



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO DE UN
ESTUDIO PARA LA MASTERIZACIÓN DE
GRABACIONES EN RADIO UNAM.**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

QUE PRESENTA:

FELIPE ARTURO MACHUCA TZILI

DIRECTOR DE TESIS
DR. ARTURO OROZCO SANTILLÁN

CIUDAD UNIVERSITARIA, 2005





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis padres.

ÍNDICE DESGLOSADO

1. Introducción	1
2. Conceptos de acústica de recintos	4
2.1 Propagación del sonido en un recinto cerrado	4
2.2 Superposición de ondas	4
2.3 Reflexiones tempranas	5
2.4 Campo reverberante	6
2.4.1 Reverberación	6
2.4.2 Tiempo de reverberación	7
2.4.3 Valores recomendados del tiempo de reverberación	8
2.5 Modos normales de vibración	9
2.6 Absorción y materiales absorbentes	14
2.6.1 Absorción acústica	14
2.6.2 Colocación de materiales absorbentes	15
2.7 Difusión	16
2.8 Ruido de fondo	18
2.8.1 Ruido	18
2.8.2 Criterios de ruido	19
2.9 Parámetros acústicos	20
2.9.1 Amplitud aparente de la fuente	20
2.9.2 Eficiencia lateral (LF)	21
2.9.3 Definición (D-50)	21
2.9.4 RASTI	22
3. El proceso de masterización	23
3.1 Masterización	23
3.2 Tipos de masterización	23
3.2.1 Tipos de restauración	24
3.3 Entorno	25
4. Acondicionamiento acústico del estudio de masterización	26
4.1 Descripción del recinto	26
4.2 Condiciones requeridas para el estudio de masterización	29
4.2.1 Usuarios	29
4.2.2 Equipo dentro del estudio	29
4.3 Condiciones acústicas deseadas	30
4.3.1 Dimensiones ideales	30
4.3.2 Niveles de audición y ruido de fondo	31
4.3.3 Reverberación óptima	32
4.3.4 Modos normales de oscilación	32
4.3.5 Reflexiones tempranas y laterales	33

4.4 Pruebas con el software de simulación	34
4.4.1 Mediciones en Radio UNAM	34
4.4.1.1 Ruido de fondo	35
4.4.1.2 Tiempo de reverberación	38
4.4.1.3 Respuesta en frecuencia	41
4.4.2 Simulación del recinto en las condiciones actuales	44
4.4.3 Comparación y análisis de datos	45
4.4.3.1 Tiempo de reverberación	45
4.4.3.2 Respuesta en frecuencia	46
4.4.3.3 Discusión de resultados	48
4.5 Evaluación del recinto sin acondicionar	51
4.5.1 Niveles de ruido	52
4.5.2 Tiempo de reverberación	54
4.5.3 Reflexiones tempranas y su dirección de incidencia	56
4.5.4 Modos del recinto	59
4.5.5 Nivel de presión sonora	60
4.5.6 Eficiencia lateral (LF)	64
4.5.7 Definición (D-50)	65
4.5.8 RASTI	66
4.5.9 Resumen de resultados	68
4.5.9.1 Observaciones	68
4.6 Sugerencias para el acondicionamiento del recinto	70
4.7 Simulación del recinto acondicionado	73
4.7.1 Niveles de ruido	78
4.7.2 Tiempo de reverberación	79
4.7.3 Reflexiones tempranas y su dirección de incidencia	80
4.7.4 Modos del recinto	83
4.7.5 Nivel de presión sonora	83
4.7.6 Eficiencia lateral (LF)	86
4.7.7 Definición (D-50)	87
4.7.8 RASTI	88
4.7.9 Resumen de resultados	90
4.7.9.1 Observaciones	90
5. Resultados y Conclusiones	92
Apéndice A	96
Apéndice B	101
Apéndice C	103
Apéndice D	108
Apéndice E	112
Apéndice F	115
Bibliografía, Publicaciones y Bases de Datos consultadas	117

1. INTRODUCCIÓN

Radio Universidad Nacional fue creada en el año de 1937, tiempo desde el cual se ha producido, día con día, material de audio que se ha guardado en distintos soportes de grabación, principalmente analógicos. Actualmente la Fonoteca Alejandro Gómez Arias cuenta con alrededor de 150 mil programas grabados, cuya calidad podría ser afectada por el paso del tiempo o por algún accidente durante su manejo o almacenamiento; por esta razón, la Dirección General de Radio UNAM ha considerado necesario respaldar y reorganizar toda la información. El proyecto de respaldar el material de la fonoteca de Radio UNAM está a cargo del Departamento de Documentación y Sistematización de Acervos Sonoros.

Este respaldo contempla no sólo la copia a formatos digitales, sino también la masterización de las grabaciones, proceso mediante el cual es posible mejorar o restaurar una grabación de sonido, aprovechando las ventajas que ofrece el audio digital.

Anteriormente, dentro del proceso de realización y acabado de una grabación sonora, el ingeniero de audio normalmente tenía la responsabilidad de balancear el sonido, dando un nivel adecuado a cada instrumento o elemento dentro de la grabación, así como controlar los cortes y entradas de cada canal de la consola en la grabación, todo al mismo tiempo. El resultado reflejaba las limitantes de este procedimiento, tanto en el sonido final como en la edición de la grabación. Por ejemplo, la ecualización con la que fue grabado el “master”, era la que prevalecía hasta el final, llevando consigo errores de apreciación del operador y las deficiencias acústicas del cuarto de control del estudio de grabación.

El desarrollo de la tecnología para audio permite un manejo más cuidadoso del sonido grabado, lejos de las presiones de una sesión de grabación en vivo. Sin embargo, este manejo ha de ser llevado a cabo en una sala especial donde no se interfiera con el tiempo asignado a otras grabaciones y, a la vez, se tengan las condiciones acústicas adecuadas para lograr una mejora sustancial de la grabación original.

Hoy en día la función de un estudio de masterización ha crecido, de simplemente realizar la transferencia de la grabación al formato de audio final, a hacer cortes precisos, proveer efectos creativos, ecualizar, comprimir, compensar el volumen de la grabación (normalizar), e incluso resolver ciertos problemas en las grabaciones originales, como por ejemplo, ruidos indeseables y “clicks” debidos a la conversión digital-analógica. Es éste el tratamiento que se planea dar a las grabaciones de la fonoteca de Radio UNAM que, además del deterioro sufrido, en su mayoría fueron hechas con las limitaciones tecnológicas ya mencionadas.

El objetivo principal del trabajo descrito en esta tesis fue llevar a cabo una propuesta de acondicionamiento y diseño de un recinto disponible en las instalaciones de Radio UNAM, ubicadas en la calle de Adolfo Prieto No. 133, Col. Del Valle (México, D.F.), para utilizarse como estudio para la masterización y restauración de grabaciones. Una de las finalidades al iniciar este trabajo era el presentarlo al Jefe del Departamento de

Documentación y Sistematización de Acervo Sonoro como una posible solución a los requerimientos de la fonoteca de Radio UNAM.

Con base en los requisitos del proceso de masterización, se hizo un análisis del tipo de acondicionamiento acústico que se requiere en el estudio. A partir de los resultados obtenidos, se determinó que es necesario efectuar algunas modificaciones estructurales del recinto con el fin de lograr el campo sonoro deseado, y que el análisis acústico de un recinto de dimensiones pequeñas debe complementarse con simulaciones y mediciones, además del análisis matemático.

En esta tesis se presenta además información sobre los requerimientos de diseño de un recinto para la masterización de grabaciones, en caso de que se desee consultar esta información como apoyo en el diseño de otros estudios. A continuación se describe brevemente el contenido y la estructura del trabajo:

En el capítulo 2 se presenta el marco teórico con los conceptos más relevantes de teoría de acústica de recintos, así como de los parámetros acústicos sobre los que se sustenta este trabajo.

En el capítulo 3 se da una breve descripción del proceso de masterización y sus diferentes tipos, señalando las técnicas de restauración como las herramientas de trabajo principales del operador.

En la sección 4.1 del capítulo 4 se presenta la descripción del recinto, y en las secciones 4.2 y 4.3 se detallan los requerimientos del área de trabajo y las condiciones acústicas que demanda un espacio acústico destinado a la masterización de grabaciones.

Antes de diseñar el acondicionamiento del estudio, fue necesario realizar pruebas con el fin de conocer los alcances y limitaciones que pudiera presentar el programa CATT-Acoustic® para las condiciones de las simulaciones planeadas en el proyecto. Tales pruebas son descritas en la sección 4.4.

En la sección 4.5 se describen los pasos seguidos para simular y evaluar el recinto en las condiciones acústicas originales, y así poder determinar las necesidades de acondicionamiento del recinto. Las sugerencias de acondicionamiento se dan en la sección 4.6.

La sección 4.7 presenta los procedimientos de diseño, desde la elección de materiales y su ubicación dentro del recinto, hasta la simulación por software de las nuevas condiciones y el análisis de los resultados obtenidos.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones y los resultados principales. Se hace un resumen de las observaciones sobre el acondicionamiento propuesto y en general sobre las consideraciones que deben hacerse antes de comenzar el acondicionamiento de recintos para masterización. También se señalan las conclusiones acerca de la utilidad del programa

CATT-Acoustic® en la simulación de recintos de dimensiones pequeñas, y los alcances de este trabajo como posible referencia para otros estudios.

Como complemento, en los apéndices se ha incluido información adicional para una mejor comprensión de algunos aspectos de este trabajo. El apéndice A presenta los conceptos básicos de la teoría de ondas acústicas y su propagación; el apéndice B describe brevemente cómo funciona el programa CATT-Acoustic® utilizado en las simulaciones; el apéndice C contiene la información referente a las simulaciones previas, a través de las cuales fue posible conocer el tipo de resultados entregados por el programa CATT; en el apéndice D se pueden encontrar los detalles de cómo se configuró en el programa CATT el patrón de directividad de los altavoces JBL mod. 4208 utilizados en la medición y en las simulaciones; finalmente, los apéndices E y F son las hojas de especificaciones de los altavoces y los dispositivos Tube Trap® (utilizados para absorber sonido de bajas frecuencias) respectivamente.

2. CONCEPTOS DE ACÚSTICA Y CONTROL DE RUIDO

2.1 Propagación del sonido en un recinto cerrado

Dependiendo de la forma de un recinto y de los objetos que haya en su interior, el sonido se verá afectado por distintos fenómenos propios de las ondas, por ejemplo, reflexiones, difracciones, superposiciones.

Considerando una fuente sonora cualquiera, la energía radiada por ésta alcanzará al oyente de dos maneras: una directa y otra por reflexiones. La forma directa ocurre cuando la energía llega a sus oídos sin encontrar ningún obstáculo en su camino, tal y como sucede en el espacio libre; esto significa que su magnitud depende únicamente de la distancia que separa a la fuente del receptor y de la energía por unidad de tiempo emitida por la fuente (potencia acústica). La parte restante de la energía percibida se debe a las múltiples reflexiones del sonido emitido por la fuente sobre los obstáculos y las paredes (también llamadas fronteras) del recinto, y por lo tanto, dependientes de la distancia de propagación, así como de la cantidad de energía absorbida en cada reflexión debido a los materiales utilizados como revestimiento de las superficies. El tamaño del recinto juega un papel importante aquí, puesto que a menores dimensiones del mismo se observan más reflexiones de un “rayo” de sonido por unidad de tiempo y en consecuencia, mayor disminución de la energía del “rayo”.

Con respecto a la capacidad de absorción de las superficies, se puede intuir que la magnitud del sonido reflejado es muy pequeña si se tienen materiales muy absorbentes, mientras que si se utilizan materiales reflejantes se tendrán niveles mucho más elevados.

Cuando se analiza el comportamiento del sonido en un recinto con respecto al tiempo es conveniente separarlo básicamente en tres partes: la primer parte es el sonido directo; la segunda, está compuesta por las reflexiones que siguen al sonido directo (primeras reflexiones o reflexiones tempranas); y la tercera por reflexiones consideradas como tardías (cola reverberante). Cada una de estas secciones representa un cierto efecto dentro de la percepción subjetiva como se describe en los siguientes apartados.

2.2 Superposición de Ondas

Para el caso de ondas coherentes, si más de una fuente acústica genera sonido en un punto P, la presión sonora en ese punto estará constituida por la suma de las presiones individuales correspondientes a cada una de las fuentes, es decir:

$$p(t) = p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) + \dots + p_n(t) \quad (2.1)$$

donde:

$p(t)$ es la presión sonora en el punto P con respecto al tiempo
 $p_1(t), p_2(t), p_3(t), \dots, p_n(t)$ son las presiones individuales de cada fuente

Ahora bien, dependiendo de la naturaleza de cada onda involucrada, la interferencia originada por la superposición de estas ondas puede ser constructiva o destructiva. Por ejemplo, para el caso de tonos puros (ondas senoidales) con la misma frecuencia y amplitud, la distancia que guardan con respecto al punto P es crucial puesto que de ella dependerá la relación de fase entre las ondas; en caso de que las ondas estén en fase, el resultado de la superposición será la misma onda pero con una amplitud mayor (interferencia constructiva), o bien, si las ondas se encuentran en oposición de fase, la interferencia será destructiva resultando un valor de presión menor a la amplitud de cualquiera de las dos ondas originales en el punto P.

Para sonidos no coherentes, la composición de las ondas se realiza de manera energética, puesto que la intensidad resultante es la suma de las intensidades individuales.

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \quad (2.2)$$

donde:

I es la intensidad resultante.
 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ son las intensidades individuales

2.3 Reflexiones tempranas

Las primeras reflexiones sensadas dentro de un recinto cerrado son las que aportan un porcentaje mayor de la energía total recibida ya que, por lo general, no han sufrido pérdidas significativas por absorción¹. También contienen información sobre las dimensiones del recinto, esto es, al ser las primeras reflexiones, la información temporal que portan está directamente relacionada con el tiempo que les tomó completar su trayectoria fuente-frontera-receptor. Esta información, gracias a la experiencia empírica (e inconsciente) del oído del receptor, es traducida por el cerebro como información espacial, le da la sensación de estar en un recinto grande o pequeño según el caso y es diferente en cada punto del recinto².

Las reflexiones que aparecen dentro de los primeros 50 ms desde que se recibió el sonido directo, son procesadas por el cerebro como parte del sonido directo, contribuyendo al reforzamiento del mismo. El sonido que llega después de este tiempo es interpretado por el cerebro como una repetición del sonido directo (eco), afectando en forma negativa a la inteligibilidad a menos que sea de un nivel muy bajo. Es importante prestar atención al control de la parte temprana del sonido cuando se desea hacer uso eficiente de la energía disponible.

¹ Las reflexiones tempranas son de orden bajo, habitualmente de orden menor o igual a 3; se dice que una reflexión es de orden “n” cuando el rayo sonoro asociado ha incidido n veces sobre las superficies del recinto antes de llegar al receptor.

² Bradley, J. S. y Souldore, G. A., *Objective Measures of Listener Envelopment*. JASA, 98 (1995) 2590.

La dirección de incidencia de las reflexiones tempranas debe también tomarse en cuenta. La cantidad de reflexiones de incidencia lateral determinará el grado de sensación de espacialidad (sensación de estar inmerso dentro del sonido), o bien, la sensación de que el sonido proviene de una fuente de mayor amplitud espacial de lo que es en realidad (amplitud aparente de la fuente sonora (ASW))³.

2.4 Campo reverberante

Es el conjunto de reflexiones que se consideran como tardías, o como cola reverberante. Los primeros 50 milisegundos de una curva de decaimiento contienen el sonido directo y las primeras reflexiones. Aproximadamente a partir de ese momento, se puede decir que comienza el decaimiento del sonido dentro del cuarto. La aportación subjetiva a la percepción de estas reflexiones es la viveza del espacio, sin que ello implique que siempre sea deseable tener un máximo de cola reverberante. El tiempo que dure esta parte del sonido dependerá del uso para el que esté destinado el recinto.

2.4.1 Reverberación.

Cuando una fuente de sonido (por ejemplo, una fuente omnidireccional), es activada emitiendo un sonido estadísticamente estacionario dentro de un recinto cerrado, el sonido emitido alcanza un cierto nivel al transcurrir un intervalo de tiempo relativamente corto. En estas condiciones, la fuente sólo produce la energía suficiente para mantener dicho nivel, es decir, mantiene el equilibrio entre la energía radiada y las pérdidas por absorción. Si se aumenta la energía emitida por la fuente, se tendrá un nivel de equilibrio más alto, y viceversa.

Supongamos ahora que la fuente es abruptamente apagada, la presión sonora percibida dentro del recinto decae hasta la inaudibilidad al cabo de un cierto tiempo. Este fenómeno es el efecto de la reverberación inherente del recinto. La reverberación está constituida por las reflexiones que siguen al instante en que se ha apagado la fuente.

La reverberación del sonido en un recinto aporta información subjetiva sobre las cualidades acústicas del mismo, por ejemplo, no causa la misma impresión escuchar a una orquesta dentro de un auditorio diseñado específicamente para estos eventos, que escuchar a la misma orquesta en un recinto muy absorbente. En el segundo caso, se tiene la sensación de un sonido “seco”, dando la impresión de que los ejecutantes carecen del talento para obtener un buen sonido a su instrumento y no todos ellos se escuchan a un nivel satisfactorio. En el primer caso en cambio, el sonido se ve enriquecido por la reverberación, los instrumentos se escuchan a un nivel más equitativo (ecualizados), además de tener un sonido más “brillante” en comparación con el percibido en un recinto absorbente.

³ Barron, M. y Marshall, A. H., *Spatial Impression Due to Early Reflections in Concert Halls: The Derivation of a Physical Measure*. *Acoustics of Sound and Vibration*, 72, 211-232, 1981.

Debido a estas marcadas diferencias entre dos cuartos con o sin reverberación, este parámetro ha sido considerado por mucho tiempo como la principal característica acústica de un recinto. Hoy en día, se han incorporado otros parámetros cuya importancia había sido ignorada o menospreciada, con lo que la reverberación, si bien es importante y la referencia menos controversial, ha pasado a ser un parámetro más de entre todos los que definen la calidad acústica de un recinto cerrado.

2.4.2 Tiempo de Reverberación

Del concepto de reverberación hay tres puntos de interés: El tiempo que tarda en decaer el sonido, el valor inicial y final de presión sonora durante la prueba, y la frecuencia del sonido emitido. El parámetro que engloba estos aspectos, es el llamado Tiempo de Reverberación, cuya definición más aceptada es la siguiente: “El tiempo de reverberación T_{60} se define como la longitud de tiempo en segundos que le toma a la energía de un campo sonoro en estado estable dentro de un cuarto decaer 60dB después de que la fuente de excitación sonora es repentinamente interrumpida”.⁴

Los 60dB recomendados representan un cambio en la intensidad o potencia sonora de un millón ($10 \log 1000000 = 60\text{dB}$), o un cambio en la presión sonora de 1000 ($20 \log 1000 = 60\text{dB}$), lo cual puede interpretarse como una transición hasta la inaudibilidad aún considerando presiones muy altas.

La manera más conocida de calcular el tiempo de reverberación es a través de la denominada fórmula de Sabine.

$$T_{60} = \frac{0.161V}{S\alpha} \quad (2.3)$$

donde:

- T_{60} es el tiempo de reverberación en segundos
- V es el volumen del recinto en metros cúbicos
- S es la superficie total del cuarto en metros cuadrados
- α es el coeficiente de absorción promedio de las superficies

Esta expresión proviene de un análisis estadístico, pero tiene la limitante de ser menos precisa conforme aumenta α .

Otra expresión útil es la fórmula de Eyring:

$$T_{60} = \frac{0.161V}{-S \ln(1 - \alpha_E)} \quad (2.4)$$

donde:

- V es el volumen del cuarto en metros cúbicos

⁴ Beranek, Leo L. *Acoustical Measurements*, Acoustical Society of America, 1988.

$\frac{S}{\alpha_E}$ es la superficie total del recinto en metros cuadrados
 es el coeficiente de absorción de energía de incidencia aleatoria promediado entre las superficies

La fórmula de Eyring complementa a la de Sabine en el sentido de que es confiable aunque la absorción en el cuarto no sea tan pequeña.

2.4.3 Valores recomendados del tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación óptimo depende del tipo de sonidos que nos interesa reproducir, ya sea, por ejemplo, voz o música. Para la voz, se recomienda en las distintas bibliografías⁵ que sea menor a 1 segundo para no interferir con la inteligibilidad, aplicando este criterio para la frecuencia significativa de la voz (512 Hz). Para música existen diferentes tiempos ya que depende de las características del sonido, es decir, de la música en cuestión. Se han construido gráficas en donde se proponen tiempos de reverberación dependiendo de la frecuencia y del volumen del recinto. Knudsen y Harris⁶ exponen un método basado en dos gráficas:

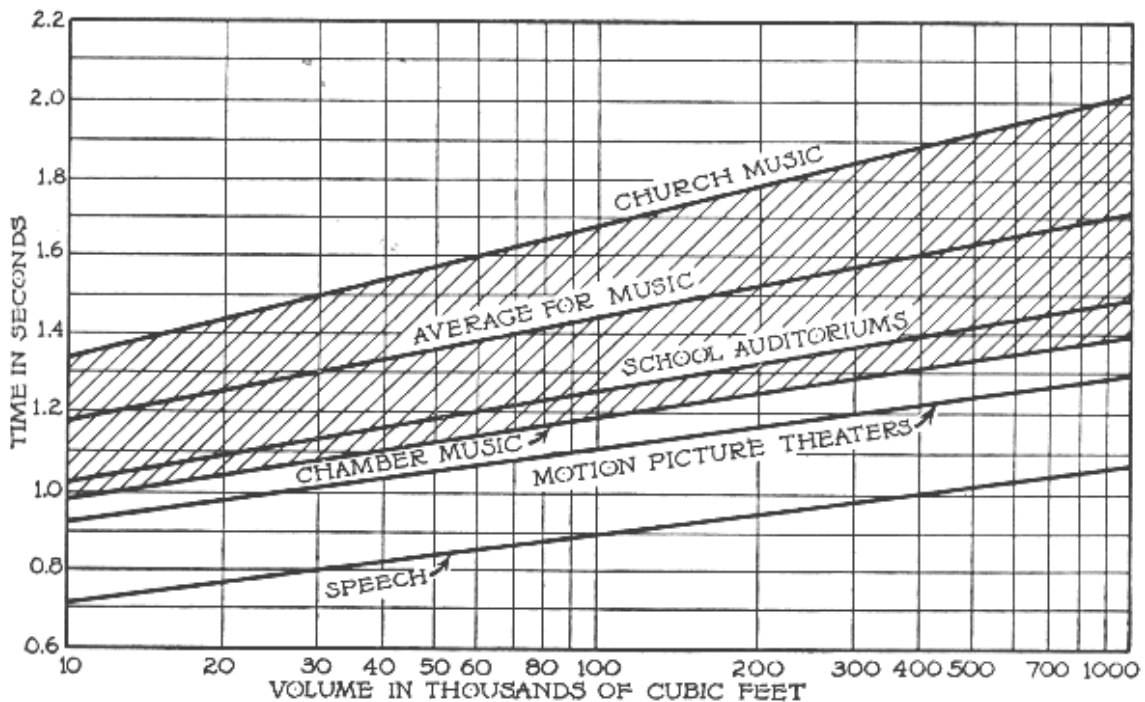


Fig. 2.1: Tiempos de reverberación recomendados según el volumen del recinto.

⁵ Knudsen, V. O. y Harris, C. M., *Acoustical Designing in Architecture*, JASA, 1978, p. 171-174.

⁶ *Idem.*

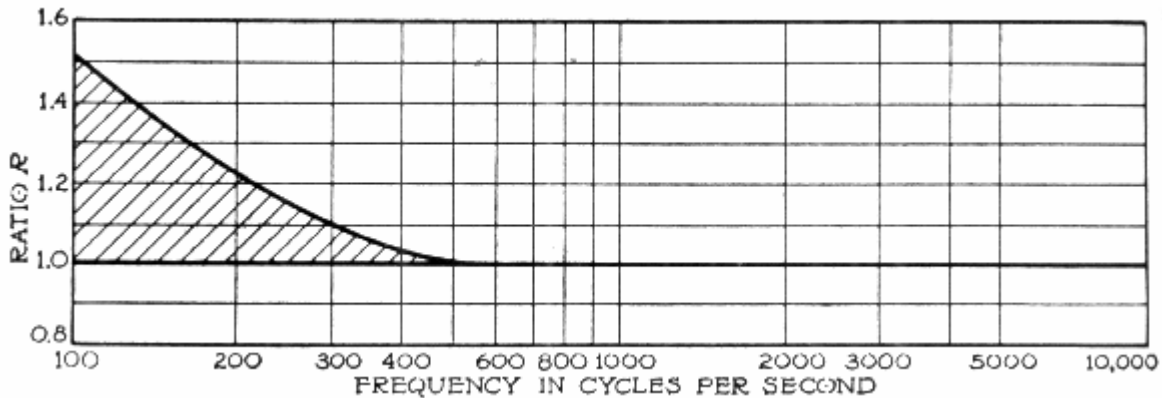


Fig. 2.2: Razón para obtener el tiempo de reverberación para diferentes frecuencias.

De la primer gráfica, Fig 2.1, se obtiene el tiempo de reverberación óptimo para un volumen dado en la frecuencia de 512 Hz (t_{512}); con este valor pasamos a la segunda gráfica, Fig. 2.2, donde para obtener el tiempo de reverberación requerido en cualquier otra frecuencia t_f (y para el mismo volumen) basta con multiplicar t_{512} por la razón correspondiente en la gráfica. De esta manera se puede obtener una característica de Tiempo de Reverberación vs. Frecuencia para cada recinto en particular.

2.5 Modos Normales de Vibración

Al resolver la ecuación de onda dentro del recinto suponiendo una solución armónica en estado estacionario, se obtiene como resultado que existen sólo ciertas frecuencias como solución de la ecuación de onda, llamadas frecuencias propias del recinto, las cuales corresponden a un modo normal de vibración. La distribución de la presión sonora dentro del recinto para un modo normal de vibración es una función de la posición llamada función propia o característica. El conjunto de todas las funciones propias forma un conjunto linealmente independiente a partir del cual se puede expresar alguna otra vibración forzada dentro del recinto.

El fenómeno de resonancia se presenta cuando algunas frecuencias emitidas por una fuente sonora coinciden con los modos de vibración propios del recinto (por ejemplo, en un recinto rectangular con muy poca absorción, al producir frecuencias cuya media longitud de onda sea un submúltiplo de la separación entre dos paredes opuestas entre sí), generando ondas estacionarias en esas frecuencias, que se refuerzan con cada reflexión. Este incremento en la energía de la onda permanece hasta equilibrar las pérdidas por absorción en las fronteras.

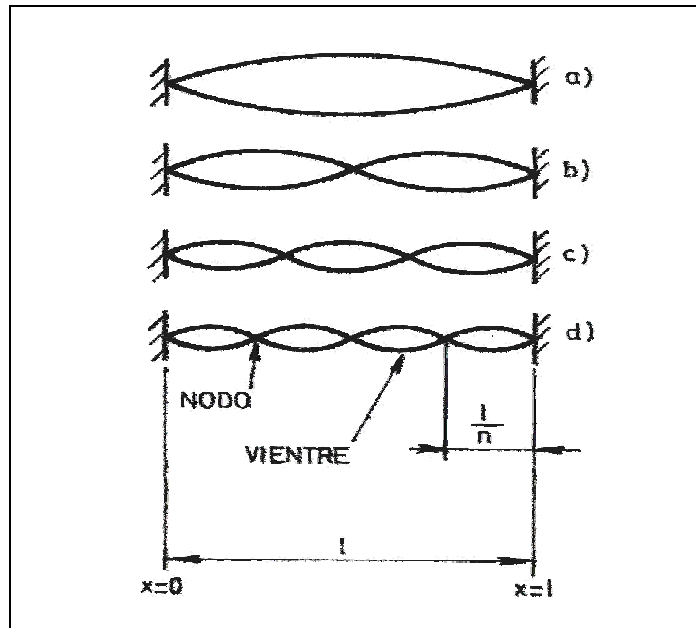


Fig. 2.3 Ondas estacionarias entre dos muros paralelos.

Los modos provocan concentraciones y “baches” de energía en diversos puntos y para distintas frecuencias, lo cual confiere un sonido característico a cada sala.

La ecuación de onda permite expresar la presión sonora dentro de un recinto como la superposición de ondas estacionarias simultáneas (modos). La ecuación de onda está dada por:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = 0 \quad (2.5)$$

donde: p , es la presión en función de la posición y el tiempo
 c , es la velocidad de propagación de la onda
 t , es el tiempo

Al resolver esta ecuación se deben considerar las condiciones de frontera para cada caso particular. Por ejemplo, si se considera que en las paredes del recinto la presión es máxima y el desplazamiento es cero (paredes rígidas), la solución a la ecuación de onda, suponiendo una excitación armónica en estado estacionario, sería una expresión que nos permite calcular la frecuencia de los modos en función de las dimensiones del recinto, que para el caso de un recinto con la forma de un paralelepípedo, dicha ecuación será de la siguiente forma:

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (2.6)$$

donde: n_x, n_y y n_z , son número naturales (números cuánticos)
 l_x, l_y y l_z , son las dimensiones del recinto (ancho, largo y alto)
 c , es la velocidad del sonido.

Los modos de un recinto se clasifican en tres grupos según su dirección:

- a. Los modos axiales, que corresponden a aquellos modos que se mueven en una sola dirección (dos términos nulos dentro del radical de la ecuación 2.6, es decir, una dimensión), por ejemplo, una trayectoria ortogonal entre dos paredes paralelas según la siguiente figura:

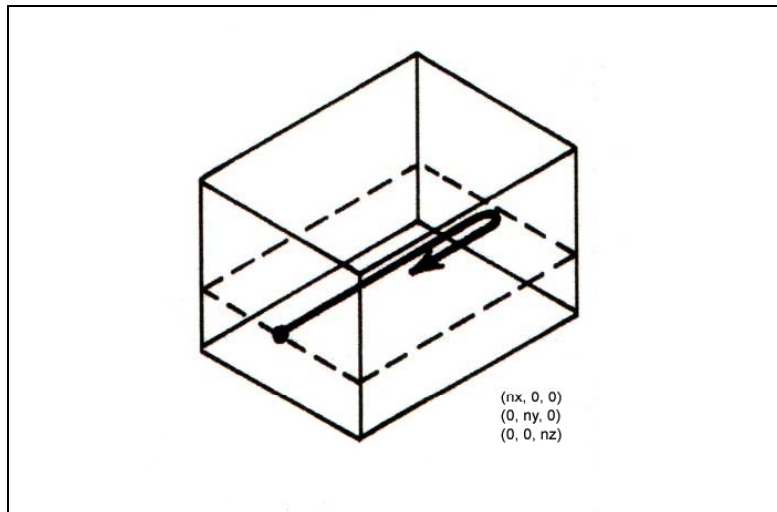


Fig. 2.4: Ejemplo de un modo axial; sólo hay dos muros involucrados. Dos valores de los números cuánticos “n” deben ser nulos.

- b. Los modos tangenciales son bidimensionales, es decir, la dirección de propagación de la onda se mueve en un plano paralelo a uno de los ejes de referencia, y habrá un término igual a cero dentro del radical de la ecuación 2.6.

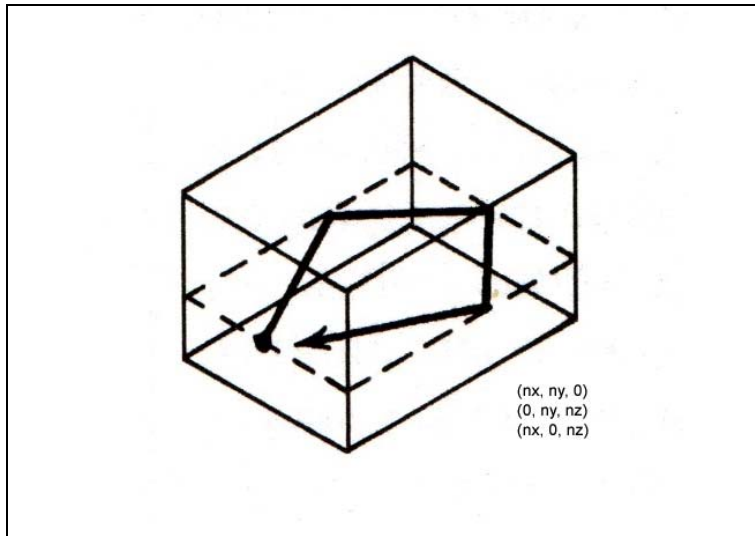


Fig. 2.5: Ejemplo de un modo tangencial; donde se ven involucradas cuatro fronteras. Sólo uno de los valores de los números cuánticos “n” debe ser cero.

- c. La dirección de los modos oblicuos no es paralela a ninguno de los ejes de referencia, por lo que, se puede decir que es tridimensional

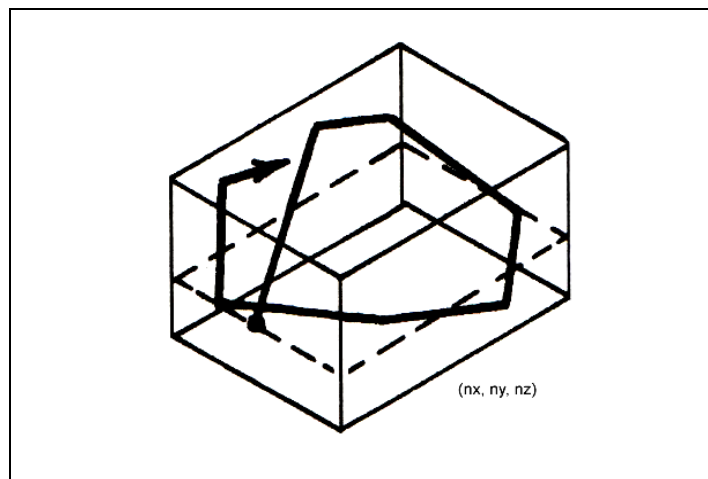


Fig. 2.6: Ejemplo de modo oblicuo; todos los planos son alcanzados por las reflexiones. Los tres números cuánticos “n” son distintos de cero.

La complejidad en el análisis ondulatorio de un recinto aumenta con la complejidad geométrica del mismo, por ejemplo, un recinto en forma de paralelepípedo será más fácil de analizar que una iglesia.

Irónicamente, la geometría que presenta más problemas y se aleja de las condiciones deseadas es precisamente el paralelepípedo, o en otras palabras, es matemáticamente deseable, pero acústicamente indeseable.

Las longitudes de onda de las frecuencias bajas y medias dentro del rango audible son comparativamente grandes con respecto a las dimensiones de la cabeza del escucha, por lo que un cambio en la posición de éste, resulta en un cambio en la amplitud del sonido en función de la frecuencia (los máximos y mínimos de la onda estacionaria están separados varios centímetros o incluso metros). Si el receptor se sitúa en el máximo de una onda estacionaria para una frecuencia en particular, el sonido en esa frecuencia estará muy reforzado en comparación con las otras frecuencias recibidas.

El número de modos aumenta con la frecuencia aproximadamente en proporción cuadrática, de manera que a bajas frecuencias, los modos se encuentran muy separados unos de otros en el dominio de la frecuencia, que a frecuencias mayores. A frecuencias altas, presentan una distribución más densa. En frecuencias medias y altas los nodos y máximos de vibración de los modos están tan cerca unos de otros, que un movimiento del receptor no influirá de manera drástica en la percepción del sonido; además, el número de modos excitados es tan grande que el campo acústico parece homogéneo.

El número de modos presente en un recinto es infinito, sin embargo, los esfuerzos por homogeneizar el campo sonoro se deben concentrar sobre aquellos modos que se encuentren más espaciados en frecuencia porque son los que se hacen más notorios al oído.

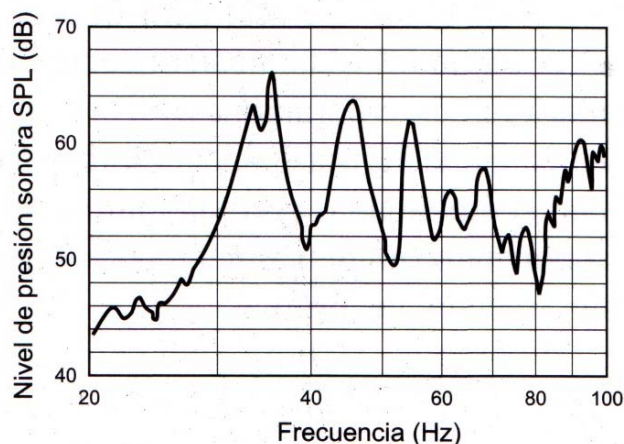


Fig. 2.7: Modos espaciados en frecuencia.

En el caso particular del diseño de un estudio, es indeseable un campo sonoro no homogéneo en el espacio de audición puesto que el operador necesita tener una cierta libertad de movimiento sin experimentar cambios en el sonido; en caso contrario, la calidad de una misma grabación podría variar si el operador se sienta en distintos lugares de la sala.

El estudio de los modos es especialmente crítico cuando se estudian recintos pequeños y rectangulares, donde la densidad modal es relativamente pequeña en las frecuencias bajas y medias del rango audible, con lo que un número muy reducido de modos contribuyen significativamente a la generación del sonido en una frecuencia o en una banda angosta. Adicionalmente, el tiempo de decaimiento del sonido en las frecuencias que coinciden con las frecuencias propias del recinto, será significativamente mayor que para el resto de las

frecuencias del sonido que se reproduce, mismas que desaparecen con mayor rapidez⁷. Las dimensiones del cuarto que se pretende acondicionar en este caso particular corresponden a las antes descritas, por lo que el estudio de los modos es relevante en nuestro análisis.

La función de este análisis es determinar qué acciones se deben tomar a fin de homogeneizar el campo sonoro, sobre todo en bajas frecuencias (ruptura de los modos). De otra manera, oyentes en distintas posiciones recibirán información distinta al sonido original.

2.6 Absorción y materiales absorbentes

2.6.1 Absorción

Cuando una onda sonora choca contra un muro, varios fenómenos suceden con relación a la energía que porta la onda. Una parte de esa energía es reflejada y continúa viajando por el medio en el que llegó, otra parte de la energía penetra la pared sufriendo una desviación cuyo ángulo dependerá de la densidad del material con que esté hecha la pared. Tanto en el viaje de la onda por el aire como por el material, hay pérdidas de energía por calor debido a la fricción entre las partículas de aire, o bien, entre las partículas de aire y el material de la pared.

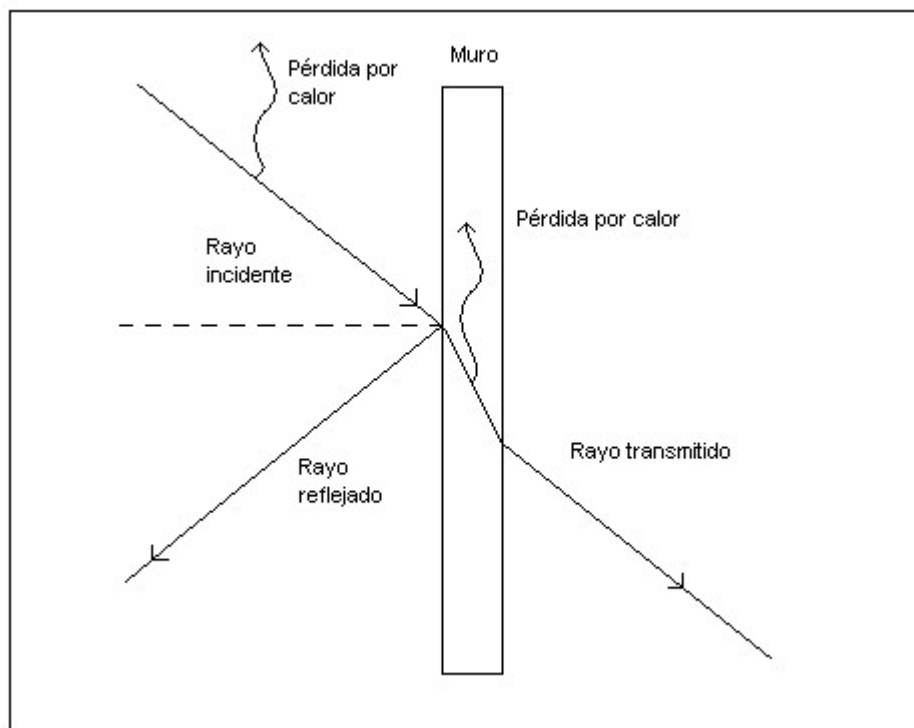


Fig. 2.8: Trayectoria de una onda incidente y pérdidas por calor.

⁷ Es por ello que a veces es preferible utilizar los valores de T-30 y T-15 (tiempo que toma a la energía decaer 30 y 15 dB respectivamente) para estimar la reverberación de un cuarto antes de ser acondicionado, puesto que aún no se ha resuelto el problema de los modos y la parte más débil de la curva de decaimiento puede ser irregular (pendiente variable)

A la pérdida de la energía de una onda al incidir sobre una pared u objeto se le llama absorción. Básicamente consiste en la disipación de la energía sonora en calor, aunque también puede haber otros fenómenos equivalentes a la absorción, por ejemplo, si una de las fronteras de un cuarto es susceptible a entrar en vibración al incidir una onda, parte del sonido es transmitido al exterior, en cuyo caso, se puede considerar como energía perdida, que si bien no se disipó como calor, ya no está dentro del cuarto y no es aprovechable. También hay materiales cuya construcción e implementación geométrica les permite ser más selectivos en el rango de frecuencias que absorben (resonadores).

La capacidad de un material de absorber energía sonora es representada por el llamado coeficiente de absorción. Un material que absorba por completo la energía incidente tendrá un coeficiente de absorción igual a 1, mientras que el valor del coeficiente de absorción de un material que refleje toda la energía será cero.

La absorción de un material varía con la frecuencia y con el ángulo con el que la onda llega a él. Las tablas de coeficientes de absorción ofrecen los valores promedio de todos los posibles ángulos de incidencia, organizados según la banda de frecuencias para la que fueron hechas las mediciones.

El espesor del material absorbente juega un papel importante. La absorción será pobre para la banda de frecuencias cuya longitud de onda sea mucho mayor que el espesor del material, de donde se deduce que a mayor espesor, mayor absorción.

