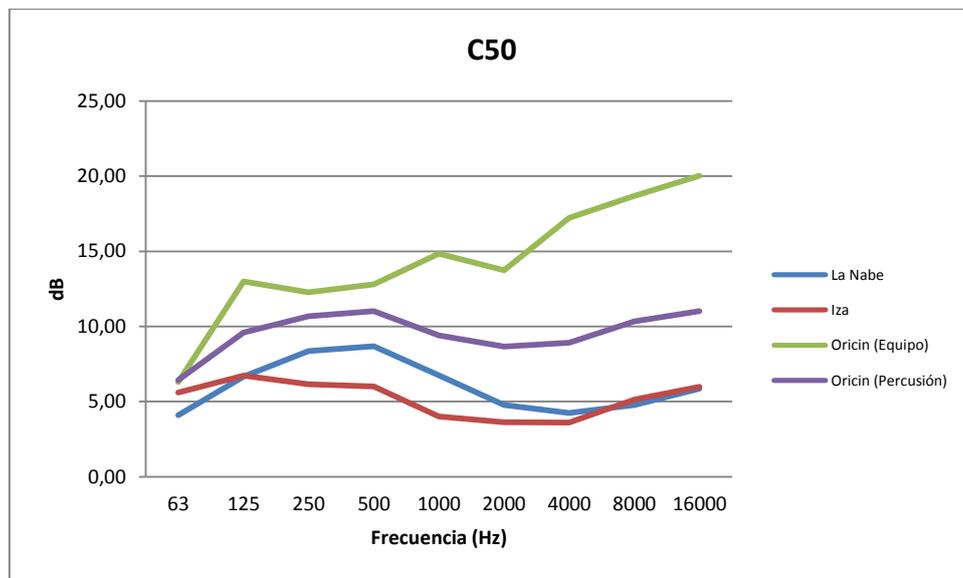


Figura 5.12 - Gráfica del C_{50} para cada sala.

La Figura 5.4 define claramente cuál es la sala que tiene una mejor inteligibilidad para la voz. Es la sala de control y escucha de Oricin. Las demás son considerablemente más bajas aunque tengan unos niveles de C_{50} aceptables.

C_{80} :

El C_{80} es un parámetro relacionado con la inteligibilidad del mensaje musical (claridad de musical). En la Tabla 5.5 se pueden ver los datos de cada sala para el C_{50} . En la Figura 5.5, estos datos se representan en una gráfica.

	Frecuencia (Hz)								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000
La Nabe	8,85	12,03	13,88	14,20	12,17	9,69	8,74	9,67	11,06
Iza	11,70	11,83	10,86	10,31	7,42	7,11	7,36	9,29	10,50
Oricin (Equipo)	10,64	17,77	18,46	19,97	22,46	21,41	26,19	28,67	29,67
Oricin (Percusión)	10,80	14,69	17,51	17,41	14,82	14,90	15,21	16,84	18,14

Tabla 11.5 - Datos del C_{80} para cada sala.

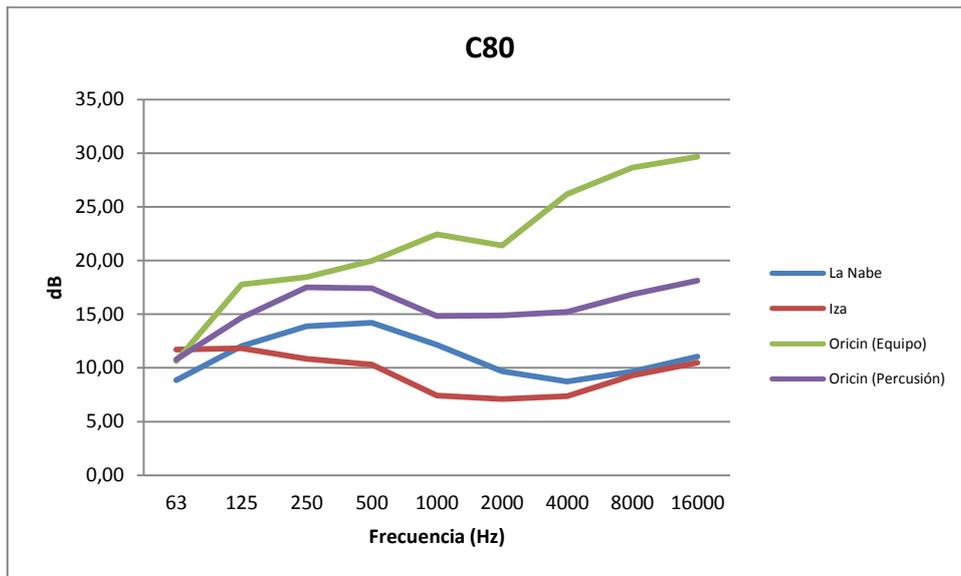


Figura 13.5 - Gráfica del C_{80} para cada sala.

Como era de esperar a tenor de la anterior comparación vuelve a ser la sala de control y escucha de Oricin la sala que presenta una musicalidad más alta en comparación con las demás. En segundo lugar la sala de grabación de instrumentos musicales, presenta muy buena sonoridad para las bandas frecuenciales de 250 y 500 Hz (casi similares a la de la sala de control y escucha). Las salas con menor musicalidad vuelven a ser Iza Y La Nabe. Aunque manteniendo niveles de musicalidad muy aceptables.

5.2-Basado en EBU-3276

5.2.1-Tiempo de reverberación

En la Figura 5.6, se puede ver de forma comparativa los tiempos de reverberación (promedio de los altavoces de la sala) para cada frecuencia. También se puede ver los límites de tolerancia establecidos por la EBU 3276, los cuales no recomienda sobrepasar para una escucha de material sonoro en la sala perfectamente adecuada.

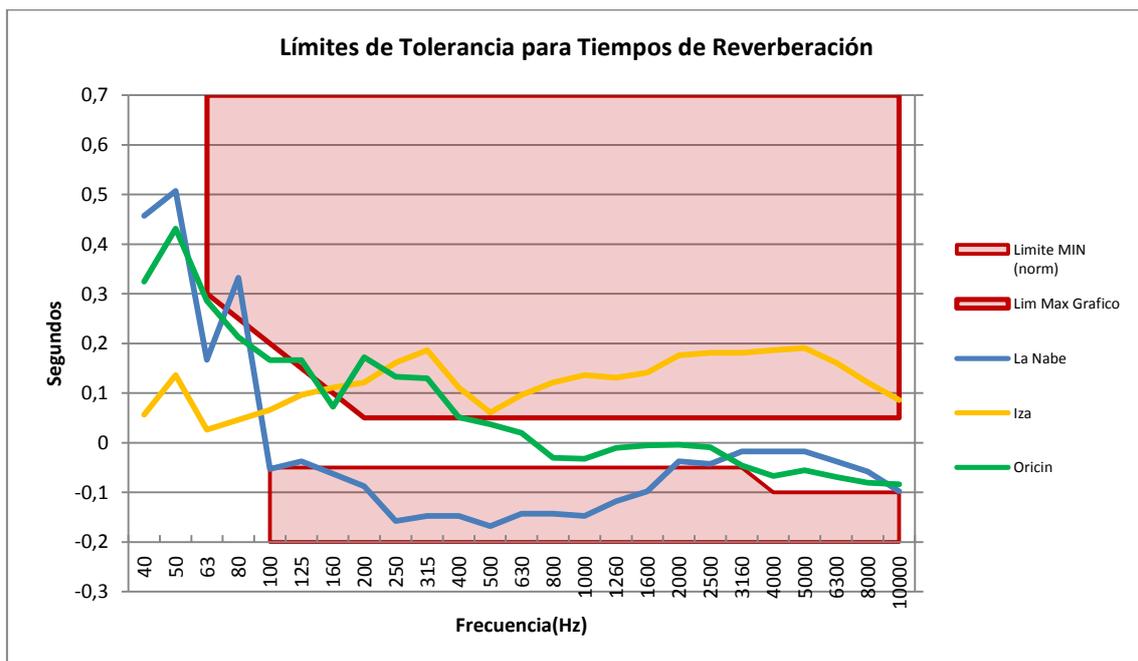


Figura 5.14 – Límites para el Tiempo de reverberación para las tres salas (EBU Tech. 3276).

