

TP 7 - DIAGNÓSTICO DE SALA DE CONTROL

Federico Gomez

Universidad Nacional de Tres de Febrero, Ingeniería de Sonido, Caseros, Buenos Aires, Argentina
email: fede_gomez@live.com

Jerónimo Igoldi Rizzi

Universidad Nacional de Tres de Febrero, Ingeniería de Sonido, Caseros, Buenos Aires, Argentina
email: jeroigoldi10@gmail.com

Ciro Lockey

Universidad Nacional de Tres de Febrero, Ingeniería de Sonido, Caseros, Buenos Aires, Argentina
email: lockey51042@estudiantes.untref.edu.ar

Alejo Cohen

Universidad Nacional de Tres de Febrero, Ingeniería de Sonido, Caseros, Buenos Aires, Argentina
email: cohen51134@estudiantes.untref.edu.ar

En este trabajo se presenta el diagnóstico acústico de la sala de control del estudio Syntagma, ubicado en el barrio de Almagro en CABA. Se realizan mediciones de respuesta al impulso en 6 puntos fijos y una medición móvil, logrando una caracterización general del recinto y un análisis detallado en el punto de sweet spot. La sala presenta una baja homogeneidad espacial, atribuida a la escasa absorción en bajas frecuencias. Además, se identificaron cancelaciones modales en torno a los 60 Hz, que no pueden corregirse mediante filtrado. Aún así, la respuesta en el punto de escucha se vería mejorada con la aplicación de filtros digitales. Se recomienda un rediseño del espacio que modifique la ubicación de los monitores y del punto de escucha, con el objetivo de mitigar las cancelaciones críticas y optimizar la respuesta general del sistema.

Palabras clave: sala de control, modos acústicos, ISO 16283-1, filtros digitales.

1. Introducción

En el presente trabajo práctico se exponen los lineamientos y procedimientos llevados a cabo para el diagnóstico acústico de la sala de control de un estudio de grabación profesional. Se detalla la aplicación concreta de estos criterios en las instalaciones de Syntagma, un estudio ubicado en el barrio de Almagro, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

El trabajo se enfoca en aspectos como la caracterización del sistema de monitoreo, el análisis de las reflexiones acústicas de la sala y el estudio del comportamiento modal de la misma. Para ello, se consideran parámetros objetivos tales como la respuesta en frecuencia, el tiempo de reverberación y el tiempo de decaimiento temprano, entre otros. Los mismos se analizan a partir de la respuesta acústica del recinto, la cual se obtiene mediante dos técnicas: en primer lugar, registrando un barrido senoidal logarítmico de larga duración en seis posiciones estáticas; y, posteriormente, aplicando la metodología de micrófono móvil según lo establecido en la norma ISO 16283-1 [1]. Tras el análisis del comportamiento acústico de la sala, se diseñan filtros de corrección para los monitores de forma

automática utilizando el software Room EQ Wizard (REW) [2], y se elabora un informe detallado para el cliente.

En las secciones siguientes se presenta un análisis del estado del arte, se exponen los lineamientos teóricos fundamentales, se describe la metodología aplicada y, finalmente, se detallan los resultados obtenidos junto con su respectivo análisis.

2. Estado del Arte

Se dispone de una amplia bibliografía especializada en el diseño de salas de control, la cual resulta fundamental para profundizar en el diagnóstico y análisis de dichas salas.

Davis en 1980 [3] introdujo el concepto "LEDE"(Live End-Dead End), que se centra en el control del retardo inicial y la densidad de las primeras reflexiones para crear un ambiente acústico neutral. Este enfoque ha sido fundamental en el diseño de salas de control desde entonces.

Posteriormente, en 1985, Volker [4] comparó diferentes tiempos de reverberación en una sala de control para mezclar música de diversos géneros, manteniendo constantes el sistema de monitoreo, la respuesta en frecuencia y la posición de escucha. Concluyó que el tiempo de reverberación ideal depende del tipo de música: para música de iglesia se prefieren valores más altos, mientras que para música moderna con percusión, como tambores, se requieren tiempos más bajos.

En 2003, Newell [5] detalló en su libro cómo debe llevarse a cabo la construcción de los estudios de grabación y las salas de control. El análisis abarca tanto los parámetros acústicos como los del sistema de monitoreo, incluyendo tratamiento de absorción y aislamiento. Se publicaron revisiones de esa primera edición considerando investigaciones posteriores y parámetros acústicos relevantes.

En 2014, Anderson, Forgette y Smith [6] presentaron un análisis acústico de un estudio de grabación utilizando la herramienta COMSOL Acoustic [?] para calcular los modos resonantes típicos de un recinto. Destacaron la importancia de considerar las resonancias de la sala en el diseño de una sala de control. El estudio calculó todas las frecuencias propias por debajo de 150 Hz junto con sus modos correspondientes, los cuales representan los patrones de intensidad sonora asociados a cada frecuencia. A partir de estas características, fue posible determinar recomendaciones sobre la ubicación óptima de los altavoces.