Por otra parte, la porosidad del material determinará la facilidad con que la onda penetre en el mismo y en consecuencia, también la absorción que representa. A mayor porosidad, mayor absorción.

Si la densidad del material absorbente es baja, la onda sonora pasará a través de él perdiendo una parte de su energía en calor debido a la fricción. Si la densidad del material aumenta gradualmente, la fricción se incrementa y por tanto, también la disipación de energía. Sin embargo, si la densidad sigue aumentando, la dificultad del paso de la onda a través del material será tal que las pérdidas por fricción comenzarán a disminuir, y cada vez una mayor parte de la energía incidente será reflejada. Los materiales utilizados en el acondicionamiento acústico se encuentran entre estos dos extremos.

2.6.2 Colocación del material absorbente

Un material absorbente puede ser colocado directamente sobre los muros o fronteras, o bien a una cierta distancia de ellos. La diferencia radica en la cantidad de absorción en bajas frecuencias. El máximo de absorción de una onda más cercano a las fronteras rígidas se encuentra a $\lambda/4$ de distancia de las mismas, si se coloca el material absorbente a esa distancia del muro, se obtiene la máxima absorción para la frecuencia de longitud de onda λ , y un aumento en la absorción de las frecuencias contiguas. Entre más grande sea la

distancia que separa al material de la frontera, menor será la frecuencia a la que la absorción es máxima.

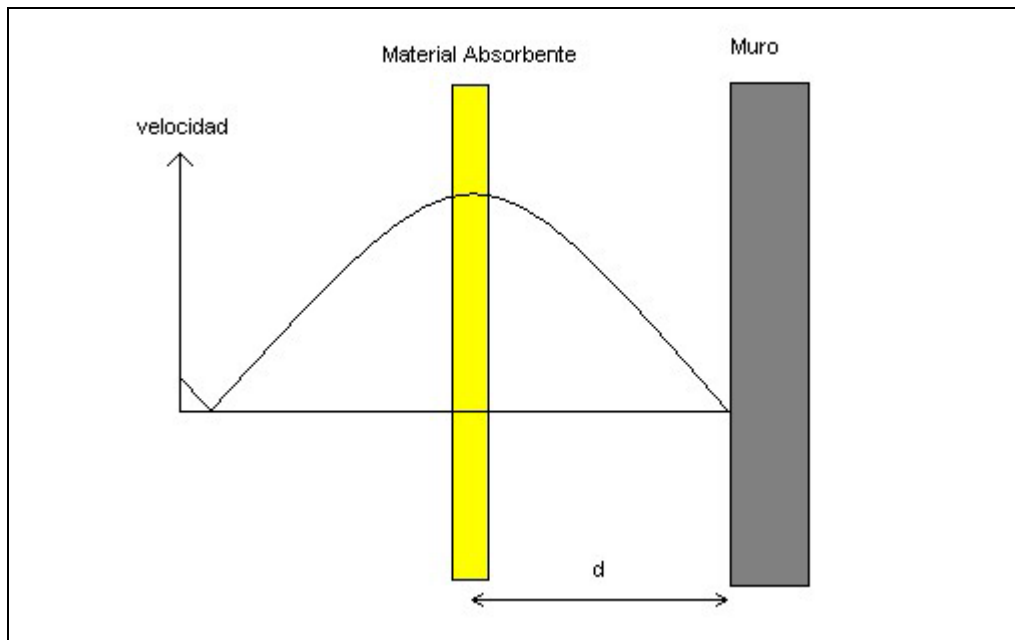


Fig. 2.9: Ejemplo del montaje de material absorbente a una cierta distancia de la pared

Existe una pequeña desventaja en cuanto a esta forma de colocación del material, y es que al separarlo de la pared, se pierde una parte de la absorción en frecuencias altas, aunque no de manera drástica.

Se ha demostrado⁸ que la manera más eficiente de colocar material absorbente dentro de un recinto es distribuirlo uniformemente, por ejemplo, colocando tiras separadas en varios muros, en vez de cubrir un par de ellos con una superficie continua de material absorbente.

2.7 Difusión del sonido

En la sección 2.5 se ha hablado de la dificultad para homogeneizar el campo sonoro de un recinto rectangular pequeño. A un campo sonoro 100% homogéneo se le llama *campo difuso*; para que un campo pueda ser considerado como tal, debe cumplir ciertas características:

- Todas las direcciones de propagación del sonido deben ser igualmente probables, por lo tanto,
- La densidad de energía acústica es la misma en cualquier parte del recinto
- Estas características deben cumplirse en todo momento, no sólo en estado estacionario, sino también en cualquier instante del decaimiento del sonido.

⁸ Randall, K. E. y Ward F. L., *Diffusion of sound in small rooms*, Proc. Inst. Elect. Engs., Vol. 107B (Sept, 1960), p. 439-450.

Los puntos anteriores tienen ciertas implicaciones, como el hecho de que en esas condiciones, la reverberación es también la misma en todos los puntos del recinto.

Un criterio para determinar a partir de qué frecuencia se puede considerar el campo sonoro como homogéneo es mediante la aplicación de la fórmula para calcular la frecuencia de Schröder:

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}}$$

donde: f_s , es la frecuencia de Schröder
 T_{60} , es el tiempo de reverberación
 V , es el volumen del recinto

Para lograr las condiciones de campo difuso en todo el espectro de frecuencias, es necesario evitar o al menos reducir las reflexiones especulares en algunos lugares del recinto.

La reflexión del sonido no sólo es especular; dependiendo de las dimensiones del recinto y de los objetos que en él se encuentran habrá un límite hacia las bajas frecuencias después del cual la suposición de reflexiones especulares (acústica geométrica) ya no es válida.

Las reflexiones no especulares distribuyen la energía acústica tanto espacial como temporalmente como puede apreciarse en la Fig. 2.10.

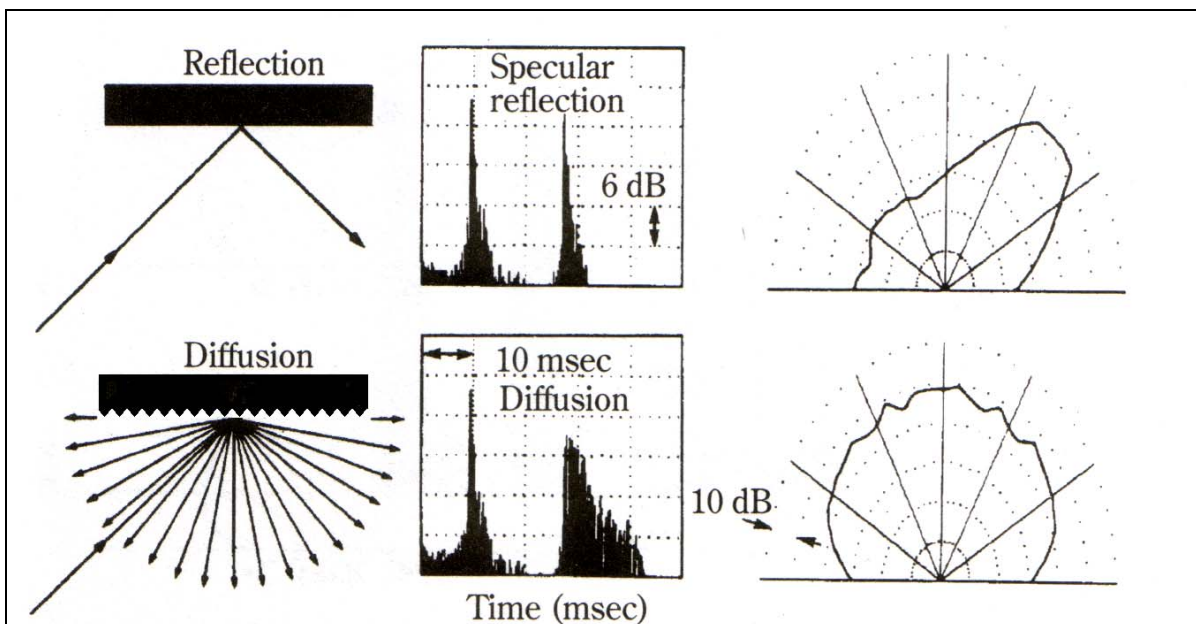


Fig. 2.10: Reflexión especular y reflexión difusa, y su comportamiento temporal y espacial.

La reflexión especular proyecta la energía en una dirección más o menos definida, mientras que la reflexión difusa lo hace en múltiples direcciones, además, esta dispersión ocurre también en el tiempo; la difusión y la reverberación están relacionadas entre sí.

La reflexión especular ocurre cuando la onda incide sobre una superficie plana; la reflexión difusa aparece cuando dicha superficie presenta ciertas irregularidades. El grado de difusión (coeficiente de difusión) de una superficie depende de la longitud de onda y del tamaño de las irregularidades mencionadas. Mientras las irregularidades no sean comparables a la longitud de onda de la onda incidente, las reflexiones seguirán siendo especulares.

Si la difusión dentro de un recinto no es suficiente, se pueden colocar elementos específicamente diseñados para dispersar la energía llamados difusores. Existen distintos tipos de difusores, clasificados según su método de diseño. A continuación se mencionan de manera breve los más comunes:

- Difusores policilíndricos. Consisten en una serie de superficies de forma convexa con un radio de curvatura que no excede los 5 m.
- Arreglos de triángulos. Se trata de prismas triangulares dispuestos secuencialmente sobre un muro.
- Curvas optimizadas. Superficies con radio de curvatura variable.
- Difusores de Schröder. Elementos difusores basados en teoría de números, desarrollados por Manfred R Schröder. Los más relevantes son:
 - Difusores Maximum Length Sequence (MLS). Están basados en secuencias pseudoaleatorias periódicas.
 - Difusores Quadratic Residue Diffusor (QRD). Hay de dos tipos; unidimensional, que consiste en una serie de ranuras paralelas; bidimensional, donde las ranuras se convierten en pozos paralelos de profundidad variable.
 - Difusores Primitive Root Diffusor (PRD). Son ranuras de distintas profundidades dispuestas en serie.

2.8 Ruido de fondo

2.8.1 Ruido

Todo sonido que incomoda o daña al receptor humano, o que interfiera sus actividades, se considera como ruido; el hecho de que un sonido sea catalogado como tal, depende no solamente de su intensidad, sino también de su frecuencia, espectro, duración, momento de emisión y en ocasiones de aspectos tan subjetivos como el estado mental y temperamental del receptor. El ruido de fondo en un recinto se debe mantener debajo de un cierto nivel que también depende del uso que se pretenda dar a dicho lugar.

Uno de los objetivos de la masterización es corregir o refinar los detalles más sutiles de una grabación, un nivel muy alto del ruido de fondo puede interferir con la correcta

apreciación de una grabación, es por ello que el control del ruido se torna especialmente crítico para este tipo de recintos.

Las fuentes de ruido pueden ser externas al recinto o producidas dentro del mismo. Las fuentes de ruido internas son por ejemplo, el sistema de aire acondicionado y el ruido del ventilador de un CPU. Las fuentes externas pueden ser personas hablando o caminando, máquinas de escribir, fotocopiar, impresoras, ruido de tuberías, motores, aviones, relámpagos, ruido del tráfico, ruido de la calle en general, etc. Los ruidos ajenos al recinto son más difíciles de controlar ya que no siempre se pueden tomar acciones directas sobre las fuentes para minimizar sus efectos negativos.

Básicamente hay dos maneras en las que el ruido puede llegar al interior de un recinto; una es a través del aire, en cuyo caso, el sonido externo puede filtrarse por cualquier rendija o abertura; otra forma es a través de sólidos, es decir, a través de la estructura misma del inmueble viajando grandes distancias. Si un cuarto tiene paredes rígidas y está bien cerrado, será difícil que el ruido exterior lo penetre, ya que la transmisión del sonido de un material a otro, depende de la densidad de los mismos. Entre mayor sea la diferencia de densidades, más deficiente será la transferencia de energía, y viceversa.

2.8.2 Criterios de ruido

Existen distintos criterios para especificar el nivel de ruido en un recinto, pero el más usado para recintos destinados a la voz y la música es el NC (noise criteria), que consiste en un conjunto de curvas SPL vs. Frecuencia.

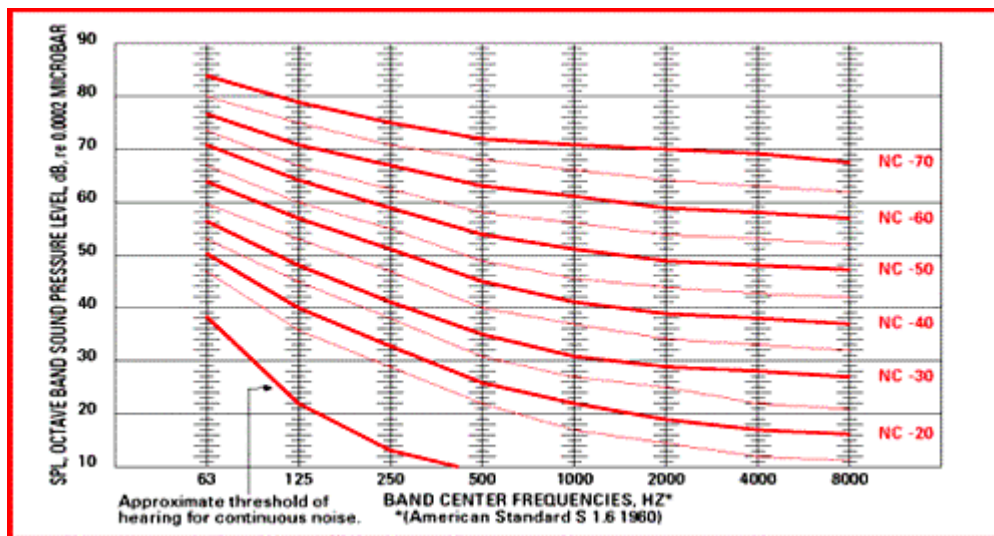


Fig. 2.11: Curvas de criterio de ruido NC.

Existen acuerdos en cada país sobre los niveles de ruido permitidos en un recinto en función del uso que se le dé al mismo, si por ejemplo, en un estudio de grabación los niveles permitidos se refieren a la curva NC-20, significa que ninguna componente del

espectro de ruido en bandas de una octava en el recinto debe sobrepasar dicha curva (con una tolerancia de $\pm 2\text{dB}$) sea cual sea el comportamiento del recinto.

Un posible procedimiento a seguir para llevar a cabo el control de ruido en un recinto es el siguiente:

- Determinar la magnitud, naturaleza y forma de distribución del ruido en el recinto y sus alrededores.
- Definir los niveles aceptables de ruido para el tipo de edificio.(Curvas NC)
- Evitar la propagación del ruido por el aire, para lo cual el cuarto debe aislarse evitando agujeros o rendijas en las paredes y puertas.
- Suprimir o atenuar vibraciones que puedan transmitirse por vía estructural usando varios tipos de divisiones y conectores flexibles (por ejemplo, para tuberías).
- Reducir el ruido mecánico de una fuente con una adecuada selección de equipo.

2.9 Parámetros acústicos

La valoración de un espacio acústico involucra siempre aspectos subjetivos, puesto que el destinatario final de todos los esfuerzos por obtener un sonido de calidad es el oído humano. Gustos personales, salud auditiva, entrenamiento del oído y hasta el entorno social, son factores que pueden influir en la evaluación de un recinto. Por tales motivos, ha sido necesario buscar una relación entre lo subjetivo y lo objetivo. Como resultado, se han sugerido una gran cantidad de parámetros físicamente medibles que, de alguna manera, normalicen la valoración de cada aspecto característico de un sonido. En el presente trabajo, se hará referencia únicamente a los parámetros más importantes y que se utilizarán en el análisis del recinto que se pretende acondicionar.

2.9.1 Amplitud aparente de la fuente (ASW)

La amplitud aparente de una fuente de sonido es la sensación de escuchar un sonido proveniente de una fuente más ancha espacialmente que la fuente real. Entre más grande sea la amplitud aparente, mayor será la sensación de estar inmerso dentro del sonido (sonido envolvente). La mayoría de los oyentes, encuentran esta característica como deseable en un espacio sonoro. La amplitud aparente de una fuente aumenta con la cantidad de reflexiones tempranas que inciden lateralmente en el oyente.

Existen varios parámetros que permiten cuantificar el grado de amplitud aparente de una fuente; en este trabajo se estudiará la denominada eficiencia lateral.

2.9.2 Eficiencia Lateral (Lateral Fraction, LF)

Es la razón entre la energía que incide sobre el oyente de forma lateral en los primeros 80ms, sin incluir el sonido directo, y la energía total recibida en dicho intervalo de tiempo:

$$LF = 100 \frac{\int_0^{80ms} h^2(t) \cos^2(\theta) dt}{\int_0^{80ms} h^2(t) dt} \quad (2.7)$$

donde: $h(t)$, es la respuesta impulso del recinto

θ , es el ángulo de incidencia del sonido medido con respecto al eje que forman los oídos del receptor

LF, es la eficiencia lateral en %

Según M. Barron y A. H. Marshall⁹, las bandas que contribuyen de manera más significativa a la impresión de espacialidad son las bandas de 125, 250, 500 y 1000Hz (bandas de una octava). Un valor representativo de este parámetro es el promedio de los valores de LF obtenidos para estas cuatro bandas (LF_{E4}).

Entre más alto sea este valor, mayor será el efecto envolvente del sonido, siendo 20% un valor aceptable para este parámetro.

2.9.3 Definición D-50

Este parámetro se refiere al grado con el que dos o más sonidos distintos pueden ser diferenciados dentro de un recinto. Esto significa que los sonidos que se produzcan simultáneamente puedan ser diferenciados, y que los sonidos consecutivos se escuchen separados. Matemáticamente, este parámetro se define como el cociente de la energía que llega al oyente dentro de los primeros 50 ms, entre la energía total recibida.

$$D50 = \frac{\int_0^{50ms} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \quad (2.8)$$

donde: $h(t)$, es la respuesta impulso del cuarto.

⁹ M. Barron y A. H. Marshall *Op Cit*

2.9.4 RASTI

La obtención del índice RASTI en un espacio acústico, es una manera objetiva de evaluar la calidad de transmisión de la palabra (inteligibilidad). Se basa en la medición de la función de transferencia de modulación (MTF) para las bandas más significativas de la voz (500 y 2000Hz).

Para medirla, en la posición del hablante se introduce, como señal de prueba, el espectro promedio del habla por bandas de una octava. Esta señal de entrada es modulada con un cierto índice bien definido.

En la posición del receptor, con ayuda de un micrófono, se captura la señal reproducida por medio de un altavoz. La señal captada por el micrófono será la señal de prueba modificada por la respuesta acústica del recinto más la superposición del ruido de fondo. Estos efectos por lo general resultan en una reducción del índice de modulación de la señal de prueba. Para la combinación de frecuencias de cada banda y las frecuencias de modulación, la reducción de este índice, está representada por la función de transferencia de modulación (MTF). Dicha función es interpretada en términos de una relación señal a ruido aparente para las bandas que considera éste índice (500 y 2000Hz); el promedio ponderado de estos valores es el llamado índice RASTI. Este resultado depende de los agentes que causaron la reducción de la modulación (por ejemplo, reverberación, ruido, ecos).

La inteligibilidad oral depende de varios factores tales como la amplitud de la señal, su frecuencia, duración, etc. Estas variaciones son modificadas por las condiciones del entorno en el cual se emite el mensaje; la modulación de la señal, y el análisis de los cambios que sufre, dan un panorama general del grado en que dichas variaciones son modificadas por los efectos del recinto.

Un valor de 0% para el índice RASTI, corresponde al caso extremo de inteligibilidad nula, mientras que un valor de 100% significa inteligibilidad perfecta. La interpretación sugerida¹⁰ de éste parámetro es la siguiente:

RASTI [%]	INTELIGIBILIDAD
< 30	Mala
30–45	Pobre
45–60	Regular
60–75	Buena
>75	Excelente

TABLA. 2.1: Interpretación sugerida del índice RASTI.

¹⁰ Dalenbäck, B-I. *CATT-Acoustic v8.0 User's Manual*. Copyright© CATT 2002.

3. EL PROCESO DE MASTERIZACIÓN

3.1 Masterización

La postproducción de audio consiste en una serie de procesos mediante los que se le da las características adecuadas a cada uno de los sonidos de un proyecto de grabación, uno de estos procesos es la masterización. Normalmente, todos los productos de audio que se lanzan al mercado pasan por el proceso de masterización antes de llegar al consumidor. En dicho proceso, se siguen varios pasos mediante los que se le dan los toques finales a un proyecto de audio, dependiendo del tipo de música o contenido, de su finalidad y ámbito. El objetivo de la masterización es conseguir un mejor sonido que el obtenido en el proceso de grabación, y que sea acorde con la intención del autor, lo que permite percibir más detalles del sonido original, así como tener un resultado de alta calidad, que podrá distribuirse en cualquier medio.

Debido a la proliferación de sistemas de grabación y estudios caseros, el proceso de masterización tiende a ser omitido o mal entendido; no existe un software que automáticamente dé los toques finales a una grabación y la haga sonar como un producto profesional. La masterización es el resultado de un análisis cuidadoso del material sonoro desde distintos puntos de vista. Las dos partes más importantes para lograr una buena masterización son un oído bien entrenado y un cuarto acondicionado específicamente para este fin. No importa cuanto se procese la grabación, no se podrán obtener buenos resultados si el cuarto es inadecuado. Se supone que un cuarto de masterización es el cuarto ideal para escuchar grabaciones, sea cual sea su índole. Esto significa que debe estar acondicionado de manera que no “coloree” el sonido y que transfiera fielmente la información grabada hasta el receptor, sin distorsiones ni efectos adicionales.

El tipo de altavoces a usarse en un estudio de masterización debe escogerse con cuidado; idealmente se desea una respuesta plana en todas las frecuencias (Yu¹¹ sugiere que se utilicen altavoces de campo lejano pues al ser de mayor tamaño, reproducen con menos problemas las frecuencias críticas). Este es uno de los motivos por los que el uso de audífonos es descartado, pues no responden de forma apropiada a las frecuencias más bajas debido a sus dimensiones físicas. Los audífonos también tienen algunas desventajas prácticas como fatiga si son utilizados durante largo tiempo, o la imposibilidad de sostener una conversación con otra persona con la diadema puesta. Por lo regular, en el proceso de masterización los audífonos se utilizan únicamente para hacer una segunda evaluación de los resultados.

3.2 Tipos de masterización

Cuando se habla de grabaciones de sonido (voz, música), la masterización suele ser algo común, pero dependiendo del tipo de trabajo ésta tendrá distintas características.

¹¹ Yu, Jonathan. *How to Overcome Misconceptions and Mastering Myths*.
<http://www.mojopie.com/mastering.html> (marzo, 2003)

- Maquetas o música: es el tipo de trabajo que se realiza inmediatamente después de que han acabado las sesiones de grabación. En este tipo de masterización se parte de una pista estéreo o de varias pistas por separado. Si los instrumentos están grabados en pistas separadas, será necesario hacer una mezcla previa así como una ecualización tanto individual como de la mezcla final. Después de esto se procede a realizar la masterización. Al trabajar con una pista estéreo el operador debe concentrarse en darle el realce y la dinámica adecuada a la grabación en función del género musical.
- TV, radiodifusión o multimedia: el objetivo de este tipo de masterización es obtener un sonido profesional, que llame la atención por su claridad, contundencia y calidad. Esto es necesario porque tanto en TV como en radio se desea estar, al menos, a un nivel similar del resto de los productos del mercado.
- Restauración: este es el tipo de masterización que nos ocupa de manera particular para la fonoteca de Radio UNAM. La restauración se realiza cuando el material sonoro tiene ruidos de fondo, “clicks”, entre otros efectos no deseados, que molestan y desvirtúan el sonido o la música que estamos escuchando. Son muchos los tipos de ruido que pueden aparecer, generalmente suele ser por el tipo de soporte, el paso del tiempo o el haber descuidado el material sonoro. En función de los agentes que hayan producido este deterioro podemos distinguir los distintos tipos de restauración:

3.2.1 Tipos de restauración

Principalmente podemos distinguir 3 tipos de restauración a grandes rasgos:

- Vinilo (o acetato): en estos casos se transfiere la información a un formato digital, desde el que se intentará eliminar gran parte del "scratch"¹², “clicks” y ruido de fondo. La forma de trabajar depende del material sonoro, ya que según el género musical se deben cuidar diferentes aspectos. Siempre se intenta mantener el carácter original de la obra, pero tratando de suplir las carencias de la grabación inicial. El resultado final es una grabación con las canciones (o voz) del vinilo separadas por tracks (1, 2, 3, 4,...).
- Cinta (casete o carrete abierto): igualmente se hace la transferencia a una grabación digital, para poder eliminar el "hiss"¹³ mediante técnicas de software¹⁴, intentando de la misma forma mejorar algunas características de la grabación inicial.
- Audio genérico (otros formatos): este tipo de restauración es la que se aplica sobre cualquier material sonoro (sin importar su procedencia y su posterior utilización), que tiene una mala calidad de sonido por fallos en la grabación (por ejemplo, sonido de viento, drops¹⁵, “sonido enlatado”¹⁶, excesivo ruido de fondo).

Cabe señalar que la frecuencia de muestreo al momento de digitalizar la grabación debe ser alta a fin de perder la menor cantidad posible de información en el proceso (la frecuencia de muestreo de 44100Hz de un CD, como mínimo).

3.3 Entorno

Cada recinto cuenta con una respuesta acústica particular que depende de la geometría y materiales tanto del recinto, como de los objetos que lo ocupan. El ruido interno y externo al cuarto también afecta las características del sonido reproducido en el interior del recinto.

Un recinto debe adecuarse al tipo de uso que pretenda dársele. Para cuartos de control, estudios de masterización y cuartos de audición en general, los requerimientos son similares. En los apartados subsecuentes se hará una descripción del recinto que se pretende utilizar como estudio de masterización y los requerimientos acústicos para este tipo de encierros.

¹² Ruido debido a impurezas sobre el disco y a irregularidades físicas del mismo.

¹³ Ruido aleatorio de alta frecuencia, debido a la magnetización de las partículas de óxido de cintas magnéticas.

¹⁴ Por ejemplo, Audio Cube, software especializado en masterización (http://www.cubetec.com/AudioCube_mainframe.html).

¹⁵ Disminuciones de volumen repentinas.

¹⁶ Efecto producido por un eco repetitivo, que se presenta en un lapso de tiempo muy corto.

4. ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO DEL ESTUDIO DE MASTERIZACIÓN

4.1 Descripción del recinto

El cuarto de que dispone Radio UNAM para la implementación de un estudio de masterización es un cuarto ubicado en el departamento de grabaciones, en el primer piso de esta dependencia.

El aspecto físico del cuarto se muestra en la siguiente figura:

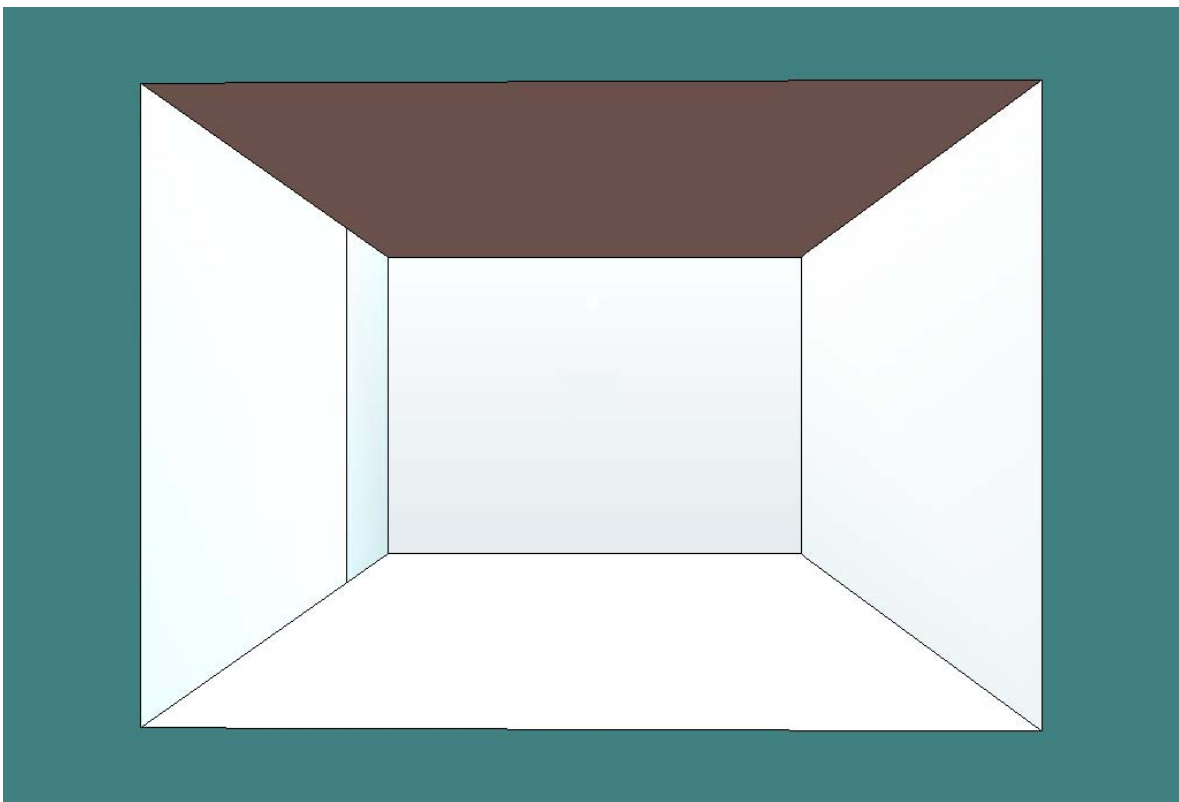


Fig. 4.1: Vista frontal del cuarto. A la izquierda del dibujo aparece la puerta de acceso al inmueble.

A continuación se dan los detalles de las dimensiones del recinto y los materiales presentes en sus fronteras:

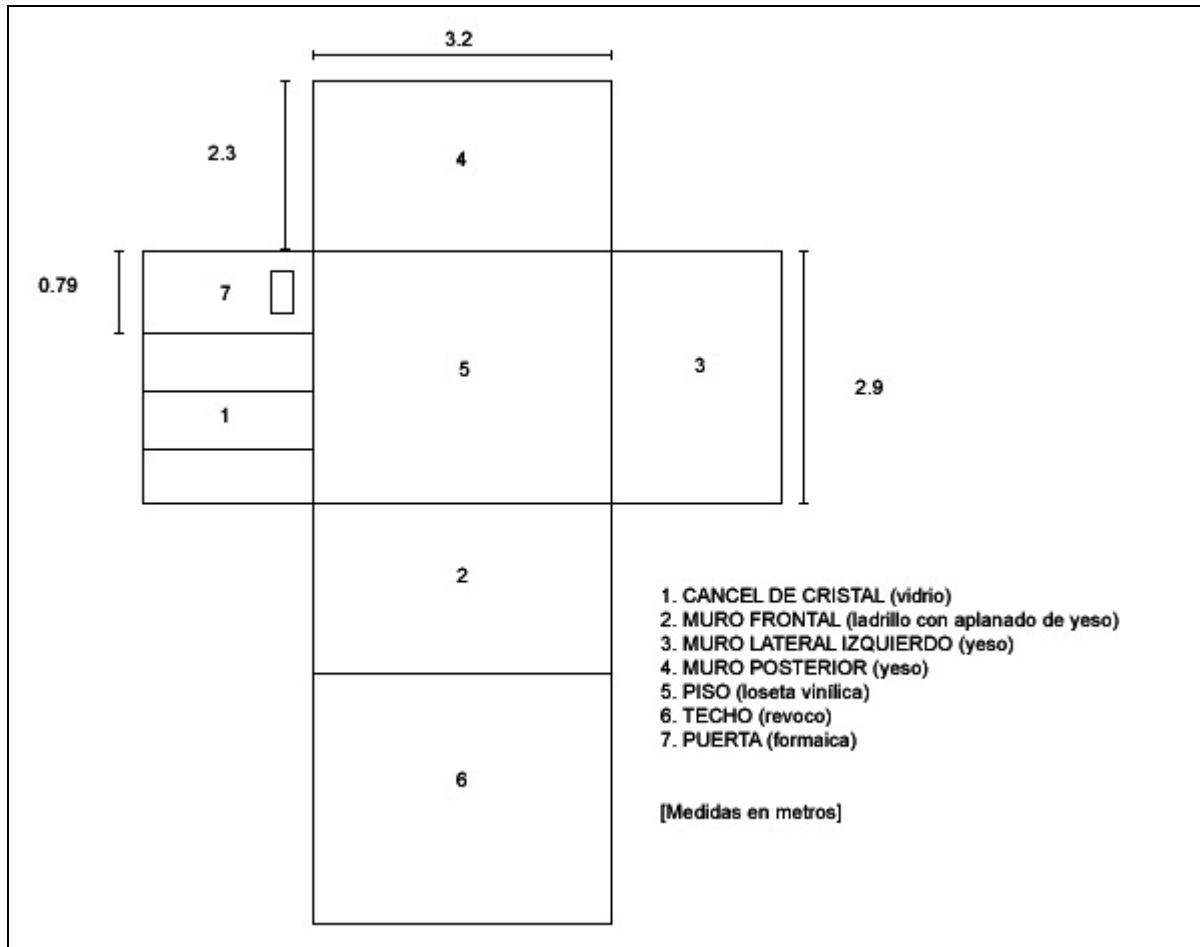


Fig. 4.2: Abatimiento, dimensiones del recinto y materiales que lo conforman.

Las propiedades de absorción acústica de los materiales que conforman el recinto estudiado, y que se utilizaron en las simulaciones, son las siguientes^{17 18 19}:

MATERIAL	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	SUPERFICIE [m²]
1. vidrio	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	4.6
2. ladrillo+aplanado yeso	0.013	0.015	0.02	0.028	0.04	0.005	7.35
3, 4. yeso	0.12	0.1	0.07	0.09	0.07	0.05	14.01
5. loseta vinílica	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	9.27
6. revoco	0.025	0.045	0.06	0.085	0.043	0.058	9.27
7. formica	0.28	0.22	0.17	0.9	0.1	0.11	2.04
ÁREA EQUIVALENTE DE ABSORCIÓN [Sabines métricos]	4.42	3.21	2.68	4.64	2.34	1.87	Suma: 46.54

TABLA. 4.1: Coeficientes de absorción de cada material del cuarto, superficie que ocupa y área equivalente de absorción por bandas de una octava.

En el siguiente apartado se describe el equipo y el número de usuarios que ocuparán este espacio.

¹⁷ Recuero López, Manuel. *Ingeniería Acústica*. Ed. Paraninfo, 2000.

¹⁸ Cox, Trevor J. y D'Antonio, Peter. *Acoustic Absorbers and Diffusers*. Ed. Spon Press, 2004. 1st edition.

¹⁹ Recuero López, Manuel. *Estudios y Controles para Grabación Sonora*. Instituto Politécnico Nacional. México, 1991.

4.2 Condiciones requeridas para el estudio de masterización

4.2.1 Usuarios.

Los usuarios del estudio de masterización serán normalmente, un operador y, ocasionalmente, un encargado de revisar el resultado final. La ubicación de ambos será preferentemente en el centro del estudio, al frente de la consola. Se desea que ocupen sillas móviles, de modo que tengan al alcance los controles, tanto del equipo y de la computadora (como mínimo para el operador), así como del resto del equipo, sin realizar movimientos mayores a un metro en cualquier dirección.

4.2.2 Equipo dentro del estudio.

El equipo que ha de ser ubicado dentro del estudio consta de una computadora (monitor, CPU, teclado y ratón), una consola digital de 16+2 canales, reproductor de cinta de carrete abierto, grabadora de cinta DAT, reproductor de cassette, reproductor de mini disco, reproductor de discos compactos, grabador en tiempo real para discos compactos, amplificador y un par de gabinetes (Mod. JBL 4208), con dos altavoces integrados en cada gabinete (tweeter y woofer). La ubicación final del equipo se presenta en la sección 4.8 (Simulación del recinto acondicionado).

Como requerimientos adicionales se instalará un sistema de ventilación silencioso, ya sea en el techo o en alguna pared, para controlar la temperatura del cuarto haciendo circular aire fresco.

4.3 Condiciones acústicas deseadas

4.3.1 Dimensiones Ideales

En el diseño o acondicionamiento acústico de recintos pequeños normalmente deben enfrentarse problemas debidos a que la respuesta acústica del recinto, en bajas frecuencias dentro del rango audible, está dominada por modos discretos con una densidad modal muy baja. Gilford¹⁸ establece que volúmenes menores a 1500 ft³ (42.47 m³) aproximadamente, son tan susceptibles a la coloración del sonido, que resultan imprácticos. Cuartos más pequeños que éstos producen, a bajas frecuencias, escasos modos normales con frecuencias propias demasiado separadas unas de otras, las cuales son causas de modificación del sonido por coloración espectral del mismo. Sin embargo, existen algunas indicaciones generales sobre las dimensiones que pudieran causar menos conflictos acústicos.

Los recintos acústicos pueden tener muchas formas distintas. La popularidad de los cuartos rectangulares se debe sobretodo a la economía y facilidad de su construcción; también ofrecen la ventaja de un tratamiento matemático preciso. Sin embargo, en términos de los modos normales de vibración (y su distribución en frecuencia), su calidad acústica tiene varias desventajas y normalmente se requiere el uso de difusores a fin de reducir el efecto de dichos modos. Desde el punto de vista acústico sería preferible diseñar un recinto asimétrico; desafortunadamente éste no es el caso de nuestro recinto en particular, el cual tiene una simetría rectangular.

Las proporciones entre longitud, ancho y altura de un recinto rectangular son de suma importancia. A continuación se muestra una tabla con las dimensiones de recintos rectangulares más favorables según diferentes autores¹⁹; estas son aproximaciones empíricas, es decir, están basadas en análisis estadísticos de proporciones para una buena distribución de los modos.

¹⁸ Gilford, C. L. S., *The Acoustic Design Of Talk Studios And Listening Rooms*, Proc. Inst. Elect. Engs., 106, Part B, 27 (May 1959), 245-258.

¹⁹ Volkmann, J. E., *Polycylindrical Diffusers In Room Acoustical Design*, J. Acous. Soc. Am., 13 1942, p. 234-243.

Boner, C. P., *Performance Of Broadcast Studios Designed With Convex Surfaces Of Plywood*, J. Acous. Soc. Am., 13 1942 p. 244-247.

Sepmeyer, L. W., *Computed Frequency And Angular Distribution Of The Normal Modes Of Vibration In Rectangular Rooms*, J. Acous. Soc. Am., 37, 3 (March 1965). p. 413-423.

Louden, M.M., *Dimension-Ratios Of Rectangular Rooms With Good Distribution Of Eingentones*, Acoustica, 24 (1971), p. 101-103.

<i>Autor</i>	<i>Altura</i>	<i>Ancho</i>	<i>Largo</i>
1. Sepmeyer	1	1,14	1,39
	1	1,28	1,54
	1	1,6	2,33
2. Louden 3 best ratios	1	1,4	1,9
	1	1,3	1,9
	1	1,5	2,5
3. Volkmann (proporción de 2:3:5)	1	1,5	2,5
4. Boner (proporción de $1:\sqrt[3]{2}:\sqrt[3]{4}$)	1	1,26	1,59

TABLA. 4.2: Dimensiones proporcionales sugeridas para recintos rectangulares.

Como se puede observar en la tabla 4.2, las relaciones existentes entre las tres dimensiones del cuarto (altura, ancho, largo) son números no enteros, esto se debe a que no resulta conveniente de entrada, tener un cuarto cuyas relaciones sean múltiplos, pues existirán dos o más modos distintos que tendrán la misma frecuencia natural (o valores muy parecidos entre ellas), y eso hará más grande la respuesta del recinto alrededor de esas frecuencias naturales. De ahí que un cuarto cúbico no es acústicamente conveniente; por ejemplo, en tal caso es posible encontrar grupos de tres modos diferentes con la misma frecuencia natural resultando en una respuesta significativa del cuarto al excitarse a esas frecuencias.

4.3.2 Niveles de Audición y Ruido de fondo.

Un efecto indeseable dentro de un estudio es el de no poder escuchar con claridad la reproducción de una grabación debido al ruido, tanto exterior al recinto así como el generado en su interior. El ruido produce una disminución en la capacidad de escuchar otros sonidos presentes, esto es, eleva el umbral de audibilidad. La cantidad de este enmascaramiento puede ser medida en decibeles.

Considerando lo anterior, se requiere que la música o voz que se reproduzca esté suficientemente por encima del nivel de ruido de fondo, obviamente sin rebasar cierto límite a partir del cual los niveles de presión sonora son excesivos para el oído humano, o bien, simplemente molestos. Es entonces necesario reducir el ruido de fondo para evitar este caso extremo.

De manera subjetiva, el operador en el estudio puede llegar a experimentar una fatiga por el ruido que lo rodea, por lo que es necesario minimizar los niveles de ruido de diversas procedencias, tales como ruido exterior transmitido por el aire, ruido exterior transmitido por sólidos (muros) y el ruido en sistemas de ventilación. Es necesario observar las fuentes de ruido de cada caso particular para determinar las acciones necesarias a fin de reducir sus efectos sobre el escucha. Según Knudsen y Harris²⁰, para el escucha promedio, un nivel de

²⁰ Knudsen, V. O. y Harris, C. M. *Op Cit.* p. 153-154.

65 dB es adecuado para una buena inteligibilidad de la voz dentro de un entorno relativamente silencioso (niveles de ruido de unos 40 dB).

Con relación a las curvas de criterios de ruido, no existen referencias que indiquen los niveles permitidos para un estudio de masterización, pero sí para un cuarto de control de un estudio de grabación. Considerando la similitud en el uso de ambos, se tomarán los criterios para este tipo de recintos. Según Knudsen y Harris²¹, el valor recomendado del ruido debe estar por debajo de la curva NC-15, o en el peor caso, por debajo de la curva NC-20.

4.3.3 Reverberación Óptima

Las propiedades acústicas transitorias del recinto deben ser tales que el nivel de presión sonora decaiga en una forma uniforme cuando el sonido es interrumpido; igualmente se desea que esta uniformidad se extienda sobre todas las frecuencias audibles a fin de no enfatizar o reducir alguna componente.