Se observa que ninguna sala cumple la limitación de tiempos de reverberación en todas las frecuencias. Todas ellas cumplen la recomendación para frecuencias graves. Pero se puede observar como la sala de Orícin cumple la recomendación para más frecuencias, sobre todo en bandas de 1/3 superiores a 400 Hz y en las frecuencias más graves (<100 Hz).

La sala de Iza no cumple la recomendación superando los límites superiores (reverberación de más). La sala de escucha es pequeña pero quizás con poco material absorbente.

La Nabe no los cumple sobrepasando los límites inferiores (reverberación insuficiente, para el volumen que tiene). La Nabe, que es más grande, podría permitirse tener T mayores, según la EBU 3276. Sin embargo, tantos objetos y recovecos, provocan que la absorción a bajas y medias frecuencias sea casi hasta excesiva. Es curioso que según la ISO, el T sea superior al de los altavoces en la EBU. La situación de la zona de escucha (zona de arriba) provoca que parezca una sala menor que la que luego es realmente.

5.2.2-Respuesta en frecuencia de las salas

En la Figura 5.7, se puede ver de forma comparativa los niveles de respuesta ante ruido rosa (promedio de los altavoces de la sala) para cada frecuencia. También se puede ver los límites de tolerancia establecidos por la EBU 3276.

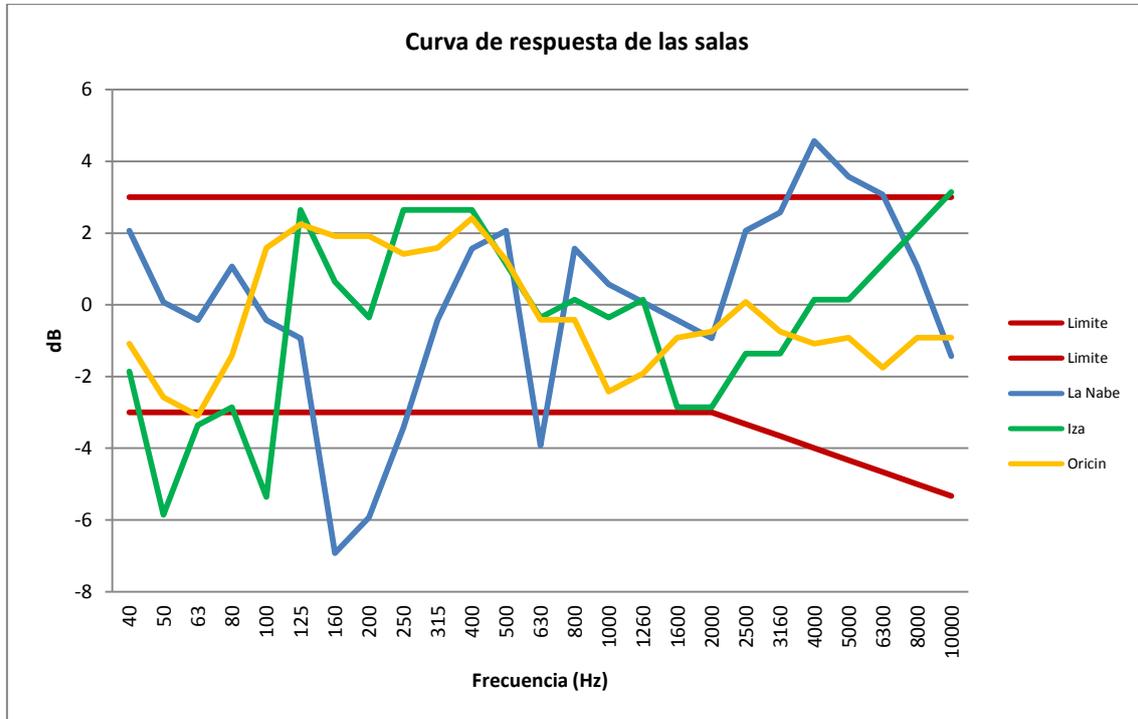


Figura 5.15 – Curva de respuesta de las salas (EBU Tech. 3276).

En general, la respuesta de las salas está conforme a los límites recomendados, salvo en algunas bandas de las salas de La Nabe e Iza. En cambio, la sala de Oricín cumple los límites recomendados. También es de reseñar que ninguna de las salas presenta una respuesta manifiestamente plana para todas las frecuencias.

5.2.3-Ruido de fondo de las salas

En la Figura 5.8, se puede ver de forma comparativa los niveles de ruido de fondo (con los equipos encendidos) de las salas. También se puede ver los límites de tolerancia establecidos por la EBU 3276.

El menor ruido lo presenta la sala de Oricín, posiblemente porque el equipamiento que suelen generar mayor cantidad de ruido está situado fuera de la sala en sí, en un pequeño cuarto anexo. La Nabe presenta unos picos muy raros a determinadas frecuencias pero podría deberse a ruidos externos ya que se encuentra ubicada en un entorno industrial y una radio comercial emite desde un punto muy cercano, provocando acoplamiento y ruidos indeseados. Lo que llama poderosamente la atención es la tendencia creciente del ruido con la frecuencia en las mediciones realizadas, teóricamente debería de pasar justo lo contrario. Se analizará el equipo de medición en busca de algún posible fallo.

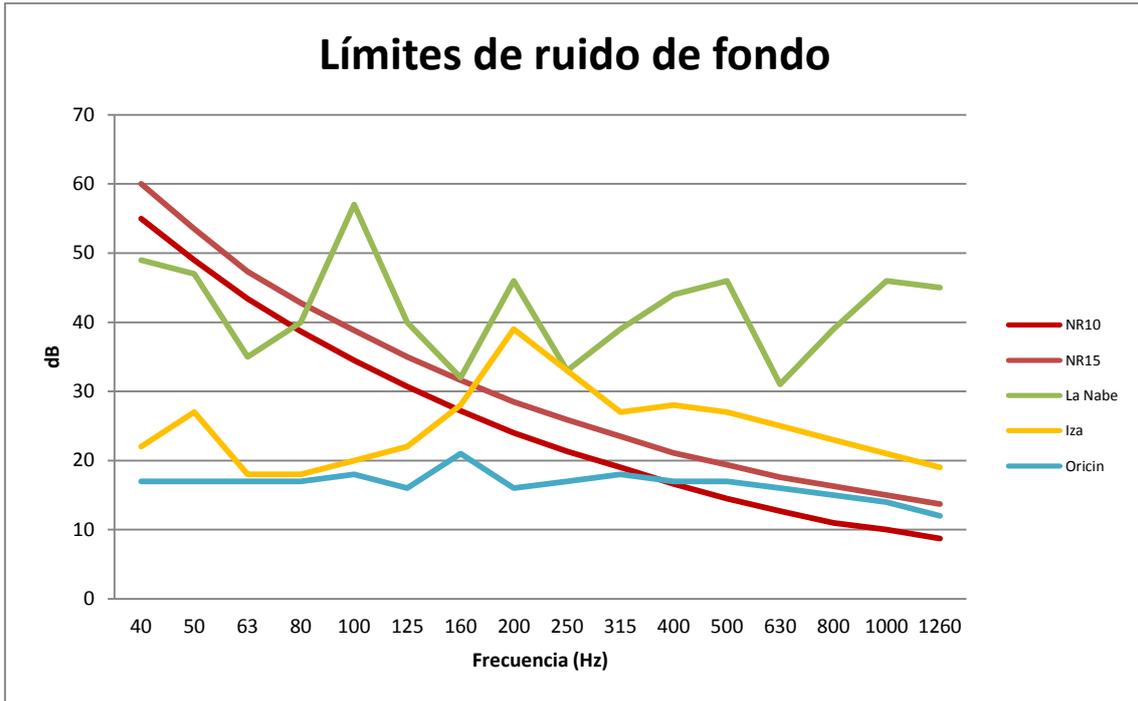


Figura 5.16 – Ruido de fondo (con equipos encendidos) de las tres salas y curvas NR (EBU Tech. 3276).