3. Marco teórico

3.1 Sala de Control y Punto de 'Sweet Spot'

Una sala de control puede definirse como un espacio diseñado específicamente para la monitorización y mezcla de audio en entornos de grabación y producción musical o audiovisual. Dicha sala debe contar con características acústicas optimizadas para proporcionar una respuesta de frecuencia plana y una imagen estéreo precisa, minimizando reflexiones no deseadas y modos de resonancia. En este contexto, el punto de 'Sweet Spot' se refiere al punto óptimo de escucha dentro de una sala de control, donde la percepción del sonido es más precisa y equilibrada en relación al resto del recinto. Alton Everest [7] describe el Sweet Spot como el lugar donde el oyente está equidistante de los altavoces y en el eje de escucha recomendado, generalmente formando un triángulo equilátero con los monitores. En este punto, la imagen estéreo es más precisa, permitiendo al ingeniero de mezcla tomar decisiones con un mayor grado de precisión.

3.2 Frecuencia de Schroeder

La frecuencia de Schroeder es un concepto clave en acústica arquitectónica. Se define como el punto de transición entre el comportamiento modal de una sala (donde dominan modos estacionarios) y el comportamiento estadístico reverberante (donde el campo sonoro puede considerarse difuso y la

energía se distribuye más uniformemente). Su expresión matemática queda detallada en la Ecuación 1, derivada de las investigaciones del Dr. Manfred Schroeder [8].

$$f_s = 2000 \cdot \sqrt{\frac{RT}{V}} \quad (1)$$

donde f_s es la frecuencia de Schroeder en Hz, RT el tiempo de reverberación en segundos, y V el volumen del recinto en m^3 .

Se trata de un concepto fundamental para entender por qué realizar mediciones en bajas frecuencias necesita mayor atención sobre los factores expuestos. El campo sonoro es menos uniforme para este rango, más dependiente de la posición de medición y más sensible a fuentes de ruido.

3.3 Modos Acústicos

Los modos acústicos constituyen propiedades resonantes inherentes a todo recinto cerrado, determinadas por su geometría y condiciones de contorno. Provocan picos y caídas en la respuesta de frecuencia que dependen de la ubicación de la fuente y del oyente, así como también de la forma y el tratamiento acústico del espacio. Investigaciones realizadas por varios autores como Bucklein [9], Olive, Schuck, Toole y otros [10] han demostrado que los picos de baja frecuencia son más perceptibles que las caídas espectrales correspondientes, además de que la detección de estas resonancias también depende de su frecuencia y su ancho de banda. En términos prácticos dentro del contexto de este trabajo, las resonancias de baja frecuencia pueden amplificar o atenuar ciertos grupos de frecuencias, alterando la percepción del oyente y, por lo tanto, llevándolo a tomar decisiones incorrectas.

A lo largo de los años se han propuesto numerosos métodos para calificar la coloración modal de un recinto, como los criterios de Bolt [11], Louden [12], Bonello [13] y Cox [14], entre otros. Básicamente, estos buscan evitar modos degenerados, donde múltiples frecuencias modales caen dentro de un ancho de banda reducido, y a su vez evitar anchos de banda sin modos.

De encontrarse en una etapa de diseño, un punto inicial para determinar las dimensiones de la sala suele ser el propuesto en la Ecuación 2, que define las frecuencias propias f_n en Hz dentro de un recinto rectangular rígido.

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

En dónde n_x , n_y y n_z son números enteros que indican el enésimo modo y l_x , l_y y l_z corresponden a las dimensiones de *largo*, *ancho* y *alto* del recinto en m . Por último, c corresponde a la velocidad del sonido en metros por segundo.

3.4 Varianza del Promedio Espacial (VSA) y Varianza Espacial Media (MSV)

La Varianza del Promedio Espacial VSA (por sus siglas en inglés) es una métrica empleada en acústica de salas para evaluar la uniformidad de la respuesta en amplitud en distintas posiciones dentro de un recinto [15]. Su cálculo consiste en obtener el nivel medio de presión sonora, expresado en decibeles (dB), a partir de mediciones realizadas en un conjunto de ubicaciones seleccionadas, y posteriormente calcular la varianza de ese promedio espacial dentro de una banda de frecuencia específica de interés.

Este descriptor ayuda a evaluar cuán consistente es la respuesta de amplitud en diferentes posiciones de asientos en una sala. Según los autores, es particularmente relevante en situaciones donde la ecualización electrónica no es una opción viable. El VSA se puede obtener mediante la Ecuación 3.

$$VSA = \text{var}(\text{mean}_s(A(s, f))) \quad (3)$$

Donde el subíndice s indica que la media o varianza se calcula considerando los diferentes asientos, resultando en un valor para cada intervalo de frecuencia. $A(s, f)$ representa la respuesta de amplitud en el receptor s y en la frecuencia f , expresada en decibeles (dB).

La Varianza Espacial Media MSV (por sus siglas en inglés) es otra métrica importante utilizada en la acústica de salas para evaluar la consistencia de la respuesta de amplitud en diferentes posiciones de asientos del recinto. A diferencia de VSA, que se centra en la uniformidad de la respuesta de amplitud entre asientos, MSV mide específicamente la variación en el nivel sonoro en dB en función de la ubicación de los asientos.