En el capítulo 2 se mostraron las curvas del tiempo de reverberación óptimo para distintos recintos. En el caso de un recinto de masterización, el objetivo general es que la información que se encuentra grabada se transfiera al oído del operador con fidelidad máxima, sin ninguna distorsión. Para que ello ocurriese se necesitaría estar en condiciones de campo libre, como por ejemplo, dentro de una cámara anecoica²². Si la reverberación se nulifica, como en una cámara anecoica, la comodidad auditiva del operador se ve afectado puesto que no es una experiencia agradable pasar varias horas trabajando en un lugar acústicamente “muerto”.

Se debe pues encontrar un balance entre el confort y la fidelidad del sonido reproducido dentro del recinto, para ello es indispensable permitir un cierto valor de reverberación en todas las bandas. Extrapolando las gráficas de Knudsen y Harris de tiempo de reverberación contra volumen del recinto, encontramos que el valor para el recinto estudiado es de 0.494 segundos, si su propósito fuese para la reproducción de voz exclusivamente. Una combinación de voz y música se da, por ejemplo, en las salas de cine, para las cuales el tiempo de reverberación promedio deseado es de 0.706 segundos, si tuviera el volumen de nuestro recinto. Con base en estos valores, se propone un tiempo de reverberación de entre 0.3 y 0.5 segundos.

4.3.4 Modos Normales de Oscilación.

En las condiciones actuales, el cuarto que se pretende acondicionar cuenta con un campo sonoro espacialmente poco uniforme en bajas frecuencias. Por ello sería conveniente romper con la simetría del cuarto para tener una distribución de sonido relativamente homogénea también en ese rango de frecuencias; sin embargo, este procedimiento, además de costoso, resultaría impráctico pues las dimensiones del cuarto dejan poco margen a este tipo de modificaciones. Es probable entonces que se tengan que utilizar difusores, cuya

²¹ *Idem*

²² Recinto altamente absorbente.

función sería la de romper los frentes de onda incidentes en ciertas superficies y distribuir la energía de forma homogénea al reflejarse las ondas sonoras sobre los difusores.

4.3.5 Reflexiones Tempranas y Laterales

Se debe obtener una proporción adecuada de reflexiones laterales (a izquierda y derecha del oyente), cuyo efecto es el de crear en el oyente la sensación de encontrarse inmerso en el sonido mismo (envolvimiento), sin perder la estereofonía de la grabación.

El tiempo de reverberación, el nivel de presión sonora, la distribución angular, todas ellas son características que juegan un papel dentro de la calidad del envolvimiento percibido del campo sonoro. Se han realizado diversos estudios subjetivos²³ para determinar parámetros objetivos que cuantifiquen el grado de envolvimiento percibido por el receptor. El parámetro que se utiliza en este trabajo es la fracción de energía lateral (LF), que indica cuánta energía incide lateralmente en el oyente con respecto al total de energía recibida.

Es importante cuidar que éste parámetro sea lo más alto posible, o que por lo menos, se mantenga por encima del valor mínimo de 20 %, estipulado en la bibliografía²⁴.

4.4 Pruebas con el software de simulación

Con el fin de predecir el resultado del acondicionamiento acústico del recinto, se realizaron una serie de simulaciones por medio del programa CATT-Acoustic²⁵. De esta

²³ Bradley J. S. y Souldre G.A., *Objective Measures Of Listener Envelopment*, JASA 98 (1995) 2590.

²⁴ Carrión Isbert, Antoni, *Diseño de Espacios Arquitectónicos*, Alfaomega. México, 2000.

manera fue posible calcular parámetros acústicos en distintos puntos del recinto como el tiempo de reverberación, la definición (D-50), la eficiencia lateral (LF), el índice de transmisión de voz (RASTI, por sus siglas en inglés: Rapid Speech Transmission Index), entre otros, y así poder estimar el resultado del acondicionamiento. (En el Laboratorio de Acústica del CCADET se cuenta con la licencia para usar la versión completa de predicción de este software).

Antes de proceder al diseño o acondicionamiento de un recinto por medio de software, se deben conocer los alcances y limitaciones del mismo para poder hacer una correcta interpretación de los resultados que arroje.

Para lograr lo anterior, se realizaron diversas mediciones dentro del recinto de Radio UNAM, unas necesarias para la caracterización del mismo, otras para compararse más tarde con los resultados obtenidos con el software. A partir del análisis de los datos mencionados, se pudo conocer qué consideraciones se debían tener en cuenta al momento de interpretar los resultados de las simulaciones.

Primeramente se presenta el reporte de lo que se obtuvo en las mediciones:

4.4.1 Mediciones en radio UNAM

Actualmente, el recinto ubicado en las instalaciones de Radio UNAM que se pretende usar como estudio de masterización, funciona como bodega de equipo de audio. Para las mediciones acústicas realizadas, se decidió dejar dentro algunos objetos de difícil desplazamiento. Esto debido a la dificultad y el tiempo que hubiera tomado evacuarlo por completo. En las figuras se muestran los objetos presentes durante las mediciones.

Las mediciones realizadas fueron las siguientes:

- Ruido de fondo
- Tiempo de reverberación
- Respuesta en frecuencia

Estas mediciones se realizaron en varios puntos dentro de la sala, los cuales están representados en la Fig 4.3.

4.4.1.1 Ruido de fondo

El equipo utilizado para esta parte fue:

- 1 micrófono de precisión ACO-P7012 con preamplificador

²⁵ El programa CATT (Computer Aided Theatre Technique) está desarrollado en Suecia por Bengt-Inge Dalenbäck.

- 1 analizador de señales portátil HP 3569 A
- 1 trípode

Con el micrófono de precisión y el analizador se midieron los niveles de presión sonora en condiciones normales, es decir, en horas de trabajo, con la particularidad de que algunos estudios se encontraban abiertos, con lo que se tuvieron las condiciones en las que se alcanzan los niveles de ruido más altos. Las mediciones se llevaron a cabo en seis puntos distintos, aquellos que se consideraron abarcarían las posibles posiciones del operador dentro de la sala.

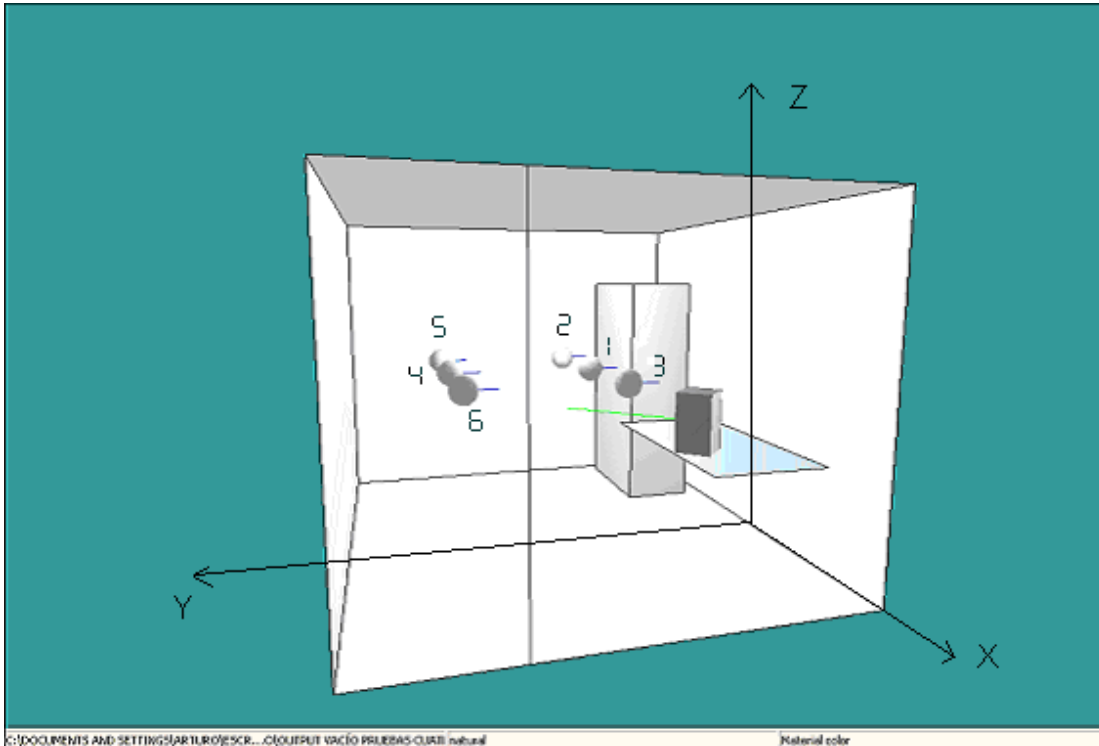


Fig. 4.3: Vista lateral del recinto a acondicionar. Las esferas representan las posiciones del micrófono de medición. El altavoz es el paralelepípedo pequeño en color más oscuro. Las líneas señalan la orientación de cada receptor y del altavoz. El objeto del fondo es un estante y el plano suspendido corresponde a una mesa, ambos presentes en las mediciones.

En la Fig. 4.3 se muestra el sistema de coordenadas considerado; el eje X es paralelo a las paredes frontal y posterior; el eje Y es paralelo a las paredes laterales; el eje Z es perpendicular al plano formado por los ejes X y Y. El origen del sistema está ubicado en el punto medio de la arista inferior del muro frontal.

Las coordenadas de los receptores mostrados en la Fig. 4.3 son las siguientes:

Posición	X [m]	Y [m]	Z [m]
1	0	1.2	1.2
2	-0.75	1.2	1.2
3	0.75	1.2	1.2
4	0	2.2	1.2
5	-0.75	2.2	1.2
6	0.75	2.2	1.2

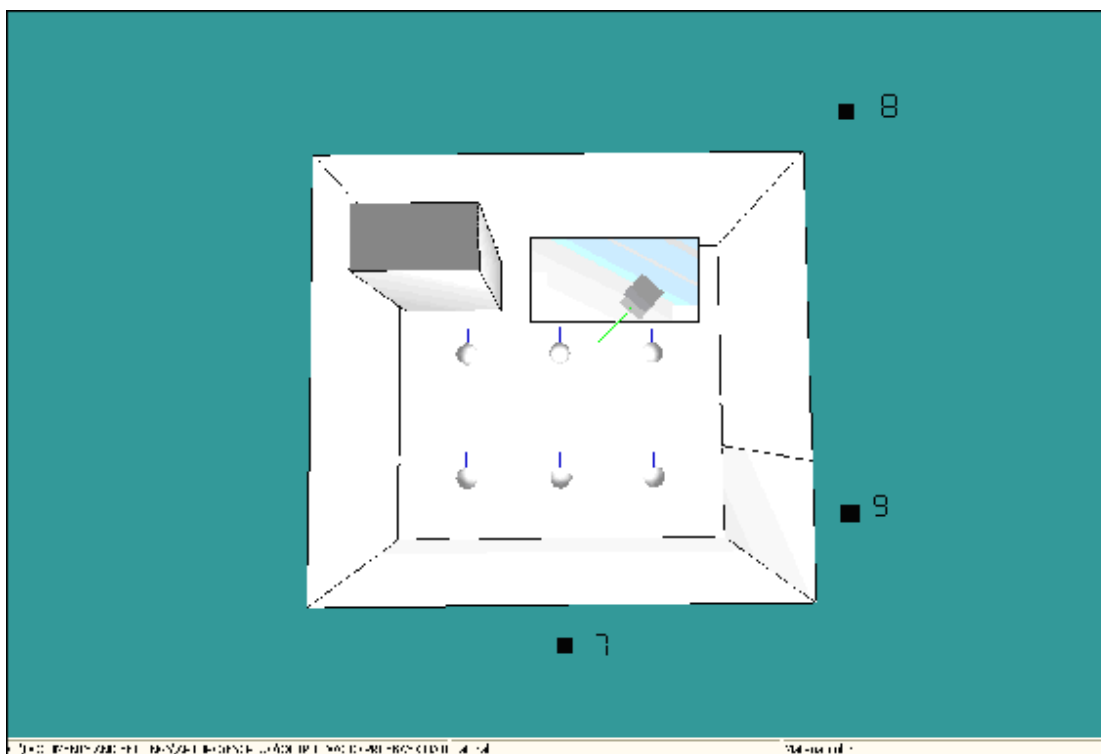
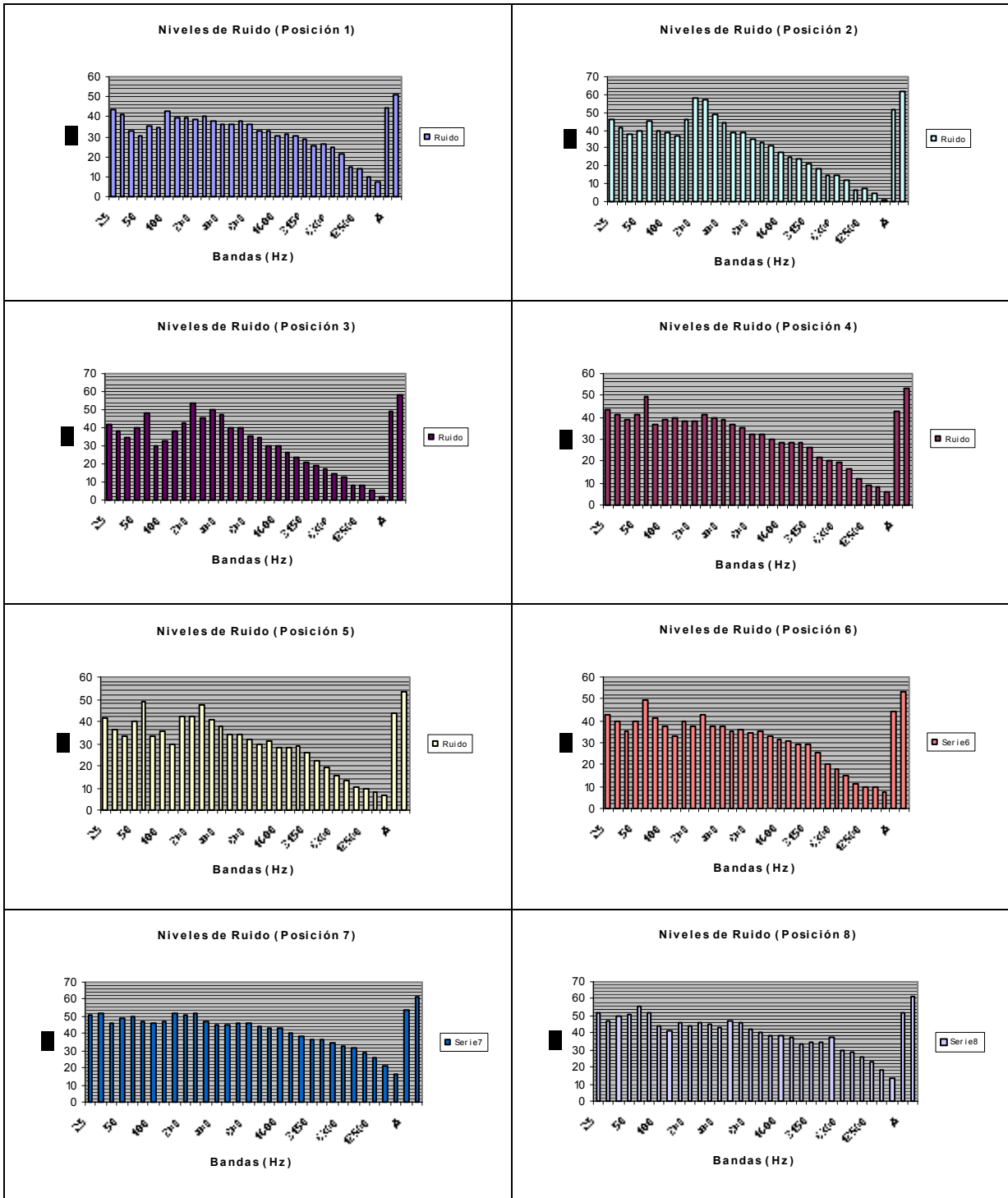


Fig. 4.4: Diagrama del recinto visto desde arriba. Los puntos 7, 8 y 9 indican los lugares de medición en los pasillos adyacentes fuera del cuarto.

El micrófono, montado en el tripié y conectado al analizador, se colocó en los puntos mostrados en las figuras anteriores (Fig. 4.3 y Fig. 4.4). Se tomaron los niveles de presión sonora durante 60 segundos en cada una de las posiciones, de los cuales el analizador realizó un promedio de los niveles sentidos durante dicho intervalo. Los resultados de estas mediciones fueron los siguientes:



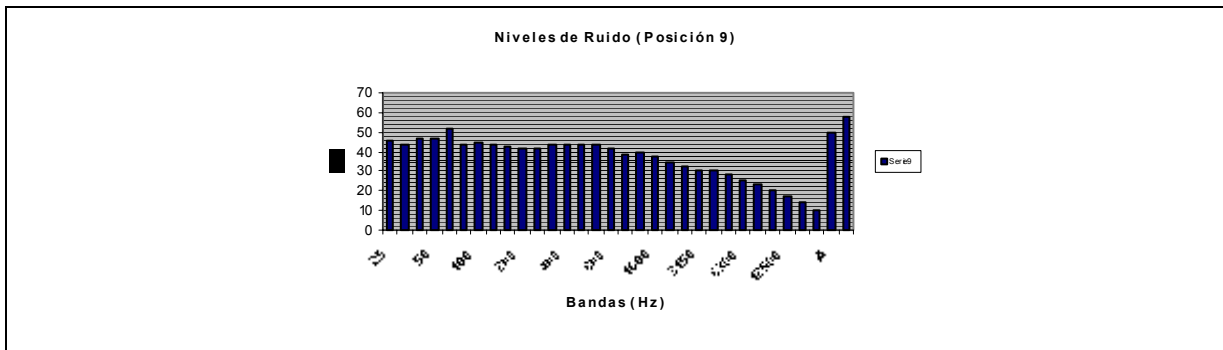


Fig. 4.5: Niveles de ruido en decibelios para las posiciones analizadas. La penúltima barra corresponde al valor de ruido en dBA, mientras que la última barra corresponde al promedio de todas las bandas en dB lineales. Valores por tercios de banda.

Las tablas de criterio de ruido están dadas por bandas de una octava, la información de las gráficas anteriores se muestra por octava en la sección 4.6.1 (Tablas 4.5 y 4.6). Por lo tanto la utilidad de las gráficas por tercio de octava es la de conocer la distribución del ruido en función de la frecuencia de manera más detallada.

Por ejemplo, se puede observar que en la mayoría de las gráficas aparece un pico en la banda de 63 Hz. Esta componente puede deberse al ruido generado por algún ventilador o motor (está en la banda que contiene la frecuencia de la instalación eléctrica) que se transmite por la estructura del inmueble²⁶. En las gráficas de las posiciones 7, 8 y 9 dicho pico se ve menos marcado porque el ruido en las otras bandas se incrementa fuera del cuarto, sin embargo, el nivel de la banda de 63 Hz continúa teniendo un valor alto.

4.4.1.2 Tiempo de reverberación

Para esta medición se ocupó el siguiente equipo:

- 1 analizador de señales portátil HP 3569A
- 1 amplificador de audio ONKYO A-RV400
- 1 gabinete de altavoces JBL 4208
- 1 micrófono de precisión ACO-P7012 con preamplificador

Por medio del analizador, un amplificador y el altavoz del gabinete, se obtuvieron los valores de T-60 y T-30 del cuarto para bandas de una octava. Para ello se excitó el altavoz con una señal de ruido rosa generado por el analizador. La señal de ruido se mantenía durante 6 segundos, al momento en que se desconectaba la excitación (automáticamente), el analizador, a través del micrófono, grababa en memoria las curvas de los niveles de presión en función del tiempo y que subsecuentemente utilizaba para promediar con las siguientes mediciones. En nuestro caso se hicieron 10 mediciones que se promediaron (para cada una de las posiciones del micrófono), con el fin de asegurar una buena medición.

Los puntos del recinto en los que se hicieron las mediciones del tiempo de reverberación se muestran en la siguiente figura:

²⁶ El análisis realizado no profundizó en la averiguación del origen de este ruido en particular.

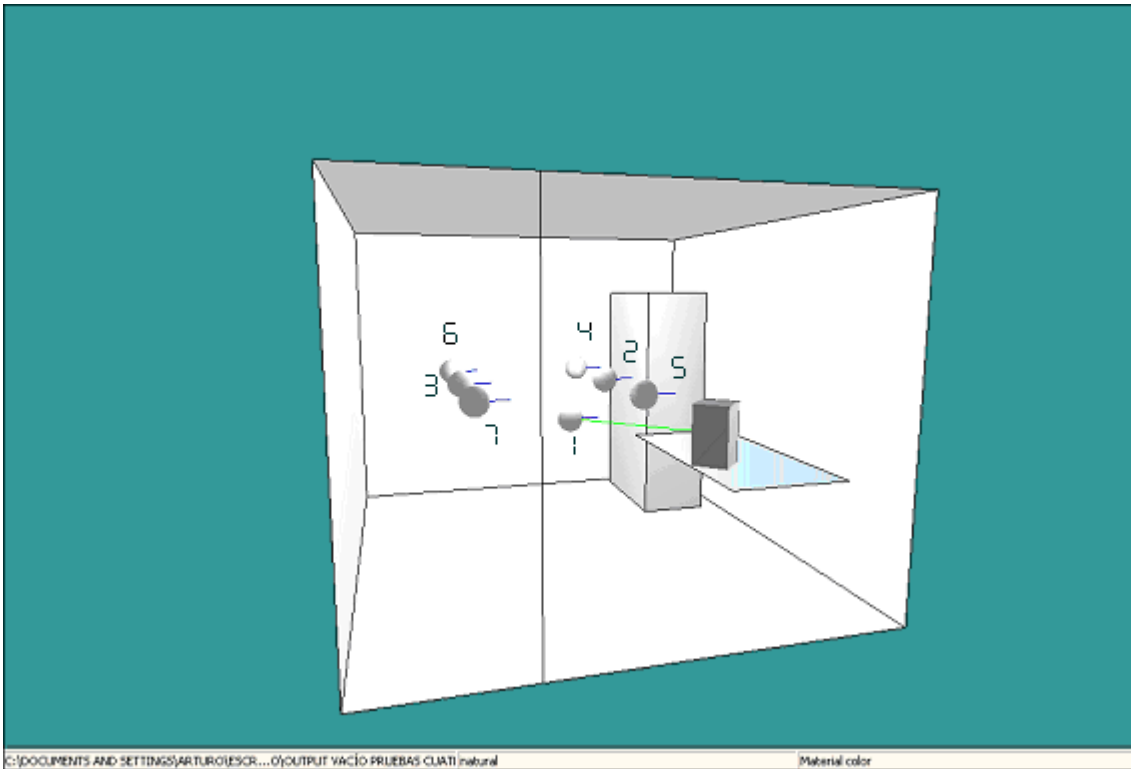


Fig. 4.6: Distintas posiciones del micrófono (esferas) para las que se midió el tiempo de reverberación T-30 y T-60.

Las coordenadas del receptor 1 son $X=0$, $Y=1.45$ y $Z= 1.15$. Las coordenadas de los receptores 2, 3, 4, 5, 6 y 7 son las mismas que las coordenadas de los receptores de la Fig. 4.3.

En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos para cada punto analizado:

BANDA	POSICIÓN 1		POSICIÓN 2		POSICIÓN 3	
	T-60 [s]	T-30 [s]	T-60 [s]	T-30 [s]	T-60 [s]	T-30 [s]
31.5	0.437	0.531	1.07	-	0.799	0.31
63	0.67	0.834	1.322	0.996	1.115	0.869
125	0.889	0.848	1.137	1.063	0.846	0.727
250	1.02	0.842	1.016	0.852	1.098	0.754
500	1.107	1.025	1.098	1.033	1.047	0.937
1000	1.182	1.219	1.115	1	1.109	1.125
2000	1.004	1.037	1.021	0.953	1.027	1.066
4000	0.91	0.912	0.922	0.896	0.914	0.919
8000	0.742	0.732	0.727	0.719	0.74	0.748
16000	0.423	0.418	0.435	0.416	0.422	0.4
A	1.066	1.068	1.021	0.951	1.041	1.035
L	1.033	0.947	1.061	0.924	1.063	0.875

BANDA	POSICIÓN 4		POSICIÓN 5		POSICIÓN 6	
	<i>T-60 [s]</i>	<i>T-30 [s]</i>	<i>T-60 [s]</i>	<i>T-30 [s]</i>	<i>T-60 [s]</i>	<i>T-30 [s]</i>
31.5	0.41	-	0.619	0.447	-	0.666
63	1.068	1.238	0.83	0.834	0.893	0.768
125	0.939	0.844	1.072	1.109	0.9	0.969
250	1.111	1.414	0.965	0.987	0.92	1.094
500	1.211	1.471	1.039	1.092	0.971	1
1000	1.313	1.699	1.078	1.057	1.072	1.023
2000	1.096	1.383	0.982	0.992	0.973	0.957
4000	0.918	0.957	0.924	0.91	0.898	0.906
8000	0.73	0.746	0.744	0.73	0.723	0.721
16000	0.418	0.348	0.402	0.394	0.406	0.393
A	1.158	1.434	1.023	1.037	0.986	1.002
L	1.043	1.32	0.982	0.863	0.961	0.81

BANDA	POSICIÓN 7	
	<i>T-60 [s]</i>	<i>T-30 [s]</i>
31.5	0.744	-
63	0.807	0.537
125	0.943	-
250	1.004	1.01
500	1.057	1.008
1000	1.117	1.119
2000	0.994	0.949
4000	0.902	0.888
8000	0.723	0.728
16000	0.394	0.383
A	1.025	1.029
L	1.014	0.883

TABLA. 4.3: Tiempos de reverberación T-30 y T-60 para distintas posiciones del micrófono dentro del cuarto. Se han sombreado los valores correspondientes a las bandas más significativas del espectro audible.

Se observa que el valor de T-30 en la mayoría de los casos es menor que T-60, lo cual indica que la curva de decaimiento no tiene una pendiente uniforme.

4.4.1.3 Respuesta en frecuencia

Equipo utilizado:

- 1 computadora portátil
- 1 tarjeta externa de adquisición de señales (Avisoft Bioacoustics USG 116)
- 1 amplificador de señales ONKYO A-RV400
- 1 gabinete de altavoces JBL 4208
- 1 micrófono de precisión ACO-P7012 con preamplificador

Para obtener la respuesta en frecuencia del recinto se implementó el siguiente arreglo:

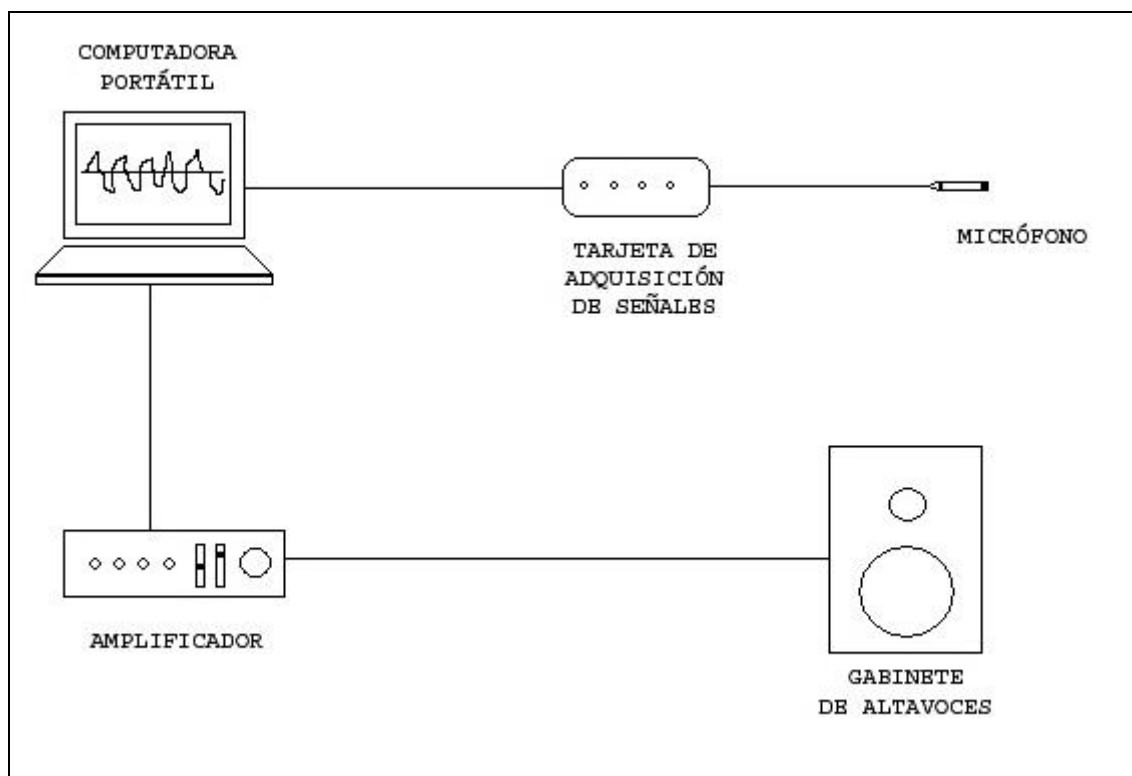


Fig. 4.7: Arreglo para medir la respuesta en frecuencia en el recinto analizado.

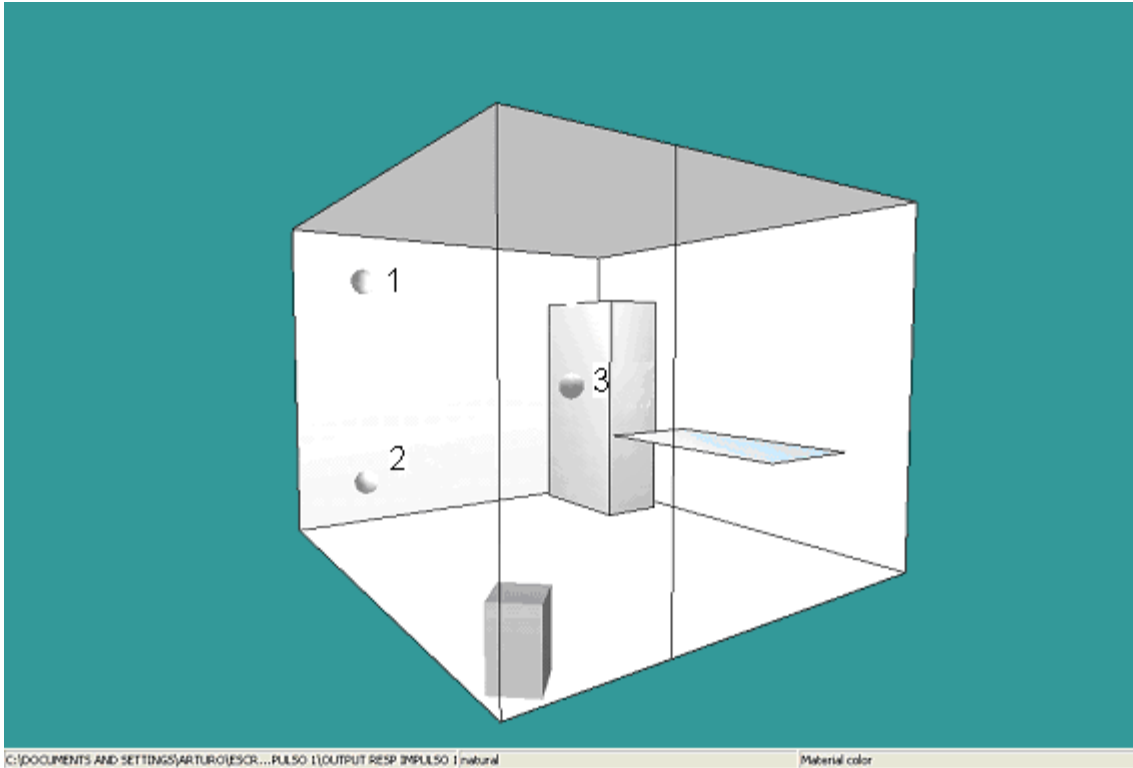


Fig. 4.8: Diagrama del interior del recinto donde se indican las posiciones del micrófono (esferas) para la medición de la respuesta en frecuencia. El altavoz se colocó en la esquina inferior más cercana a la puerta.

Para conocer la respuesta en frecuencia de 0 a 2000 Hz, se utilizó una secuencia de longitud máxima (MLS) de orden 13 (8191 elementos) considerando una frecuencia de muestreo de 4000 Hz. Esta secuencia fue remuestreada a 8000 Hz, por medio de la función “resample” de Matlab, con la finalidad de poder ser usada con la tarjeta de adquisición de señales (la frecuencia de muestreo más baja con la que opera la tarjeta es de 8 kHz). Dividiendo el número de elementos de la secuencia entre la frecuencia de muestreo, se obtiene el periodo de la secuencia MLS que es de 2.05 segundos (aproximadamente el doble del tiempo de reverberación que se predecía con el programa CATT). Esta secuencia se reprodujo 12 veces desde la computadora y se grabó la señal captada por el micrófono (en archivos con extensión .wav). El altavoz y el micrófono se colocaron en las posiciones señaladas en la Fig. 4.8.

Se utilizaron secuencias MLS debido a que originalmente se pretendía conocer la respuesta impulso; desafortunadamente hubo problemas con la tarjeta de adquisición, aparentemente de sincronización entre las señales de salida y de entrada, por lo que la información obtenida presentó errores que impidieron la determinación de la respuesta impulso. Sin embargo, los errores mencionados fueron despreciables para la obtención de la respuesta en frecuencia.

Con ayuda de MATLAB se obtuvieron las gráficas de la respuesta en frecuencia en cada una de las tres posiciones. Para ello primero se obtuvo el espectro en frecuencias promedio de cada señal grabada (contenido en los archivos .wav). Para determinar dicho promedio se utilizaron 50 espectros, a su vez, cada espectro se obtuvo utilizando la FFT (el tamaño del bloque de la transformada fue de 4000 elementos). Posteriormente cada uno de los espectros promedio se dividió (frecuencia por frecuencia) entre el espectro promedio de la señal registrada cuando la salida de la computadora se conectó directamente a la entrada de la tarjeta externa de adquisición de señales. De esta manera, se compensó el efecto de la respuesta de dicha tarjeta.

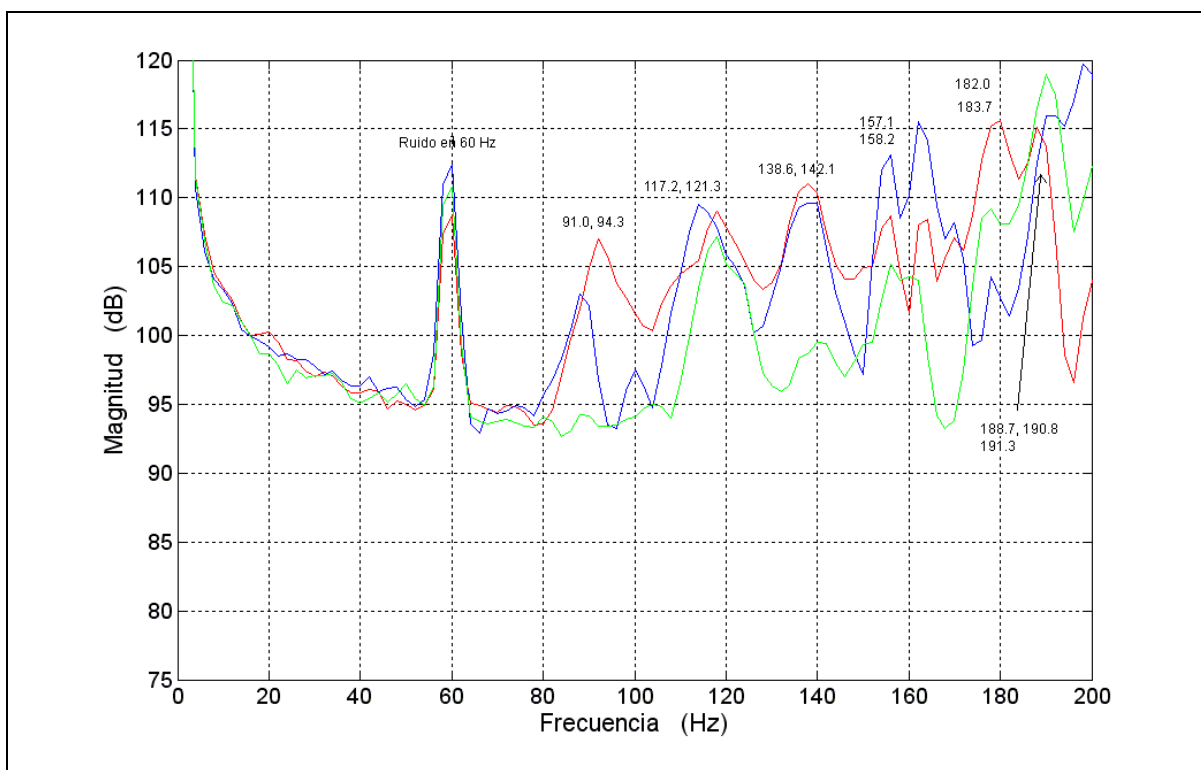


Fig. 4.9: Respuestas en frecuencia obtenidas para la posición 1 (rojo), posición 2 (azul) y posición 3 (verde).

La Fig. 4.9 muestra las respuestas en frecuencia para las posiciones 1, 2 y 3 del micrófono y se indican las frecuencias propias del recinto que se han podido distinguir claramente en las respuestas obtenidas en la medición.

En esta figura (4.9) hay varios modos reconocibles, correspondientes a los modos propios del recinto, previamente calculados con la expresión²⁷:

²⁷ Ver Tabla 4.10.

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (4.1)$$

donde: n_x , n_y y n_z , son números enteros
 l_x , l_y y l_z , son las dimensiones del recinto (ancho, largo y alto)
 c , es la velocidad del sonido.

Se identificaron claramente algunos picos como las contribuciones de algunos de los modos determinados teóricamente. En las curvas roja y azul se observan seis picos que pueden asociarse con las frecuencias propias del recinto. También hay un pico muy marcado en 60 Hz, con lo que se confirman las suposiciones del análisis de ruido hechas anteriormente, en donde se hizo la observación de que el valor relativamente alto de la banda de 63 Hz, era probablemente debido al ruido de un ventilador o algún motor.

No fué posible identificar todas las frecuencias propias teóricas en las curvas experimentales. Esto se puede atribuir a que los valores reales de las frecuencias propias en el recinto son diferentes de los valores teóricos debido a la presencia del armario y del escritorio (ya que la ecuación 4.1 asume un cuarto vacío) y a que no todas las fronteras del recinto tenían una impedancia acústica relativamente alta (paredes rígidas) como es supuesto en el modelo utilizado para calcular los modos matemáticamente.

La curva de la respuesta en frecuencia de la posición 3 (en color verde en la Fig 4.9) no es igual a las otras dos, se distinguen menos picos. Esto se debe a que en el centro del recinto (posición 3) se registran los modos que tienen sus tres índices modales pares, pero los modos con uno o más índices impares presentan líneas nodales en dicha ubicación. Cerca de las esquinas (posiciones 1 y 2) todos los modos tienen máximos. Por ejemplo, alrededor de 90 Hz se observan picos para las respuestas correspondientes a las esquinas, pero la respuesta en el centro no los detecta ya que el micrófono está cerca de una línea nodal; lo mismo ocurre para los picos cercanos a los 140 Hz.

Aparentemente al realizar la medición *in situ*, los modos en bajas frecuencias no fueron excitados en forma adecuada, ya que la respuesta obtenida en bajas frecuencias tiene niveles bajos.

4.4.2 Simulación del recinto en las condiciones actuales

Las simulaciones del recinto se llevaron a cabo bajo las siguientes condiciones:

- Se usaron los datos de la fuente electroacústica (gabinete de altavoces JBL 4208) utilizada en el resto de las simulaciones

- Se asignó a la fuente una presión sonora de 90 dB en todas las bandas (esto implica que se ha asumido que se ecualizó la respuesta del altavoz)
- Se omitió el filtro para audífonos de las herramientas de CATT Acoustics
- El programa simuló a los receptores como esferas de 18cm de diámetro con dos “oídos”
- Se asumieron los valores promedio siguientes para las condiciones ambientales: temperatura de 20°C, humedad del 50% y densidad del aire de 1.20 kg/m³
- Al no presentar irregularidades geométricas significativas, el coeficiente de difusión para todas las superficies se declaró de 2%
- Se incluyeron los objetos presentes dentro del cuarto durante las mediciones *in situ*
- Las posiciones del receptor y de la fuente fueron las mismas que en las mediciones *in situ*
- Se asignaron a las superficies los coeficientes de absorción de los materiales más parecidos a los del cuarto (ver Tabla 4.1)

Para la simulación de la respuesta en frecuencia:

- Se sustituyó el archivo anecoico original Demo_22_an.wav por otro con un impulso como única información
- La cabeza esférica que emula al receptor se rotó de manera que un oído apuntase hacia alguna esquina, con el fin de evitar una configuración simétrica que produjera la misma señal en ambos receptores. Para la medición en el centro del cuarto la cabeza se orientó hacia el frente
- La fuente se colocó en una esquina inferior del cuarto

4.4.3 Comparación y análisis de datos

A continuación se presenta la comparación entre los resultados obtenidos de las mediciones realizadas y los que se obtuvieron por medio de las simulaciones así como el análisis de los mismos. Las condiciones del recinto fueron las mismas para ambos casos, es decir, el cuarto casi vacío y sin ningún acondicionamiento acústico.

4.4.3.1 Tiempo de reverberación

La tabla de abajo muestra los resultados tanto de las mediciones, como de la simulación con CATT-Acoustics para bandas de una octava. Los valores de T-60 obtenidos con la simulación son un promedio de todos los puntos del recinto; ese es el único valor que el programa entrega (razón por la cual T-60 no aparece en las gráficas de decaimiento de la sección 4.6.2).

Para calcular los promedios de las mediciones del tiempo de reverberación se eliminaron los valores con desviación estándar alta.