6-Simulación de las salas analizadas

6.1-Modelado virtual de la sala. SketchUp.

6.1.2-Introducción

- Coordenadas: Colocar las coordenadas de manera que el eje X se sitúe en la audiencia, el eje Y hacia la izquierda del escenario, y el eje Z orientado hacia la parte superior del escenario.

- Tamaños: Un mayor grado de detalle del auditorio no significa un posterior mejor modelado y aumenta el cálculo en el software ODEON. Se recomienda no usar superficies de tamaño inferior a la longitud de onda de frecuencia media (1kHz), que son 0,34 metros. Se utilizarán entre 100 y 200 superficies diferentes.

- Superficies curvas: Todas las superficies deben ser planas. Las superficies curvas se realizaran mediante aproximaciones de secciones planas. Para curvas convexas, que dispersen el sonido, se colocará un plano a 45º, que actúe como reflector.

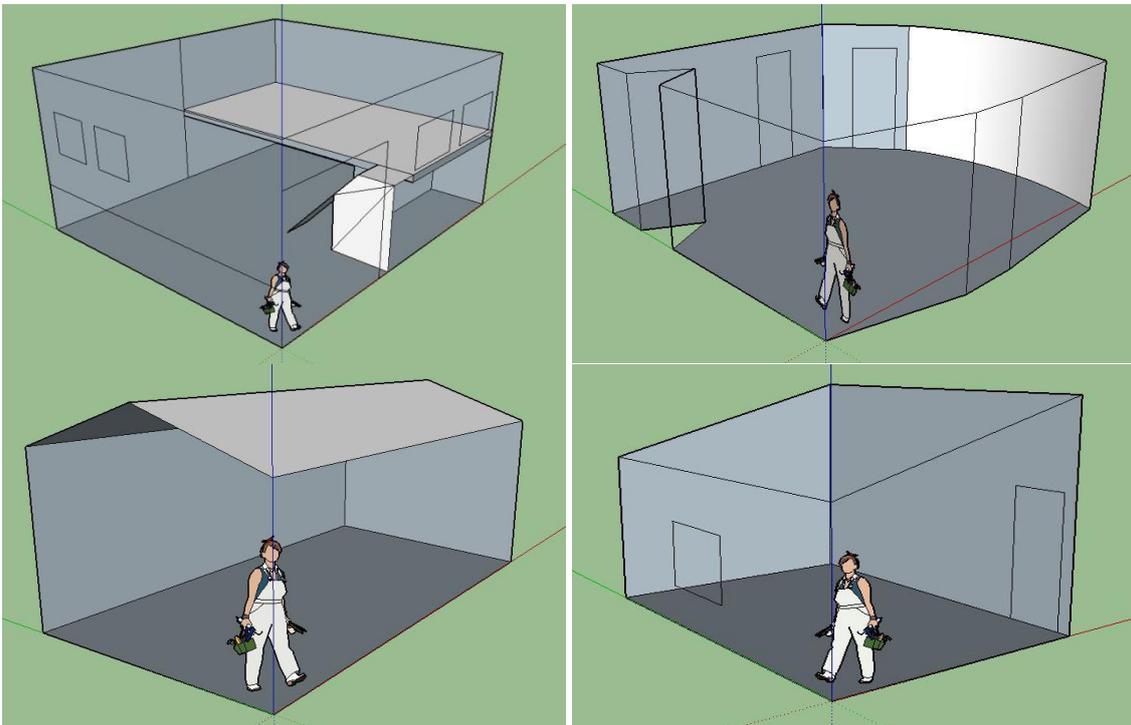


Imagen 6.2 – Modelados virtuales. Arriba: La Nabe (i) e Iza (d). Abajo: Orícín, control (i) y percusión (d).

Una vez realizados los modelos (Imagen 6.1), mediante el *Plugin SU20de* SketchUp permite guardarlo en formato .par, para poder abrir la sala virtual con el programa ODEON.

6.2-Ajuste manual con ODEON

6.2.1-Asignación de los materiales

La absorción del sonido en diferentes tipos de materiales ha sido estudiada por un gran número de autores diferentes. Estos estudios, en su mayoría, recogen una comparación de los coeficientes de absorción medidos en laboratorios y salas.

Para la realización de la asignación de los materiales a las superficies de los recintos utilizados en este proyecto, se ha partido de la base de datos de materiales con los que cuenta ODEON, asignando materiales se han asignado visualmente los materiales. Posteriormente se han modificado sus valores de absorción de una forma controlada, para ajustar los valores medidos con los valores simulados. En las Tablas 6.1-6.4 se pueden ver los materiales y sus absorciones por bandas.

Material	Frecuencias							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Cemento pintado	0,14	0,25	0,15	0,06	0,02	0,02	0,02	0,02
Baldosa (Pared)	0,21	0,21	0,54	0,65	0,34	0,16	0,36	0,35
Baldosa (Suelo)	0,21	0,17	0,50	0,74	0,34	0,31	0,35	0,35
Madera (suelos, escaleras)	0,25	0,25	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,05
Metal (puerta)	0,40	0,40	0,30	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10
Fina lona (sobre pared)	0,10	0,15	0,19	0,17	0,40	0,35	0,27	0,27
Vidrio (ventanas)	0,40	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,04
Armarios, superficies rugosas	0,50	0,45	0,45	0,65	0,65	0,45	0,29	0,25
Techo	0,14	0,45	0,56	0,65	0,61	0,53	0,46	0,37

Tabla 6.1 – Materiales en La Nabe.

Material	Frecuencias							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Madera (paredes)	0,45	0,25	0,10	0,17	0,11	0,09	0,11	0,11
Puerta	0,24	0,19	0,46	0,30	0,24	0,19	0,21	0,05
Madera (suelo)	0,40	0,22	0,15	0,15	0,17	0,21	0,18	0,15
Techo	0,43	0,28	0,22	0,30	0,28	0,29	0,18	0,15

Tabla 6.2 – Materiales en Iza.

Material	Frecuencias							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Piedra y absorbente	0,28	0,38	0,36	0,46	0,49	0,55	0,55	0,65
Piedra	0,15	0,15	0,15	0,2	0,32	0,32	0,37	0,37
Madera (suelo)	0,45	0,39	0,15	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Techo	0,15	0,15	0,25	0,52	0,56	0,51	0,57	0,56

Tabla 6.3 – Materiales en Orícín (Control).

Material	Frecuencias							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Estanterías	0,02	0,02	0,11	0,22	0,38	0,47	0,50	0,50
Puerta	0,14	0,14	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10
Techo	0,19	0,18	0,13	0,12	0,17	0,10	0,11	0,11
Ventana	0,18	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
Pared	0,12	0,10	0,13	0,28	0,42	0,42	0,40	0,35

Tabla 6.4 – Materiales en Orícín (Percusión).

6.2.2-Ajuste manual

Se va a realizar una simulación conociendo los datos medidos *in situ* en la sala, para ello necesitamos que el modelo simulado nos de los datos lo más ajustado a los datos reales que se pueda. Esto implica las limitaciones típicas de una simulación: es difícil reflejar la realidad en una simulación al 100%, ya sea por excesiva complejidad de replicar el escenario real por completo o por necesidad de cálculos extremadamente complejos.

A continuación las Figuras 6.1 a la 6.4 se puede ver el resultado de dejar las salas ajustadas según el criterio establecido.