Al calcular la varianza del nivel sonoro para cada frecuencia en las posiciones de los asientos y luego determinar la varianza media, MSV proporciona información sobre la consistencia de la respuesta de amplitud de asiento a asiento en una sala. Aunque no se ha demostrado de manera concluyente que esté correlacionada con la preferencia del oyente, se considera importante minimizar la variación de la respuesta de amplitud entre asientos, especialmente en escenarios donde se pretende ecualizar el sistema de audio. Este descriptor se puede obtener mediante la Ecuación 4.

$$MSV = \text{mean}(\text{var}_s(A(s, f))) \quad (4)$$

En donde primero se calcula la varianza del nivel sonoro en dB en función de la ubicación de los asientos para cada frecuencia y, a partir de esto, se calcula la varianza media.

3.5 Tiempo de Reverberación (RT) y Tiempo de Decaimiento Temprano (EDT)

El tiempo de reverberación (RT) es el tiempo, en segundos, que tarda el nivel de presión sonora en disminuir 60 dB tras cesar de emitir la fuente sonora. Dado que alcanzar ese decaimiento no siempre es posible en entornos reales, se utilizan caídas de 20 o 30 dB y se extrapolan a 60 dB, según lo establece la norma ISO 3382-2 [16], dando lugar a los parámetros T20 y T30. La tasa de decaimiento se calcula mediante regresión lineal, comenzando 5 dB por debajo del nivel inicial. Si el análisis alcanza una caída de 35 dB se obtiene T30, mientras que en presencia de mayor ruido de fondo se limita a 25 dB para obtener T20.

El Tiempo de Decaimiento Temprano EDT (por sus siglas en inglés) se define formalmente como el tiempo en segundos que tarda la presión sonora en disminuir 10 dB luego de que la fuente sonora se detenga. El mismo es un parámetro acústico utilizado para describir la disminución del nivel de presión sonora en los momentos iniciales después del cese de la fuente sonora. Resulta particularmente relevante en el diseño acústico de salas de conciertos, auditorios y otros espacios donde la acústica toma un rol principal ante la calidad del sonido.

3.6 Fase Mínima y Exceso de Retardo de Grupo

Un sistema de fase mínima es aquel en el que tanto la respuesta de magnitud como la de fase están interrelacionadas de manera que la representación de fase es la menor posible para una magnitud dada. Este tipo de sistema se caracteriza porque todos sus ceros están ubicados dentro del círculo unitario en el plano complejo para sistemas discretos, o en el semiplano izquierdo del plano complejo para sistemas continuos [17]. Esto garantiza que la respuesta del sistema no introduce retrasos adicionales, manteniendo así la integridad temporal de la señal de audio y minimizando la distorsión de fase.

Por otro lado, el exceso de retardo de grupo se refiere a la diferencia entre el retardo de grupo real de un sistema y el retardo de grupo correspondiente a una señal de fase mínima. Según Ken C. Pohlmann [18], el retardo de grupo es la derivada de la fase con respecto a la frecuencia, y el exceso de retardo de grupo indica la cantidad de distorsión de fase adicional que experimenta una señal. Esta distorsión puede causar que diferentes componentes de frecuencia de la señal lleguen en diferentes momentos, afectando la claridad y la precisión del audio. De esta manera, un sistema se puede considerar de fase mínima cuando su exceso de retardo de grupo es mínimo.

Para el caso en estudio, las regiones espectrales de fase no mínima representan problemas de índole acústica, como filtros peine, que solo pueden ser corregidos de forma pasiva (tratamiento acústico). El resto del espectro se puede corregir de forma activa, es decir, con filtros electrónicos. Entonces, gráficos de exceso de retardo de grupo permiten evaluar qué frecuencias son posibles de corregir con filtros y cuáles no.

3.7 Barrido Manual con Micrófono según ISO 16283-1

La norma ISO 16283-1 se centra en la medición del ruido ambiental y en la misma se establecen procedimientos y requisitos específicos para evaluar el sonido en entornos determinados. Para llevar a cabo la medición del nivel de presión sonora acústica en un espacio, se emplea un método de micrófono de movimiento continuo mecanizado, del tipo de barrido manual.

La trayectoria de dicho barrido debe seguir una ruta circular, helicoidal, cilíndrica o de tres semi-círculos, según indica la normativa. En este caso se decide emplear la medición utilizando la técnica cilíndrica, la cual se puede visualizar en la Figura 1. Para llevar a cabo la técnica mencionada, el operador debe estar de pie, en el punto de medición escogido. Idealmente, la velocidad angular del barrido debería ser constante.

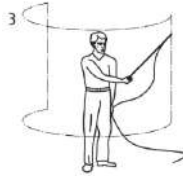


Figura 1: Captura mediante el método de la ISO 16283-1.

4. Metodología

4.1 Configuración Estructural de la Sala de Control

El recinto a medir es la sala de control del estudio profesional Syntagma, el cual tiene un volumen de $48,6 \text{ m}^3$. La sala cuenta con 4 m de ancho, 4,5 m de largo y 2,7 m de alto. Todas las paredes, salvo la lateral izquierda, fueron construidas mediante el método de obra seca. El techo cuenta con un cielorraso de yeso, mientras que el piso es flotante de madera dispuesto sobre losa de concreto. Se presenta una vista de la sala de control diagnosticada en la Figura 2, donde es posible visualizar la disposición del sistema de monitoreo y la mesa con el rack del equipamiento de audio del estudio.