REVERBERACIÓN						
(valores promedio entre los diferentes puntos de medición)						
BANDA [Hz]	MEDICIONES		SIMULACIONES (CATT-Acoustics)			
	T-60 [s]	T-30 [s]	T-60 [s]	T-30 [s]	T-15 [s]	Eyring [s]
125	0.903	0.847	0.67	0.8	0.74	0.64
250	1.004	0.922	0.89	0.94	0.92	0.87
500	1.053	1.016	1.01	1.08	1.05	0.98
1000	1.112	1.09	0.96	1	0.99	0.94
2000	1	0.992	1.12	1.17	1.15	1.1
4000	0.913	0.913	1.15	1.21	1.19	1.13

TABLA. 4.4: Tiempo de reverberación: comparación entre las mediciones y la simulación. Los valores mostrados corresponden al promedio entre todas las posiciones del micrófono (ver Fig 4.6).

Comparando los valores de T-30 entre las mediciones y las simulaciones se advierte una gran similitud hasta la banda de 1000 Hz; para la banda de 2000 Hz el error es del 18% y de 32% para la de 4000 Hz. Este aumento en el error conforme crece la frecuencia se debe probablemente a diferencias entre los valores estimados del coeficiente de absorción, y los valores reales.

Se observan errores relativamente grandes (alrededor de 30%) entre los valores medidos y los simulados de T-60 para las bandas de 125 y 4000 Hz. El programa CATT utiliza principalmente el método de trazado de rayos para hacer sus estimaciones, esto es, se basa en acústica geométrica cuyos resultados son más precisos en frecuencias más bien altas dado que subestima el fenómeno de difracción en frecuencias bajas. A este hecho se le podría atribuir la diferencia observada en la banda de 125 Hz. También es importante mencionar que el CATT calcula este parámetro a partir de la fórmula de Sabine pero a partir de un valor de superficie total que depende fuertemente de la geometría del recinto. Al parecer, cuando existen superficies traslapadas dentro del modelo a simular, el valor de superficie total estimado por el programa puede no coincidir con el valor real, dependiendo de qué tan grande o qué tan pequeño sea el traslape.

4.4.3.2 Respuesta en frecuencia

El programa CATT-Acoustic se basa principalmente en el método de trazado de rayos. Este método supone que la dimensión más pequeña del recinto es mucho mayor que la longitud de onda acústica, sin embargo, el programa CATT compensa el método de trazado de rayos con otros elementos, como el modelado de imágenes y difracción en objetos, aunque el fabricante no especifica de qué manera se involucran en los algoritmos dichas consideraciones. Es por estas razones que se consideró necesario conocer sus alcances y limitaciones hacia las bandas más bajas (125 y 250 Hz), uno de los medios para lograrlo fue la comparación de las respuestas en frecuencia.

La gráfica 4.10 corresponde a la respuesta en frecuencia que se obtuvo en la esquina superior del recinto (ver Fig. 4.8) por medio del programa CATT y con las mediciones. En la gráfica 4.10 hay tres curvas, dos correspondientes a cada uno de los oídos de las

HRTF utilizadas por el programa (verde: oído derecho, azul: oído izquierdo), y una tercera que es la respuesta que se obtuvo en las mediciones *in situ* (color rojo).

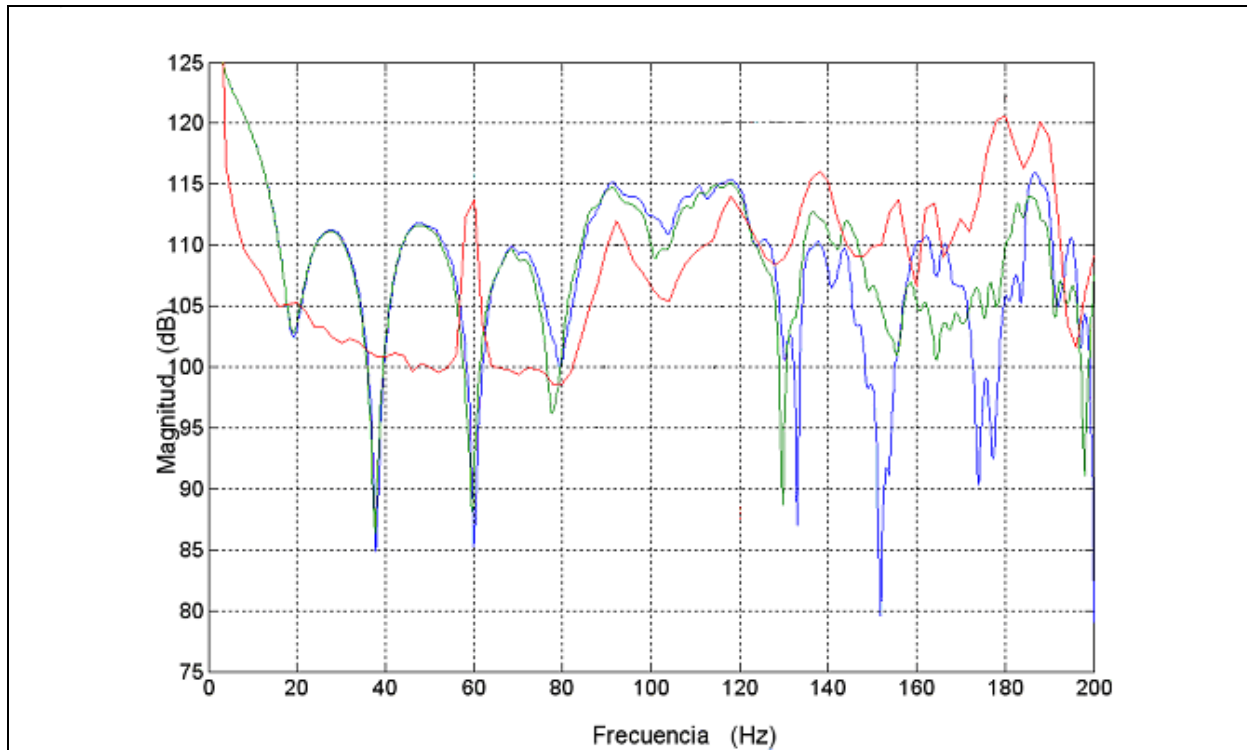


Fig. 4.10: Respuesta en frecuencia obtenida de las simulaciones con CATT-Acoustic (azul: oído izquierdo y verde: oído derecho) y por medio de las mediciones realizadas (rojo), correspondiente a la esquina superior izquierda del muro posterior (Posición 1 en la Fig 4.8).

Las diferencias entre las gráficas obtenidas con el CATT (en azul y verde), se deben a que hay una separación espacial entre los oídos de la HRTF y algunos modos se perciben más fuertes o más débiles según la posición y también al efecto mismo de la esfera que simula la cabeza del receptor.

En bajas frecuencias, debajo de la banda de 125 Hz, los valores entregados por el CATT no son válidos debido a que la dicha banda es la más baja analizada por este programa. Como puede observarse en la gráfica de la Fig. 4.10, existe una cierta similitud entre las curvas del CATT y la de la medición, pero a juzgar por las diferencias que hay en otras regiones, podría decirse que estas similitudes son fortuitas; no se conoce exactamente el funcionamiento del programa CATT con relación a cómo son tratados los fenómenos de difracción y superposición de ondas, pero es muy probable que no permita identificar el efecto individual de los modos, ya que se basa principalmente en el método de trazado de rayos e imágenes y la información es procesada en términos de bandas de ancho de una

octava, siendo la de 125 Hz la banda de frecuencia más baja considerada en el programa. Se puede concluir que el análisis modal se debe basar principalmente en las mediciones y los cálculos teóricos.

La Fig 4.10 hace una comparación sólo en una de las posiciones consideradas en las mediciones. Las simulaciones obtenidas para las otras dos posiciones (esquina inferior y centro del recinto) difieren aún más de las curvas obtenidas en la medición, por lo que no se consideró necesario incluirlas.

Por otra parte, el programa CATT puede utilizarse confiablemente en el cálculo de otros parámetros acústicos. Esta afirmación se basa en la comparación de los tiempos de reverberación medidos y los obtenidos en la simulación en las bandas de 125 y 250 Hz, cuya diferencia es muy pequeña (ver Fig. 4.12).

4.4.3.3 Discusión de resultados

Debido a que la banda más baja en el programa CATT es la de 125 Hz, la información de la respuesta en frecuencia que esté por debajo de la frecuencia de corte de esta banda (88 Hz), no será útil para el análisis del recinto, ya que dicha información no es válida.

Por otra parte, el diseño del software está orientado a recintos más grandes que el analizado en este trabajo, como consecuencia, con el estudio de un recinto de pequeñas dimensiones se han observado varias inconsistencias de los resultados obtenidos con este programa. Llevar los algoritmos del CATT a estos extremos nos permite concluir que no es 100% confiable en bajas frecuencias para el recinto considerado, específicamente en la banda de una octava de 125 Hz y bajo las condiciones mencionadas, o en un momento dado, se deben interpretar los datos tomando en cuenta las limitaciones del método de trazado de rayos y el hecho de que la densidad modal es muy pequeña.

También es importante resaltar que los tiempos de reverberación obtenidos con la computadora presentan un patrón con respecto a la frecuencia ligeramente distinto a los reales; el patrón obtenido en las mediciones tiene forma de parábola invertida, lo cual es esperado, pues en general, la absorción de los materiales en frecuencias muy bajas o muy altas tiende a ser mayor que en la zona de frecuencias medias, sin embargo, la simulación arroja valores que tienden a aumentar con la frecuencia (aunque se aprecia una ligera disminución en 1kHz). Las siguientes figuras muestran las diferencias mencionadas.

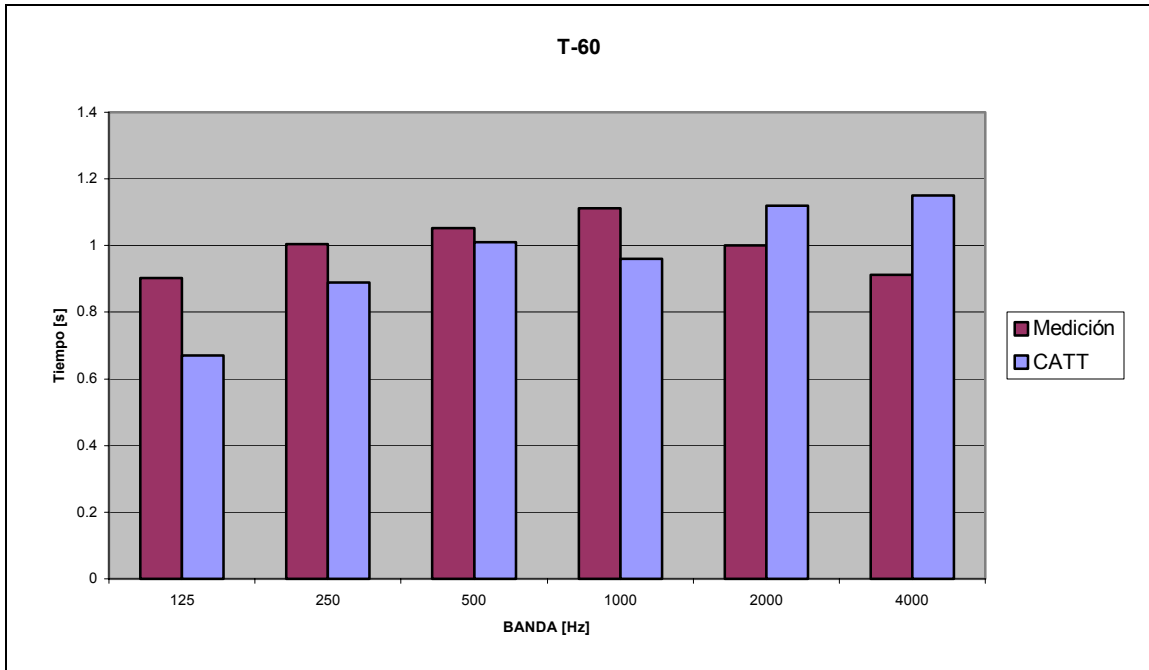


Fig. 4.11: Comparación de los tiempos de reverberación T-60 obtenidos en la medición (barras de la izquierda), y con el CATT (barras de la derecha).

Los valores de T-60 que más se aproximan entre sí, son los correspondientes a las bandas de 250 y 500 Hz, mientras que para T-30, las bandas de 125, 250, 500 y 1000Hz, son muy cercanos (ver Fig. 4.16).

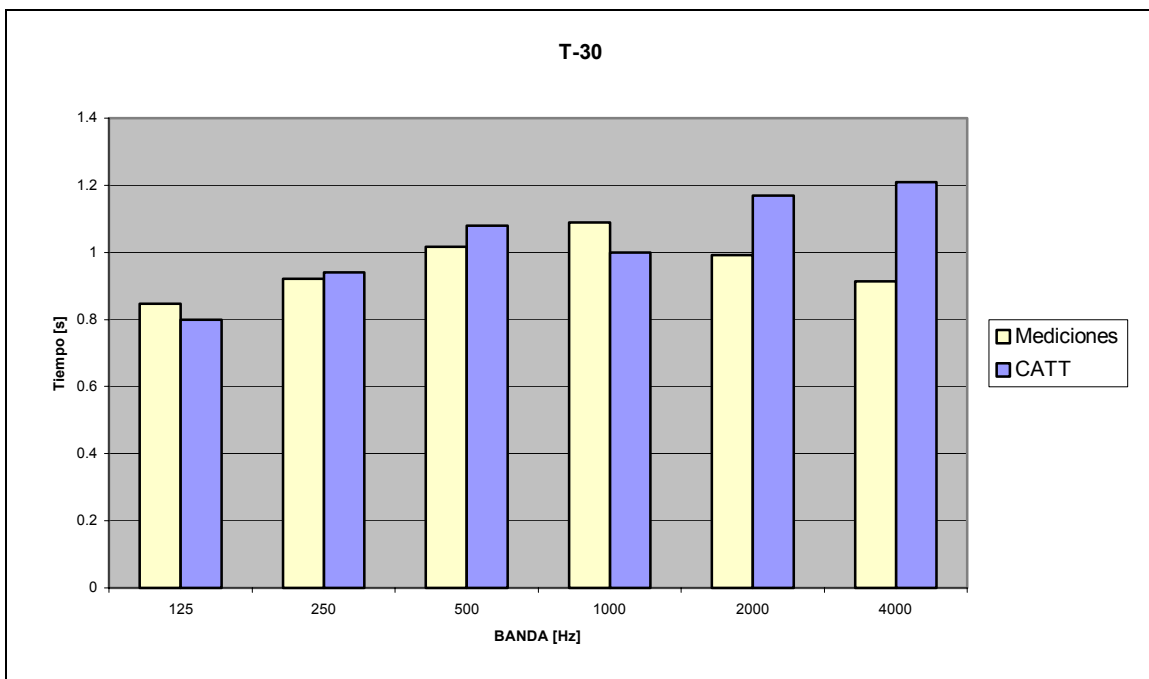


Fig. 4.12: Comparación de los tiempos de reverberación T-30 obtenidos en la medición (barras de la izquierda), y con el CATT (barras de la derecha).

Normalmente los tiempos de reverberación tienen sus máximos en frecuencias bajas o intermedias, aquí se observa que dichos máximos no coinciden. Para las mediciones el máximo está en la banda de 1000 Hz, mientras que para el CATT ocurre en 4000 Hz. El motivo más probable de las diferencias en altas frecuencias, es que los valores para el coeficiente de absorción de los materiales encontrados en tablas, y asignados al modelo de simulación, no sean exactamente los que se tienen físicamente. Puede concluirse que los valores experimentales y los obtenidos con las simulaciones presentan pequeñas diferencias en algunas bandas, pero que existe una muy buena concordancia entre esos valores. Por lo tanto los tiempos de reverberación de las simulaciones son altamente confiables para el caso del recinto tratado.

Durante el desarrollo de la propuesta de acondicionamiento de este cuarto se deben tomar en cuenta las discrepancias observadas entre los valores reales y los valores calculados, de tal manera que no afecten de manera significativa al desempeño del recinto una vez implementado el acondicionamiento.

Un beneficio adicional de estas comparaciones fue comprobar que hay un problema de ruido en 60Hz, esto se aprecia en todas las respuestas en frecuencia obtenidas.

4.5 Evaluación del recinto sin acondicionar

A partir del punto anterior, se pudo advertir hasta qué grado son confiables los resultados de las simulaciones y qué consideraciones se deberían hacer antes de interpretar los resultados del mismo. Se realizó la simulación del recinto con todos los muebles y equipo que se utilizarán en el estudio pero en las condiciones actuales del cuarto, es decir, sin ningún acondicionamiento acústico. Al igual que en la simulación del cuarto vacío, se han evaluado varios parámetros acústicos en 6 puntos diferentes del recinto, intentando cubrir el área en donde es más probable que se sitúe el operador del estudio durante el desempeño de su trabajo (ver Fig 4.17).

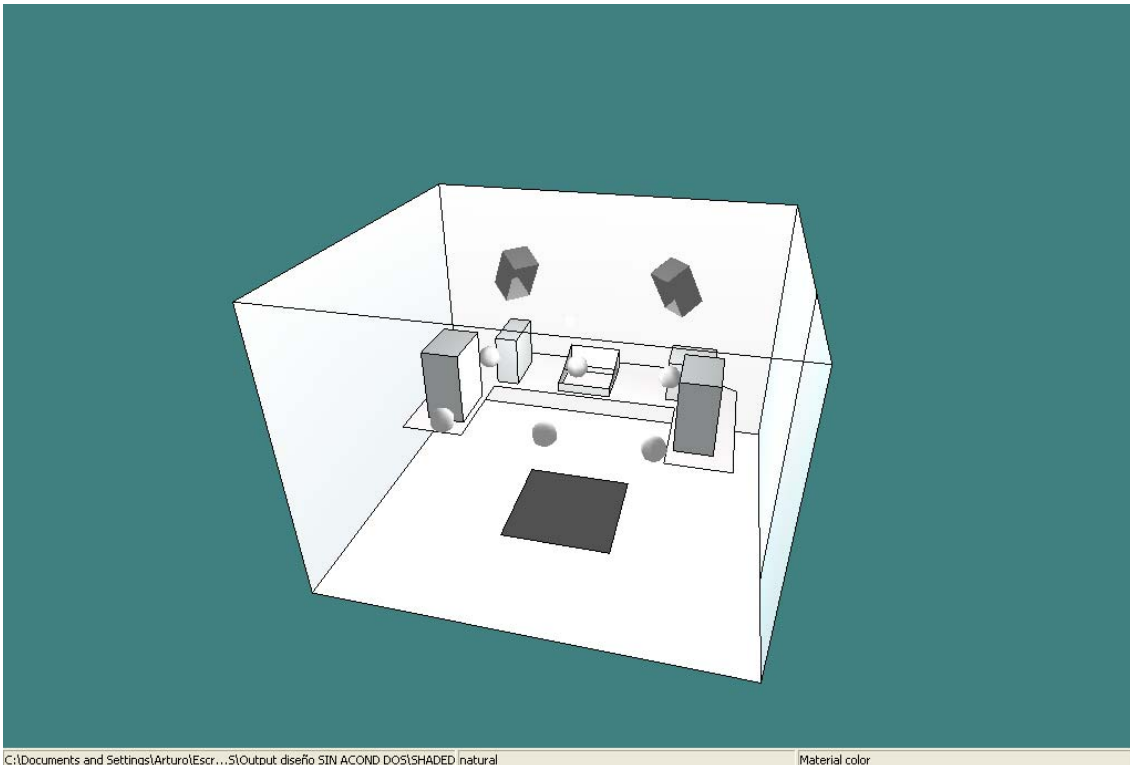


Fig. 4.13: Disposición del equipo, altavoces y receptores (esferas) dentro del recinto.

En la Fig. 4.13, se muestra la posible disposición del equipo que se usará en la masterización de las grabaciones, la ubicación de las bocinas y los puntos donde se colocaron los receptores para la simulación; al frente se colocó el CPU, la consola y el monitor de la computadora, a los lados se encuentran los racks que contienen los aparatos de grabación y reproducción. El programa CATT recomienda que, en lugar de modelar la audiencia detallada (por ejemplo, sillas y personas), ésta sea representada por una superficie cuyo coeficiente de absorción sea el de personas sentadas en sus asientos. El rectángulo que

aparece en el piso, representa la superficie equivalente a la silla y operador, y se le ha asignado también un valor de absorción según las tablas consultadas²⁹.

BANDAS [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
COEFICIENTE α	0.27	0.53	0.67	0.93	0.87	0.8

TABLA 4.5: Coeficientes de absorción de una persona sentada en una silla tapizada por bandas de una octava.

Los resultados que se analizan corresponden a la simulación por software, excepto:

- Los niveles de ruido, que fueron medidos *in situ*, y
- Los modos propios del recinto, calculados matemáticamente

4.5.1 Niveles de ruido

Las tablas que se muestran a continuación, contienen un concentrado por bandas de una octava calculados a partir de la información en tercios de octava obtenida durante las mediciones *in situ*.

BANDA [Hz]	Niveles de presión sonora [dB]					
	POSICIÓN 1	POSICIÓN 2	POSICIÓN 3	POSICIÓN 4	POSICIÓN 5	POSICIÓN 6
63	38.81	50.12	49.22	47.36	48.65	50.34
125	45.78	43.75	43.14	47.27	44.13	42.39
250	43.66	44.53	49.49	60.77	55.97	44.98
500	41.6	42	40.37	46.15	48.35	41.17
1000	39.09	36.48	35.67	38.27	38.91	39.1
2000	35.25	33.2	33.1	30.61	32.11	35.05
4000	31.7	28.26	28.13	23.69	24.04	31.05
8000	26.65	21.61	18.3	17.01	17.53	20.51
	NC - 40	NC - 40	NC - 40	NC - 55	NC - 50	NC - 40

TABLA. 4.6: Niveles de ruido dentro del recinto para distintas posiciones (ver Figs. 4.3 y 4.4) por bandas de una octava, y curva NC con que cumple cada posición.

²⁹ Recuero López, Manuel. *Ingeniería Acústica*. Ed. Paraninfo, 2000.

Cox, Trevor J. & D'Antonio, Peter. *Op Cit*.

Recuero López, Manuel. *Estudios y Controles para Grabación Sonora*. I P N. México, 1991.

BANDA [Hz]	Niveles de presión sonora [dB]		
	POSICIÓN 7	POSICIÓN 8	POSICIÓN 9
63	53.47	57.78	53.58
125	54.02	49.03	48.4
250	55.23	49.98	47.31
500	50.11	50.59	48.57
1000	49.3	45.52	45.02
2000	46.03	41.72	40.07
4000	40.83	40.2	34.47
8000	36.15	33.23	28.29
	NC - 50	NC - 45	NC - 45

TABLA. 4.7: Niveles de ruido para tres posiciones fuera del cuarto y curvas NC con que cumple cada posición.

BANDA [Hz]	Niveles de presión sonora [dB]		
	PROMEDIO 1-6 Puntos interiores	PROMEDIO 7-9 Puntos exteriores	Diferencia entre el exterior y el interior
63	48.55	55.44	6.89
125	44.74	51.26	6.52
250	54.68	52.1	-2.58
500	44.36	49.84	5.48
1000	38.11	47.06	8.95
2000	33.51	43.36	9.85
4000	28.81	39.27	10.46
8000	21.73	33.62	11.89
	NC - 45	NC - 45	

TABLA. 4.8: Promedio de niveles de ruido dentro y fuera del cuarto respectivamente, y curvas NC a las que corresponden los niveles de ruido.

En la tabla 4.6 se pueden ver algunas variaciones en el valor de la curva NC con que cumple cada posición dentro del recinto, sobretodo en la posición 4, donde hubo un valor muy alto para la banda de 250Hz.

La tabla 4.7 muestra los niveles de ruido en el exterior, en general más altos que en el interior; se observa que el aislamiento que proporcionan las paredes resulta relativamente pequeño e inapropiado.

La tabla 4.8 muestra el nivel de presión sonora promedio en las posiciones dentro y fuera del cuarto, y las curvas NC a que corresponden esos promedios, que en este caso coinciden (NC - 45) debido a los valores de la banda de 250 Hz. La tercera columna de esta tabla, muestra la diferencia en decibeles entre las dos columnas anteriores, con lo que se tiene el aislamiento al ruido dentro del cuarto, que como puede verse, es insuficiente (obsérvese además que las curvas NC coinciden dentro y fuera del recinto).

4.5.2 Tiempo de reverberación

Gráficas de decaimiento

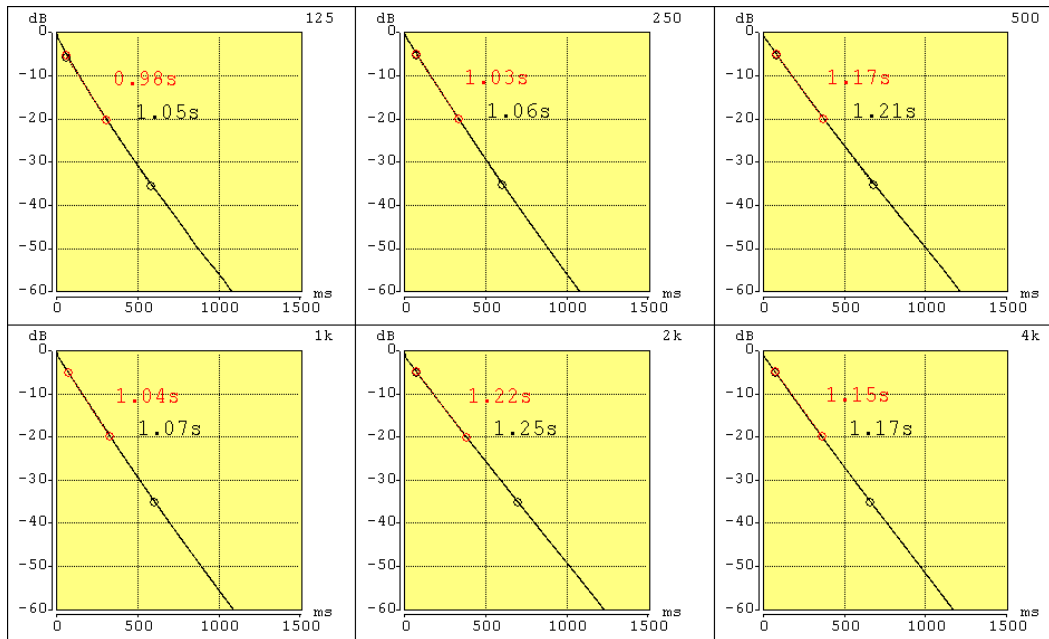


Fig. 4.14: Ejemplo de gráfico obtenido con el programa CATT del decaimiento de la energía para cada banda con respecto al tiempo, y el tiempo de reverberación T-15 (valor superior) y T-30 (valor inferior).

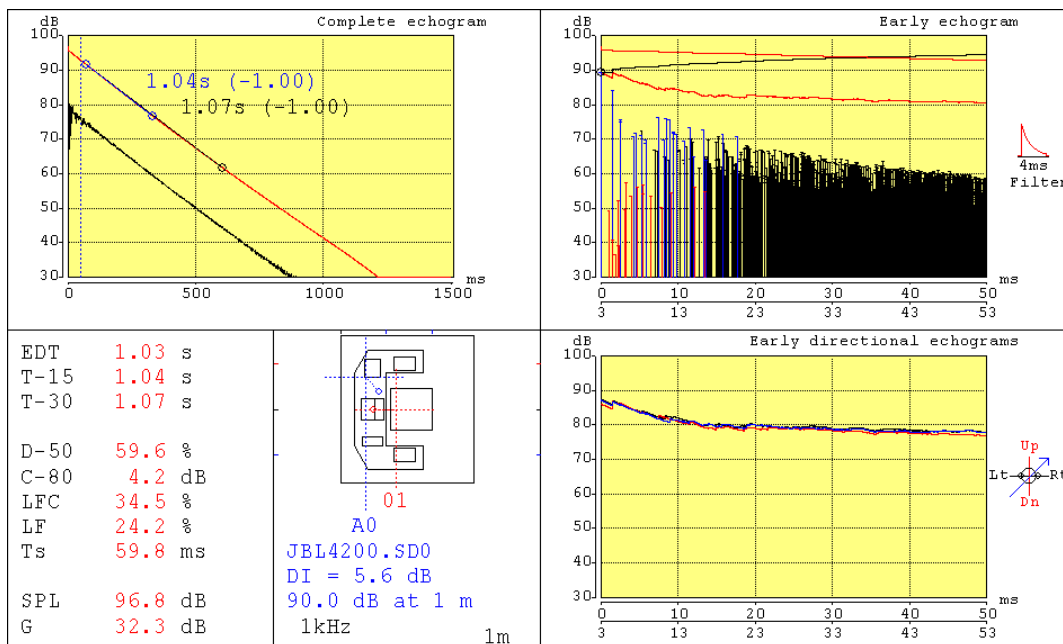


Fig. 4.15: Ejemplo de ecogramas para la banda de 1 kHz. Aparecen (de derecha a izquierda, y de arriba hacia abajo), el ecograma completo con los tiempos de reverberación T-30 (superior) y T-60, un ecograma temprano, diversos parámetros acústicos calculados para lo posición del receptor y fuente señalados y un ecograma que toma en cuenta la dirección de incidencia.

Las gráficas de las Figs. 4.14 y 4.15, constituyen un ejemplo de la manera en que el programa de simulación CATT entrega los resultados de sus estimaciones. A partir de estas gráficas, se han conjuntado los datos para todas las bandas en la siguiente tabla:

Resumen de resultados

Tiempos de reverberación						
BANDA [Hz]	POSICIÓN 1		POSICIÓN 2		POSICIÓN 3	
	T-15 [s]	T-30 [s]	T-15 [s]	T-30 [s]	T-15 [s]	T-30 [s]
125	0.975	1.06	0.965	1.065	0.975	1.07
250	1.03	1.06	1.03	1.06	1.03	1.06
500	1.17	1.205	1.17	1.21	1.17	1.21
1000	1.045	1.075	1.055	1.075	1.055	1.075
2000	1.225	1.25	1.235	1.255	1.24	1.255
4000	1.155	1.175	1.16	1.18	1.16	1.18

POSICIÓN 4		POSICIÓN 5		POSICIÓN 6	
T-15 [s]	T-30 [s]	T-15 [s]	T-30 [s]	T-15 [s]	T-30 [s]
0.985	1.065	0.97	1.07	0.975	1.075
1.04	1.06	1.04	1.06	1.04	1.06
1.17	1.21	1.175	1.21	1.18	1.21
1.045	1.075	1.055	1.075	1.055	1.075
1.235	1.255	1.235	1.255	1.24	1.255
1.16	1.18	1.16	1.18	1.16	1.18

TABLA. 4.9: Tiempos de reverberación T-15 y T-30 obtenidos con el programa CATT para distintas posiciones.

Los valores de tiempo de reverberación no varían sustancialmente entre una posición y otra, sin embargo, se ha hecho el promedio de dichos valores para las seis posiciones analizadas:

CATT	PROMEDIO	PROMEDIO	PROMEDIO	PROMEDIO
BANDA	T-60 [s]	T-30 [s]	T-15 [s]	Eyring [s]
125	0.79	1.068	0.974	0.78
250	0.97	1.06	1.035	0.98
500	1.08	1.209	1.173	1.105
1000	0.98	1.075	1.052	1
2000	1.15	1.254	1.233	1.18
4000	1.08	1.179	1.159	1.11
PROMEDIO	1	1.14	1.1	1.03

TABLA. 4.10: Valores promedio de distintos parámetros para evaluar el tiempo de reverberación.

Además de los promedios de T-15 y T-30, se han añadido en la tabla 4.10 los valores promedio de T-60 y el tiempo de reverberación de Eyring, obtenidos también con el programa CATT, pero como un promedio general (por fórmula), y que no dependen del lugar donde se ubiquen los receptores. Es por tanto una aproximación un tanto burda para los fines de este trabajo.

4.5.3 Reflexiones tempranas y su dirección de incidencia

Los diagramas que a continuación se muestran contienen la información de incidencia espacial del sonido dentro de los intervalos de tiempo señalados. El número en porcentaje que se proporciona corresponde a la relación entre la energía recibida para cada plano y el total de la energía recibida en ese intervalo de tiempo. Los diagramas presentados son los obtenidos únicamente con el altavoz derecho; se han omitido los que corresponden al altavoz izquierdo ya que, debido a las condiciones de simetría del cuarto y la distribución del equipo, son prácticamente iguales.

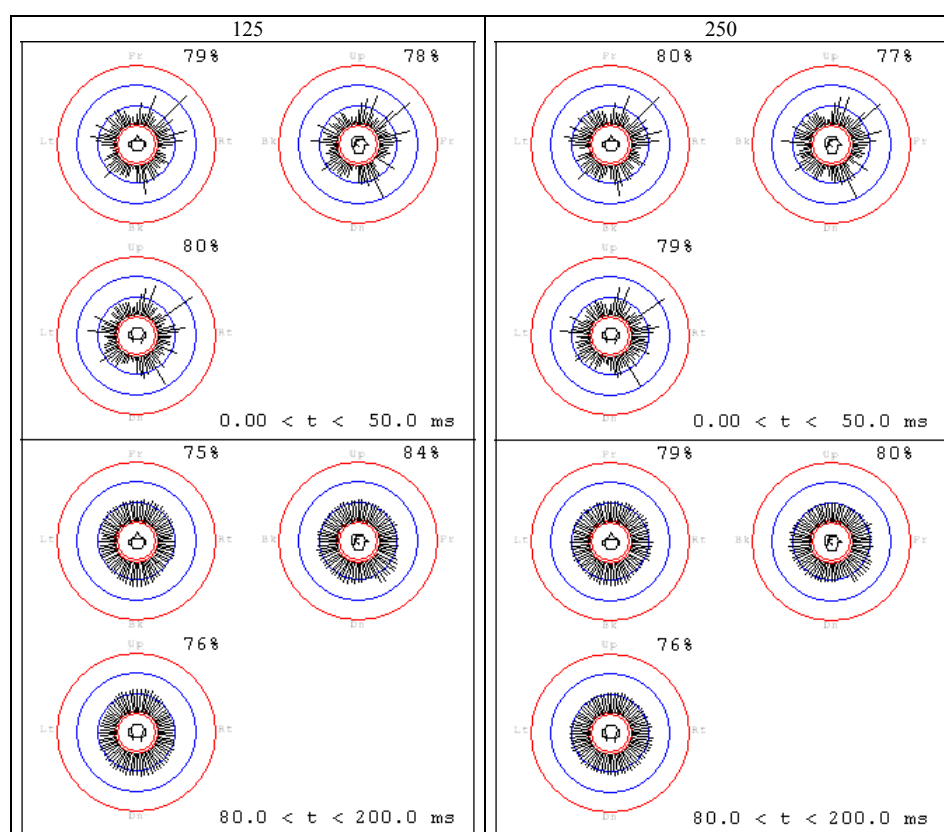


Fig. 4.16: Patrón de incidencia para las bandas de 125 y 250Hz. Para cada intervalo de tiempo se muestran tres gráficos, correspondientes a la vista superior, lateral y posterior de la cabeza del receptor. El número en porcentaje indica la razón entre recibida en cada plano y el total de la energía en el intervalo señalado.

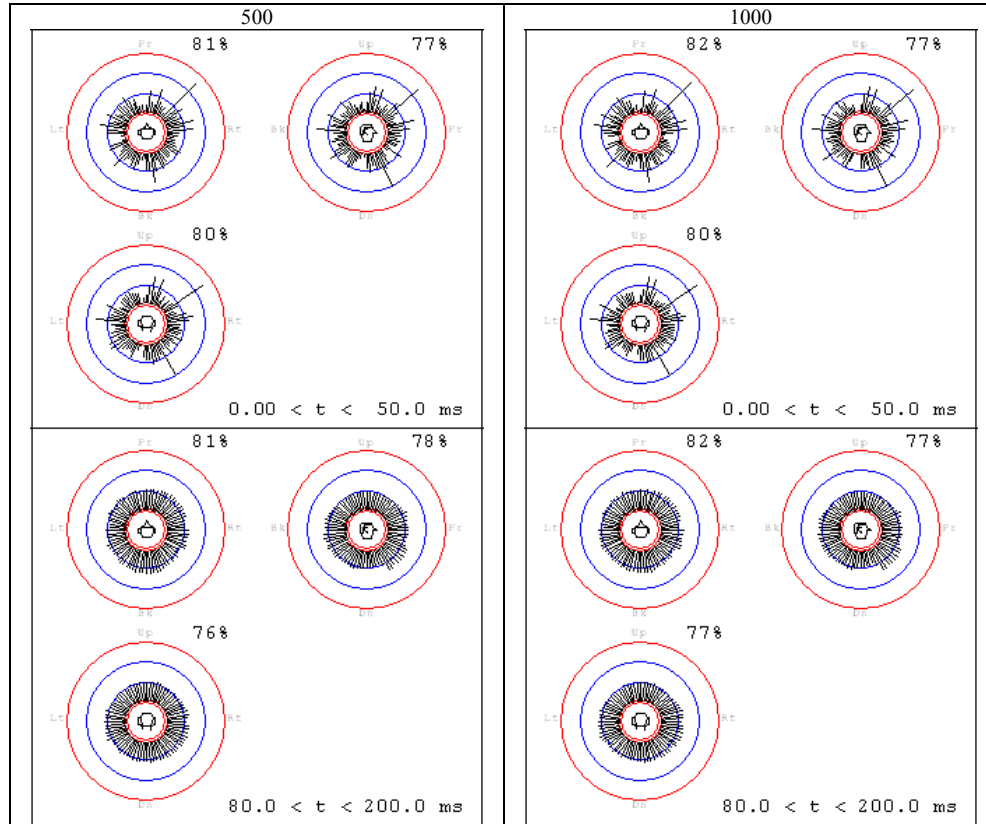


Fig. 4.17: Patrón de incidencia para las bandas de 2000 y 4000Hz. Para cada intervalo de tiempo se muestran tres gráficos, correspondientes a la vista superior, lateral y posterior de la cabeza del receptor. El número en porcentaje indica la razón entre recibida en cada plano y el total de la energía en el intervalo señalado.

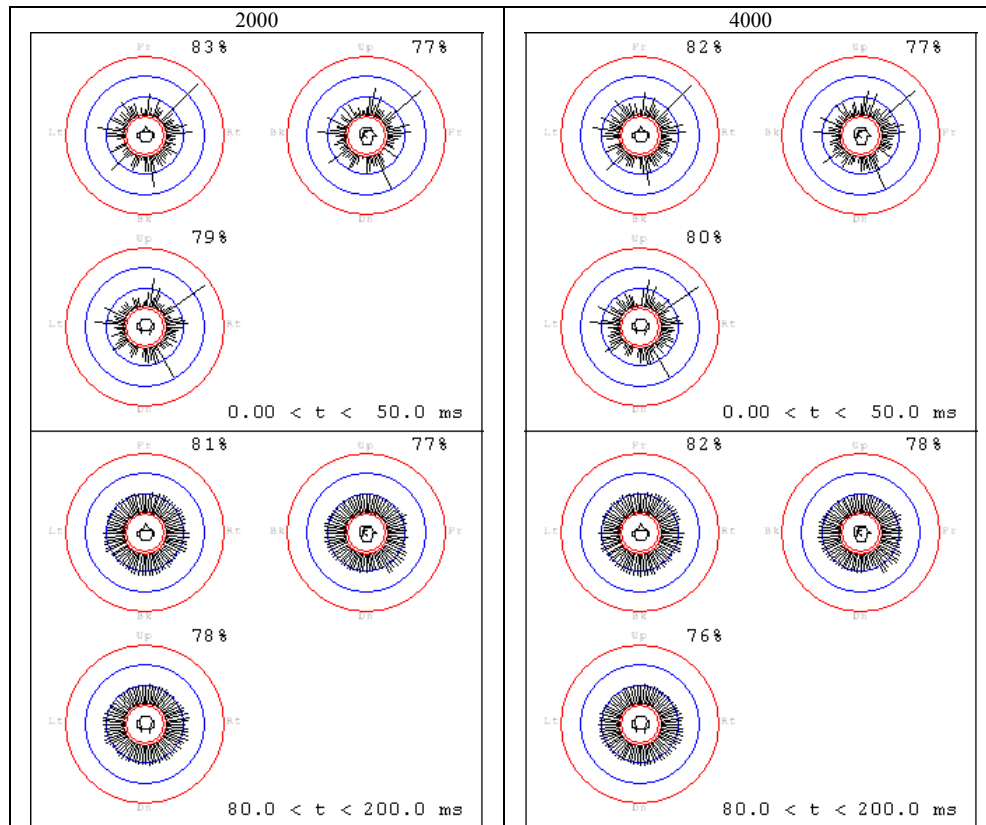


Fig. 4.18: Patrón de incidencia para las bandas de 2000 y 4000Hz. Para cada intervalo de tiempo se muestran tres gráficos, correspondientes a la vista superior, lateral y posterior de la cabeza del receptor. El número en porcentaje indica la razón entre recibida en cada plano y el total de la energía en el intervalo señalado.

En el intervalo de 0 a 50 ms se aprecia en todas las bandas que hay bastantes reflexiones laterales, mismas que son importantes para enfatizar la sensación de espacialidad, más aún, en el intervalo siguiente (80-200 ms), el campo ya es prácticamente uniforme en todas las bandas y en todos los planos.

4.5.4 Modos del recinto

La tabla siguiente, muestra los modos propios del recinto hasta 200Hz, calculados a partir de la ecuación de onda. Se ha asumido que el recinto tiene paredes rígidas y está vacío:

	nx	ny	nz	FRECUENCIA(Hz)	AXIAL	TAN	OBL
1	1	0	0	53.12	☒		
2	0	1	0	58.62	☒		
3	0	0	1	73.91	☒		
4	1	1	0	79.11		☒	
5	1	0	1	91.02		☒	
6	0	1	1	94.34		☒	
7	2	0	0	106.25	☒		
8	1	1	1	108.27			☒
9	0	2	0	117.24	☒		
10	2	1	0	121.35		☒	
11	1	2	0	128.71		☒	
12	2	0	1	129.43		☒	
13	0	2	1	138.59		☒	
14	2	1	1	142.09			☒
15	0	0	2	147.83	☒		
16	1	2	1	148.42			☒
17	1	0	2	157.08		☒	
18	2	2	0	158.22		☒	
19	0	1	2	159.02		☒	
20	3	0	0	159.37	☒		
21	1	1	2	167.66			☒
22	3	1	0	169.81		☒	
23	2	2	1	174.64			☒
24	3	0	1	175.68		☒	
25	0	3	0	175.86	☒		
26	2	0	2	182.05		☒	
27	1	3	0	183.71		☒	
28	3	1	1	185.20			☒
29	0	2	2	188.67		☒	
30	0	3	1	190.76		☒	
31	2	1	2	191.25			☒
32	1	2	2	196.01			☒
33	3	2	0	197.85		☒	
34	1	3	1	198.02			☒

TABLA. 4.11: Modos normales de vibración. Se indica el número de modo, la frecuencia propia y la naturaleza del mismo.