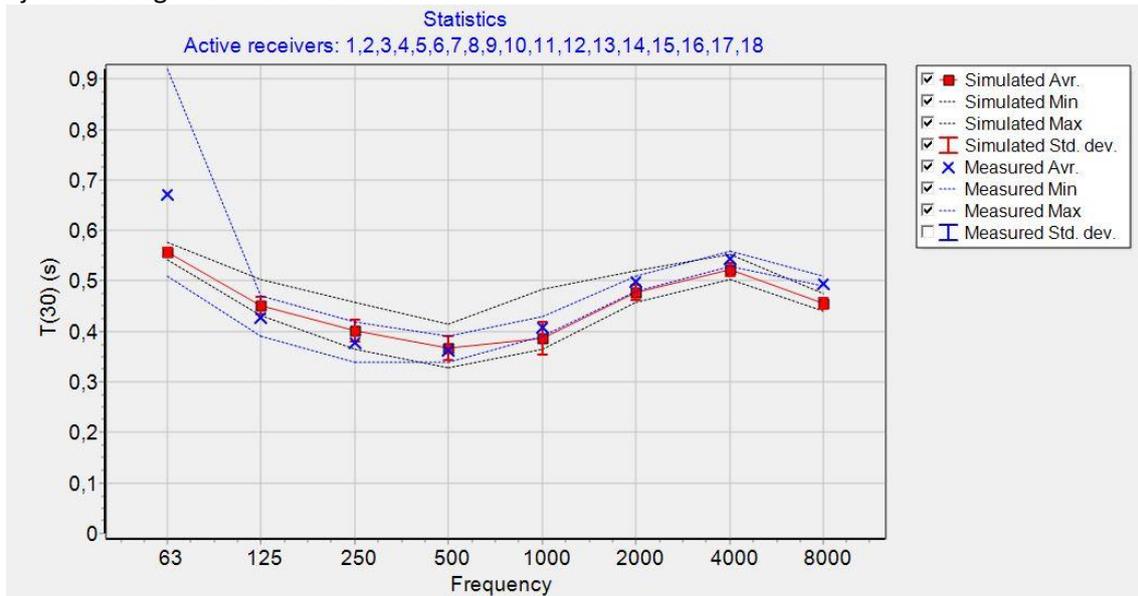


Figura 6.2.A – Medido vs simulado de La Nabe (fuente 1).

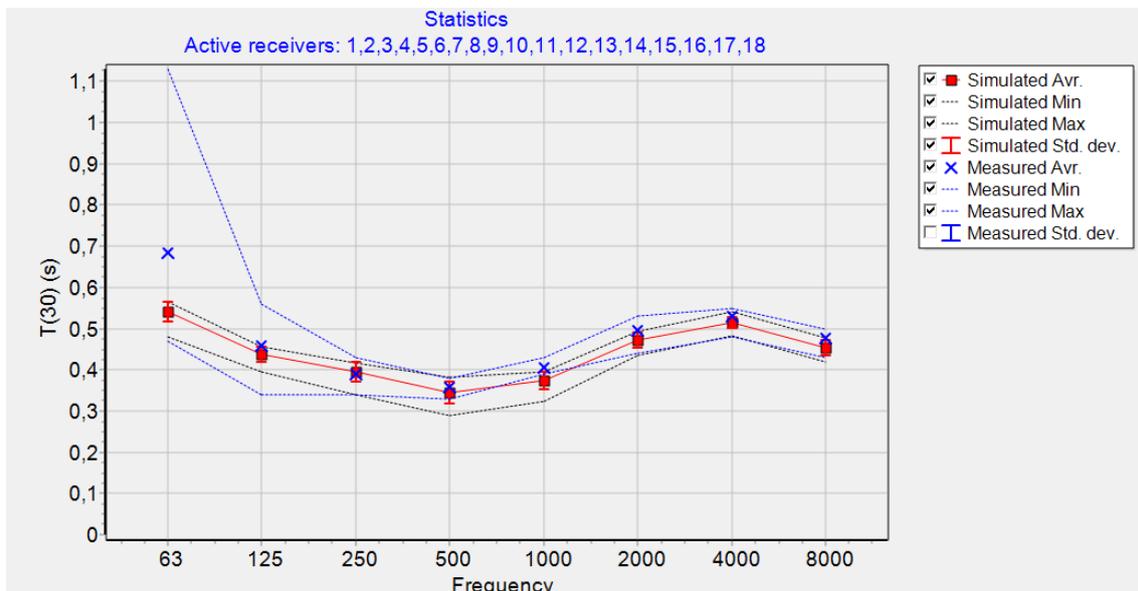


Figura 6.2.B – Medido vs simulado de La Nabe (fuente 2).

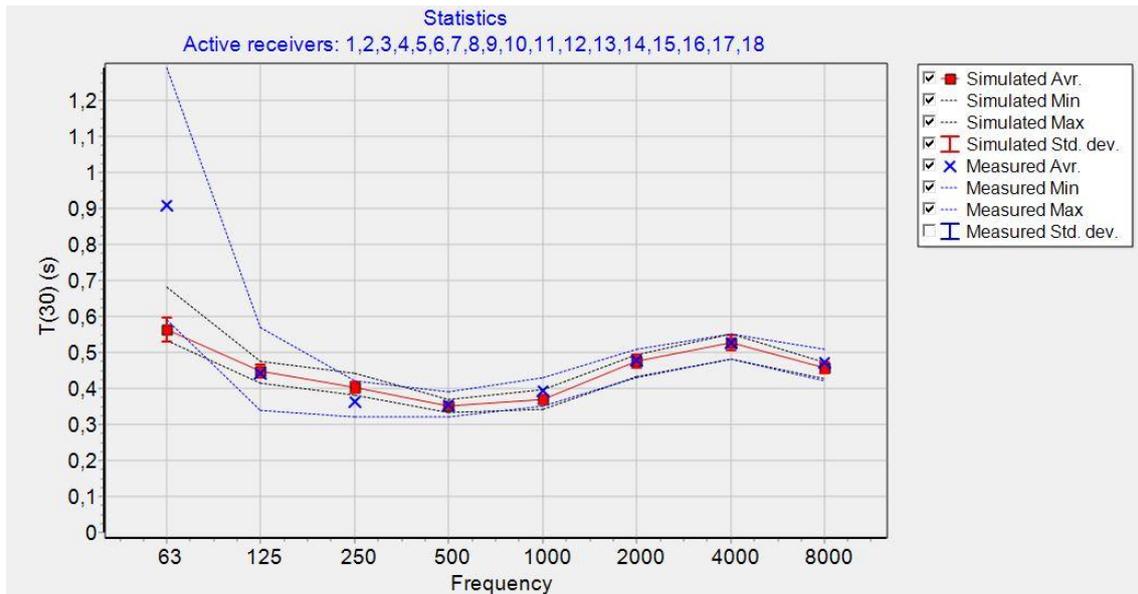


Figura 6.2.C – Medido vs simulado de La Nabe (fuente 3).

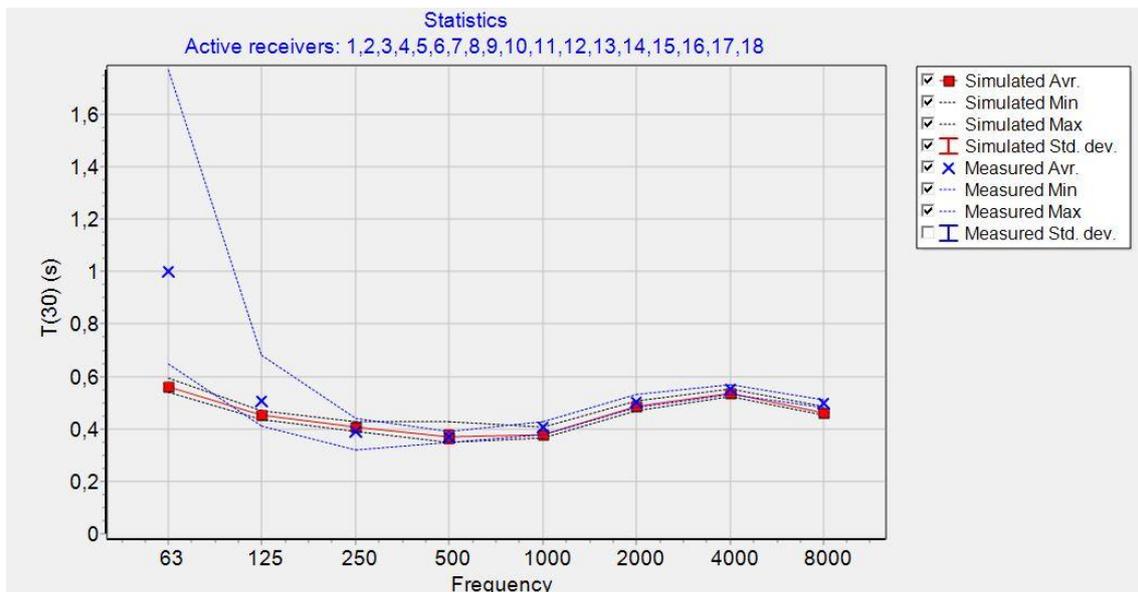


Figura 6.2.D – Medido vs simulado de La Nabe (fuente 4).