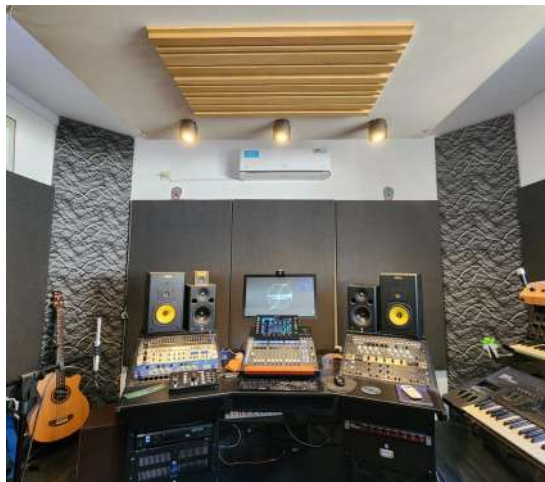


Figura 2: Vista frontal

La mesa de trabajo se encuentra centrada a 1,15 m de la pared frontal y 2 m de las laterales, con el punto de sweet spot desplazado 60 cm hacia la pared trasera.

De acuerdo a lo mencionado por su dueño, la sala se diseñó con la intención de cumplir con los criterios de Bonello y Bolt para distribución modal, pero condiciones imprevistas y errores constructivos resultaron en una sala prácticamente cúbica. Cabe destacar la presencia de un pasillo paralelo a la pared trasera, el cual cumple función de soundlock y hall de entrada. Éste, dado el método constructivo empleado para el muro que lo separa de la sala principal, resultará de interés para el análisis modal del recinto.

4.2 Tratamiento Acústico

El tratamiento acústico de la sala está compuesto por tres elementos principales. En primer lugar, se destaca la presencia de un panel absorbente en formato nube. El mismo se encuentra suspendido a 42 cm del cielorraso, por sobre la mesa de trabajo y tiene 2,3 m de ancho y 2,6 m de largo. Además, comprende un marco de madera de 10 cm de espesor, relleno de lana de vidrio y cubierto con un entelado. El mismo se presenta en la Figura 3.



Figura 3: Nube acústica

Por otro lado, se pueden encontrar múltiples paneles absorbentes en las paredes de la sala. La cara frontal de la misma se encuentra prácticamente cubierta por ellos, mientras que las paredes laterales los presentan en menor medida, y la pared trasera cuenta con un único panel absorbente. Todos ellos se encuentran realizados con el mismo método de lana de vidrio enmarcada y entelada, con la diferencia de que estos cuentan con un espesor de 5 cm. Se presenta su disposición en la Figura 2 detrás de la mesa. Además, los paneles que recubren las esquinas cuentan con una profundidad máxima de 15 cm.

Por último, el estudio cuenta con tres paneles difusores del tipo MLS, de 1 m de alto y 0,56 m de ancho. El primero se encuentra posicionado directamente en la nube, por sobre el punto de sweet spot. Los dos restantes se encuentran colocados en la pared trasera, con orientación vertical. Los paneles cuentan con una profundidad de celda de 2 cm y un ancho de celda de 3,5 cm, lo cual podría dar indicios de mala difusión del campo sonoro en ambos extremos del espectro de frecuencias.

4.3 Respuesta en Frecuencia del Sistema Reproductor

El sistema reproductor se compone de un par de monitores de estudio Yamaha MSP7 [19] y un par de monitores del fabricante Wolf, cuya particularidad es el diseño con woofer y tweeter invertidos respecto a lo tradicional. Estos últimos no son utilizados cotidianamente por el dueño del estudio, por lo que se utiliza el par Yamaha para el diagnóstico de la sala de control. La selección entre pares se hace mediante la matriz de monitoreo Audient Nero [20].

Se presenta en la Figura 4 la respuesta en frecuencia del parlante Yamaha MSP7, capturada con el software Smaart Suite 9 [21] mediante la función de transferencia. Se realizan capturas en el punto de sweet spot, para ambos monitores por separado. La curva color salmón corresponde al reproductor izquierdo y la verde al derecho.

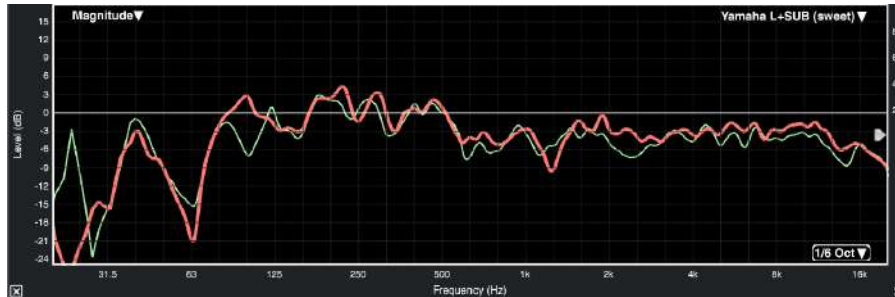


Figura 4: Respuesta en frecuencia del sistema en el sweet spot.