Se han sombreado algunas líneas dentro de la tabla con el fin de destacar grupos de frecuencias propias relativamente cercanas y que posiblemente refuerzan la respuesta en frecuencia. Por ejemplo, los primeros modos se encuentran muy separados unos de otros.

La revisión de los modos del recinto a través de la tabla 4.11 incluye frecuencias por debajo de la banda de 125 Hz. De esta forma se complementa la información sobre la distribución de la presión sonora en el interior del recinto que se muestra en el siguiente apartado (4.6.5), misma que fue obtenida con el programa de simulación, y cuya banda más baja es la de 125Hz (88 a 176 Hz). Se deberá entonces considerar también el hecho de que hay poca uniformidad en el campo sonoro a muy bajas frecuencias.

4.5.5 Nivel de presión sonora

Las figuras que se muestran en este apartado, corresponden a la presión sonora en dB para intervalos de tiempo de 0 a 20 ms y de 20 a 50 ms³⁰. En todas las figuras la altura del mapeo es de 1.20m sobre el nivel del piso, es decir, coincidente con la altura promedio a la que se encuentra la cabeza de un adulto sentado.

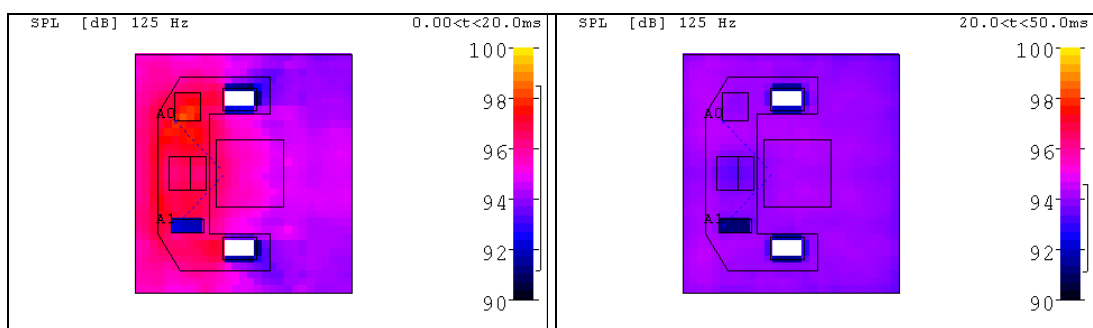


Fig. 4.19: Distribución de la presión sonora en el plano horizontal a 1.20 m sobre el piso en la banda de 125Hz, para intervalos de 0 a 20 y de 20 a 50 ms (vista superior).

POSICIÓN	SPL [dB] a 125Hz
1	97.65
2	97.11
3	97.21
4	97.05
5	97
6	96.9

TABLA. 4.12: Promedio espacial y temporal del SPL para las posiciones que se estudiaron.

El rango de valores de presión, por ejemplo, para la gráfica de 0 a 20 ms de la Fig. 4.19, es de 91 a 99 dB según la escala de la derecha, sin embargo, los valores cerca de los objetos no son confiables, por lo que se ha decidido ignorar los valores alrededor de los mismos.

³⁰ Para una buena interpretación de este tipo de gráficos es importante atender a la escala de colores que aparece al lado derecho ya que es diferente para cada gráfica.

Así, el rango de valores válidos en la gráfica de 0 a 20 ms va ahora de 92 a 99 dB. Esta misma suposición se hará también para las gráficas subsecuentes.

En el intervalo de 0 a 20 ms el campo aún no es homogéneo, sin embargo, hay pocas variaciones dentro de la zona del operador. Para el segundo intervalo (20 a 50 ms), el rango de valores de presión se reduce considerablemente, lo que significa que el campo ya es bastante homogéneo. Estas observaciones son corroboradas por la Tabla 4.12, cuyos valores son muy cercanos para las posiciones del operador.

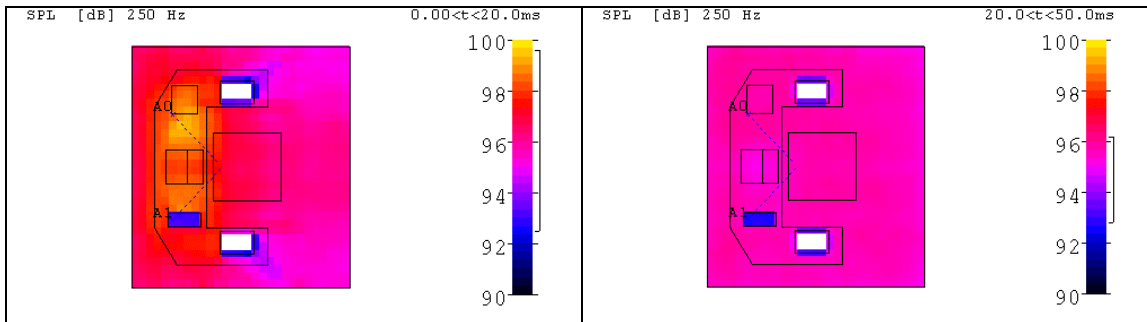


Fig. 4.20: Distribución de la presión sonora en el plano horizontal a 1.20 m sobre el piso en la banda de 250Hz, para intervalos de 0 a 20 y de 20 a 50 ms (vista superior).

POSICIÓN	SPL [dB] a 250 Hz
1	99.4
2	99.16
3	99.27
4	99
5	99
6	98.9

TABLA. 4.13: Promedio espacial y temporal del SPL para las posiciones que se estudiaron.

El rango de valores de la primera gráfica de la Fig. 4.20 es de 94 a 99 dB, y sólo se aprecian variaciones en el campo atrás de los racks y sobre la mesa, pero estas ubicaciones no interfieren con la zona del operador. Para el segundo intervalo, el campo es prácticamente uniforme. En la tabla 4.13 los valores también son prácticamente iguales.

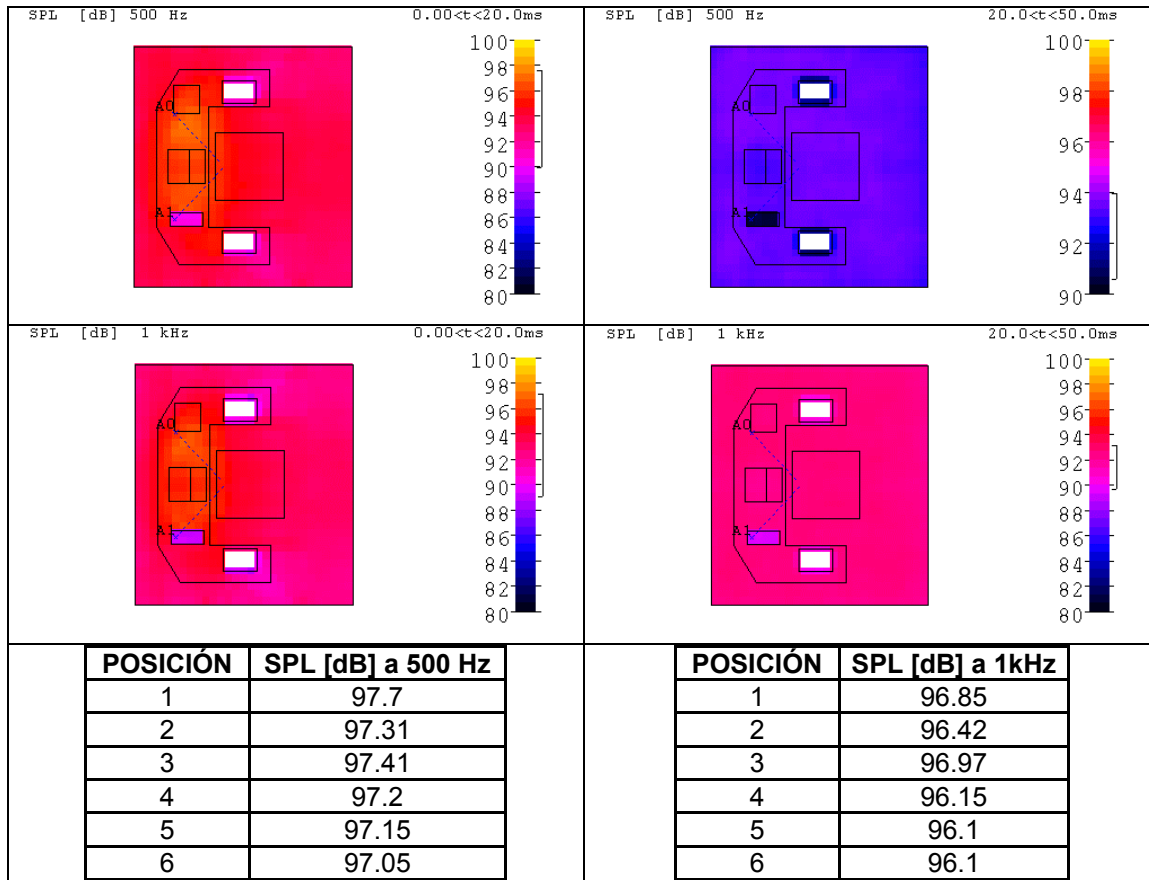


Fig. 4.21: Distribución de la presión sonora en el plano horizontal a 1.20 m sobre el piso en las bandas de 500 y 1000Hz, para intervalos de 0 a 20 y de 20 a 50 ms (vista superior) y Tablas con promedio espacial y temporal del SPL para las posiciones que se estudiaron.

Para las bandas de 500 y 1000 Hz (Fig. 4.21), se observa un campo homogéneo, prácticamente desde el primer intervalo.

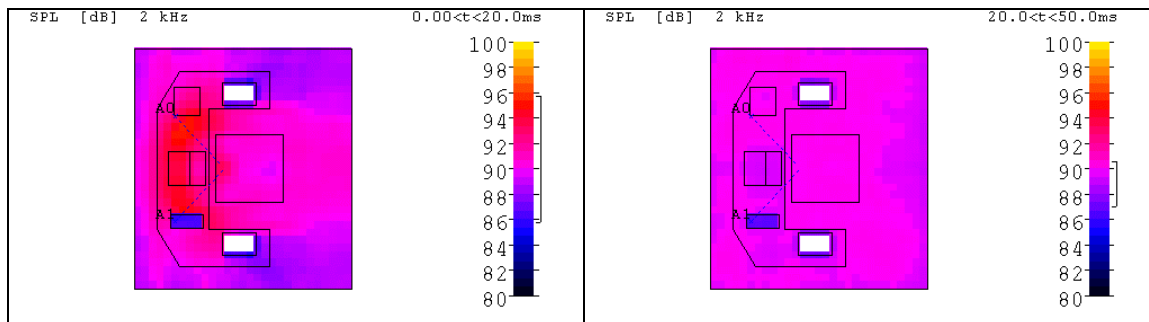


Fig. 4.22: Distribución de la presión sonora en el plano horizontal a 1.20 m sobre el piso en la banda de 2000Hz, para intervalos de 0 a 20 y de 20 a 50 ms (vista superior).

POSICIÓN	SPL [dB] a 2kHz
1	95.05
2	94.31
3	94.36
4	93.9
5	93.86
6	93.82

TABLA. 4.14: Promedio espacial y temporal del SPL para las posiciones que se estudiaron.

En la Fig. 4.22 se observa que el rango de la presión sonora vuelve a aumentar y la sombra acústica detrás de los racks se acentúa porque las ondas a estas frecuencias son más direccionales y pierden su capacidad de rodear obstáculos puesto que su longitud de onda es del orden de 0.17m.

El campo se vuelve uniforme hasta el segundo intervalo de la Fig. 4.25.

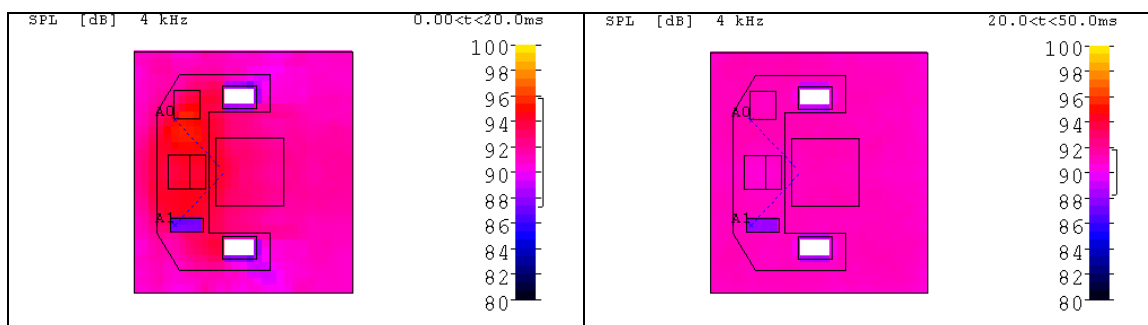


Fig. 4.23: Distribución de la presión sonora en el plano horizontal a 1.20 m sobre el piso en la banda de 4000Hz, para intervalos de 0 a 20 y de 20 a 50 ms (vista superior).

POSICIÓN	SPL [dB] a 4kHz
1	95.9
2	95.26
3	95.26
4	95
5	94.96
6	94.95

TABLA. 4.15: Promedio espacial y temporal del SPL para las posiciones que se estudiaron.

El campo que muestra la Fig. 4.23 es bastante uniforme a pesar de que estas frecuencias son las de longitud de onda más pequeña (alrededor de 0.08m) y los objetos representan barreras acústicas. Esto es atribuible al hecho de que la absorción promedio del cuarto a altas frecuencias es muy pobre, con lo que los rayos (la simulación se basa en el método de trazado de rayos), pierden poca energía en cada colisión, manteniendo así un nivel de energía alto.

4.5.6 Eficiencia lateral (LF)

La siguiente tabla muestra un resumen de los valores de LF (Lateral Fraction) según la posición dentro del recinto.

Eficiencia Lateral (LF)						
POSICIÓN	125 [Hz]	250 [Hz]	500 [Hz]	1000 [Hz]	2000 [Hz]	4000 [Hz]
1	22.8	26.8	25.4	24.4	20.5	22.3
2	25	26.1	26.6	25.7	26.2	26.9
3	25.2	26.2	27	26.5	26.5	26.9
4	25.4	27.6	28.7	29.1	30.2	29.2
5	25.2	28.8	28.3	28.3	27.7	28
6	24.2	26.7	28.1	27.9	28.1	27.7
PROMEDIO	24.6	26.8	27.45	27	26.5	26.8
PROMEDIO DE LAS SEIS BANDAS: 26.53						
PROMEDIO DE LAS PRIMERAS CUATRO BANDAS: 33.09						

TABLA 4.16: Valores de LF en % por banda.

Se podría decir que para cada posición, el valor de LF es constante al aumentar la frecuencia, esta es una situación conveniente, ya que la sensación de espacialidad debida a las reflexiones laterales será consistente con respecto a la frecuencia.

En la parte inferior de la tabla aparecen dos promedios, uno para las seis bandas y otro para las primeras cuatro bandas. Estos valores se basan a su vez en el promedio de las seis posiciones. El primer promedio se da como un dato complementario, y para verificar que el valor de LF cumpla con los requerimientos mínimos. Sin embargo, los estudios realizados por varios investigadores³¹, indican que las bandas más significativas para evaluar este efecto son las cuatro primeras.

Entre más alto sea este valor, mejor será el efecto envolvente del sonido (o amplitud aparente de la fuente), sin embargo, es un valor que difícilmente superará el 50% puesto que es imposible, si los altavoces están al frente, que toda la energía llegue de forma lateral. Un valor aceptable para LF es 20%.

³¹ Beranek, Leo L. Et al, *Interaural cross-correlation (IACC), lateral fraction (LF), and low- and high-frequency sound levels (G) as measures of acoustical quality in concert halls*. JASA, 98 (1995) 2, 988.

4.5.7 Definición D-50

Las gráficas siguientes, muestran la distribución espacial del valor de D-50 dentro del recinto. La altura del plano de mapeo es de 1.2m (misma altura de un adulto sentado).

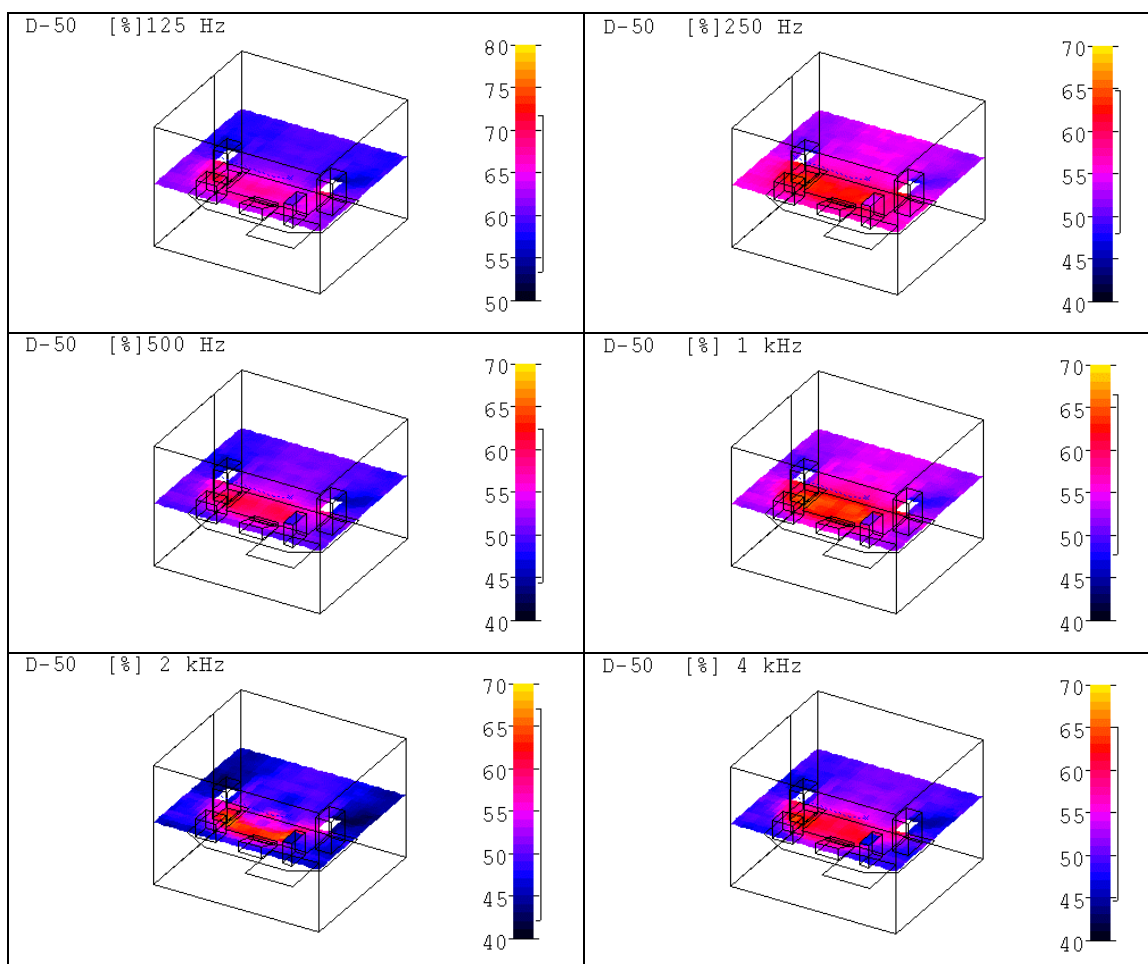


Fig. 4.24: Distribución espacial del valor de D-50 para las bandas de 125 a 4000Hz (vista desde esquina opuesta a la puerta).

La distribución espacial de este parámetro no es uniforme en todo el cuarto, pero sí lo es en la zona en que se ubicará el operador. Se espera que después del acondicionamiento se mantenga esta homogeneidad, o incluso, que se extienda a otras zonas.

La siguiente tabla muestra un resumen de los valores de definición para cada posición considerada dentro del recinto.

POSICIÓN	125 [Hz]	250 [Hz]	500 [Hz]	1000 [Hz]	2000 [Hz]	4000 [Hz]
1	63.1	56.25	54.4	59.3	59.1	58.25
2	61.15	57.15	54.85	57.45	52.95	54.1
3	61.1	56.25	53.05	57.2	52.6	53
4	57.1	51.7	48.35	52.1	45.95	47.8
5	57.65	52.65	48.4	52.6	46.5	48.35
6	57.75	52.65	49.05	52.95	46.2	49.15
PROMEDIO	59.64	54.44	51.35	55.27	50.55	51.78
PROMEDIO DE LAS 6 BANDAS: 53.84						

TABLA. 4.17: Valores de D-50 en % por banda.

La definición D-50 puede variar entre 0 y 100%. Al estar relacionado con la inteligibilidad, se desea que se incremente lo más posible, aunque un valor mayor a 50% puede ya considerarse como suficiente.

4.5.8 RASTI

Distribución espacial del RASTI con y sin ruido de fondo.

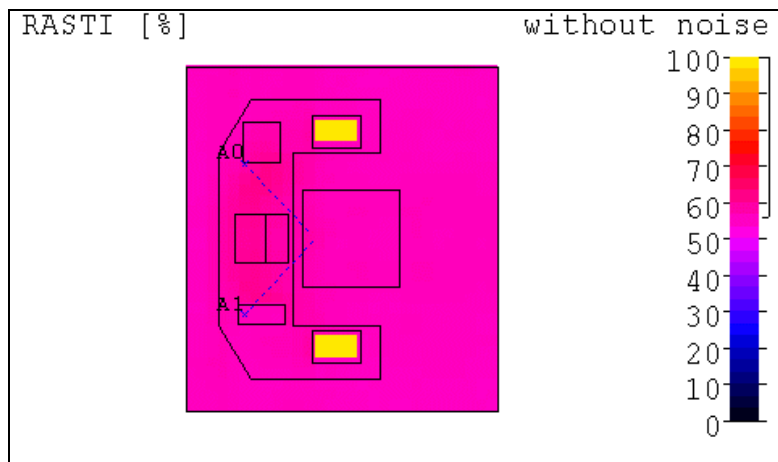


Fig. 4.25: Distribución espacial del valor del RASTI (%) sin ruido de fondo (vista superior).

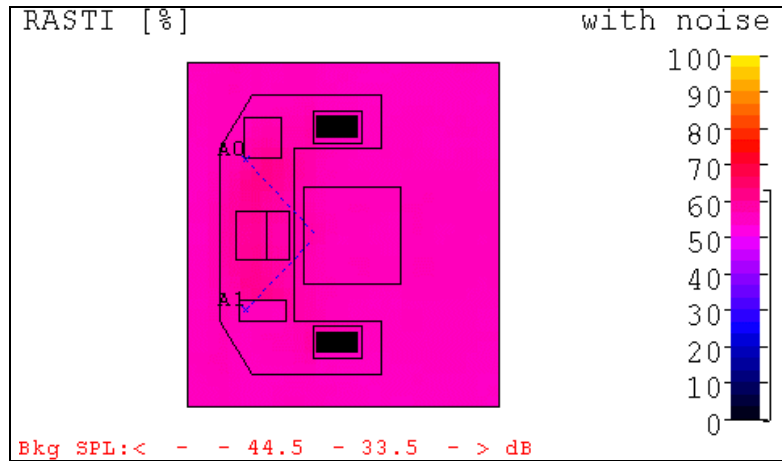


Fig. 4.26: Distribución espacial del valor del RASTI (%) con ruido de fondo. Los niveles de ruido considerados para 500 y 2000Hz respectivamente, se indican en la parte inferior.

Con o sin ruido, se tiene una distribución altamente homogénea de este parámetro, por lo que no hay problemas en cuanto a la ubicación de un receptor, prácticamente en cualquier lugar se tendría la misma inteligibilidad.

Valores del RASTI para cada posición considerada (eje horizontal)

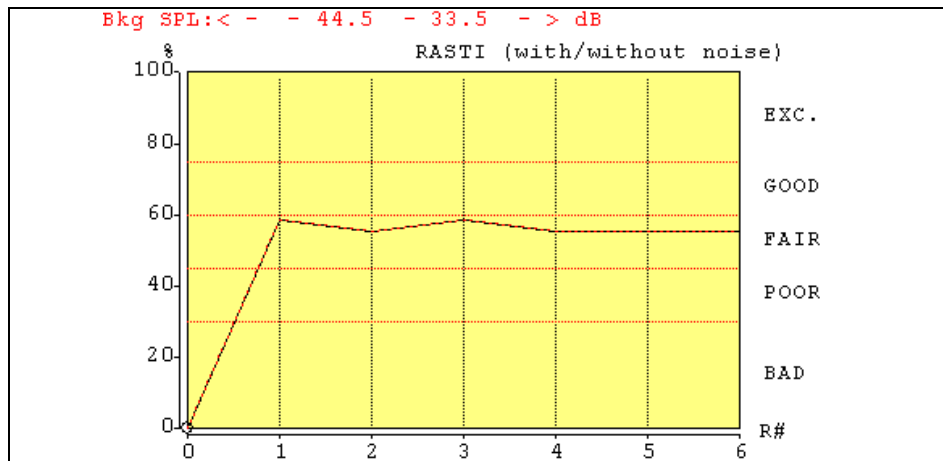


Fig. 4.27: Valor del RASTI (%) según la posición del receptor. A la derecha se encuentra la evaluación sugerida para cada rango de valores.

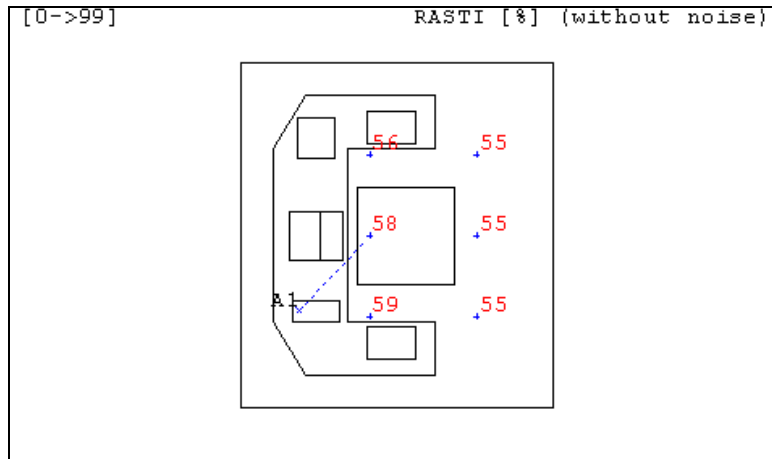


Fig. 4.28: Valores del RASTI en las posiciones analizadas (vista superior).

Los valores de este parámetro son apenas regulares, esto es atribuible a dos factores principalmente; primero, al tiempo de reverberación, cuyo valor es relativamente alto; segundo, a los niveles de ruido que se tienen dentro del recinto.

4.5.9 Resumen de resultados

A continuación se analiza la calidad acústica del cuarto con base en las tablas y resultados anteriores.

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR O INTERVALO MÍNIMO DESEADO	VALOR O INTERVALO ACTUAL	CALIFICACIÓN
T-60	[s]	0.3 a 0.5	1	Muy elevado (malo)
LF	%	≥ 20	33.09	Bueno
D-50	%	>50	53.84	Aceptable
RASTI	%	>75	56.3	Regular
RUIDO	[dB]	NC-20	NC-45	Malo

TABLA. 4.18: Resumen y análisis de resultados.

4.5.9.1 Observaciones

- La dirección de incidencia de las reflexiones tempranas (0 – 50 ms) está distribuída de manera bastante uniforme, es decir, hay suficientes incidencias en todas direcciones para todas las frecuencias. Más aún si se toma en cuenta que falta la superposición de los rayos debidos a la segunda bocina (omitida, como ya se explicó). Para el intervalo de 80 a 200 ms es claro que se ha alcanzado una distribución espacial homogénea del campo sonoro para cada una de las bandas de una octava, de la banda con frecuencia central de 125 Hz a la banda de 4000 Hz.

- La distribución sonora dentro del cuarto a la excitación de las bocinas es satisfactoria para las bandas que analizadas con el programa CATT (bandas con frecuencia central de 125 a 4000 Hz). La distribución de la presión sonora (SPL) resultó ser bastante homogénea desde los primeros milisegundos (0 – 20 ms), y prácticamente existe campo difuso en los siguientes instantes (20 – 50 ms). Sin embargo, por la distribución de los modos calculados matemáticamente, se sabe que hay problemas por debajo de la banda de 125 Hz ya que los modos se encuentran muy separados entre sí debajo de los 100 Hz (campo no uniforme), y hay una componente acentuada en 60 Hz. Es por ello que la información del programa CATT resulta insuficiente a frecuencias menores a alrededor de 100 Hz para nuestro caso particular, ya que la frecuencia de corte inferior de la banda de 125 Hz es de 88 Hz. Además de que aparentemente el programa CATT- Acoustic no permite observar el efecto aislado de modos de vibración.
- El tiempo de reverberación del recinto sin acondicionar es bastante alto para ser usado como estudio para masterización. Esta es una situación un tanto inesperada, pues siendo un recinto de dimensiones pequeñas, generalmente el tiempo de reverberación no es muy largo, esto se debe a que la absorción promedio de las superficies del recinto y los objetos es baja.
- El coeficiente de incidencia lateral (LF) está por encima de las especificaciones mínimas requeridas.
- La definición D-50 y el índice RASTI están directamente relacionados con la inteligibilidad. En el caso de D-50 se cuenta con un valor apenas aceptable, mientras que el RASTI alcanza solamente la categoría de regular, se espera que al reducir los tiempos de reverberación y los niveles de ruido de fondo, estos valores se incrementen considerablemente.
- El ruido presente dentro del recinto es muy alto en comparación con la curva NC requerida en un estudio de masterización.

4.6 Sugerencias para el acondicionamiento del recinto

Con base en el análisis anterior, existen tres aspectos esenciales para el correcto acondicionamiento de este recinto:

- Reducción de los niveles de ruido ambiental
- Reducción del tiempo de reverberación
- Evitar la presencia de los modos debajo de 100 Hz

Como consecuencia de la atención que se preste a estos tres puntos, otros parámetros acústicos se verán beneficiados.

En lo que concierne al ruido ambiental, hay que recordar que las mediciones se llevaron a cabo bajo las condiciones más hostiles: además del ruido habitual, los estudios adyacentes tenían las puertas abiertas debido al excesivo calor de la temporada en que se llevaron a cabo las mediciones³². Cuando los demás estudios están cerrados el ruido en el área se reduce considerablemente, por lo que la primera medida que se debe tomar para disminuir el ruido es la revisión, mantenimiento y/o cambio de los sistemas de enfriamiento ambiental dentro de cada uno de los estudios contiguos, con la finalidad de que bajo ninguna circunstancia se encuentren abiertos mientras están en operación.

Otra causa de transmisión de ruido es el “muro” donde se haya la entrada al cuarto. Más que un muro es tan sólo un cancel de cristal que permite una alta transmisión de los sonidos provenientes del exterior, además, la puerta no cierra herméticamente y tiene una rejilla en la parte inferior, por lo tanto, se requiere una puerta nueva que impida la transmisión de sonido a través de rendijas. Se sugiere también la construcción de un muro en el lugar del cancel de cristal ya que, además de reducir la transmisión de ruido al interior, se tendría la posibilidad de montar un difusor o material absorbente en esa frontera en caso de ser necesario.

El ruido causado por los pasos de usuarios en el pasillo puede atenuarse fácilmente colocando una alfombra en lugar del piso de hule que existe actualmente.

El ruido transmitido por la estructura se debe básicamente a las tuberías y a ocasionales portazos, estas vibraciones pueden viajar grandes distancias a través de estructuras sólidas. En el caso de las tuberías, dentro del cuarto, se escucha el sonido de la bomba de agua transmitido por las mismas. Para atenuar este efecto, se pueden colocar tramos de tubo de hule flexible entre las uniones de la bomba y la tubería correspondiente. El ruido de las puertas se puede evitar colocando tiras de hule en los marcos de las mismas.

Existe un problema de ruido en 60Hz como lo reveló el análisis de ruido y la respuesta en frecuencia. Este problema se tratará junto con los modos de muy bajas frecuencias.

³² Mediciones realizadas en época de primavera-verano

También se está considerando el control de ruido interno al cuarto, como el ruido del CPU. Para evitar este tipo de vibraciones, los aparatos que tengan ventilador pueden ser montados sobre bases que eviten la transmisión de vibraciones al mueble sobre el que están colocados.

Para reducir el tiempo de reverberación hasta el intervalo deseado, es necesario colocar material absorbente sobre algunas paredes del cuarto. Este material se colocará preferentemente en el techo, en la parte posterior y a los lados, respetando la zona donde se originan reflexiones laterales importantes para la sensación de espacialidad (LF, reflexiones tempranas, etc). Aún así, se colocará un panel reflejante de cada lado del cuarto y se reducirá la altura a la que están colocados los racks (para dejar camino libre a las reflexiones), con el fin de no perder el efecto de dichas reflexiones.

Debido a la implementación de los paneles laterales, la puerta tendrá que ser reubicada en la parte posterior del recinto.

Para la eliminación de los modos a bajas frecuencias normalmente se utiliza algún tipo de difusor. El problema en este caso es que se desea una buena difusión a muy bajas frecuencias³³, para lo cual, las dimensiones del difusor suelen ser muy grandes como para poder ser implementados en un cuarto tan pequeño.

Ya que geoméricamente no es posible eliminar el efecto de los modos de bajas frecuencias, se tiene como solución alternativa colocar material absorbente en las esquinas posteriores, que es donde se encuentran los máximos de presión de los modos, con el fin de atenuarlos. Las esquinas anteriores deben tratarse considerando que no deben eliminarse del todo las reflexiones que ahí ocurren pues forman parte de las reflexiones laterales necesarias para tener una sensación de espacialidad apropiada. Para evitar lo anterior se pueden colocar en las esquinas paneles cuya absorción sea muy alta en la cara que “ve” hacia la esquina y muy baja en la cara contraria, lo cual reflejaría más las frecuencias medias y alta, pero aumentaría la absorción de las bajas frecuencias debido al efecto de difracción.

Tube Trap® es un dispositivo comercial que sirve como absorbente y como resonador de Helmholtz al mismo tiempo, se trata de cilindros de dos a tres pies de altura y de diámetros de hasta 20 pulgadas. Estos cilindros deben colocarse preferentemente en las esquinas, donde la amplitud de la presión sonora es mayor, y donde es posible lograr una mejor absorción. El desempeño acústico de estos dispositivos es el siguiente³⁴:

³³ El campo ya es homogéneo en las demás bandas.

³⁴ Especificaciones completas en el Apéndice F.

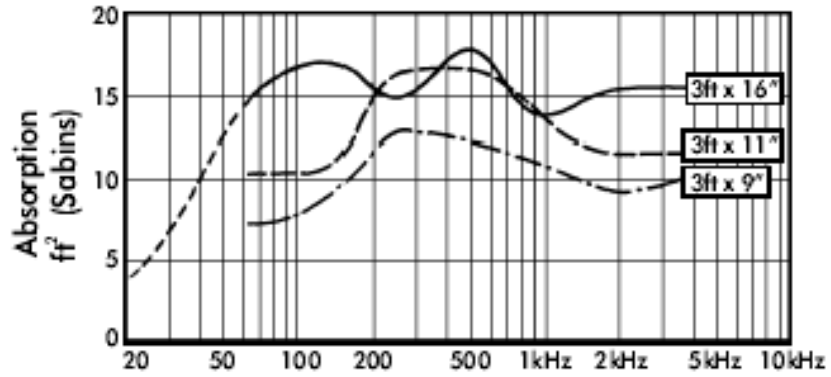


Fig. 4.29: Absorción vs. frecuencia para tres Tube Traps de diferentes diámetros.

Como puede verse en la figura anterior, a mayor diámetro, mayor absorción en bajas frecuencias, por lo que este dispositivo sería útil para atenuar el efecto de los modos a bajas frecuencias.

Se propone usar este dispositivo en conjunción con el material absorbente y los paneles suspendidos para solucionar el problema de los modos de oscilación.

4.7 Simulación del recinto acondicionado

Según lo observado en los apartados anteriores, se requiere reducir el tiempo de reverberación en casi todo el intervalo de frecuencias de interés. Para calcular el área equivalente de absorción (suma de los productos dados por el área que ocupa un material multiplicado por su coeficiente de absorción en esa banda) necesaria en cada banda y obtener el tiempo de reverberación deseado, se partió de la ecuación del tiempo de reverberación de Sabine, ecuación 4.2 (que se discute en la sección 2.4.2 del capítulo 2), y considerando que el volumen del recinto es de 21.3 m^3 , se obtuvo el área de absorción total necesaria para tener el tiempo de reverberación deseado:

$$T_{60} = \frac{0.161V}{S\alpha} [\text{s}] \quad (4.2)$$

Donde el volumen V y la superficie S están dados en metros cúbicos y metros cuadrados respectivamente. Sustituyendo V en la fórmula de Sabine (Ec. 4.2) y despejando el denominador:

$$S\alpha = \frac{3.4293}{T_{60}} \text{ [sabines métricos]} \quad (4.3)$$

Con la expresión anterior se puede calcular el área de absorción total que el cuarto requiere para un cierto tiempo de reverberación. Suponiendo que se desean un tiempo $T_{60} = 0.4 \text{ s}$ en todas las bandas, el área de absorción total que se debe alcanzar en cada banda es:

$$S\alpha = \frac{3.4293}{0.4} = 8.57 \text{ [sabines métricos]} \quad (4.4)$$

Con ayuda de un programa en Excel se ha calculado la proporción necesaria de cada material de manera que se obtuviera el área de absorción equivalente requerida en cada banda con relación al valor anterior:

MATERIAL	Coeficientes de absorción						Superficie total de cada material [m ²]
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	
YESO (NUEVA PARED)	0.12	0.1	0.07	0.09	0.07	0.05	2.93
ladrillo+enlucido yeso	0.013	0.015	0.02	0.028	0.04	0.005	7.35
Yeso	0.12	0.1	0.07	0.09	0.07	0.05	6.79
panel de fibra-yeso	0.025	0.045	0.06	0.085	0.043	0.058	7.11
loseta vinilica	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	9.27
Formica	0.28	0.22	0.17	0.9	0.1	0.11	1.18
ESPUMA POLIURETANO	0.16	0.25	0.45	0.84	0.97	0.87	7.19
CLEARSORBER	0.64	0.56	0.41	0.28	0.13	0.06	7.02
AUDIENCIA	0.27	0.53	0.67	0.93	0.87	0.8	0.8
PANELES LATERALES	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	2.28
ÁREA EQUIVALENTE DE ABSORCIÓN [SABINES MÉTRICOS]	8.5767	8.5224	8.6787	12.10635	10.50983	8.759	Superficie total: 48.84

TABLA. 4.19: Coeficientes de absorción de los materiales presentes en el cuarto, superficie total y área equivalente de absorción en sabinos.

Para las simulaciones en computadora, las modificaciones del recinto se asumieron de la siguiente manera:

Primeramente, se cambió el cancel de cristal por una pared de las mismas características de absorción que las paredes 3 y 4 (ver Fig. 4.2), y que en la tabla 4.19 aparece en la primera fila.

Para alcanzar el área de absorción calculada, es necesario introducir material absorbente, para lo cual se investigó el tipo de materiales absorbentes disponibles en el mercado, de entre los cuales se eligieron espuma de poliuretano³⁵ y Clearsorber®³⁶, materiales que resultaron apropiados de acuerdo al valor del coeficiente de absorción que poseen.

Se colocó espuma de poliuretano en las paredes laterales y en la pared posterior en forma de paneles rectangulares (Fig. 4.30). Este material tiene las propiedades de absorción indicadas en la tabla 4.20.

BANDAS [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
COEFICIENTE α	0.16	0.25	0.45	0.84	0.97	0.87

TABLA. 4.20: Coeficientes de absorción de la espuma de poliuretano por bandas de una octava.

³⁵ Cox, Trevor J. & D'Antonio, Peter. *Op Cit*.

³⁶ RPG Diffuser Systems, Inc. <http://www.rpginc.com/index.htm>.

La espuma de poliuretano tiene una gran absorción en las bandas más altas, pero muy pobre para bajas frecuencias.

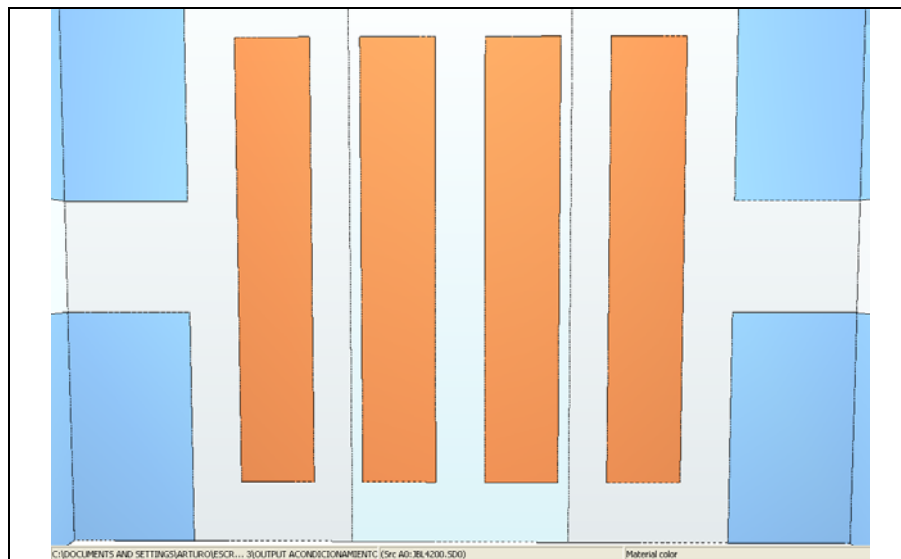


Fig. 4.30: Tiras de espuma de poliuretano sobre la puerta y la pared posterior.