Para las tres fuentes se puede ver que no reflejan su variabilidad en los resultados simulado y medido de la banda de 63 Hz, y que como se observa en las Figuras 6.2-6.4, los valores simulados no tienen las mismas dispersiones que los de las medidas. Esto evidencia un problema en esa banda de frecuencias, ya que el modelo simulado con los materiales correctamente asignados para el resto de la sala no anticipa el resultado que se da en la realidad y simula otro resultado, el que en teoría debía de ser. Esto es la confirmación de la existencia de modos propios y lo que imposibilita a los datos simulados acercarse a los reales.

Para las otras salas encontramos la misma situación, que el modelo simulado no refleja la variabilidad de determinadas frecuencias para los diferentes receptores, Figuras 6.2-6.4.

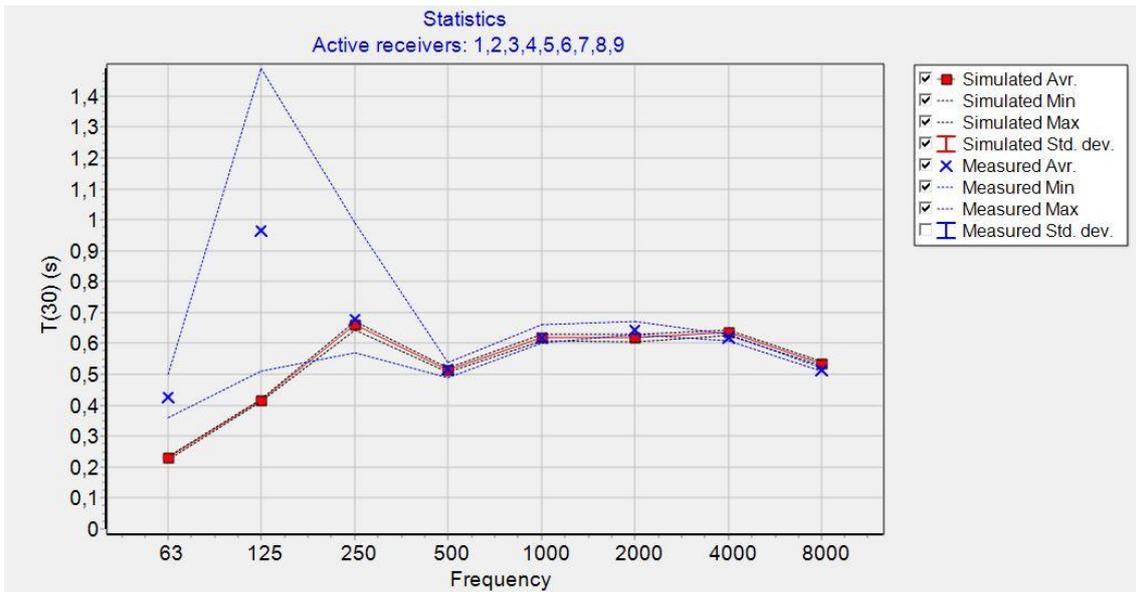


Figura 6.2 – Medido vs simulado de Iza.

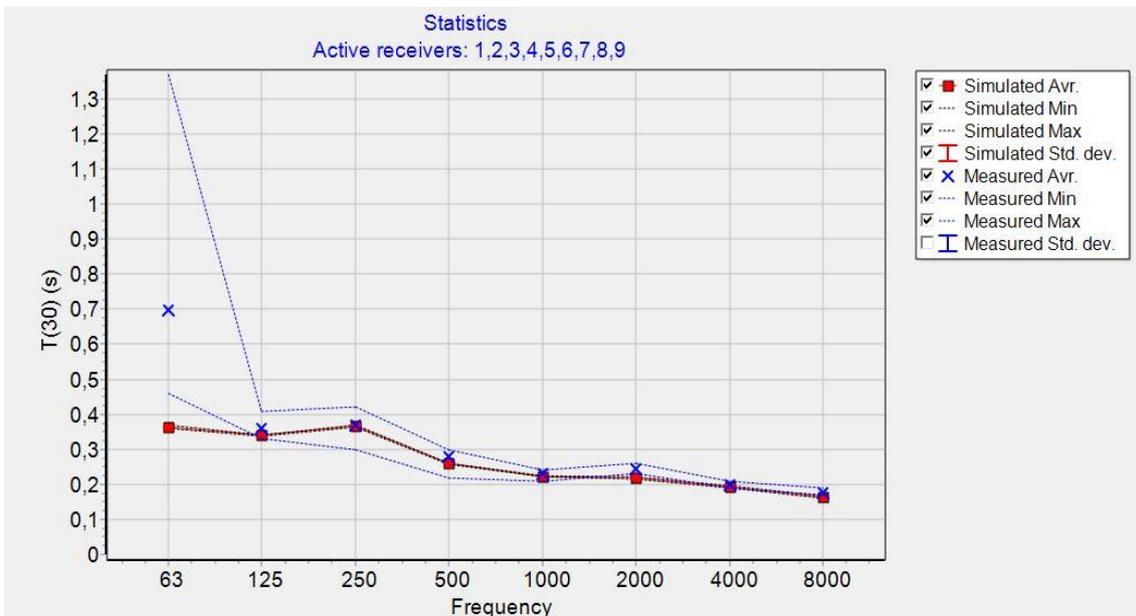


Figura 6.3 – Medido vs simulado de Oricín (Control y escucha).