Los resultados en ambos extremos del espectro determinan un límite para las frecuencias mínima y máxima del estímulo. Se propone como banda superior de análisis la de 16 kHz para la validez de los resultados. Según la respuesta presentada en la Figura 4 la banda inferior de análisis sería la de 31,5 Hz.

Cabe destacar que la evaluación mediante este método se realiza para la configuración de los estímulos, y que mayor detalle sobre la misma se obtendrá mediante la medición de respuesta al impulso.

4.4 Cálculo de la Frecuencia de Schroeder

Para el cálculo de la frecuencia de Schroeder se procesan las respuestas al impulso con el módulo Aurora [22] de Ángel Farina. Del mismo se extraen los tiempos de reverberación de las bandas de 125 Hz, 250 Hz y 500 Hz, y se promedian. Luego se aplica este promedio, en conjunto con el volumen del recinto, en la Ecuación 1. Debido al tamaño de la sala, se estima que la frecuencia de Schroeder estará en alguna de esas bandas y, por ende, resulta más adecuado tomar este promedio en vez de un valor global.

Una vez obtenida la frecuencia de Schroeder, se repite el proceso, pero esta vez con el valor de TR de la banda de octava más cercana al valor obtenido. Si esta nueva frecuencia se encuentra dentro de la banda utilizada para el cálculo, se toma como el valor de frecuencia de Schroeder.

Para un análisis modal detallado y una posible validación del análisis de las respuestas obtenidas, se propone utilizar Amroc (The Room Mode Calculator) [24].

4.5 Medición de las Respuestas al Impulso

La disposición del instrumental para la medición se presenta en la Figura 5. Las posiciones de fuente respetan las elegidas por el dueño del estudio, mientras que las de micrófono se definen en base al estudio acústico a realizar, las limitaciones espaciales del recinto y siguiendo los lineamientos de la norma ISO 3382.

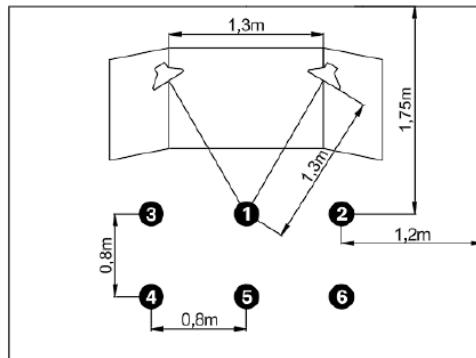


Figura 5: Disposición de los puntos de medición.

Se registran con un micrófono Behringer ECM8000, una placa de audio Motu M2 y una computadora Lenovo Yogaslim 7i los estímulos reproducidos en la sala con el sistema de reproducción Yamaha. El barrido senoidal logarítmico, afectado por la respuesta de la sala, es convolucionado con el filtro inverso del estímulo utilizando el complemento Aurora. De este modo, se obtienen las respuestas al impulso de la sala para las distintas configuraciones de monitor y posición de captura.

Se capturan un total de 12 respuestas al impulso, correspondientes a los dos monitores y las 6 posiciones de captura. El procesamiento y análisis de las mismas se hace utilizando el software REW, mediante el cuál se obtienen las curvas de respuesta en frecuencia y gráficos de cascada ('Waterfall'). Además, se generan los filtros de corrección necesarios en base a la curva de corrección ('Target Curve') de Harman, elegida por el dueño del estudio.

4.6 Diferencias de Nivel entre Monitores

Se propone un análisis del nivel relativo entre monitores, de modo que se puedan obtener las diferencias en la radiación del sistema reproductor y así poder corregirlas. Para el mismo, se registra la reproducción de ruido rosa para cada fuente por separado, en cada una de las 6 posiciones de medición presentadas anteriormente. El estímulo abarca el ancho de banda que va desde 25 Hz a 18 kHz, y se registra durante 20 segundos.

Se propone la corrección de niveles a partir de los resultados del punto 1, siendo el mismo el correspondiente al punto de sweet spot, equidistante a ambos monitores.

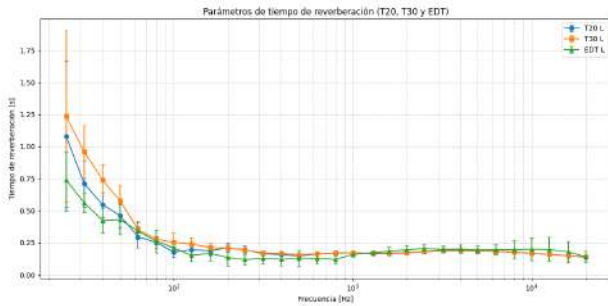
5. Resultados y Análisis

5.1 Frecuencia de Schroeder

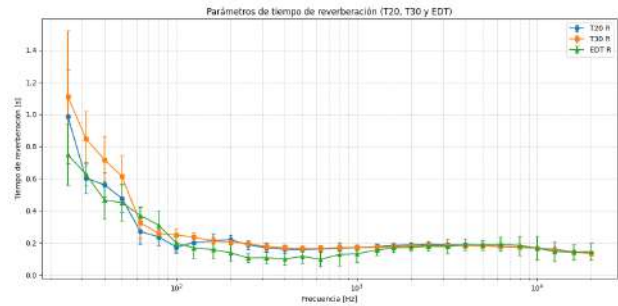
Utilizando el proceso presentado en el marco teórico se obtiene un resultado para la frecuencia de Schroeder de 128 Hz (con un tiempo de reverberación de 0,2 s en la banda de 125 Hz y un volumen de $48,6 m^3$). Se contrasta la frecuencia obtenida con los resultados del calculador online de Amroc [24]: 126 Hz.