En las esquinas posteriores se colocó Clearsorber® (Fig. 4.31), material desarrollado por RPG Systems, y cuya capacidad de absorción se muestra en la tabla 4.21.

BANDAS [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
COEFICIENTE α	0.64	0.56	0.41	0.28	0.13	0.06

TABLA. 4.21: Coeficientes de absorción del Clearsorber por bandas de una octava.

Este material absorbe bien las bajas frecuencias, pero en altas frecuencias se comporta casi como un reflejante.

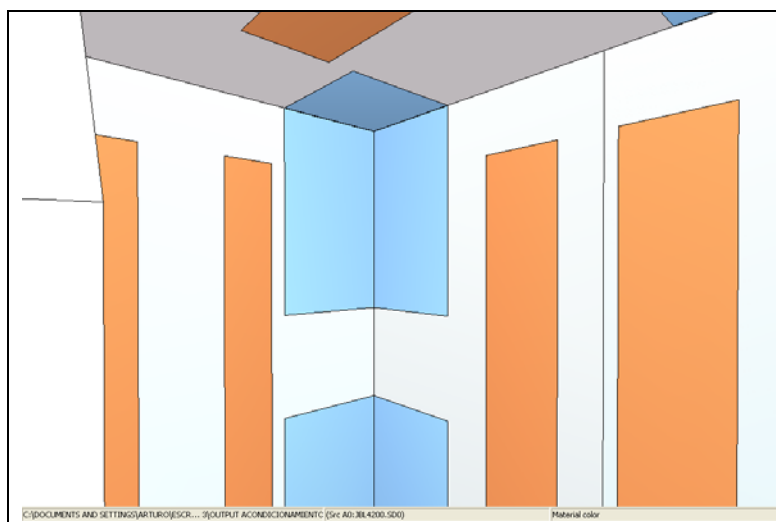


Fig. 4.31: Clearsorber® en las esquinas posteriores del recinto.

La finalidad de colocar Clearsorber en las esquinas es atenuar los modos del recinto a bajas frecuencias. La cantidad de Clearsorber que no pudo ser colocado en esta zona, se alternó en el techo como tiras junto con la espuma de poliuretano, contribuyendo también a mejorar la estética del cuarto (Fig. 4.32).

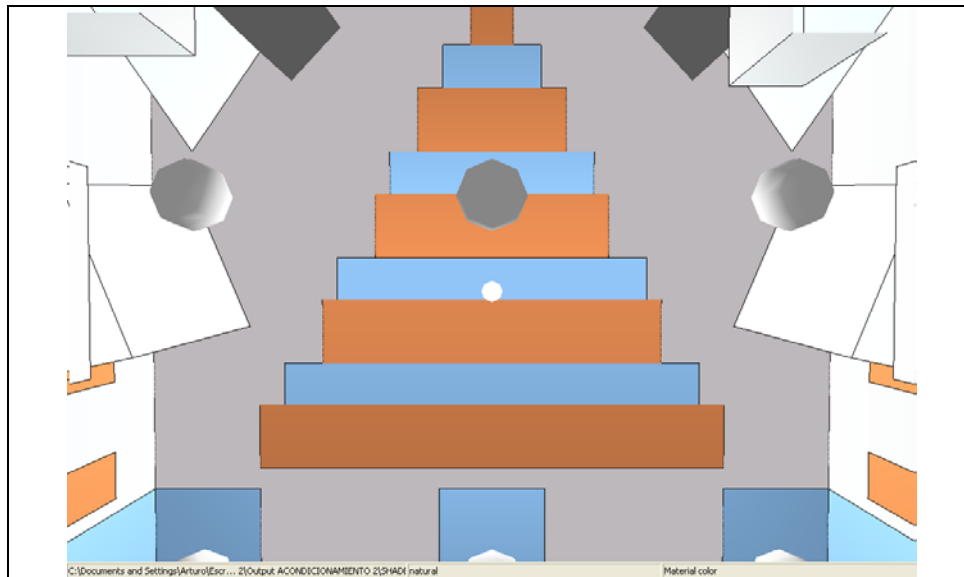


Fig. 4.32: Tiras alternadas de Clearsorber® y espuma de poliuretano en el techo.

Los materiales empleados (espuma de poliuretano y Clearsorber) se pudieron balancear fácilmente (ver tabla 4.19); es decir, al tener un comportamiento opuesto con respecto a la frecuencia, se pudo racionar la cantidad de cada material a modo de compensar la absorción en bajas y altas frecuencias, según se requiera. Esta condición es preferible y más versátil, que manejar un solo material muy absorbente en todo el espectro.

Se agregaron dos paneles de forma triangular (Fig. 4.33) en las esquinas superiores de la parte frontal del recinto, las cuales están formadas por Clearsorber en su parte posterior, y formica del lado que “mira” hacia la zona del operador. La función de estos paneles triangulares es atenuar los modos y reflejar la energía correspondiente al resto del espectro (estos paneles también se orientaron para dirigir las reflexiones hacia los operadores).

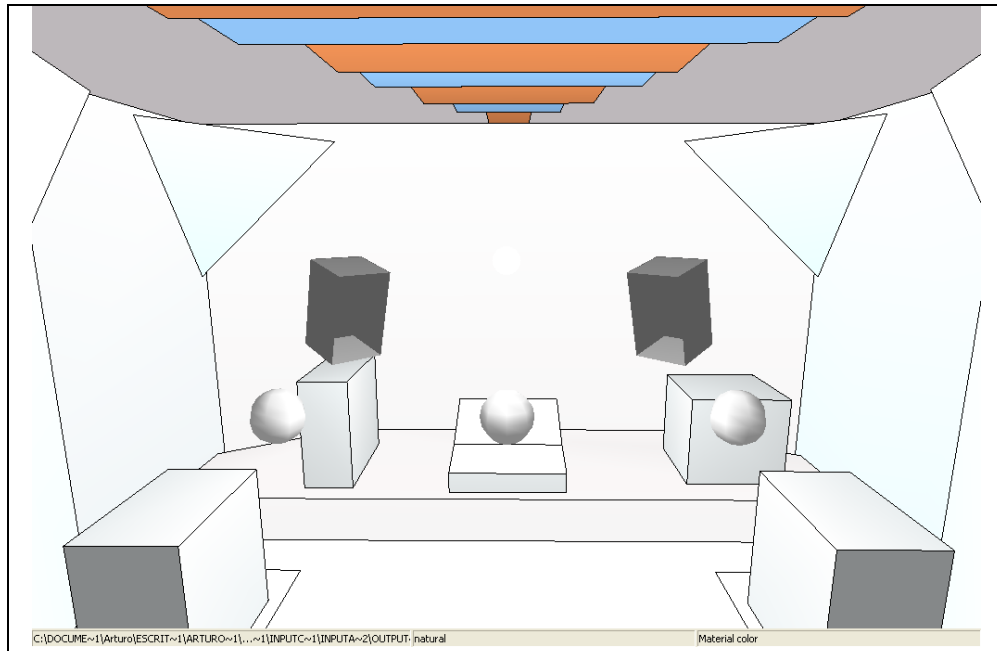


Fig. 4.33: Vista de los paneles triangulares en las esquinas frontales superiores del cuarto.

En las paredes laterales, a ambos costados del operador, se incluyeron dos paneles de acrílico (Fig. 4.34) orientados de tal forma que las primeras reflexiones del sonido emitido por los altavoces incidan de manera lateral en los operadores. Para dar una correcta orientación a los paneles, se utilizaron las leyes de reflexión especular para redirigir las ondas acústicas hacia la zona deseada antes de incidir sobre algún otro material muy absorbente.

La apariencia final del recinto ya acondicionado se muestra en la Fig. 4.34, donde el cuadro en el piso representa la superficie equivalente y absorción de una persona sentada en una silla tapizada.

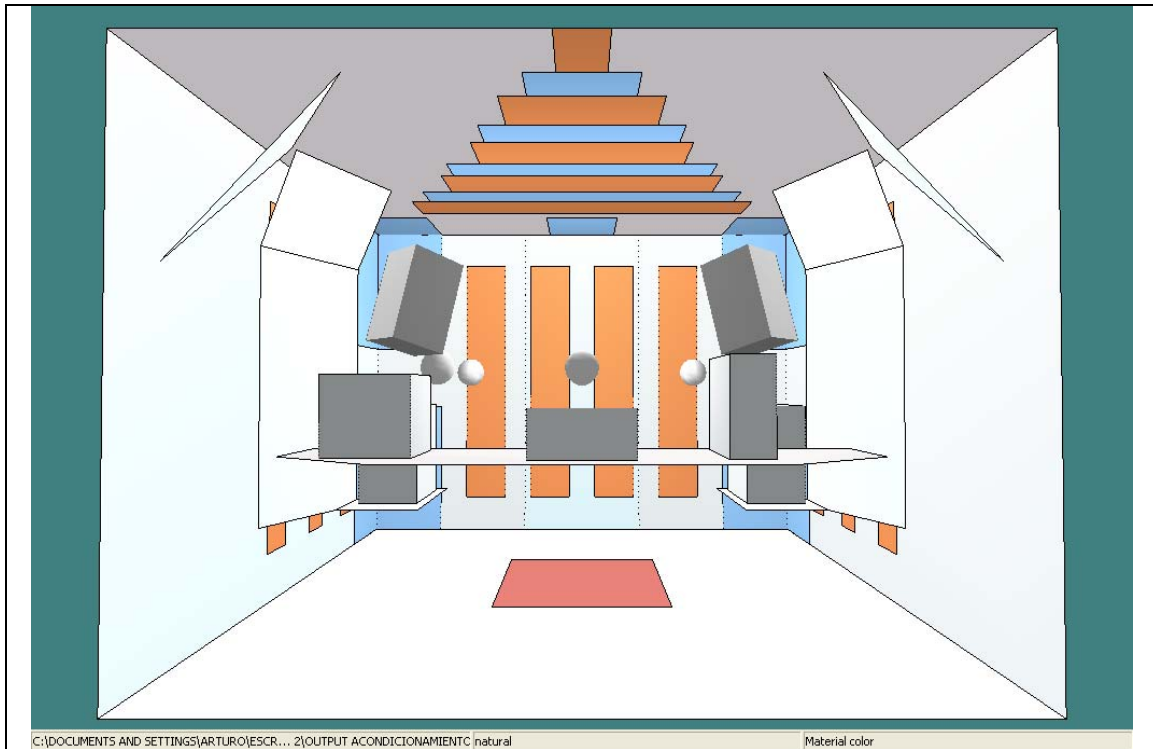


Fig. 4.34: Apariencia del recinto después del acondicionamiento (vista frontal).

Nótese que, aprovechando la construcción del nuevo muro en vez del cancel de cristal, la puerta se ha cambiado a la parte posterior para dar espacio al material absorbente de las esquinas y a los paneles.

4.7.1 Niveles de ruido

Considerando que todas las recomendaciones para el control de ruido se han atendido, se ha realizado la simulación asignando niveles de ruido que consideran un margen de error, esto es, en lugar de utilizar los valores de la curva NC-20 (curva NC recomendada), se han utilizado valores correspondientes a la curva NC-25 (para el cálculo del RASTI con el programa CATT, se utilizaron 32dB para la banda de 500Hz y 25dB para la de 2000Hz), en la suposición de que no todo el ruido externo pueda ser controlado o aislado (ver gráficas del RASTI en las Figs. 4.44 y 4.45).

4.7.2 Tiempo de reverberación

Resumen de resultados obtenidos por medio de las simulaciones con el programa CATT-Acoustic considerando el acondicionamiento propuesto.

Tiempo de Reverberación						
BANDA [Hz]	POSICIÓN 1		POSICIÓN 2		POSICIÓN 3	
	T-15 [s]	T-30 [s]	T-15 [s]	T-30 [s]	T-15 [s]	T-30 [s]
125	0.41	0.43	0.405	0.425	0.405	0.425
250	0.45	0.465	0.45	0.46	0.44	0.46
500	0.44	0.465	0.44	0.465	0.44	0.47
1000	0.375	0.42	0.375	0.42	0.375	0.425
2000	0.4	0.42	0.4	0.425	0.405	0.42
4000	0.43	0.465	0.43	0.465	0.435	0.465

BANDA [Hz]	POSICIÓN 4		POSICIÓN 5		POSICIÓN 6	
	T-15 [s]	T-30 [s]	T-15 [s]	T-30 [s]	T-15 [s]	T-30 [s]
125	0.41	0.445	0.4	0.43	0.4	0.43
250	0.45	0.47	0.445	0.465	0.445	0.46
500	0.435	0.47	0.44	0.47	0.435	0.47
1000	0.365	0.44	0.365	0.44	0.365	0.435
2000	0.39	0.44	0.4	0.445	0.395	0.44
4000	0.435	0.485	0.435	0.48	0.435	0.485

TABLA. 4.22: Tiempos de reverberación T-15 y T-30 obtenidos con el CATT para distintas posiciones en el recinto con el acondicionamiento propuesto.

Como puede observarse de la tabla 4.22, los valores del tiempo de reverberación no varían sustancialmente al cambiar la posición y todos están dentro del rango elegido como adecuado para el estudio de masterización (0.3 a 0.5 segundos).

BANDA [Hz]	PROMEDIO	PROMEDIO	PROMEDIO	PROMEDIO
	T-60 [s]	T-30 [s]	T-15 [s]	Eyring [s]
125	0.24	0.43	0.41	0.35
250	0.28	0.46	0.445	0.4
500	0.28	0.47	0.44	0.39
1000	0.22	0.43	0.375	0.31
2000	0.24	0.435	0.4	0.33
4000	0.27	0.47	0.435	0.37

TABLA. 4.23: Valores promedio de distintos parámetros para evaluar el tiempo de reverberación.

En la tabla 4.23 se presentan los valores promedio de las seis posiciones de T-15 y T-30, además del T-60 y el tiempo de reverberación de Eyring. Se observa que todos los valores quedan dentro del intervalo deseado, excepto los que corresponden a T-60, que son

demasiado bajos. Dichos valores no son tomados en cuenta para la evaluación final, ya que al haber una gran cantidad de superficies traslapadas en el nuevo modelo de simulación, el T-60 calculado por el CATT es poco confiable.

4.7.3 Reflexiones tempranas y su dirección de incidencia

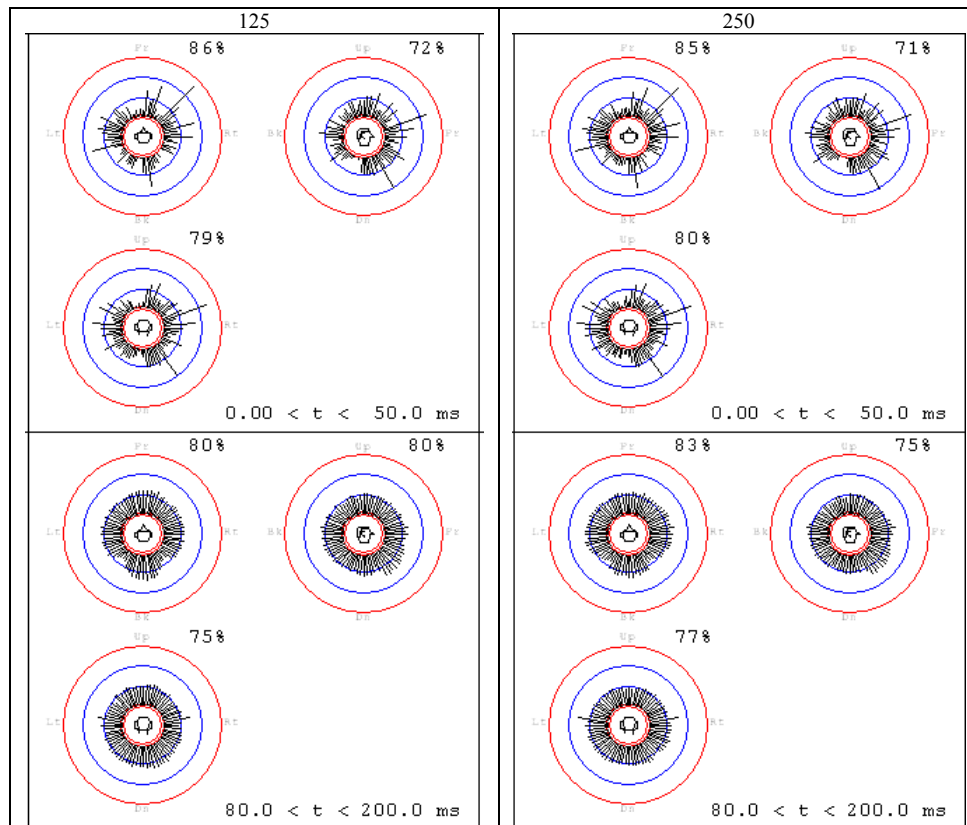


Fig. 4.35: Patrón de incidencia para las bandas de 125 y 250Hz. Para cada intervalo de tiempo se muestran tres gráficos, correspondientes a la vista superior, lateral y posterior de la cabeza del receptor. El número en porcentaje indica la razón entre recibida en cada plano y el total de la energía en el intervalo señalado.

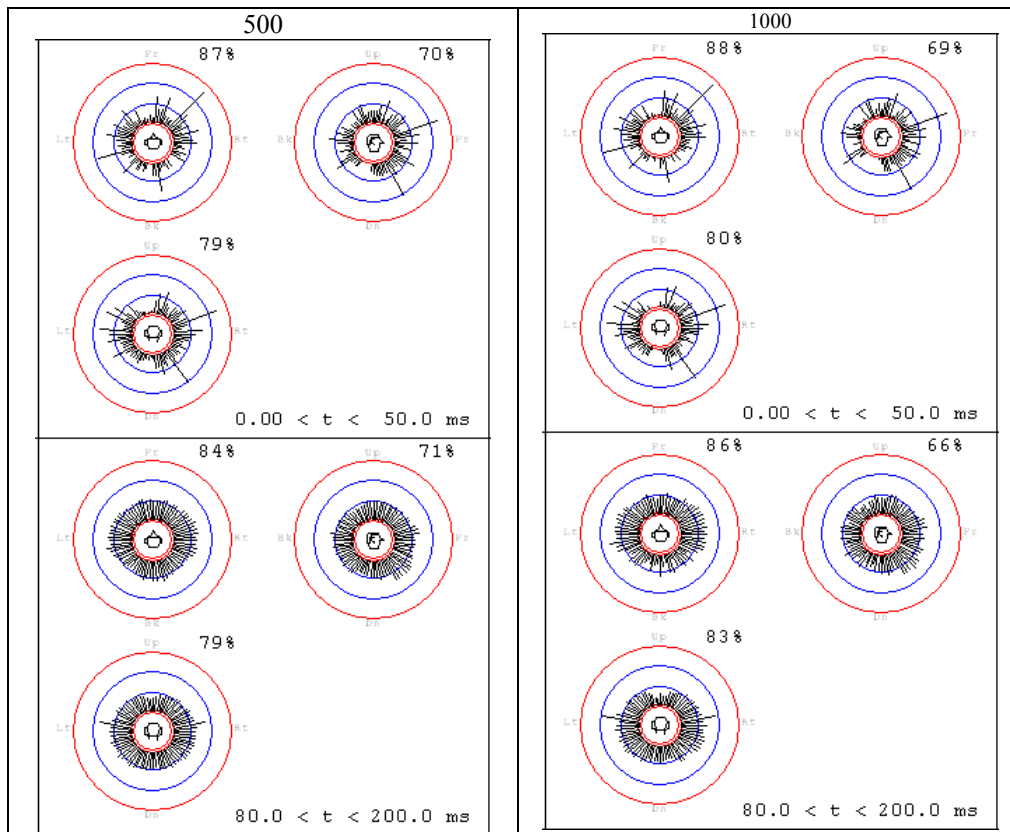


Fig. 4.36: Patrón de incidencia para las bandas de 500 y 1000 Hz. Para cada intervalo de tiempo se muestran tres gráficos, correspondientes a la vista superior, lateral y posterior de la cabeza del receptor. El número en porcentaje indica la razón entre recibida en cada plano y el total de la energía en el intervalo señalado.

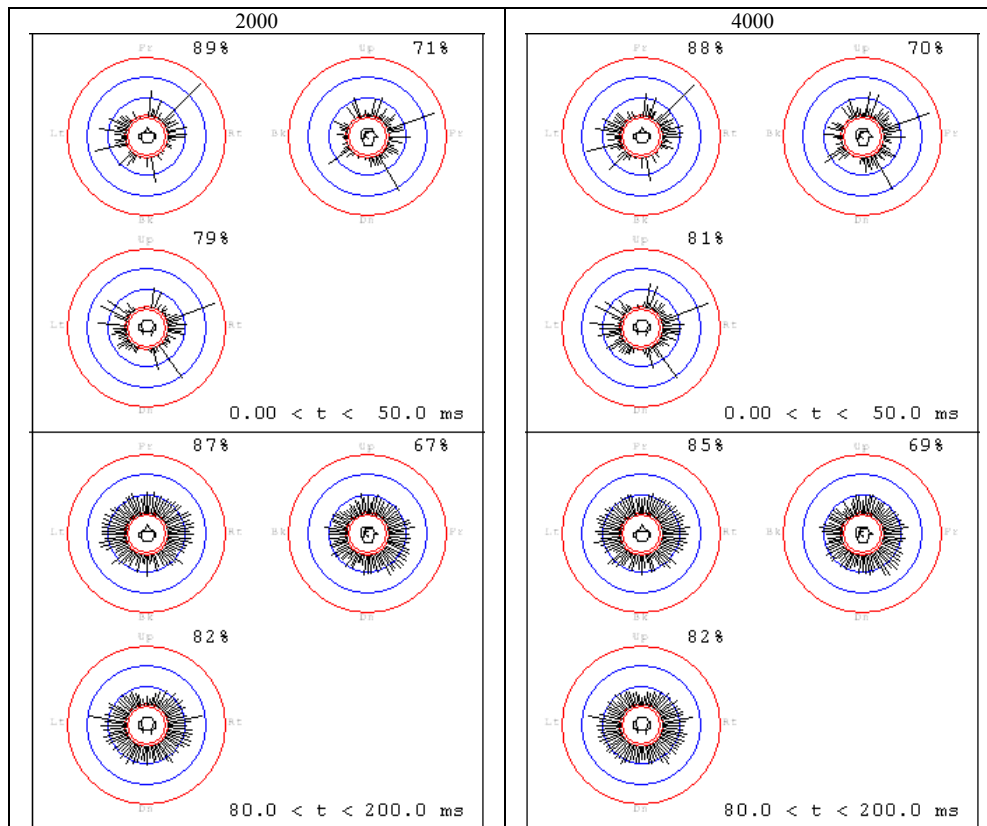


Fig. 4.37: Patrón de incidencia para las bandas de 500, 1000, 2000 y 4000 Hz. Para cada intervalo de tiempo se muestran tres gráficos, correspondientes a la vista superior, lateral y posterior de la cabeza del receptor. El número en porcentaje indica la razón entre recibida en cada plano y el total de la energía en el intervalo señalado.

Si se observa el número de rayos incidentes en las Figs. 4.35, 4.36 y 4.37, se aprecia que la energía de incidencia espacial del sonido dentro de los intervalos de tiempo señalados ha disminuido, aunque como veremos más adelante, el valor de LF continúa por encima del número mínimo requerido en prácticamente todas las bandas y posiciones. Tomando en cuenta que en estos diagramas (Fig. 4.35, 4.36 y 4.37) falta la superposición de las incidencias debidas al otro altavoz (y que son simétricas a las anteriores), se puede decir que la cantidad de rayos recibidos en todos los planos es suficiente, y que en el intervalo de 80 a 200ms el campo se puede considerar como uniforme. La espiga de mayor magnitud que aparece en la parte superior derecha de cada figura, corresponde al sonido directo del altavoz derecho, mientras que la que aparece en la parte inferior derecha es probablemente una reflexión proveniente del piso que, por ser lateral y simétrica con respecto a la reflexión que aparece por efecto del altavoz izquierdo (en las Figs 4.35, 4.36 y 4.37 sólo aparecen los rayos correspondientes al altavoz de la derecha), no tiene efectos acústicos negativos sobre el receptor.

4.7.4 Modos del recinto

Como ya se explicó en el apartado 4.6, se espera atenuar los modos de vibración a bajas frecuencias con material absorbente en las esquinas del cuarto, donde las ondas estacionarias tienen sus máximos de presión. Además, se ha sugerido el uso de Tube Traps, un dispositivo comercial que sirve como absorbente y como resonador de Helmholtz al mismo tiempo, a bajas frecuencias. Con el uso de este dispositivo la absorción del cuarto no se ve afectada drásticamente, pero si contribuye a la atenuación de los modos al colocarse cerca de las esquinas donde la absorción de modos a bajas frecuencias es más eficiente.

4.7.5 Nivel de presión sonora

Presión sonora en dB para intervalos de tiempo de 0 a 20 ms y de 20 a 50 ms. En todas las figuras la altura del mapeo es de 1.20m sobre el nivel del piso.

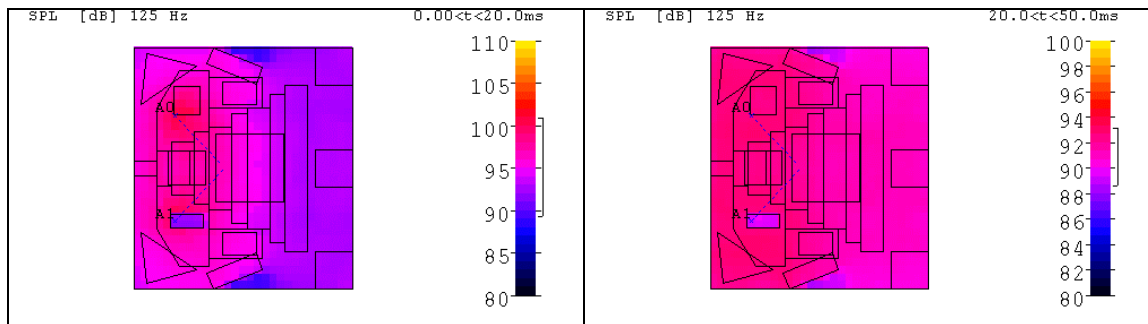


Fig. 4.38: Distribución de la presión sonora en la banda de 125Hz, para intervalos de 0 a 20 y de 20 a 50 ms (vista superior).

POSICIÓN	SPL [dB] a 125Hz
1	96.05
2	95.6
3	95.5
4	93.3
5	93.2
6	93.3

TABLA. 4.24: Promedio espacial y temporal del SPL para las posiciones que se estudiaron.

El campo es bastante homogéneo en la Fig. 4.38, y si se ignoran las zonas detrás de los paneles y sobre la mesa frontal (donde nunca habrá un receptor), las variaciones para ambos intervalos son despreciables (94 a 96dB aproximadamente). Esto significa que el colocar material absorbente en las esquinas ha cumplido con el objetivo de atenuar los modos causantes de irregularidades en el campo sonoro.

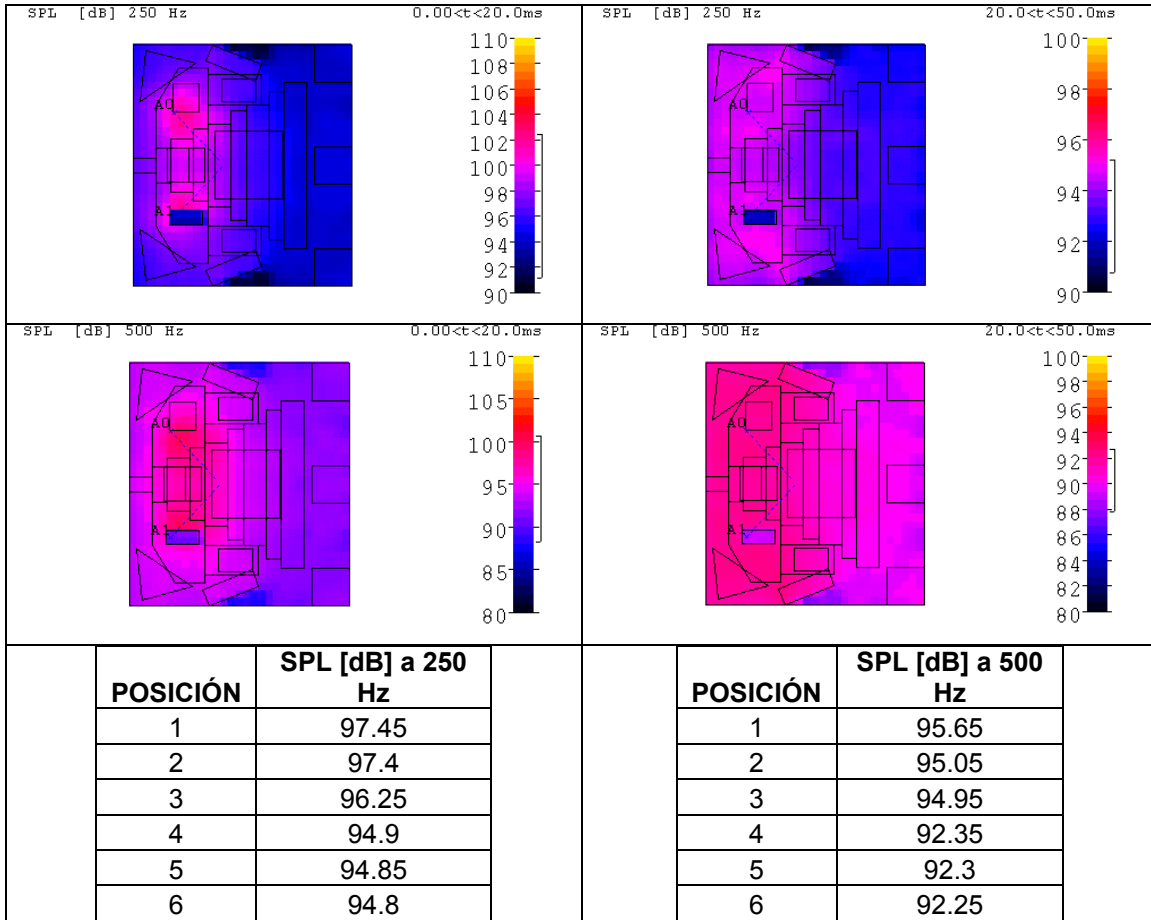


Fig. 4.39: Distribución de la presión sonora en las bandas de 250 y 500Hz, para intervalos de 0 a 20 y de 20 a 50 ms (vista superior) y tablas con el promedio espacial y temporal del SPL para las posiciones que se estudiaron.

El campo sonoro en las dos bandas de la Fig. 4.39 es aparentemente poco uniforme y los rangos en que varía la presión sonora son más amplios, sin embargo, la zona del operador permanece con variaciones de alrededor de 3dB, por lo que se puede considerar que esto no afectará la percepción del operador.

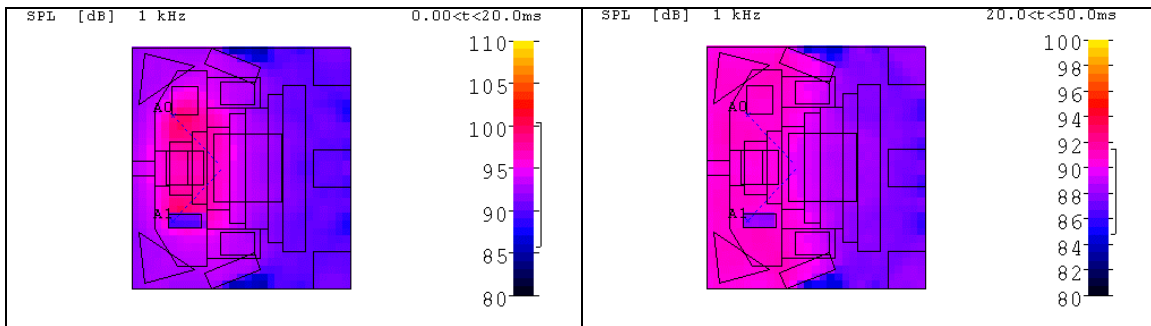


Fig. 4.40: Distribución de la presión sonora en la banda de 1000Hz, para intervalos de 0 a 20 y de 20 a 50 ms (vista superior).

POSICIÓN	SPL [dB] a 1kHz
1	94.75
2	94.05
3	93.85
4	90.35
5	90.5
6	89.95

TABLA. 4.25: Promedio espacial y temporal del SPL para las posiciones que se estudiaron.

Las condiciones de distribución de la presión para la Fig. 4.40 aún parecen aceptables, aunque la diferencia de decibeles entre las posiciones del operador ha aumentado a casi 5 dB.

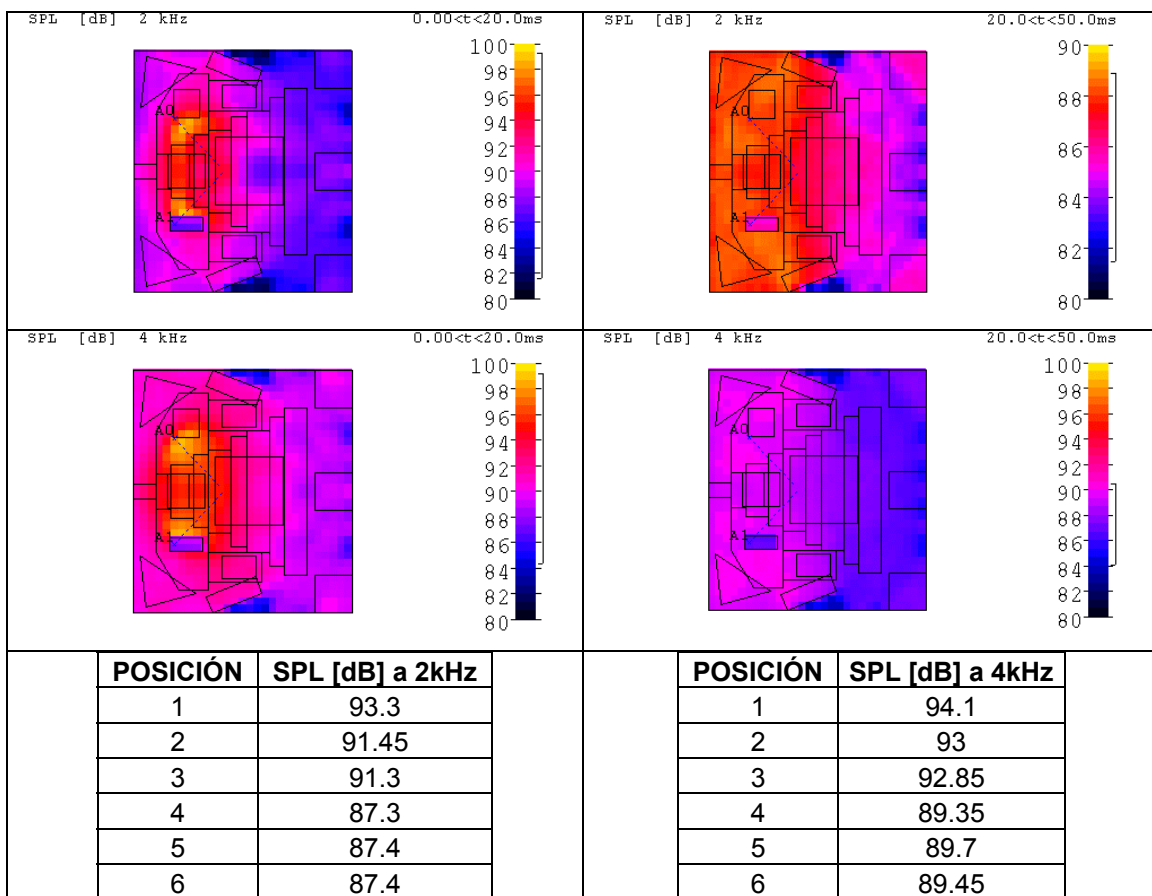


Fig. 4.41: Distribución de la presión sonora en las bandas de 2000 y 4000Hz, para intervalos de 0 a 20 y de 20 a 50 ms (vista superior) y tablas con el promedio espacial y temporal del SPL para las posiciones que se estudiaron.

Las variaciones entre las posiciones frontales (1, 2 y 3) y las posteriores (4, 5 y 6) son de hasta 6dB, sin embargo, es poco probable que el operador alcance la ubicación de las posiciones posteriores (4, 5 y 6) durante sus actividades de trabajo. Por lo tanto el acondicionamiento es apropiado.

4.7.6 Eficiencia lateral (LF)

La siguiente tabla muestra un resumen de los valores de LF (Lateral Fraction) en términos de bandas de una octava según la posición dentro del recinto.

Eficiencia Lateral (LF)						
POSICIÓN	125 [Hz]	250 [Hz]	500 [Hz]	1000 [Hz]	2000 [Hz]	4000 [Hz]
1	23.6	28.5	26.8	25.8	18.15	23.3
2	24.7	26.3	25.65	25	24.45	24.5
3	25	26.85	26.55	25.5	24.85	25.6
4	23.5	24.95	25.95	26.45	26.9	26.95
5	22.35	24.25	24.5	23.85	22.2	23.55
6	22	23.95	24.5	23.3	22.5	24
PROMEDIO	23.55	25.8	25.65	25	23.2	24.65
PROMEDIO DE LAS SEIS BANDAS: 24.64						
PROMEDIO DE LAS PRIMERAS CUATRO BANDAS: 25						

TABLA. 4.26: Valores de LF en % por banda.

Con excepción del valor de LF para la posición 1 en la banda de 2000Hz (Tabla 4.26), los demás valores están por encima del requerimiento mínimo (20%), aunque el promedio tanto de seis como de cuatro bandas ha caído a los valores mostrados con respecto a los valores de la tabla 4.16, antes del acondicionamiento. Esta situación no es grave puesto que dichos promedios siguen arriba del 20% y según se dijo, las primeras cuatro bandas son las más significativas para este parámetro, y el valor que está por debajo de las especificaciones (posición 1, 2000Hz), queda fuera de ese intervalo.

La razón más probable por la que no se ha podido incrementar más este parámetro en general, es que las dimensiones del recinto son muy pequeñas y las superficies lateral y frontal que contribuyen a las reflexiones laterales fueron insuficientes.

4.7.7 Definición D-50

Las gráficas siguientes, muestran la distribución espacial del valor de D-50 dentro del recinto acondicionado. La altura del plano de mapeo es de 1.2m.

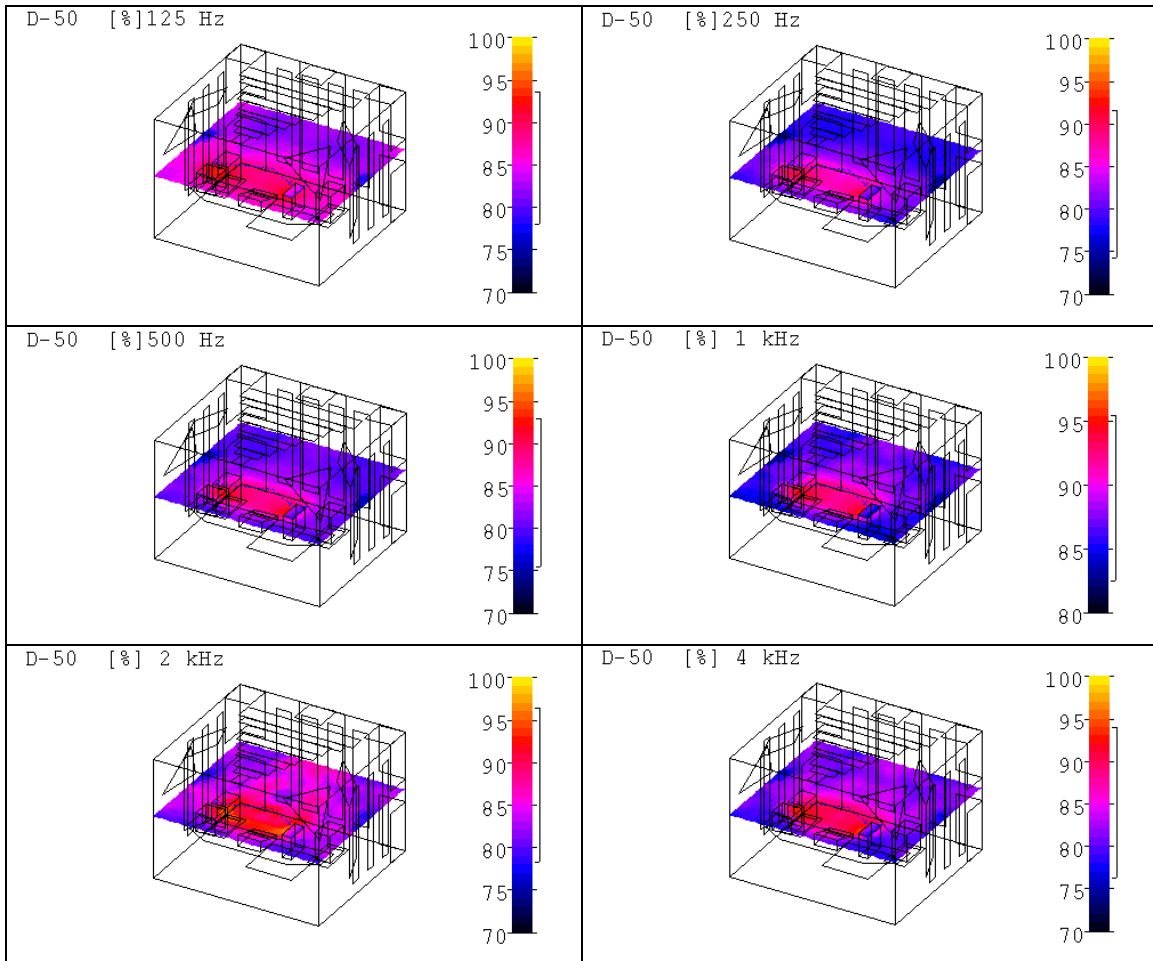


Fig. 4.42: Distribución espacial del valor de D-50 para la banda de 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000Hz (vista desde esquina opuesta a la puerta).

La distribución espacial de este parámetro en la zona del operador presenta poca variación. Se puede observar que existen variaciones mayores en otras regiones del recinto, pero no es un factor negativo ya que no habrá operadores en esas regiones.

La siguiente tabla muestra un resumen de los valores de definición para cada posición considerada dentro del recinto.