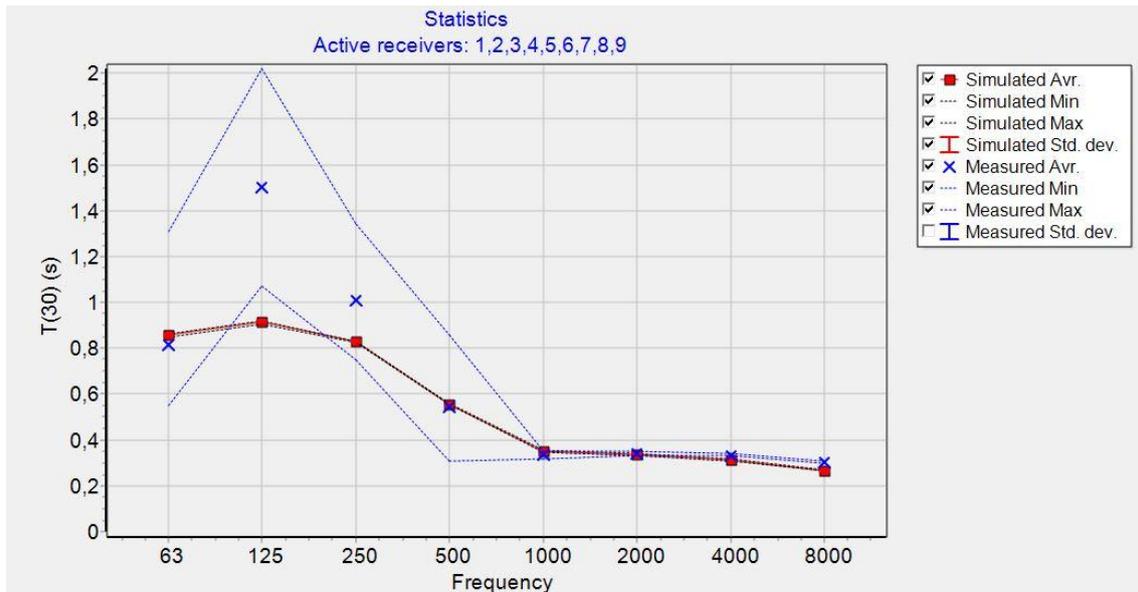


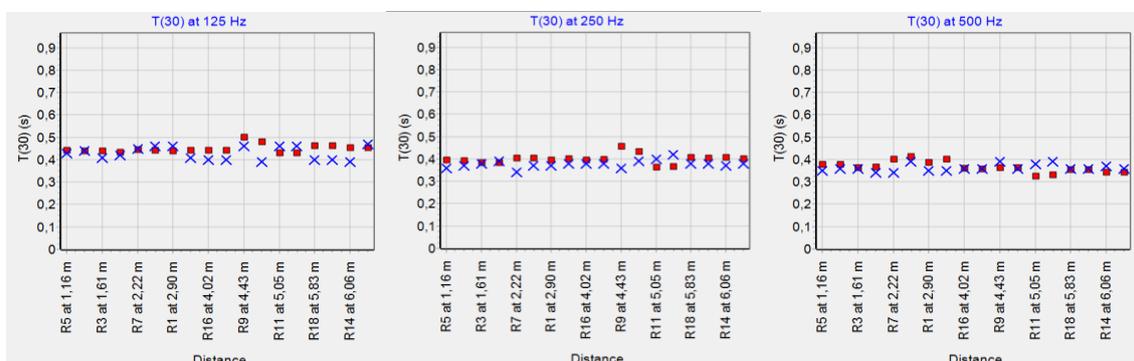
Figura 6.4 – Medido vs simulado de Orícin (percusión).

Como se puede ver vuelven a aparecer los problemas de ajuste en determinadas bandas. Y además en las bandas donde se había dicho en el análisis que hacían efecto los modos propios. En el caso de Iza y Orícin en la frecuencia de 125 Hz. Esta frecuencia es más grande en estas salas porque su volumen es menor, y el efecto que producen los modos propios se convierte en difuso a frecuencias más elevadas cuanto más pequeño es el recinto.

6.3-Análisis del ajuste en frecuencias desajustadas

6.3.1-La Nabe

La simulación en este recinto presenta un desajuste en la banda de octava de 63 Hz, como ya se ha descrito en el capítulo anterior, y un ajuste correcto para el resto de bandas. En la Figura 6.3.1.A se puede ver el ajuste para cada receptor por frecuencia, para las que el modelo simulado está ajustado. Esta representación solo se muestra los resultados de las medidas y simulaciones para el caso de la fuente uno, para el resto de fuentes el resultado es similar.



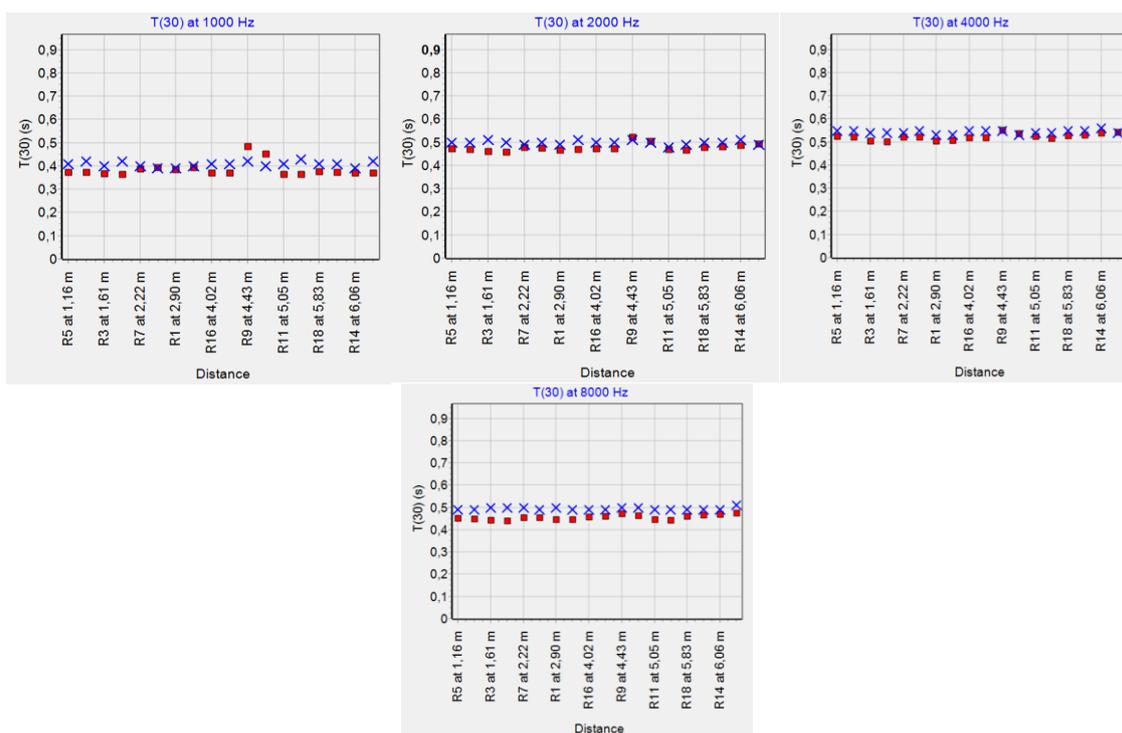


Figura 6.3.1.A – Receptores ajustados por frecuencia.

En cambio en la banda desajustada los receptores tienen tiempo de reverberaciones muy dispares, y obtener un valor simulado ajustado, es decir, promediado y representativo de todos se hace imposible dada las diferencias. Conseguir un valor medio para representativo de todos los receptores sería enmascarar las diferencias y no simular la sala de forma ajustada a la realidad. En la Figura 6.3.1.B se puede observar esta situación de una manera más gráfica.

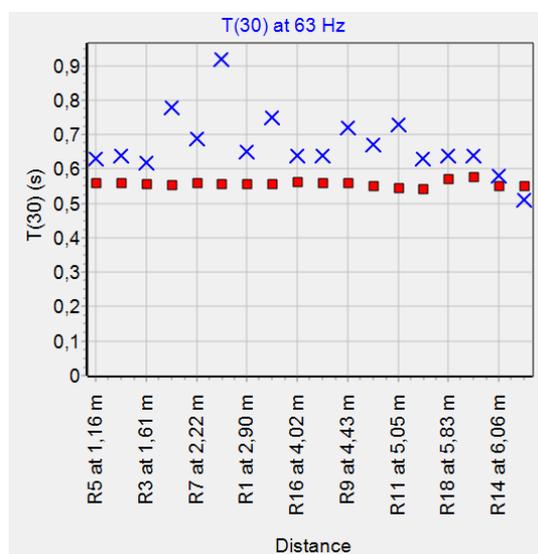


Figura 6.3.1.B – T_{30} real y simulado para frecuencia desajustada.

Estas variaciones tan altas entre los receptores se deben a la existencia de modos propios en la sala, y se hace patente la poca efectividad del programa de simulación de recrear esta situación que nos encontramos en la realidad. Por lo tanto solo podremos considerar los resultados de la simulación para esta frecuencia como un valor objetivo que tendríamos que conseguir en la realidad en este recinto con los acondicionamientos que se propongan.

6.3.2-Iza

Usando el mismo método que en la sala anterior, mirando exclusivamente en la frecuencia desajustada que presenta esta sala. La Figura 6.3.2 representa esta la situación.

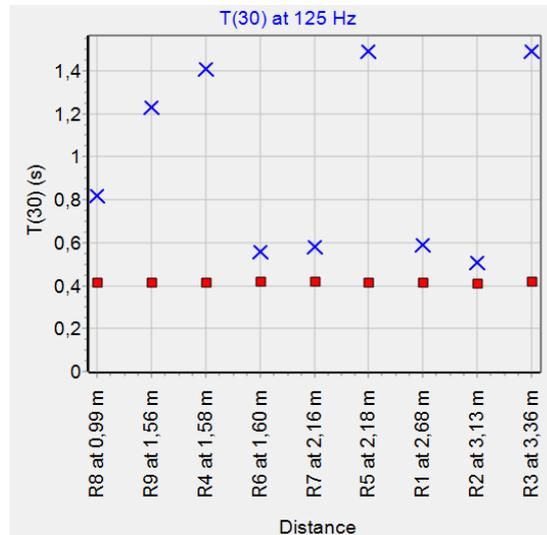


Figura 6.3.2 – Frecuencia desajustada para cada receptor.