5.2 Parámetros Acústicos

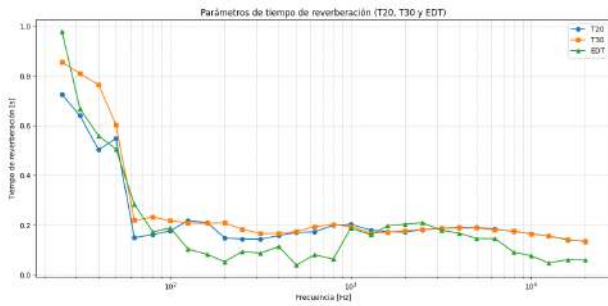
En la Figura 6 se pueden observar los resultados de T20, T30 y EDT correspondientes al promedio de todos los puntos y al punto óptimo de escucha para cada monitor, respectivamente. Los cálculos se realizan con el módulo Aurora y un script en Python para el gráfico.



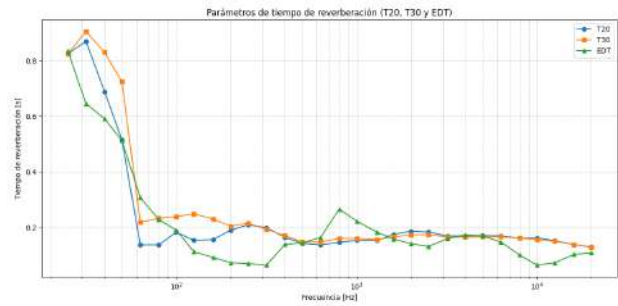
(a) EDT, T20 y T30 Promedio L



(b) EDT, T20 y T30 Promedio R



(c) EDT, T20 y T30 Sweet Spot L



(d) EDT, T20 y T30 Sweet Spot R

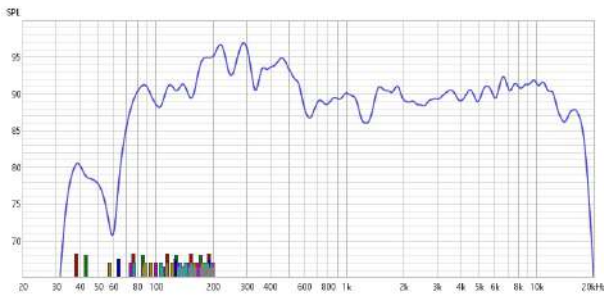
Figura 6: Comparación de parámetros (T20, T30 y EDT) en distintas posiciones del recinto.

Se observa que en las posiciones correspondientes al punto de sweet spot, los valores de T20 tienden a asemejarse a los de EDT, estabilizándose en torno a los 200–210 ms en casi todas las bandas de frecuencia superiores a 150 Hz. Esta coincidencia entre T20 y EDT es indicativa de una respuesta temprana bien controlada, que favorece la percepción directa y precisa del contenido sonoro, condición deseable para un entorno de grabación y monitoreo crítico.

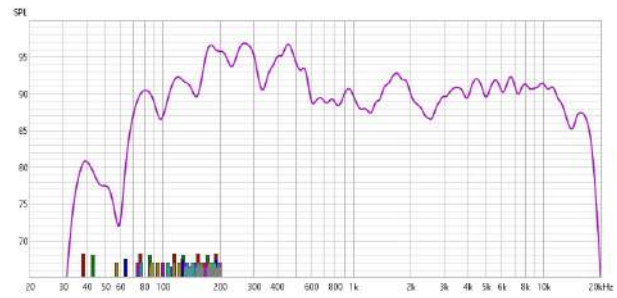
Si bien la desviación en las bandas de frecuencia inferiores a 125 Hz es alta en el promedio, se aprecia un aumento considerable del tiempo de reverberación, alcanzando valores superiores a 0,7 segundos, tanto en las curvas promedio como en las posiciones individuales. Esta tendencia puede atribuirse a un tratamiento insuficiente en bajas frecuencias, fenómeno habitual en estudios de dimensiones reducidas donde el control modal requiere soluciones específicas como resonadores de membrana o de Helmholtz. Por último, los valores de reverberación registrados se encuentran dentro de los rangos sugeridos como óptimos para monitoreo supercrítico en salas de control, según el estudio de Hirata [23], lo que reafirma la adecuación del diseño acústico para tareas de grabación y mezcla de alta exigencia.

5.3 Respuesta en frecuencia

En las figuras 7, 8 y 9 se detallan las respuestas en frecuencia obtenidas para cada uno de los casos analizados.