POSICIÓN	125 [Hz]	250 [Hz]	500 [Hz]	1000 [Hz]	2000 [Hz]	4000 [Hz]
1	88.95	85.7	88.1	92.35	93.5	90.5
2	87.3	84.6	85.75	89.9	89.1	86.9
3	87.25	84.35	85.7	89.95	88.95	86.75
4	83.2	79.95	81.65	87.4	84.35	81.55
5	83.45	80.6	82.65	88.3	86	83.45
6	83.65	80.5	82.45	87.95	85.3	82.4
PROMEDIO	85.65	82.6	84.35	89.3	87.85	85.25
PROMEDIO SEIS BANDAS: 85.83						

TABLA. 4.27: Valores de D-50 en % por bandas de una octava.

El valor promedio de este parámetro creció en un 60% con respecto al valor original, con esto se ha asegurado un muy buen nivel de definición.

4.7.8 RASTI

Distribución espacial del RASTI con y sin ruido de fondo.

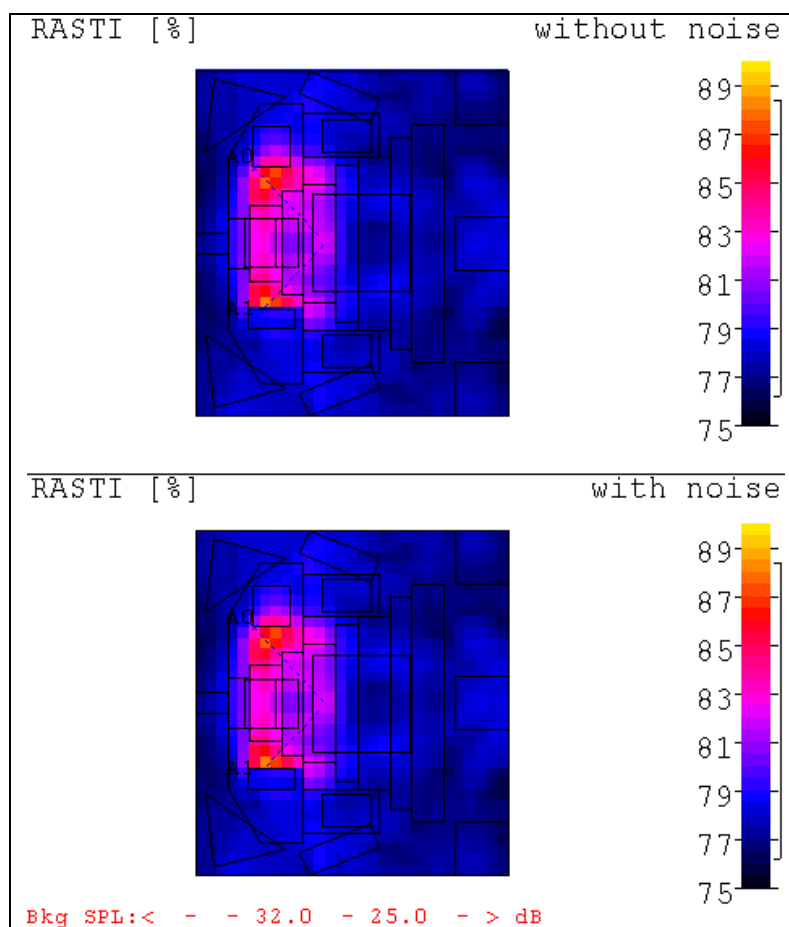


Fig. 4.43: Distribución espacial del valor del RASTI (%) con ruido de fondo. Los niveles de ruido considerados para 500 y 2000Hz respectivamente, se indican en la parte inferior.

En ambos casos (con y sin ruido) se ha alterado la distribución homogénea que se tuvo antes del acondicionamiento, pero si se ignora la zona entre la computadora y la consola, en el resto del cuarto las irregularidades son menores, por lo que en cualquier lugar se tendrá casi la misma inteligibilidad.

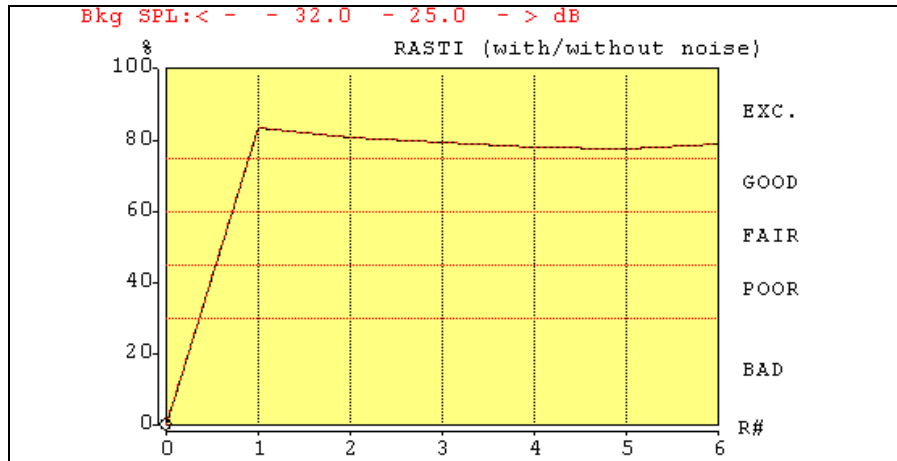


Fig. 4.44: Valor del RASTI (%) según la posición del receptor. A la derecha se encuentra la evaluación sugerida para cada rango de valores.

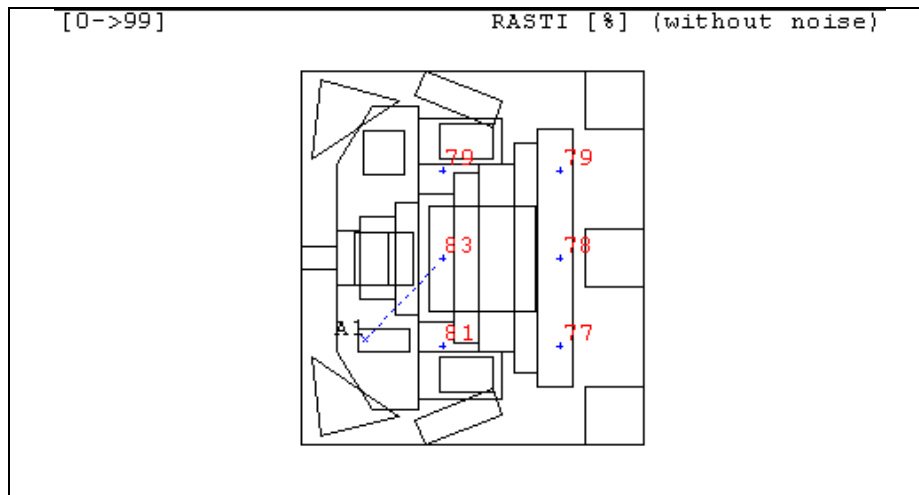


Fig. 4.45: Valores del RASTI en las posiciones analizadas (vista superior).

El valor del RASTI se ha beneficiado con las mejoras implementadas al cuarto, principalmente la reducción del tiempo de reverberación y el control del ruido en el recinto, aumentando un 41% su valor (Fig. 4.44 y Fig. 4.45), con lo que se tendrá una condición excelente de inteligibilidad después del acondicionamiento.

4.7.9 Resumen de resultados

A continuación calificaremos la calidad del cuarto después del acondicionamiento con base en las tablas y los resultados anteriores.

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR O INTERVALO MÍNIMO DESEADO	VALOR O INTERVALO ACTUAL	CALIFICACIÓN
T-60	[s]	0.3 a 0.5	0.45	Bueno
LF	%	≥ 20	25	Bueno
D-50	%	>50	85.83	Excelente
RASTI	%	>75	79.5	Excelente
RUIDO	[dB]	NC-20	NC-20	Bueno

TABLA. 4.28: Resumen y evaluación de resultados.

4.7.9.1 Observaciones

- La dirección de incidencia de las reflexiones tempranas (0 – 50 ms) continúa teniendo una distribución uniforme y simétrica, y se alcanza una distribución homogénea en el intervalo de 80 a 200 ms.

La distribución espacial de la presión sonora en el cuarto a la excitación de las bocinas sigue siendo satisfactoria (buena distribución de la presión sonora al menos en la posición del operador) para las primeras cuatro bandas (125 – 1000 Hz), en las bandas de 2000 y 4000Hz las variaciones son mayores, aunque no excesivamente grandes. Además se puede decir que se espera mayor uniformidad en las bandas menores a la de 125 Hz puesto que se considera el material absorbente y las trampas para graves (Bass Traps) en los lugares requeridos³⁷.

- El tiempo de reverberación que se ha logrado cumple con los valores deseados y varía muy poco con respecto a la frecuencia. Esto asegura un decaimiento uniforme en todas las bandas.
- El coeficiente de incidencia lateral (LF) ha disminuido, aunque no drásticamente. Aún se mantiene por encima del valor mínimo requerido. El único dato que no sobrepasa dicho valor es el que corresponde a la posición del operador en la banda de 2kHz (18.15%), pero no es grave pues está fuera de las primeras cuatro bandas. Cabe mencionar que es el valor más alto que se pudo alcanzar sin comprometer los demás parámetros.

³⁷ Esquinas del recinto donde los modos tienen sus máximos de presión.

- La definición D-50 y el índice RASTI mejoraron de manera sobresaliente, esto se debe a que dependen fuertemente del tiempo de reverberación y el ruido ambiental, ambos reducidos a los niveles deseados.
- Se hace la suposición de que el ruido presente dentro del recinto cumple ahora con la curva requerida (NC-20).

5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En cuartos de dimensiones acústicamente pequeñas (dimensiones comparables a las longitudes de onda audibles) surge el problema de los modos acústicos propios del recinto, que tienden a colorear el sonido generado en su interior; las frecuencias alrededor de las frecuencias propias del recinto se ven reforzadas significativamente respecto al resto de las frecuencias. Este problema es especialmente crítico en bajas frecuencias, donde el espaciamiento entre las frecuencias propias es grande y por lo tanto el campo sonoro no es uniforme. Por otro lado, al aumentar la frecuencia, aumenta el número de modos acústicos por ancho de banda (densidad modal), con lo que el campo se hace cada vez más homogéneo.

Generalmente, en un espacio destinado a la audición, se desea contar con un campo de nivel de presión sonora uniforme. Para tener esta condición se puede recurrir al empleo de difusores acústicos. El inconveniente de éstos para recintos pequeños es que las dimensiones físicas de un difusor aumentan en proporción directa con la longitud de onda que se desea tratar. En el caso del recinto analizado, no fue posible utilizar difusores dadas las limitaciones de espacio. Se recurrió entonces al uso de material absorbente, resonadores y paneles reflejantes colocados cerca de las esquinas con el fin de atenuar los efectos de los modos del recinto.

El tiempo de reverberación debe ser escogido en función de la utilización del recinto. Para estudios de masterización, el valor de este parámetro debe ser relativamente bajo (de 0.3 a 0.5 segundos aproximadamente) puesto que lo que se desea es transferir fielmente la información grabada a los oídos del receptor, de manera que tenga la percepción correcta y pueda estar en posición de evaluar y corregir el contenido de la misma adecuadamente. La variación del tiempo de reverberación con respecto a la frecuencia debe ser uniforme, es decir, su valor no debe diferir mucho entre una banda y otra.

Existen diversos parámetros para evaluar distintos aspectos de la acústica de una sala, sin embargo, no todos son útiles o representativos de la calidad en todos los casos. Se deben tomar únicamente los parámetros que sean de interés para el caso estudiado. En masterización, además de un tiempo de reverberación adecuado, buenos niveles de inteligibilidad (RASTI, D-50) y reflexiones laterales (LF) son de suma importancia.

Finalmente se debe cuidar que el entorno de un estudio sea lo suficientemente silencioso, como para garantizar un espacio de trabajo libre de ruidos persistentes o transitorios que distraigan la percepción del sonido de interés, o que incluso puedan modificar la información original.

Gracias al acondicionamiento sugerido para el recinto estudiado, con base en simulaciones realizadas en computadora, fue posible predecir una mejora sustancial de la acústica del recinto, adecuándola al uso de éste como estudio de masterización. El tiempo de reverberación del cuarto en las condiciones originales es de un segundo, pero después del acondicionamiento propuesto, se reduce al intervalo preestablecido (0.3 a 0.5 segundos) en las bandas de interés (frecuencias centrales de 125 a 4000 Hz). Además, al variar su

valor relativamente poco con respecto a la frecuencia, el decaimiento de cada banda será casi el mismo y como consecuencia se tendrá la impresión adecuada de la información que se este reproduciendo.

También se predice un campo sonoro homogéneo en la zona del operador en todo el espectro audible. Se dio solución al problema de los modos del recinto a través de material absorbente y las trampas para bajos específicamente diseñadas para este fin. Con las mejoras mencionadas, se puede confiar en que la reproducción de sonido dentro del estudio no se verá afectada por coloraciones en la zona donde se moverá el operador.

La cantidad de reflexiones tempranas, si bien disminuyó debido a la colocación de materiales absorbentes, aún sigue siendo suficiente y simétrica, por lo que siguen contribuyendo de manera significativa al refuerzo del sonido directo. Esta disminución de la energía de las reflexiones repercutió sobre la eficiencia lateral (LF), sin embargo, se obtuvo un valor de $LF = 25\%$ aproximadamente, el cual se considera como aceptable. Para evitar que este valor decreciera más, se usaron paneles reflejantes en las paredes laterales. De esta manera, la impresión espacial (o ancho aparente de la fuente), sigue siendo adecuada contribuyendo a la comodidad auditiva del operador (persiste la sensación de encontrarse inmerso en el sonido).

El control de ruido implica realizar un estudio exhaustivo del edificio donde se encuentra el recinto, y seleccionar las técnicas de control adecuadas. Un extenso análisis de las características del ruido en las instalaciones de Radio UNAM queda fuera de los alcances de esta tesis, sin embargo, se hicieron recomendaciones considerando las primeras medidas que deben tomarse en cuenta para disminuir el ruido presente en el recinto³⁸. Las técnicas de control de ruido que se proponen son: un buen aislamiento del cuarto para evitar la transmisión del ruido por aire, asegurar una alta impedancia en los muros para disminuir la transmisión del ruido externo hacia el interior del recinto, y tomar las medidas adecuadas para evitar la transmisión de vibraciones a través de las estructuras del inmueble, disminuyendo su emisión o amortiguando su transmisión.

La inteligibilidad de la palabra y la definición de los sonidos dependen en gran medida del tiempo de reverberación y del ruido de fondo. Al haber disminuido estos dos parámetros, el RASTI y la definición D-50 fueron claramente beneficiados, de acuerdo a los resultados de las simulaciones, aumentando en un 41% y 60% respectivamente. Así se termina de asegurar una correcta transmisión del mensaje (grabado) emitido por los altavoces a los oídos del escucha, sin importar si se trata de un mensaje oral o de cualquier tipo de música.

Para lograr resultados satisfactorios en todos los aspectos que involucra un buen acondicionamiento acústico, es necesario hacer un balance de los efectos que tendrán las medidas que se desean implementar para mejorar un aspecto individual, sobre el resto de los factores que determinan la calidad de un espacio acústico. A lo largo del proceso de

³⁸ Se considera que con las medidas tomadas, se ha logrado una reducción del ruido de la curva NC-45 original, a la curva NC-20 deseada.

acondicionamiento de este recinto, se hizo patente el hecho de que es necesario encontrar un ajuste de cada parámetro de manera que se obtengan valores muy cercanos al objetivo planteado, sin comprometer el desempeño de los demás parámetros.

Es igualmente importante cuidar el aspecto estético del espacio, ya que el confort visual va ligado a la disposición perceptiva de los demás sentidos, incluido el del oído. Atender este aspecto del acondicionamiento, repercute en el éxito integral de un trabajo de este tipo.

El proceso de masterización es el último filtro por donde pasará una grabación, por lo que el acondicionamiento de un estudio para este fin es especialmente crítico, sin embargo, y la información disponible sobre los requerimientos acústicos de un estudio de masterización en libros, publicaciones y bases de datos electrónicas, es escasa.

El presente análisis, se ha centrado en un recinto muy particular para dar respuesta a las necesidades del proyecto de la Fonoteca de Radio UNAM, sin embargo, este trabajo puede ser utilizado como referencia para el acondicionamiento de otros recintos con características similares (aún siendo de mayores dimensiones) y cuyo objetivo sea la instalación de un estudio de masterización.

Por otra parte, la utilidad del modelado en computadora de recintos acústicos pequeños para la predicción de sus parámetros acústicos ha sido comprobada en este trabajo. La capacidad del programa CATT-Acoustic para la simulación de auditorios de dimensiones medianas a grandes ya se ha demostrado en otros trabajos³⁹, sin embargo, no existen referencias sobre su aplicación en recintos pequeños.

A pesar de que sus algoritmos no consideran el análisis ondulatorio, es posible utilizar este software en la predicción de recintos pequeños con resultados satisfactorios, siempre y cuando se tomen en cuenta las siguientes observaciones:

- La banda más baja analizada por el programa CATT es la que tiene como frecuencia central 125 Hz (cuyas frecuencias límite son 88 y 177 Hz), por lo que debajo de dicha banda, sus resultados no son válidos. El programa CATT no puede ser usado para analizar los modos del recinto.
- Hay condiciones extremas bajo las cuales, este software no funciona correctamente:
 - Superficies extremadamente reflejantes
 - Fuentes y/o receptores en las proximidades de las fronteras (a una distancia menor a alrededor de 0.2 m)
 - Exceso de superficies traslapadas

³⁹ Por ejemplo, Pancharatnam, S. y Ramachandraiah, A., *A Study on the Computer Aided Acoustic Analysis of an Auditorium*. IE Journal, Vol. 84, April 2003, 10-16.

Kleiner, Mendel, *Auralization Experiments with CATT*. JASA, 100 (1996) 4, 2579.

- Geometrías muy complicadas tanto de objetos en su interior, como del recinto en sí.
- Se debe complementar el análisis por software con mediciones de ruido de fondo y análisis ondulatorio.

Apéndice A

El Sonido Generación

Considérese un cuerpo vibrando en el aire. Cuando se mueve hacia adelante empuja a la capa más próxima de aire comprimiéndola, aumentando por consiguiente su densidad y su temperatura. Puesto que la presión en esta capa es mayor a la de la atmósfera que la rodea, sus moléculas tienden a moverse hacia adelante y transmiten su movimiento a la capa de aire adyacente, esta a su vez, transmite el movimiento a la siguiente capa, y así sucesivamente. Cuando el cuerpo vibrante se mueve hacia atrás la capa que antes fue comprimida ahora es enrarecida (expandida). Esta capa enrarecida está justo detrás de la capa comprimida y el estado de compresión y expansión de ambas se va transmitiendo a las capas que están delante de ellas, en una especie de efecto dominó, donde la velocidad de propagación depende de la densidad y compresibilidad del medio (en este caso el aire). A esta transmisión sucesiva de compresión y rarefacción se le llama movimiento ondulatorio. Las variaciones de presión producidas con respecto a la presión atmosférica estable pueden ser captadas por el oído humano, siempre que la frecuencia con que vibra el objeto se encuentre dentro de un cierto intervalo.

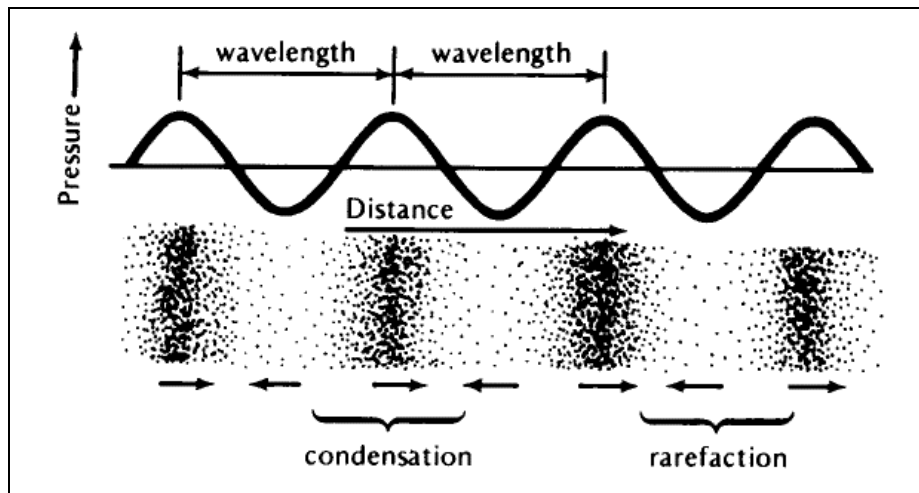


Fig. A.1: Moléculas de aire

Del párrafo anterior se desprende una de las definiciones de sonido más aceptadas: “El sonido es una vibración mecánica que se propaga a través de un medio material elástico y denso, y que es capaz de producir una sensación auditiva”.

Al objeto vibrante se le llama fuente sonora. Las moléculas a su alrededor que son perturbadas por su vibración no viajan con la propagación mencionada (onda sonora), sino que sólo oscilan alrededor de su posición de equilibrio.

Características

Las ondas sonoras son del tipo longitudinal ya que el movimiento oscilatorio que las produce ocurre en la misma dirección en que se propagan.

Un campo sonoro normalmente se cuantifica mediante la presión sonora, es decir, la fuerza que ejercen las moléculas del medio elástico por unidad de área. Si se mide la evolución (variación) de presión en función del tiempo de una onda sonora proveniente de un objeto que vibra a una sola frecuencia (por ejemplo, un diapasón) se observará un comportamiento senoidal.

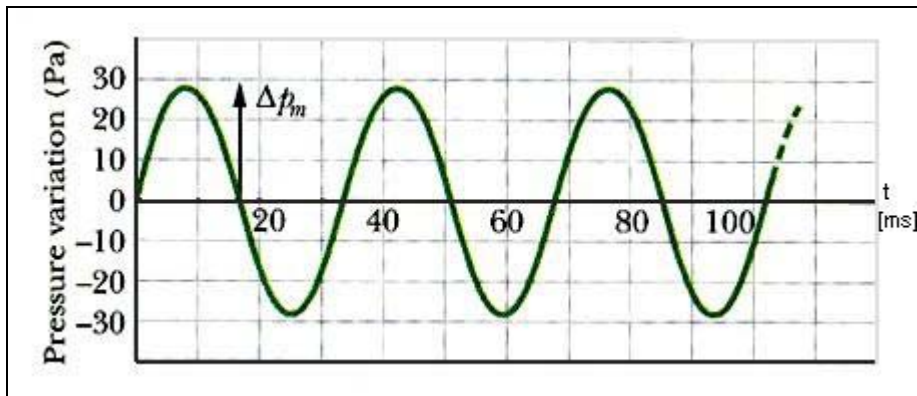


Fig. A.2: Presión sonora con respecto al tiempo en un punto cualquiera del espacio.

En la figura anterior se observa que la presión oscila al transcurrir el tiempo, alrededor de un punto de equilibrio (presión atmosférica). Al número de oscilaciones con respecto al tiempo se le denomina frecuencia (f) y su unidad es el hertz (Hz) que corresponde al número de oscilaciones o ciclos por segundo (c/s).

La velocidad de propagación de una onda sonora depende de la elasticidad y densidad del medio en el que viaje, estas magnitudes son función de la presión atmosférica y la temperatura. En condiciones normales (1 atmósfera de presión y 22°C), la velocidad del sonido en el aire es de 345 m/s. Entre más denso y/o menos elástico sea el medio de propagación, mayor será la velocidad de la onda. Es por ello que el sonido viaja a mayor velocidad a través de los líquidos y sólidos.

Un parámetro importante en el análisis acústico, y de ondas en general, es la longitud de onda (λ) que se define como la distancia en metros entre dos puntos consecutivos del campo sonoro que se encuentren en idéntico estado de vibración (dos crestas adyacentes, por ejemplo), en un mismo instante de tiempo. La longitud de onda y la frecuencia guardan una relación inversamente proporcional:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (\text{a.1})$$

donde: λ es la longitud de onda en metros

v es la velocidad de propagación de la onda en m/s

f es la frecuencia de la onda en Hz

Al igual que cualquier tipo de onda, las ondas sonoras están sujetas a las leyes de reflexión, refracción, difracción, etc.

La ley de reflexión dice que al incidir una onda se refleja sobre una superficie con un ángulo igual al ángulo incidente (reflexión especular).

La refracción es el fenómeno por el cual, al cambiar de un medio de propagación a otro de distinta densidad, una onda es desviada de su trayectoria original debido a un aumento o disminución de su velocidad.

La difracción se refiere a la capacidad de las ondas para “rodear” obstáculos pequeños en comparación con su longitud de onda.

Propagación del sonido en el espacio libre.

El sonido en campo libre es aquel que viaja en líneas rectas, sin obstáculos ni desviaciones, esto significa, sin reflexiones, difracción, refracción, difusión y no está sujeto a efectos de resonancia.

Para explicar este tipo de propagación, podemos primeramente considerar una fuente omnidireccional, es decir, una fuente que radie energía en todas direcciones de manera uniforme, y cuyas dimensiones sean pequeñas con respecto a las longitudes de onda generadas. Para lograr estas características, la forma física de la fuente tendría que ser una especie de esfera pulsante de dimensiones del orden de milímetros, pero capaz de emitir frecuencias de toda la banda audible.

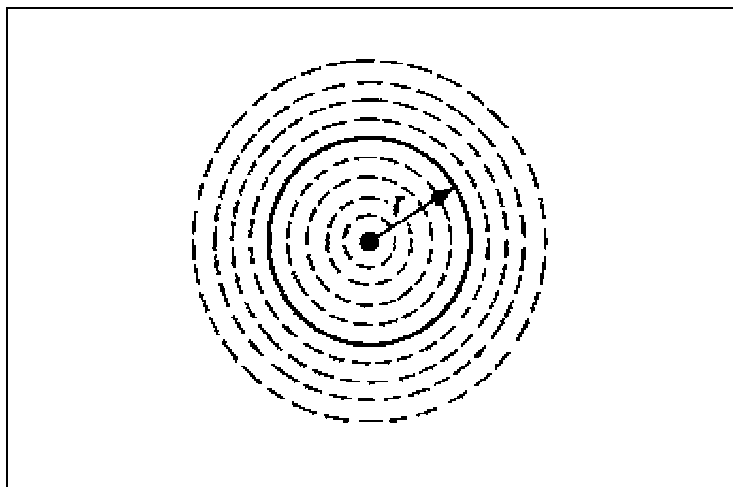


Fig. A.3: Fuente omnidireccional ideal y esferas concéntricas de distintos radios⁴⁰.

⁴⁰ r es el radio de la esfera.

La expansión y contracción de esta esfera se lleva a cabo a un ritmo senoidal y estas ondas pueden ser representadas como esferas concéntricas alrededor de la fuente propagándose en dirección radial. Así, se tendrán esferas de distintos tamaños, a través de cuyas áreas pasará la energía producida originalmente en la fuente. Es obvio entonces que entre más grande sea la esfera mayor será la superficie sobre la cual tiene que distribuirse la energía producida desde la esfera fuente.

Además, sabiendo que la intensidad sonora se define como la cantidad de energía que atraviesa una superficie en un cierto tiempo (Ec.1), se puede afirmar que la intensidad decrece al aumentar la distancia entre fuente y receptor; si la distancia se duplica ($r \rightarrow 2r$), la superficie aumenta en relación cuadrática, es decir, si antes se obtenía en función de r^2 (*), ahora se obtendrá en función de $(2r)^2 = 4r^2$, y por lo tanto la intensidad se reduciría a $\frac{1}{4}$. Si volvemos a duplicar la distancia ($r \rightarrow 4r$), entonces la intensidad disminuirá en un factor de $\frac{1}{16}$, y así sucesivamente. Se concluye que la intensidad del sonido es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia con respecto a la fuente (Ec.2).

$$I = \frac{E}{At} \quad (\text{a.2})$$

$$I \propto \frac{1}{r^2} \quad (\text{a.3})$$

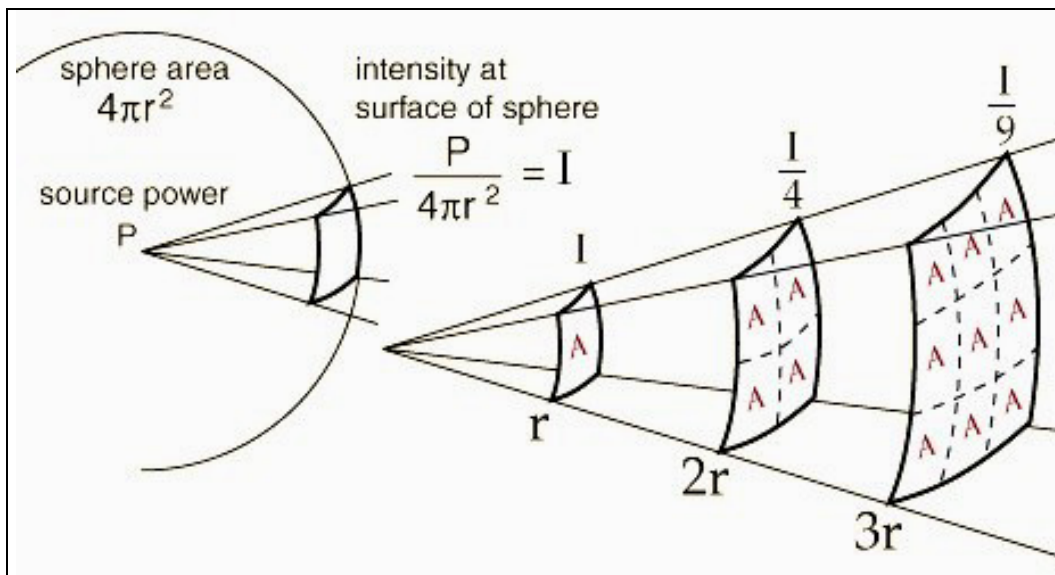


Fig. A.4: Aumento de la superficie del frente de onda y disminución de la intensidad acústica.

En la práctica, la intensidad acústica no es fácilmente medible, por lo que se suele recurrir a la presión sonora cuando se desean obtener datos acerca del campo sonoro. La intensidad acústica para una onda viajera es directamente proporcional al cuadrado de la

presión sonora (Ec.3), por lo que la relación entre distancia y presión es sólo inversamente proporcional (Ec.4).

$$I = \frac{p^2}{\rho_o c} \quad (\text{a.4})$$

$$p \propto \frac{1}{r} \quad (\text{a.5})$$

Apéndice B

CATT-Acoustic – Descripción

CATT-Acoustic (Computer Aided Theatre Technique) es un programa para predicción de espacios acústicos basado en el modelado de fuentes imagen (Image Source Model, ISM) para el detallado de ecogramas de la parte temprana, trazado de rayos para el mapeo del área de la audiencia y el trazado aleatorio de conos (RTC) para auralizaciones¹.

El sistema consiste en una interfaz de documentos múltiples de 32 bits para Windows como programa principal, un editor de texto personalizado que comunica con el programa principal, un visor de gráficos independiente (PLT-viewer), un visor de gráficos 3D basado en OpenGL y un conjunto de archivos AutoLISP para la interfaz con AutoCAD. El programa principal CATT32.EXE integra predicción, post procesamiento binaural, software de convolución, adición de fuentes múltiples, editor de directividad de fuentes, biblioteca de propiedades acústicas de las superficies, procesamiento en secuencia, reproductor de archivos .WAV, conversión de tipos de archivo, entre otras funciones.

Algunos parámetros calculados por el programa CATT

- Tiempos de reverberación

Calcula las siguientes variantes del tiempo de reverberación:

T_{60} (SabT)

T_{30}

T_{15}

Eyring (EyrT, EyrTg)

Los archivos que incluyen los parámetros anteriores son: (E_SS_RR_OCT.PLT y RT_SS.PLT)¹

- Gráficos de presión sonora

Se entrega una gráfica en 2D ó 3D del recinto, con un mapeo del área previamente seleccionada para cada octava y con una resolución ajustable.

Archivos: PARAM1_SS.PLT, PAR3_OCT.PLT y SPL_OCT.PLT

¹ Archivos de ayuda del programa CATT-Acoustic v8.0

¹ SS – Número de fuente

RR – Número de receptor

OCT – Banda de octava

- **Otras gráficas y parámetros**

Se pueden obtener gráficas 2D ó 3D con la distribución espacial de los siguientes parámetros:

- Eficiencia Lateral (LF)
Archivos E_SS_RR_OCT.PLT, LF_OCT.PLT y PARAM1_SS.PLT
- Early Decay Time (EDT), Claridad musical (C-80), Definición (D-50), Fuerza (G)
Archivos: E_SS_RR_OCT.PLT, PARAM1_SS.PLT, PAR1_OCT.PLT, PAR2_OCT.PLT y PAR3_OCT.PLT
- Índice RASTI
Archivos: RASTI.PLT y RASTI_SS.PLT

Ecogramas “tempranos”.

Archivos: E_SS_RR_OCT.PLT

Direccionalidad de los rayos recibidos por la HRTF.

Archivos: R_SS_RR_OCT.PLT

Decaimiento dB vs. T

Archivos: E_SS_RR_INT.PLT y E_SS_RR_D.PLT

Camino Libre Medio (MFP), Absorción promedio (AbsC, AbsCg), Difusión promedio (Diffs).

Archivo: RT_SS.PLT

Además, también se puede visualizar información detallada acerca de la geometría del recinto, las fuentes acústicas y los receptores configurados.

Apéndice C

Simulaciones preliminares

Con el fin de corroborar la utilidad del programa CATT-Acoustic® para este proyecto y conocer el grado de confiabilidad de las simulaciones obtenidas para el recinto estudiado, se hicieron varias simulaciones preliminares.

Así mismo, estas pruebas sirvieron para conocer los pormenores del programa y su respuesta en las condiciones particulares del caso estudiado.

RESPUESTAS IMPULSO.

Para la obtención de todas las respuestas al impulso presentadas en este apéndice, se han hecho las siguientes consideraciones:

- Se ha declarado una fuente puntual, con un patrón de radiación omnidireccional
- Se ha asignado a la fuente una presión sonora de 90 dB en todas las bandas
- Se ha omitido el filtro para audífonos
- Se sustituyó el archivo anecoico original Demo_22_an.wav por otro con el mismo nombre, longitud y fecha de creación pero con un impulso como única información.
- El receptor es una esfera de 18mm de diámetro con dos “oídos”. La simulación considera el efecto geométrico de dicha esfera (HRTF).
- Esta cabeza esférica ha sido rotada de manera que un oído apunte hacia la fuente.
- Se asumieron los valores promedio siguientes para las condiciones ambientales: temperatura de 20°C, humedad del 50% y densidad del aire de 1.20 kg/m³
- Al no presentar irregularidades geométricas significativas, el coeficiente de difusión para todas las superficies se ha declarado de 2%.
- No se ha incluido ningún objeto dentro del cuarto

Operador y fuente en las posiciones normales:

- Se utilizaron los valores de absorción de las superficies encontrados en tablas (ver Tabla 4.1)
- El receptor se encuentra frente a la fuente a una distancia de 0.7m (tomando en cuenta sus centros geométricos), y ambos están alineados sobre el eje “y” a 1.20m sobre el nivel del piso (ver Fig B.1).

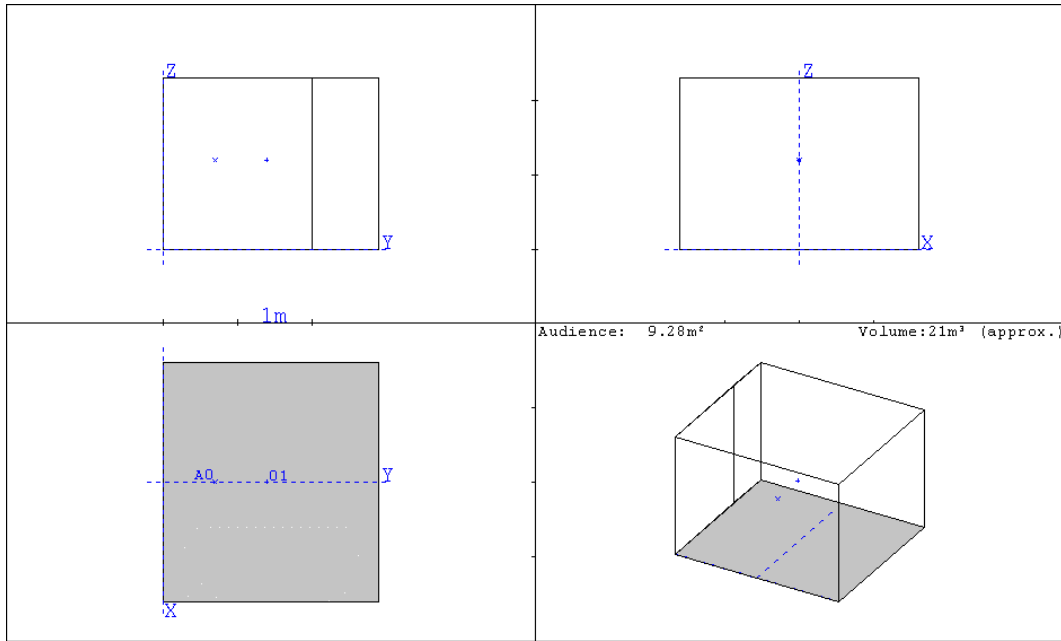


Fig. B.1: Ubicación de la fuente (A0) y el receptor (01)

Operador y receptor en esquinas opuestas:

- El receptor está en una esquina posterior a 0.09m de las tres fronteras aledañas
- La fuente está en la esquina anterior opuesta a la del receptor, a 0.1m de los tres planos contiguos
- Las posiciones mencionadas implican una distancia de 4.46m entre sus centros geométricos.

Operador y receptor en esquinas opuestas y en condiciones altamente reflejantes:

- Se utilizó un coeficiente de absorción del 1% y 2% de difusión en todas las superficies
- Las posiciones del receptor y la fuente son idénticas al caso anterior

Las simulaciones anteriores evidencian el comportamiento del programa CATT en la simulación de cuartos pequeños y condiciones extremas tales como muy baja absorción, objetos, receptor y/o fuentes colocados en las esquinas o cerca de las fronteras, etc. Se encontraron las siguientes particularidades:

- Puesto que los algoritmos utilizados en el programa son de carácter estadístico, en ciertas ocasiones, incluso para condiciones idénticas de simulación, puede producirse o no un error en el programa llamado “Fuga” en donde uno o más de los rayos utilizados por el programa escapan del encierro, perdiéndose información que puede ser importante o despreciable dependiendo del instante en que suceda tal

evento (si la fuga ocurre dentro de los primeros 100 ms de la simulación los datos pueden ser alterados de manera significativa, dependiendo de cada caso).

- El programa no considera alta la probabilidad de que un altavoz o un receptor puedan estar realmente cerca de las fronteras. Esto se debe a que el programa está orientado a recintos relativamente grandes. Es por ello que al acercarse uno de dichos elementos a alguna frontera, ocurren por lo regular fugas en los primeros milisegundos que afectarán los resultados finales.
- El recinto analizado es de dimensiones muy pequeñas en comparación con algunas longitudes de onda audibles (bajas frecuencias), esto crea un conflicto importante en el software que claramente se refleja en los resultados obtenidos: La respuesta en frecuencia de la Fig. B.3 (obtenida a partir de la respuesta impulso (Fig. B.2) que entregó el programa) se aleja mucho de lo esperado (modos difícilmente distinguibles, contrariamente a lo esperado para esta geometría).
- En condiciones extremas, como fronteras altamente reflejantes, la respuesta en frecuencia obtenida es muy difícil de interpretar en bajas frecuencias, ya que aparece una especie de ruido montado sobre la curva; se esperaba obtener una curva suave en bajas frecuencias, con modos bien definidos. Además, el tiempo de simulación se extendió exageradamente: casi 30 horas en comparación con los 4 o 5 minutos en condiciones normales de absorción (sin calcular los mapeos de distribución del nivel de presión sonora, que son los procesos más tardados, sólo respuesta impulso).

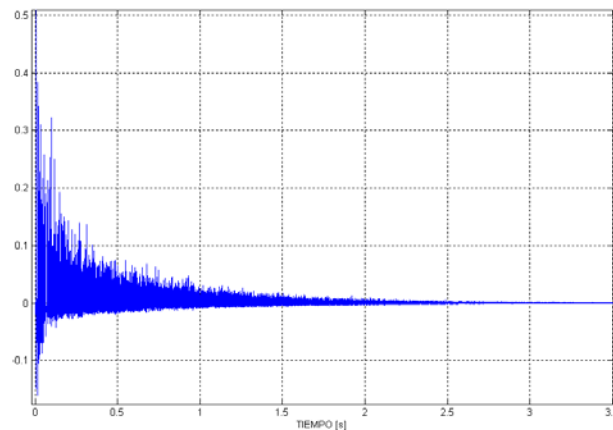


Fig. B.2: Respuesta impulso del recinto vacío con fronteras altamente reflejantes.

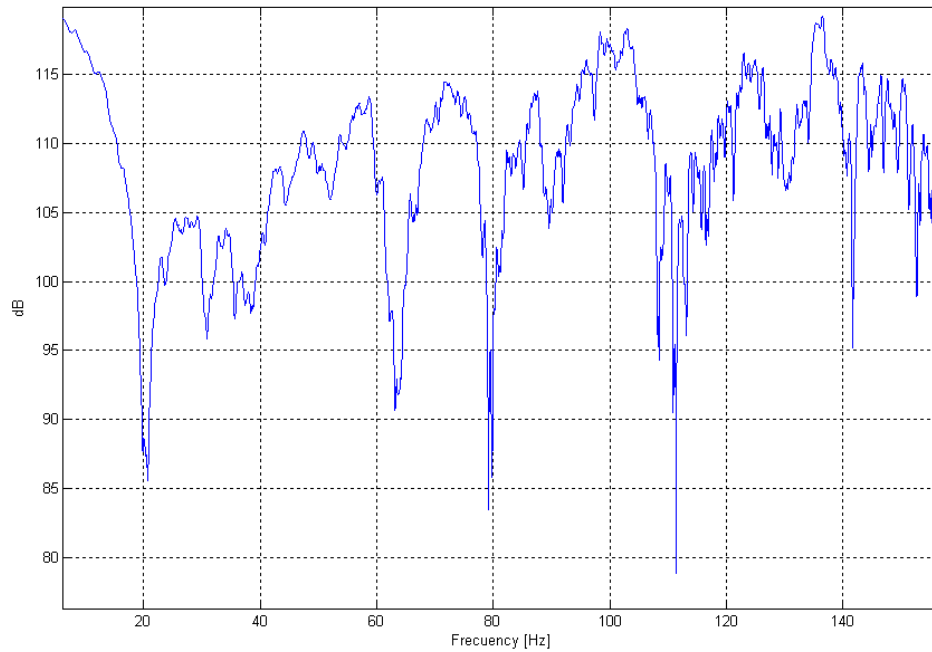


Fig. B.3: Respuesta en frecuencia del recinto vacío con fronteras altamente reflejantes.