Observando la Figura 6.3.2 se puede pensar que el valor de simulación que se debe buscar en el ajuste manual sea una línea más o menos intermedia alrededor de 1 s de tiempo de reverberación como promedio representativo de todos los receptores. Pero si se usara este procedimiento, se estaría enmascarando la problemática que presenta esta sala a 125 Hz, y no sería una simulación fidedigna y representativa de la realidad. Habría que acondicionar la sala para que los resultados reales se acerquen más a los simulados.

Comparando con la sala anterior podemos ver que la misma situación se da en bandas de frecuencia distintas, esto es por el hecho de que son salas de volúmenes muy diferentes. En la de mayor volumen los modos propios, la causa de esta situación, se manifiestan con mayor impacto en frecuencias más bajas que en las salas con un volumen menor, donde la frecuencia de corte de los modos propios es mayor.

6.3.3-Orícin

En las dos salas de este recinto, lo esperado puede ser un caso similar al de la sala del apartado anterior. Sobre todo por su volumen, que el de las dos es pequeño y muy similar, los datos medidos y simulados revelan otra realidad. La banda de frecuencias desajustada no es la misma para los dos casos, como se podría esperar.

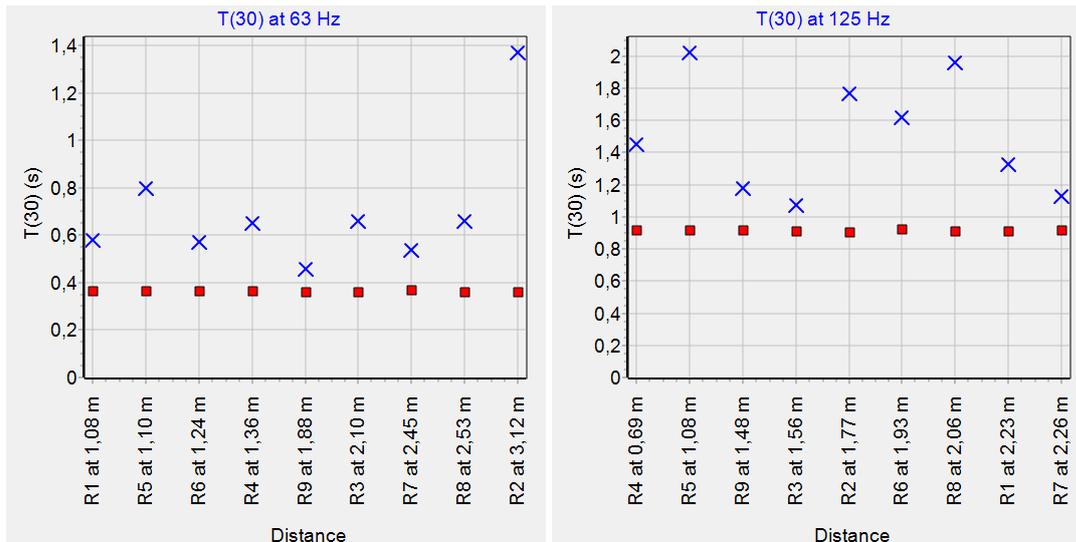


Figura 6.3.3 – Frecuencia desajustada. Sala de control y escucha (i), sala de percusión (d).

En base a su volumen se podría esperar que la acción e impacto de los modos propios se pudiera reflejar en frecuencias superiores, como en el caso anterior, y no solo en la banda inferior de 63 Hz. Resulta que para la sala de control y escucha la banda desajustada es la de 63 Hz y para la sala de percusión es la de 125 Hz.

Estos desajustes vuelven a ser causados por los modos propios, pero que afectan de forma diferente a cada sala aunque su volumen sea similar. Esto puede deberse a múltiples motivos, como la geometría el acondicionamiento realizado en cada una de ellas, etc... Por ello que una sala tenga un volumen pequeño no quiere decir que sí o sí los modos propios vayan a afectar obligatoriamente a frecuencias superiores en comparación con una sala grande.

7-Propuestas de acondicionamiento

El acondicionamiento acústico de salas pequeñas es diferente al de las salas grandes. Por ejemplo, las salas pequeñas necesitan tratamientos con mayor nivel de absorción, ya que sus superficies están muy cerca de los altavoces o de las zonas de escucha.

En salas pequeñas hay cuatro problemas fundamentales a tener en cuenta que se deben intentar corregir y son los siguientes: minimizar las primeras reflexiones, difundir las reflexiones tardías, controlar las resonancias y aislar el interior del exterior y viceversa. La reducción de las primeras reflexiones se consigue con materiales absorbentes. La difusión de reflexiones tardías con difusores. El control de los modos propios con trampas de graves. Y el aislamiento acústico con separadores, suelos flotantes, falsos techos, etc...

En el caso de las salas que se han estudiado, cada una presenta distintos campos de mejora. En primer lugar, en el recinto de La Nabe, los mayores problemas son: los modos propios, el ruido de sus elementos de reproducción musical y el aislamiento del ruido exterior. Para solucionar los modos propios se recomienda el uso de trampas de graves (pasivas, Figura 7.1, o activas Figura 7.2). Para el problema de los altavoces se recomienda su apantallamiento para aislarlo de acoples indeseados que padece o el cambio de los mismos. Y para el aislamiento del ruido exterior (el problema de solución más costosa) se recomienda no realizar obras para su acondicionamiento, simplemente hacer uso del recinto para fines de grabación o reproducción en horarios fuera del horario de actividad industrial. O la utilización de auriculares en caso de tareas de escucha.

En la sala del Iza los mayores problemas son que se desearía un tiempo de reverberación un tanto menor, la simetría del techo y el suelo y los modos propios. La colocación de paneles absorbentes en las paredes y techo (pueden no ser absorbente y solo reflectantes, para romper la simetría de suelo y techo) (Figura 7.3). Para los modos propios se recomienda soluciones de tipo trampas de graves (Figura 7.1-7.2).

En el caso de las salas del recinto de Orícín, el único punto problemático es la aparición de modos propios en ambas salas. La sala de escucha y control tiene una acústica muy cuidada y buscada para la actividad que se desarrolla. Lo más recomendable es la colocación de trampas de graves pasivas (diseñadas para las frecuencias más problemáticas) en los vértices de las superficies de la sala (Figuras 7.1). Para solventar los problemas de modos propios en la sala de percusión se recomienda el uso de trampas de graves activas (el ancho de banda de las trampas activas es más estrecho que el de las pasivas). Las frecuencias afectadas son frecuencias propias de muchos sonidos de percusión e interesa mucho la absorción a esas frecuencias pero sin absorber en un ancho de banda excesivo. Y por otro lado tratar de evitar las esquinas ya que son auténticas guías de onda y deben de ser tratadas.