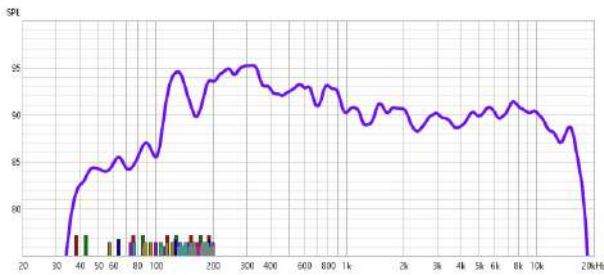


(a) Respuesta en frecuencia del monitor izquierdo (L) en el Sweet Spot.

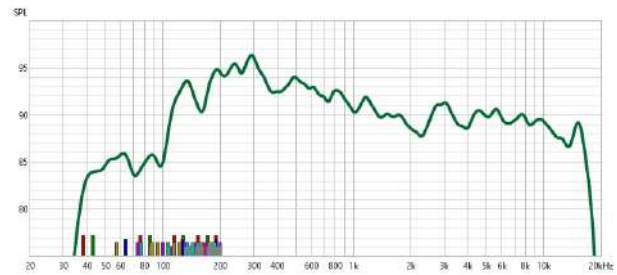


(b) Respuesta en frecuencia del monitor derecho (R) en el Sweet Spot.

Figura 7: Gráficos respuesta en frecuencia en el Sweet Spot.

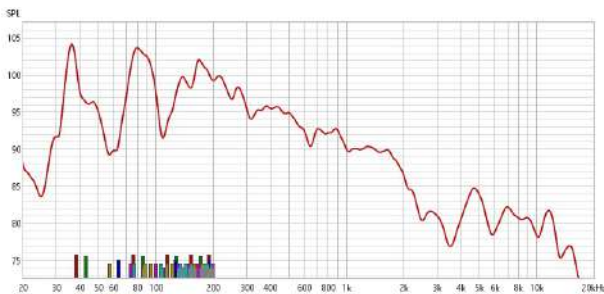


(a) Respuesta en frecuencia del monitor izquierdo (L) para el promedio todas las posiciones.

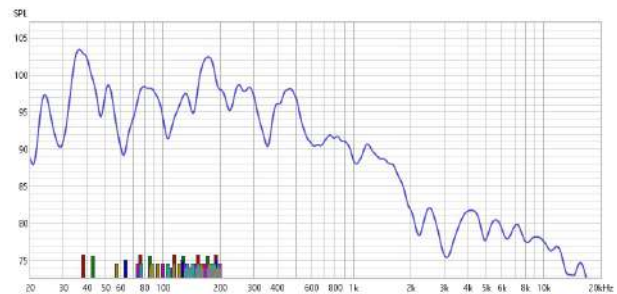


(b) Respuesta en frecuencia del monitor derecho (R) para el promedio todas las posiciones.

Figura 8: Gráficos respuesta en frecuencia del promedio de las posiciones.



(a) Respuesta en frecuencia del monitor izquierdo (L) para el método de micrófono móvil.



(b) Respuesta en frecuencia del monitor derecho (R) para el método de micrófono móvil.

Figura 9: Gráficos respuesta en frecuencia del el método de micrófono móvil.

Si bien las curvas de respuesta en frecuencia no son iguales, coinciden en los picos y valles que presentan. Lo primero que se observa en el sweet spot es un valle en 60 Hz, siendo este una cancelación axial que al integrar el promedio de todos los puntos, desaparece al atenuarse su efecto. Esto se debe a que en la posición ubicada 80 centímetros detrás del sweet spot, la cancelación no ocurre. Se puede observar cómo el efecto de este modo se reproduce en las octavas siguientes, 110 Hz y 220 Hz aproximadamente. Esta cancelación en la frecuencia de 60 Hz se condice exactamente con la obtenida en la respuesta en frecuencia medida a través de la función de transferencia por Smaart (Figura 4). Vale destacar que el día de la medición, al visualizar la respuesta en Smaart, se realizó un análisis modal de manera informal. Tras identificar la cancelación abrupta en 60 Hz en ambos monitores, se evaluó el resto de la sala y se identificó que en todo el ancho de la sala a 1,75 metros de la pared delantera se daba una cancelación. Es decir, el sweet spot se encuentra situado sobre un mínimo de

presión. Además, este fenómeno se repetía al alejarse otros 1,75 metros (3,5 metros desde la pared). Este comportamiento será explicado con mayor detalle en la sección de análisis modal.

Las curvas de respuesta en frecuencia promedio de todas las posiciones son relativamente planas a partir de 150 Hz. A través de pequeñas correcciones sería posible obtener una respuesta plana sin complicaciones. No obstante, justo en el sweet spot, los modos en bajas frecuencias generan una curva no uniforme.

En las Figuras 10 y 11 se presentan los gráficos de cascada que permiten validar el análisis realizado anteriormente.