Puesto que, bajo las condiciones altamente reflejantes, no aparecen los modos en la curva (como era de esperarse), se puede concluir que el programa CATT no considera estos efectos y no es posible utilizarlo para el estudio de modos en bajas frecuencias.

- En condiciones normales de absorción los modos reconocibles de la respuesta en frecuencia (contribución de solo una o pocas frecuencias características), coincidían de manera satisfactoria con los calculados de manera independiente al programa, a partir de las expresiones de acústica ondulatoria (Fig. B.4 y Fig. B.5).

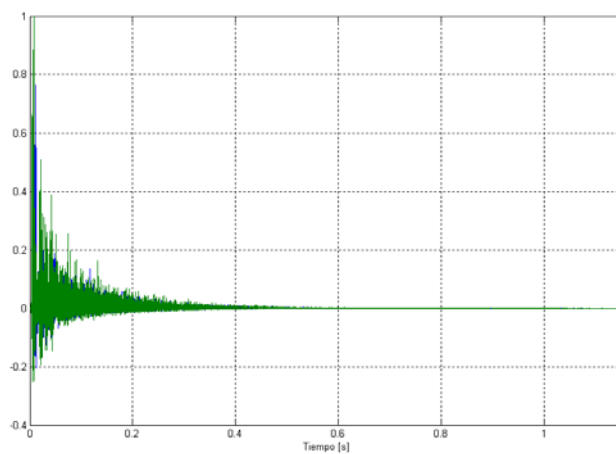


Fig. B.4: Respuesta impulso del recinto vacío con condiciones normales de absorción.

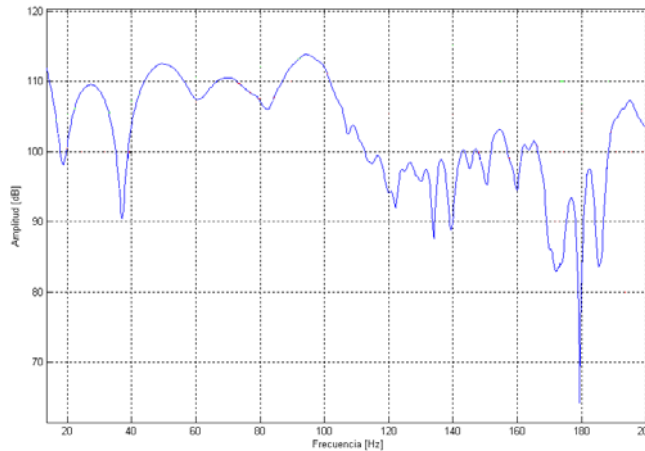


Fig. B.5: Respuesta en frecuencia del recinto vacío en condiciones normales de absorción.

Ya que las mediciones en Radio UNAM no pudieron efectuarse con el recinto completamente vacío, se tuvieron que incluir en la simulación los objetos presentes durante las mediciones *in situ*, esto trajo consigo otra serie de observaciones en la simulación:

- Al colocar objetos dentro del recinto resulta práctico despreciar detalles geométricos, siempre que dichos detalles no afecten la respuesta acústica (deben tener dimensiones pequeñas en comparación con las longitudes de onda estudiadas), como por ejemplo las patas de una mesa, objetos muy pequeños, etc., de lo contrario, será un proceso mucho más tardado y propenso a errores. Si después de estas consideraciones la geometría de un objeto sigue siendo compleja (superficies traslapadas, superficies con absorción en ambos lados) es recomendable aumentar el número de rayos por octava al doble o más o se obtendrán resultados sólo aproximados.
- Si el piso o el techo son muy absorbentes en comparación con las demás fronteras hay que asegurarse que llegue un número similar de rayos a todas ellas aumentando el número de rayos por octava o evitando objetos muy grandes “flotando” entre el suelo y el techo. Se observó que el error que se produce al no atender estas consideraciones puede ser hasta del 50 o 60%.

Apéndice D

Directividad.

Para poder utilizar una fuente electroacústica (altavoz, baffle, etc.), o cualquier otra fuente que no sea omnidireccional, dentro de una simulación con el programa CATT se deben definir ciertos parámetros de las fuentes sonoras fundamentales para una simulación cercana a la realidad. Tales parámetros son la directividad del altavoz, su sensibilidad y el nivel máximo de presión sonora emitido. La sensibilidad y directividad pueden obtenerse de las hojas de especificaciones de las bocinas, el SPL es definido por el usuario. Para el caso particular estudiado, las bocinas son el modelo JBL 4200, cuyas hojas de especificaciones no contienen información alguna sobre la directividad, por lo tanto, se tuvieron que efectuar las mediciones correspondientes.

Con ayuda de un analizador de señales marca Brüel & Kjaer modelo 2034 , dentro de la cámara anecoica del Laboratorio de Acústica del CCADET (UNAM, CU), se hicieron mediciones del nivel de presión sonora emitido por los altavoces mencionados a 1m de distancia y para distintos ángulos. Los detalles de las mediciones se dan a continuación.

EQUIPO UTILIZADO EN LAS MEDICIONES

- Analizador de señales B & K Tipo 2034
- Par de gabinetes con dos altavoces JBL 4208
- Micrófono de condensador de campo libre Brüel & Kjaer Mod. 4165 (sensibilidad:- 26.6dB re 1 V/Pa)
- Amplificador Yamaha AX-380 100 Wmax
- Pedestal giratorio para el gabinete.
- Tripié para micrófono
- Cables y accesorios varios

Dentro de la cámara anecoica se colocaron el gabinete y el micrófono separados un metro de distancia entre sí.

Se midió la sensibilidad de los altavoces a 1kHz, 1watt y 1m de distancia y también para una entrada de ruido pseudoaleatorio de 0-20 kHz, el voltaje de entrada fue de $2.81V_{rms}$.

Sensibilidad_{1 kHz} = 86.1dB

Sensibilidad_{ruido} = 83.6 dB

A continuación se obtuvo la función de transferencia (FT) bajo las siguientes consideraciones:

Ancho de banda (BW): 0 - 25.6 kHz
Voltaje de excitación del altavoz (Vent): 7.02 V
Nivel de salida total: 91.1 dB

Ancho de banda (BW): 0 - 1.6 kHz
Voltaje de excitación del altavoz (Vent): 7.02 V
Nivel de salida total: 91.1 dB

Luego se repitió el procedimiento varias veces rotando 15 grados el gabinete hasta completar los 180 grados frontales a la misma.

Las gráficas y resultados obtenidos se guardaron en archivos con extensión .MAT para poder ser manipulados en MATLAB.



Fig. C.1: Ejemplo de respuesta en frecuencia para un ángulo de 60°.

Para que el programa CATT reconozca la directividad de una bocina, se deben proporcionar los datos cada 10 o cada 15 grados (según el incremento la extensión del archivo puede ser .SD0 ó .SD1), y deben cubrir los 360 grados alrededor del altavoz tanto en un plano azimutal como polar. La razón por la cual las mediciones realizadas abarcan solamente los 180 grados frontales es que originalmente estos datos se obtuvieron con el único fin de complementar las especificaciones del equipo utilizado, y fue más adelante que se tuvo la posibilidad de utilizar la versión completa del programa CATT- Acoustic para hacer las simulaciones y diseño del cuarto, con la opción de utilizar distintos patrones de directividad para los altavoces del modelo. No fué posible realizar nuevas mediciones para completar los datos requeridos por el software ya que los altavoces no estuvieron disponibles para ello.

De entre una serie de especificaciones de directividad halladas tanto en la red como en la base de datos del mismo CATT-Acoustic se encontró que los altavoces de Meyer modelo UPM 1P, tienen un patrón de radiación muy parecido al obtenido experimentalmente para las JBL 4208 (ver Fig. C.2 y Fig. C.3), por lo que se tomaron como referencia los valores del patrón de radiación de los altavoces Meyer UPM 1P para ser usados en el programa CATT junto con los patrones de radiación de los altavoces JBL 4208.

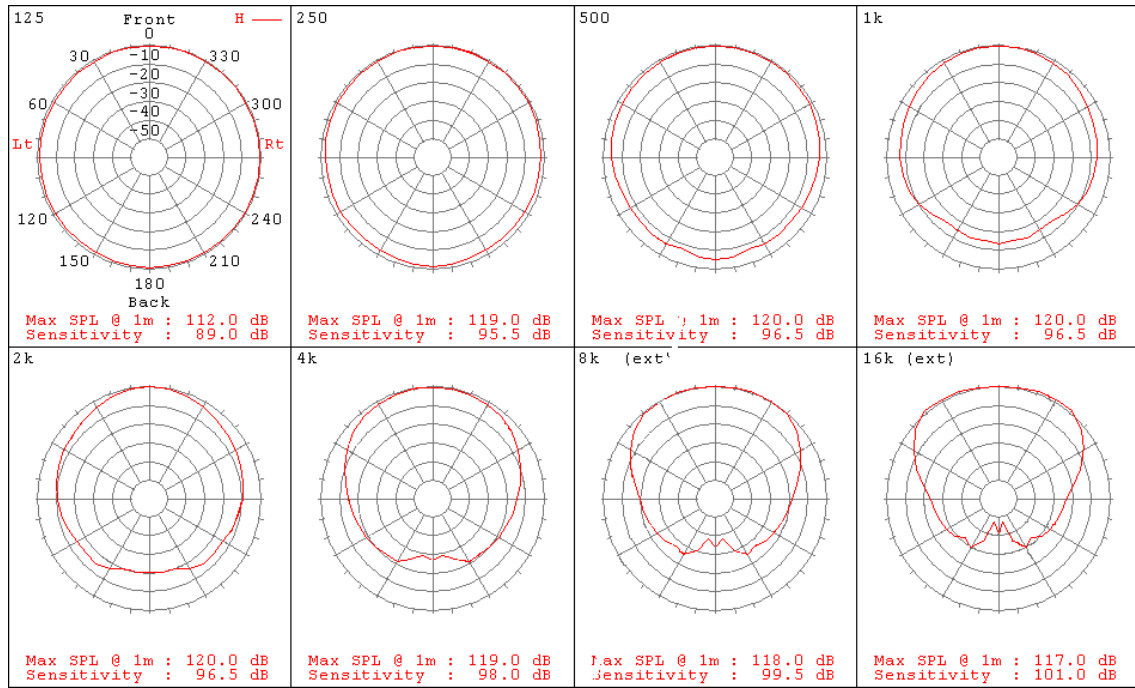


Fig. C.2: Patrón de directividad por bandas de una octava del altavoz Meyer modelo UPM 1P (extensión .SD1).

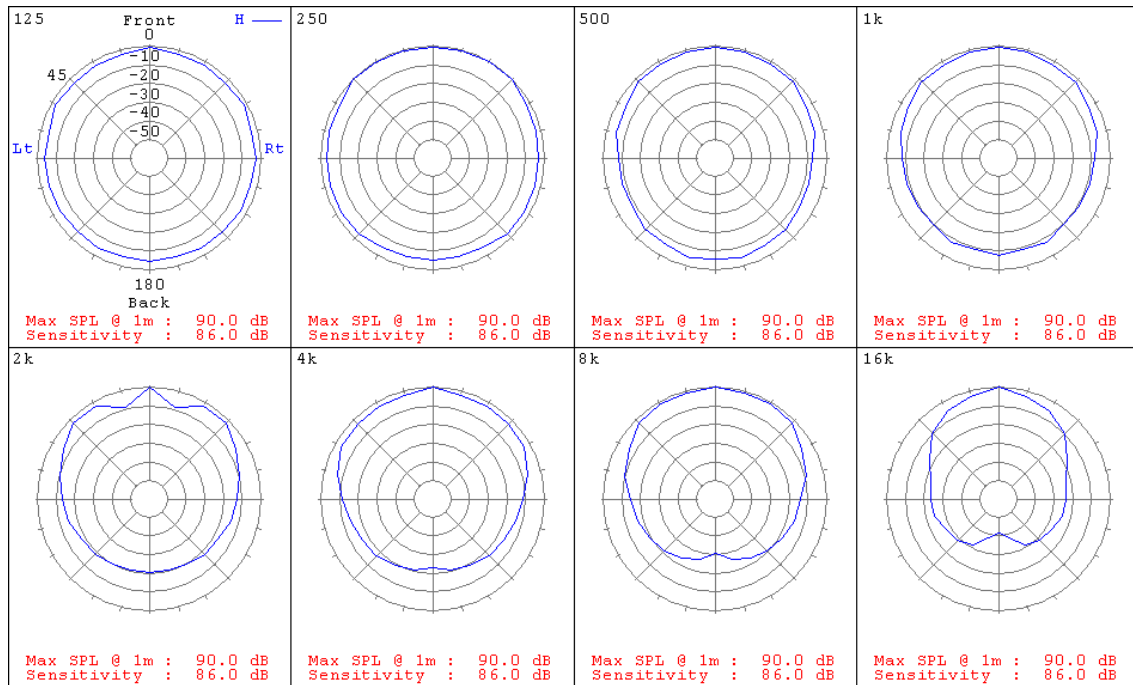


Fig. C.3: Patrón de directividad por bandas de una octava, utilizado en la simulación para los altavoces JBL modelo 4208 (extensión .SD0).

En las Figs. C.2 y C.3 se puede observar la gran similitud existente entre la parte superior de los patrones de ambas marcas. En la Fig. C.3 ya se han complementado la parte inferior del patrón de directividad del altavoz JBL con los valores del patrón de directividad de los altavoces Meyer.

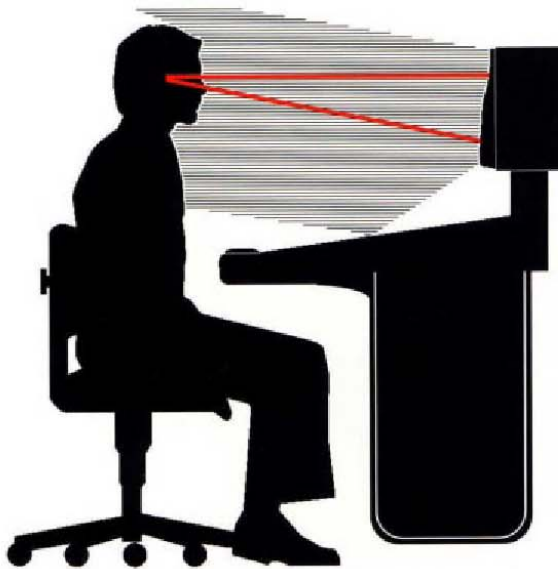
Apéndice E

Hojas de especificaciones de los altavoces JBL 4208

JBL

4200 Series Studio Monitors

Redefining The Shape And Sound, Of Console-Top Monitors.



To provide maximum stereo imaging while reducing the potential for listener fatigue, the pure titanium dome tweeter and cone transducer are aligned to deliver both high and low frequency information to the listening position at precisely the same instant.

Not too long ago, small speakers placed atop the mixing console were largely chosen for one thing: the "smallness" of their sound, i.e. their ability to duplicate the performance of the average home radio or car stereo. In recent years, the quality of home hi-fi and automotive audio systems has continually improved and recording engineers have been pushed to upgrade their console-top monitors accordingly. The search for the "ultimate" reference monitor was on.

We took a hard look at this situation. Today's recording studio can be a complex multi-function music recording, film and video post production, or radio production facility, or as simple as a 4-track studio in a bedroom or garage. Modern technology has made it possible to generate top quality recordings in just about any studio environment. As a result, no matter how simple or sophisticated the facility, it is clear that the monitor should be the very best it can be.

More and more critical listening occurs in the final mix, often making close proximity monitors more important than the mains. With no apparent technical guidelines with which to judge prospective monitor loud-speakers, the field was wide open. One thing, however, was very clear: many console-top monitors

were initially designed for the livingroom and not the control room. Until now.

We launched our efforts from your point of view, literally from the position where most of your critical listening and mixing is done: directly across from the mixing console. We interviewed a cross-section of recordists, ranging from known professionals in large production facilities to individual songwriters who own compact MIDI studios. We took into account the various recording environments and noted their physical and acoustical characteristics. With this information we were able to develop a list of design goals and define the methods by which we would achieve those goals.

In response, we developed the 4200 Series, console-top monitor models designed specifically for use in the near field. Both the 165 mm (6.5 in) model 4206 and the 200 mm (8 in) model 4208 bring a new look, a new sound and a new standard to the multi-purpose studio environment of today.

Starting with the unique Multi-Radial™ sculptured baffle, 4200 Series monitors direct the axial output of the individual components for optimum summing at the most common listening distance, approximately 1 to 1.5 meters (3 to 5 ft).

4206 Studio Monitor



The Multi-Radial baffle also positions the transducers to achieve alignment of their acoustic centers so that low, mid and high frequency information reaches your ears at the same point in time, resulting in superb imaging and greatly reduced phase distortion.

The curved surface of the injection molded ABS baffle serves to direct possible reflections of the shorter wavelengths away from the listening position, virtually eliminating baffle diffraction distortion. Vertical alignment of the transducers across the baffle center produces natural mirror-imaging.

A totally new 25 mm (1 in) pure titanium diaphragm high frequency transducer was developed for smooth, extended response. The incorporation of JBL's patented "diamond pattern surround" provides control over secondary resonances for virtually flat axial response beyond the upper limits of human hearing. This new device features a uniquely shaped "lens" which acts as a mechanical filter to balance energy output to within ± 2 dB to 20 kHz. Its magnet assembly is shielded to allow safe placement near magnetically sensitive equipment, i.e. CRT's, tape recorders, etc.

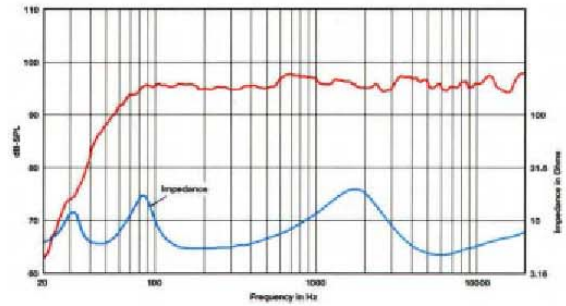
The low frequency components also feature magnetic shielding

making the 4200 Series monitors ideal for use in video post production facilities as well as music recording studios. The long, linear excursion design of the low frequency transducers results in smooth extended bass output with less distortion and power compression than competitive systems.

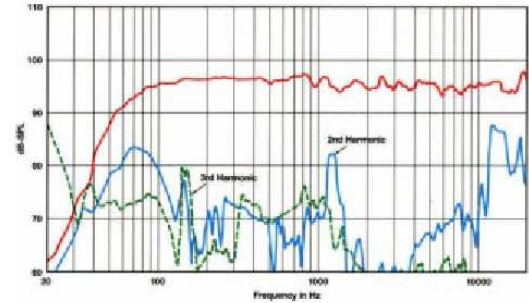
Smooth transition from low to high frequency components is achieved through carefully engineered high complexity crossover networks. Tight tolerances are maintained to achieve seamless summing and minimal distortion.

There is one thing old fashioned about the all-new 4200 Series. They're the product of JBL's legacy of listening. Listening to recording professionals, what they listen to and how they listen to it. The result of nearly two years research, design and engineering effort has produced the remarkable 4200 Series, console-top monitors designed in the studio, for the studio. These monitors offer exceptional sonic performance, incorporating technology and features typically associated with systems several times their price.

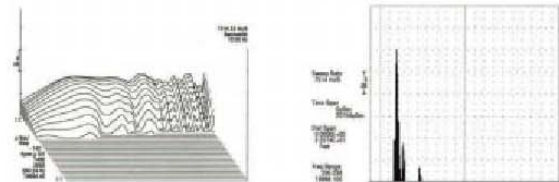
4200 Series: the shape, and the sound, of things to come.



Model 4206: Frequency Response: 96 dB at 1 m, typical console listening levels.



Model 4208: Distortion vs. Frequency 96 dB at 1 m, typical console listening levels (distortion raised 20 dB)



Model 4206: Time-Energy-Frequency (TEF) Curves (200 Hz to 20 kHz) Front-back span is from 7400 microseconds to 2993 microseconds; vertical divisions 6 dB. Note the smooth decay characteristics of the system.

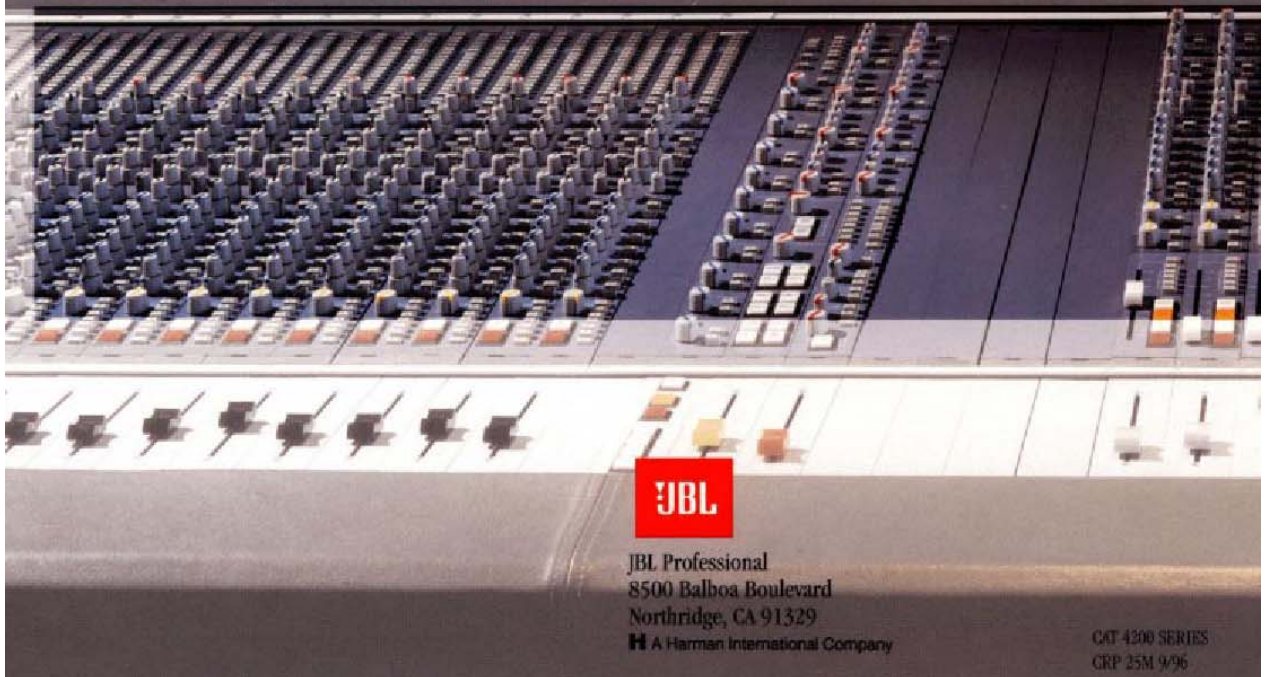
Model 4206: Energy-Time Curve (time span, 0 to 18,304 microseconds; vertical divisions of 6 dB; loudspeaker placed one meter from microphone). Note that the bulk of the loudspeaker's energy arrives at the microphone coherently.

4208 Studio Monitor

4200 Series Studio Monitors

Specifications

	4206	4208
Frequency Response (± 2 dB):	65 Hz - 20 kHz	60 Hz - 20 kHz
Frequency Range (- 10 dB):	42 Hz - 21 kHz	38 Hz - 21 kHz
Power Capacity:		
(Continuous Pink Noise):	75 watts	75 watts
(Peak Pink Noise):	300 watts	300 watts
Sensitivity:	87 dB SPL, 1 watt (2.83 V) at 1 meter	89 dB SPL, 1 watt (2.83 V) at 1 meter
Nominal Impedance:	8 ohms	8 ohms
Crossover Frequency:	2.8 kHz	2.6 kHz
Transducer Complement:	165 mm (6.5 in) LF 25 mm (1 in) pure titanium dome	200 mm (8 in) LF 25 mm (1 in) pure titanium dome
Finish:	Matte gray vinyl enclosure	Matte gray vinyl enclosure
Grille Color:	Gray	Gray
Dimensions:	390 x 229 x 241 mm 15 3/8 x 9 x 9 1/2 in	451 x 286 x 229 mm 17 3/4 x 11 1/4 x 9 in
Net Weight (each):	6.8 kg (15 lb)	9.3 kg (20.5 lb)
Shipping Weight (pair):	16.4 kg (36 lb)	21.8 kg (48 lb)



JBL Professional
8500 Balboa Boulevard
Northridge, CA 91329
A Harman International Company

CAT 4200 SERIES
CRP 25M 9/96

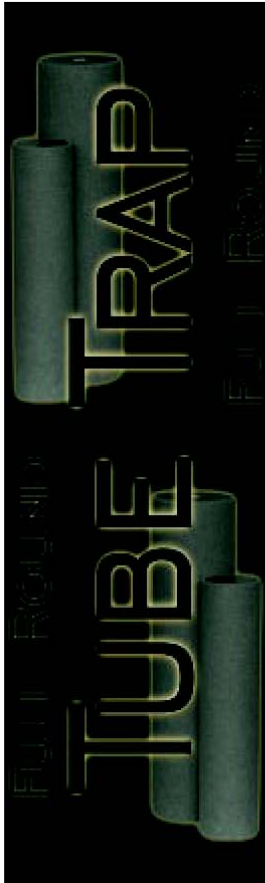
Apéndice F

Hojas de especificaciones

HI-FI
&
STUDIO

ACOUSTIC SCIENCES CORPORATION

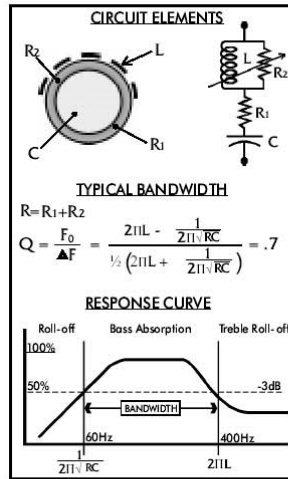
TUBE TRAP



DESIGNED WITH ACOUSTIC PERFORMANCE IN MIND

ASC's *Tube Trap* is the first and foremost corner loaded bass trap in the audio industry. It's low frequency absorption is determined by the diameter of the *Tube Trap*: the greater the diameter, the lower the roll-off. The acoustic capacitor (C) is the air chamber inside, the bigger it is, the more efficient the *Tube Trap* is at low frequencies. The acoustic resistance (R) is DC impedance matched to the radiation (LC) impedance of a freely radiating soundwave. The specular diffusion panel that covers half of the *Tube Trap* is an acoustic choke (L) which is sized, ported and mass loaded to backscatter the treble range.

The operating bandwidth of *Tube Traps* is about 60Hz to 400Hz with a resulting $Q = .7$. The numerous proprietary steps integrated into the *Tube Trap* insure smooth, resonant-free response curves.

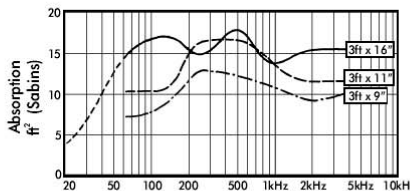


THE ACOUSTIC CIRCUIT



Absorption

- Curved walls are pressure loaded for resonance free absorption
- Entire curved surface of the Tube Trap is bass absorptive
- Impedance matched to radiation of the sound in free air
- Interior bulkhead compartments to increase efficiency
- Vented free breathing reflector sheet improves bass absorption

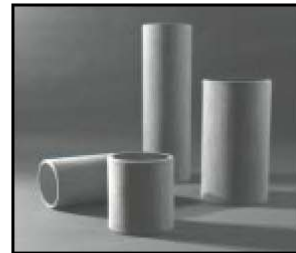


Reflection

- Reflector is curved for wide angle treble diffusion
- Perforated reflector gives smooth nearfield diffusion
- Reflector is a floating limp mass sheet and is resonant free
- Rotate the Trap to adjust reflector position and dial in ambience
- Specular diffusion, no time smear, storage or resonance effects
- Chrome button indicates the center of the reflective surface

Features

- Freestanding, corner loaded bass trap
- Full bandwidth absorption to 40Hz or below
- Adjustable mid-range diffusion above 400Hz
- Sturdy exoskeleton construction for strength
- Threaded inserts for stacking and hanging
- Fiber-free construction, multiple sizes and colors



ASC ACOUSTIC SCIENCES CORPORATION

Headquarters:
4275 West 5th Ave.
Eugene, OR 97402

Contact:
Ph: 541.343.9727
Fax: 541.343.9245
info@tubetrap.com

www.tubetrap.com

1 800 272 8823

ASC Providing World-Class Acoustics

TUBE TRAP

ACOUSTIC SCIENCES CORPORATION

GENERAL SPECIFICATIONS



The *Tube Trap* is the basic acoustic component in high performance sound systems. The original *Tube Trap* was developed as a corner loaded bass trap and voiced with a built-in treble range diffuser panel. Patented and lab tested, the *Tube Trap* has become a well known acoustic device in its own right. *Tube Traps* are used against walls, ceilings, loudspeakers and even in open space. By far, the most compelling feature of the *Tube Trap* is how convenient it is to position and adjust. This flexibility encourages experimenting in acoustics and has resulted in many unique innovations. The following sections outline basic principles used in *Tube Trap* setups.

••• Corner Loaded Bass Trap •••

The tri-corner of a room acts to transform and compress all of the acoustic energy in a sound wave into pure pressure fluctuations. *Tube Traps* are designed to take full advantage of the acoustic pressure zones created in the corners of a room. They convert the pressure changes into air movement within the dense walls of the *Tube Trap*. Through regulated friction in the walls of the *Tube Trap*, energy is damped out of the wave.

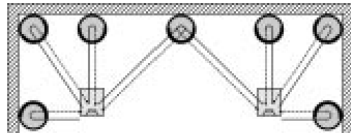
Because of how it works the *Tube Trap* is known as a "pressure zone bass trap." The diameter of the *Tube Trap*, not the length determines the low frequency cutoff. Only *Tube Traps* have built-in diffusive reflection panels to maintain ambience control. *Tube Traps* work best in areas where there is heavy bass, such as the corners of the room.



••• Boundary Reflections •••

When a woofer is located near a wall, its freefield frequency response becomes distorted. The nearby reflection drives a pressure wave back over the speaker cone. Walls, floor and corner reflections produce 5 to 20ms delay signals that mix with the direct signal at the driver to induce comb filtering effects into the bass range of the speaker and as well, side lobe beaming patterns.

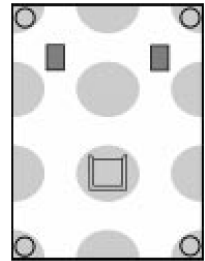
A *Tube Trap* located at each of these reflection points will reduce the strength of the reflection. This reduces the comb filtering and side-lobing effects in the bass range. But not all wall reflections are bad. Speakers located near walls deliver better deep bass. Our boundary conditioning Traps are bandwidth limited to allow them to defeat comb filtering and beaming effects but not at the expense of wall loading in the deep bass range. Diffusive strips in the Traps are oriented behind the speakers to better develop the ambience.



••••• Room Modes •••••

When low frequency sound is injected into a room, the waves reflect back and forth. At certain frequencies, the reflection patterns begin to overlap and lock into a synchronized condition with each other to produce standing waves. Whenever this pattern overlaps the speakers we get "room boom", an overpowering emphasis by the room/speaker arrangement to play only a few, very strong bass notes.

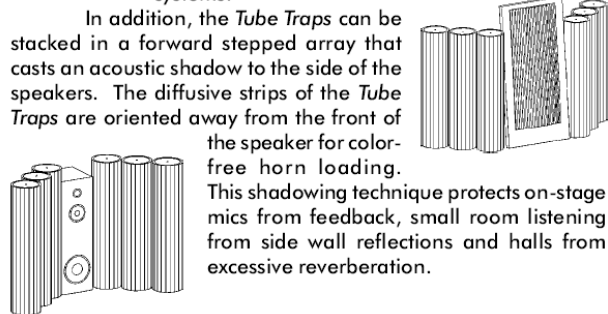
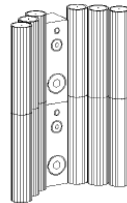
Nothing can actually get rid of room modes, short of removing the room entirely. But adding bass traps will even out the bass response and improve transient attacks and decay. Although every mode has a unique pattern of pressure zones distributed throughout the room, all modes have pressure zones in the tri-corners. ASC is the pioneer of corner loaded bass traps, and the *Tube Trap* remains the unsurpassed upgrade for all high performance audio acoustic systems.



••••• Bass Loading •••••

Tube Traps can also be used in the open, close coupled to speakers in order to improve their performance. By stacking *Tube Traps* to expand the effective size of the speaker baffle board, the effect of increased bass directivity and efficiency is achieved. This works with sealed, front ported or dipole speakers, flown or stage mains, hi-fi, studio monitors, portable PA and nightclub systems.

In addition, the *Tube Traps* can be stacked in a forward stepped array that casts an acoustic shadow to the side of the speakers. The diffusive strips of the *Tube Traps* are oriented away from the front of the speaker for color-free horn loading. This shadowing technique protects on-stage mics from feedback, small room listening from side wall reflections and halls from excessive reverberation.



When You Want the Best in Acoustic Performance, Specify ASC *Tube Traps*.

BIBLIOGRAFÍA

Everest F. Alton.

THE MASTER HANDBOOK OF ACOUSTICS

Ed. McGraw Hill, (USA) 2001.

4ª edición.

Cox, Trevor J. y D'Antonio, Peter.

ACOUSTIC ABSORBERS AND DIFFUSERS (Theory, Design and Application)

Ed. Spon Press, (London) 2004.

1ª edición.

Carrión Isbert, Antoni.

DISEÑO ACÚSTICO DE ESPACIOS ARQUITECTÓNICOS

Ed. Alfaomega, (México) 2001.

1ª edición.

J. Llinares, A. Llopis y J. Sancho.

ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA Y URBANÍSTICA

Universidad Politécnica de Valencia, 1991.

Knudsen, Vern y Harris, Cyril.

ACOUSTICAL DESIGNING IN ARCHITECTURE

Acoustical Society of America, 1978.

Templeton, Duncan. *Et al.*

ACOUSTICS IN THE BUILT ENVIRONMENT

Butterworth Architecture, (Great Britain) 1993.

Recuero López, Manuel.

INGENIERÍA ACÚSTICA

Ed. Paraninfo, (España), 2000.

Recuero López, Manuel.

ESTUDIOS Y CONTROLES PARA GRABACIÓN SONORA.

Instituto Politécnico Nacional. México, 1991.

Miyara, Federico.

ACÚSTICA Y SISTEMAS DE SONIDO

Universidad Nacional de Rosario, (Argentina) 1999.

Crocker, Malcolm J. y Kessler, Frederick M.

NOISE AND NOISE CONTROL Vol. II

CRC Press

Crocker, Malcolm J. *Et al.*
ENCYCLOPEDIA OF ACOUSTICS Vol. III
John Wiley & Sons, Inc. 1997.

Beranek, Leo L.
ACOUSTICAL MEASUREMENTS
Acoustical Society of America, 1988.

Kuttruff, Heinrich.
ROOM ACOUSTICS
Spon Press, 2000.
4ª edición.

Steeneken, H.J.M. y Houtgast, T.
TECHNICAL REVIEW No. 3-1985 (RASTI)
Brüel & Kjaer, 1985.

Hewlett Packard.
HP 3569A A REAL-TIME FREQUENCY ANALYZER OPERATOR'S GUIDE
H-P Company, 1994.

Bradley J. S. y Souldore, G. A. *Objective Measures of Listener Envelopment*. JASA, 98 (1995) 2590.

Randall, K. E. y Ward, F. L. *Diffusion of Sound in Small Rooms*, Proc. Inst. Elect. Engs., Vol. 107B (Sept, 1960), p. 439-450.

Barron, M. y Marshall, A. H. *Spatial Impression Due to Early Reflections in Concert Halls: The Derivation of a Physical Measure*. Acoustics of Sound and Vibration, 72, 211-232, 1981.

Gilford, C. L. S. *The Acoustic Design of Talk Studios and Listening Rooms*. Proc. Inst. Elect. Engs., 106, Part B, 27 (May 1959), 245-258.

Beranek, Leo L. *Correlations between categories of acoustical quality for forty concert halls and measured physical parameters for them: RT, EDT, IACC, LF, G, ITDG, BR, C(80) and diffusion*. JASA, 97 (1995) 5, 3319.

Beranek, Leo L. [Et al]. *Interaural cross-correlation (IACC), lateral fraction (LF), and low- and high-frequency sound levels (G) as measures of acoustical quality in concert halls*. JASA, 98 (1995) 2, 988.

Beranek, Leo L. *Concert Hall Acoustics*. JASA, 116 (2001) 5, 2620.

D'Antonio, Peter y Cox, Trevor. *Two Decades of Sound Diffusor Design and Development Part 1: Applications and Design*. J. Audio Eng. Soc., Vol. 46, No. 11, 1998.

D'Antonio, Peter y Cox, Trevor. *Two Decades of Sound Diffusor Design and Development Part 2: Prediction, Measurement, and Characterization*. J. Audio Eng. Soc., Vol. 46, No. 12, 1998.

Boris, Jeffrey. *Diffusing Surfaces in Concert Halls: Boon or Bane?*. J. Audio Eng. Soc., Vol. 34, No. 7/8, 1986.

D'Antonio, Peter y Konnert, John H. *The Reflection Phase Grating Diffusor: Design Theory and Application*. J. Audio Eng. Soc., Vol. 32, No. 4, 1984.

Mommertz, Eckard. *Determination of Scattering Coefficients from the Reflection Directivity of Architectural Surfaces*. Applied Acoustics, 60 (2000) 201-203.

Farina, Angelo. *A New Method for Measuring the Scattering Coefficient and the Diffusion Coefficient Panels*. Acta Acustica, Vol. 86 (2000) 928-942.

Steeneken, H. J. M. y Houtgast, T. *A Physical Method for Measuring Speech Transmission Quality*. JASA, 67 (1980) 318.

Pancharatnam, S. y Ramachandraiah, A. *A Study on the Computer Aided Acoustic Analysis of an Auditorium*. IE Journal, Vol. 84, April 2003, 10-16.

Garrido Hernández, Vanesa y Orduña Bustamante, Felipe. *Desarrollo de un Sistema para la Medición de Índices Acústicos en Recintos*. SOMI XIV Congreso Nacional de Instrumentación, 523-527.

Guzmán, A., Orduña, F. Y Ruiz, R. *Diseño e Implementación de una Jerarquía de Clases para la Simulación de Espacios Acústicos Usando Programación Orientada a Objetos*. SOMI XIV Congreso Nacional de Instrumentación, 528-532.

Volkman, J. E. *Polycylindrical Diffusers In Room Acoustical Design*, J. Acous. Soc. Am., 13 1942, p. 234-243.

Boner, C. P. *Performance Of Broadcast Studios Designed With Convex Surfaces Of Plywood*, J. Acous. Soc. Am., 13 1942 p. 244-247.

Sepmeyer, L. W. *Computed Frequency And Angular Distribution Of The Normal Modes Of Vibration In Rectangular Rooms*, J. Acous. Soc. Am., 37, 3 (March 1965). p. 413-423.

Louden, M.M. *Dimension-Ratios Of Rectangular Rooms With Good Distribution Of Eingen-tones*, Acoustica, 24 (1971), p. 101-103

Kleiner, Mendel. *Auralization Experiments with CATT*. JASA, 100 (1996) 4, 2579.

Pyper, T., Knight, D. y Schmidt A. *Recent Emphasis of Computer Modelling in Architectural Acoustics Consulting*. JASA, 111 (2002) 5, 2369.

BASES DE DATOS CONSULTADAS

Broadcast Engineering: Control Room Acoustics

http://broadcastengineering.com/aps/production/broadcasting_control_room_acoustics/ (07 FEBRERO 2005 10:10 AM)

Multichannel Control Room Acoustics

<http://www.genelec.com/pdf/MultichannelControlRoomAcousticsandCalibration.pdf> (07 FEBRERO 2005 10:30 AM)

Tangible Technology

<http://www.tangible-technology.com/acoustics/1/room2move.htm>
(07 FEBRERO 2005 10:40 AM)

Acoustic Design & Products

<http://www.soundcontrolroom.com/guidelines.htm>
(07 FEBRERO 2005 11:00 AM)

RPG Diffusor Systems

<http://www.rpginc.com/index.htm>
(24 JUNIO 2005)

Mojo Pie For Recording Musicians

<http://www.mojopie.com/mastering.html>
(07 FEBRERO 2005 11:41 AM)

Laboratorio de Acústica y Electroacústica (Difusores Acústicos)

<http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/~acustica/index.htm>
(Difusores, 07 FEBRERO 2005 11:50)

Variable Room Acoustic System

<http://www.proav.de/lcs-vras/24167.html>
(29 JUNIO 2005 17:23)

Audiocube

http://www.cube-tec.com/Audiocube_mainframe.html
(12 JULIO 2005)

CATT-Acoustic

<http://www.catt.se/>
(01 JULIO 2005)

Acústica en México
<http://gama.fime.uanl.mx/acustica>
(23 ABRIL 2005)

Postproducción y masterización de audio
<http://www.darkdog.3a2.com/>
(23 SEPTIEMBRE 2004)

Cube Tec (Procesado de señal)
<http://www.iberalp.es/Descripciones/cubetec/vpis.htm>
(29 JUNIO 2005)

Brüel Acoustics
<http://www.bruel-ac.com/eng/rasti.htm>
(10 JULIO 2005)

Cyclotron Records (Pro Audio Mastering)
<http://www.cyclotronrecords.com/mastering/index.html>
(20 JULIO 2005)

Acústica Arquitectónica
http://www.labc.usb.ve/EC4514/AUDIO/ACUSTICA_ARQUITECTONICA/Acustica_geometrica.html
(25 ENERO 2004)

Journal of Acoustic Society of America
<http://asa.aip.org/jasa.html>
(25 JULIO 2005)