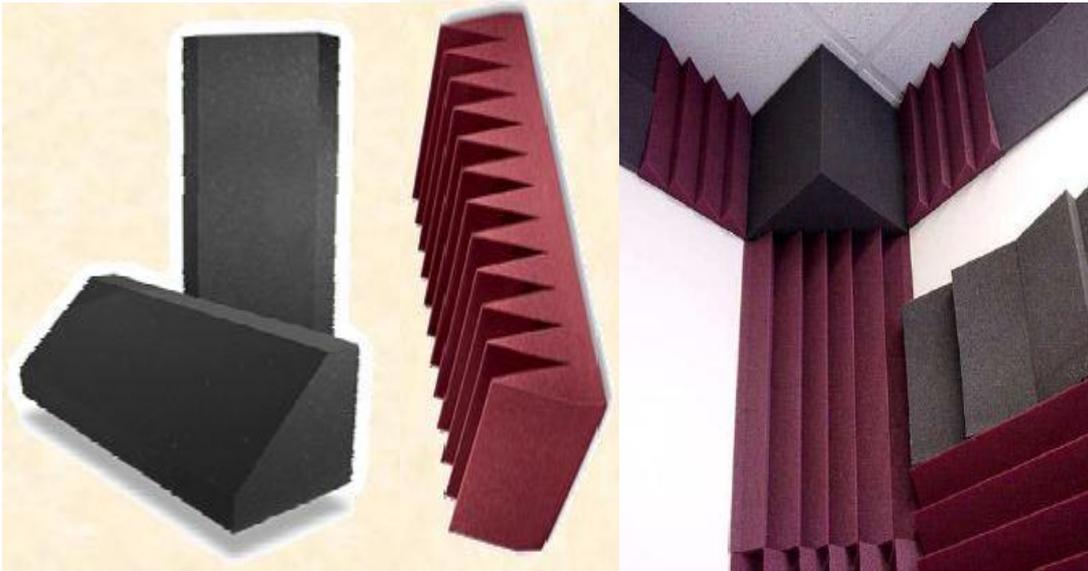


Figura 7.1 – Ejemplos de trampas de graves pasivas.



Figura 7.2 – Ejemplos de trampas de graves activas.

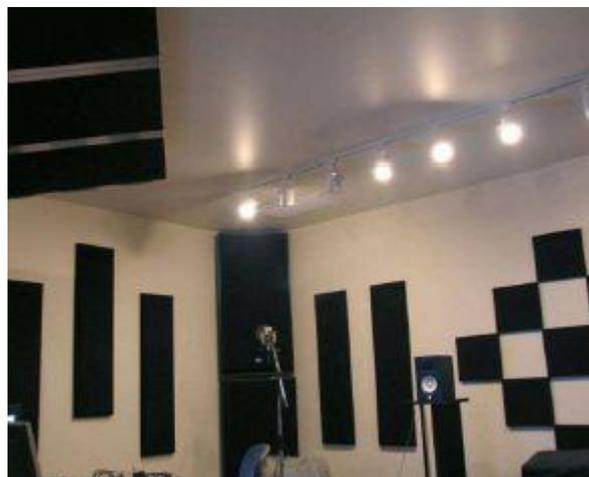


Figura 7.3 – Ejemplos de paneles en paredes y techos.

8-Conclusiones y Líneas Futuras

El objetivo de este trabajo ha sido caracterizar, simular y acondicionar tres recintos. Con la particularidad de que no son recintos de tamaño grande como auditorios, teatros, etc... que son los habitualmente analizados. Los recintos son uno de tamaño medio y otros dos de tamaño pequeño (cada uno con dos salas).

La medición y el análisis de las propiedades acústicas de los tres recintos se han realizado de forma exhaustiva. Se han utilizado tres métodos, tanto de medida como de análisis: caracterización siguiendo la ISO-3382, evaluación de condiciones de escucha siguiendo la EBU Tech. 2ª Edición 3276 y estudio de modos propios con *set-up* específico del software WinMLS.

La acústica en recintos pequeños es diferente a la de recintos más grandes. Es de especial importancia el fenómeno los modos propios. También tienen especial importancia los niveles de absorción, las primeras reflexiones y las reflexiones tardías o el ruido de fondo. También son importantes las dimensiones, que aunque no sea un parámetro acústico, influye mucho por ejemplo en los modos propios.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- En base a la ISO-3382-1:

En lo que respecta al tiempo de reverberación de las salas, la sala con menor tiempo de reverberación es la de Orícín ($T_{30}(1\text{KHz})=0,26\text{s}$) y la sala con el tiempo de reverberación más elevado es la de Iza ($T_{30}(1\text{KHz})=0,62\text{s}$). Ambas son las salas de tamaño pequeño y aquí queda clara la importancia de la absorción en salas de este tamaño. La sala de Orícín tiene una absorción correcta y se podría concluir que la de Iza necesita un refuerzo de absorción acústica. En un punto intermedio queda La Nabe con $T_{30}(1\text{KHz})=0,41\text{s}$. Se podría esperar que siendo la sala con mayor volumen tuviera el T más elevado, pero que sea inferior de lo esperado se debe a que tiene muchos objetos, recovecos etc... que hacen que el tiempo reverberación disminuya.

Las condiciones acústicas más adecuadas para un uso de grabación, son las de la sala de Orícín. La Nabe presenta condiciones muy adecuadas para el volumen que tiene. Iza es la que para su tamaño no tiene las mejores condiciones que cabría esperar.

- En base a la EBU Tech. 2ª Edición 3276:

La evaluación de las condiciones de escucha de la sala nos ha concluido que ninguna sala cumple la limitación de tiempos de reverberación en todas las frecuencias. La que se encuentra más cerca de cumplir la recomendación para todas las frecuencias es la sala de Orícín. Iza no cumple las recomendación porque lo supera. La Nabe, que es más grande, podría permitirse tener T mayores, según la EBU 3276. Sin embargo, tantos objetos y recovecos, provocan que la absorción a bajas y medias frecuencias sea casi hasta excesiva. Es curioso que según la ISO, el T sea superior al de los altavoces en la EBU. La situación de la zona de escucha (zona de arriba) provoca que parezca una sala menor que la que luego es realmente.

En general, la respuesta en frecuencia de las salas excitadas con ruido rosa está conforme a los límites recomendados, salvo en algunas bandas de las salas de La Nabe e Iza.

En lo que respecta al ruido de fondo el menor lo presenta la sala de Orícín, posiblemente porque el equipamiento que suelen generar mayor cantidad de ruido está situado fuera de la sala en sí, en un pequeño cuarto anexo. La Nabe presenta ruido de fondo que podría deberse a ruidos externos ya que se encuentra ubicada en un entorno industrial y una radio comercial emite desde un punto muy cercano, provocando acoplamientos y ruidos indeseados.

- En base al estudio de los modos propios

Se ha visto que en la acústica de los tres recintos afectan los modos propios. En las salas pequeñas (Orícín e Iza) las frecuencias afectas por los modos propios llegan a ser mayores que en el caso de la sala mediana. Caso de sala tamaño medio $f_{\max} = 84$ Hz y salas de tamaño pequeño $f_{\max} \approx 155-162$ Hz.

La sala con mayor impacto es la de escucha de Orícín, ya que los puntos donde los receptores toman valores con mayor variación y los puntos donde tienen menor variación (nodos), están muy próximos en frecuencia, lo que puede hacer más audible el efecto indeseado de los modos propios.

A la hora de simular se han detectado ciertas limitaciones del programa para reproducir las variaciones en ciertos parámetros y frecuencias. En concreto la variabilidad que producen los modos propios en salas pequeñas a frecuencias bajas. Esto hace que dudemos de su utilidad para la simulación de posibles soluciones para el acondicionamiento acústico de salas pequeñas. Interesaría poder simular diferentes soluciones al problema de los modos propios, como pueden ser trampas de graves, pero las limitaciones encontradas lo impiden.

El acondicionamiento propuesto no se ha sido evaluado específicamente. Por ello para líneas futuras se podrían proponer varios acondicionamientos y testarlos e ir modificándolos hasta dar con la mejor solución para cada sala, ya que después de las medidas y el análisis realizados se saben cuáles son las condiciones acústicas necesarias de mejora. También otra línea futura podría ser el estudio de cuando está ajustado nuestro modelo de sala pequeña con el software utilizado siendo este un software más concreto para salas grandes.

9-Bibliografía

- M. Kleiner, J. Tichy Small (2014) “Acoustics of small rooms”
- Torgeir Berge Sjolingstad (2005) “Distribution of sound fields in rooms at low frequencies” (Room modes master thesis)
- Morset Sound Development (2004) “WinMLS 2004” User manual
- ODEON Room Acoustics Modelling Software. User manual: Industrial, Auditorium and Combined Editions.
- UNE – EN ISO-3382-1 (2010) “Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos”.
- European Broadcasting Union (1998) “EBU Tech. 2º Edición 3276” Geneva, Switzerland.