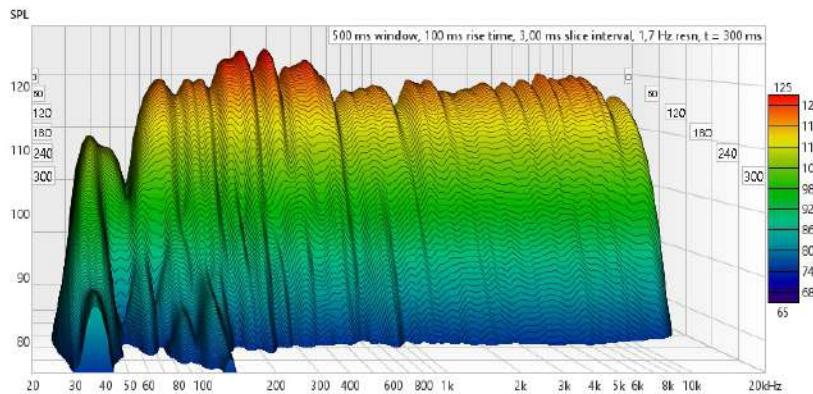


Figura 10: Gráfico de cascada (waterfall) para la respuesta del monitor izquierdo (L) en el Sweet Spot.

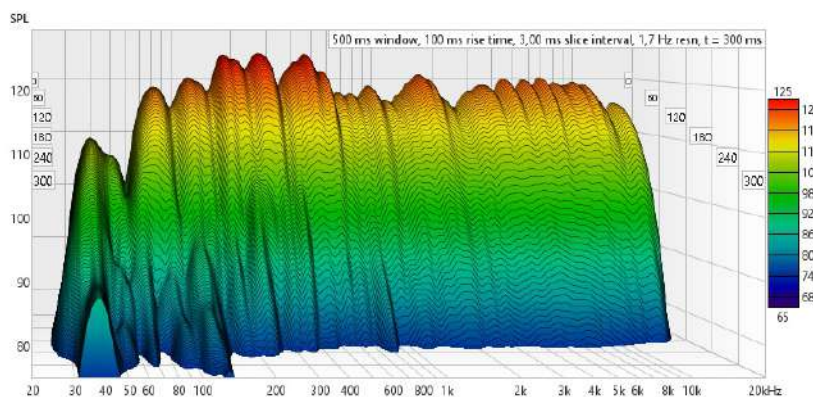


Figura 11: Gráfico de cascada (waterfall) para la respuesta del monitor derecho (R) en el Sweet Spot.

La pérdida de energía en 60 Hz es evidente. Además, el tiempo en que permanece la energía en las bajas frecuencias es largo. Esto, indica que la sala necesita un tratamiento acústico en bajas frecuencias. Ya que las paredes no son lo suficientemente anchas, las bajas frecuencias no son absorbidas ni tratadas. Es posible que la aplicación de resonadores o trampas de bajo sean una buena incorporación al recinto.

5.4 Análisis Modal

Los resultados obtenidos del análisis modal indican que hay un modo axial en 63 Hz y uno tangencial en 57 Hz. Además, el volumen y la frecuencia de Schroeder se condice con lo calculado.

Aunque el dueño del estudio realizó el diseño en base a las recomendaciones clásicas de Bolt y el criterio de Bonello, la geometría del estudio no los cumple.

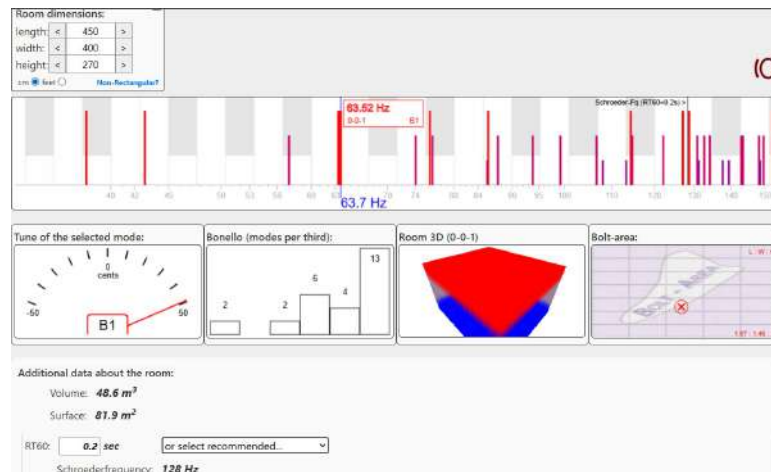


Figura 12: Análisis modal obtenido en Amroc (The Room Mode Calculator).

Respecto al fenómeno observado alrededor de 60 Hz en la respuesta de los monitores, este puede explicarse por las dimensiones de la sala y su método constructivo. Si bien la sala en cuestión cuenta con $4,5\text{ m}$ de largo, se encuentra separada por un muro delgado del pasillo de entrada, el cual cuenta con aproximadamente 2 m de profundidad. Para bajas frecuencias, el paramento podría no presentar un cambio de impedancia suficiente como para reflejar la onda, por lo que resulta de interés el análisis de la dimensión completa.

Ignorando la pared divisoria, se obtiene una nueva longitud de $6,5\text{ m}$ lo cual corresponde a una longitud de onda para 53 Hz . Esta cifra se condice con el fenómeno observado, por lo que se podría concluir que el paramento es invisible en bajas frecuencias, siendo un claro ejemplo de que lo que se encuentra a la vista no es necesariamente lo que ve el campo acústico.

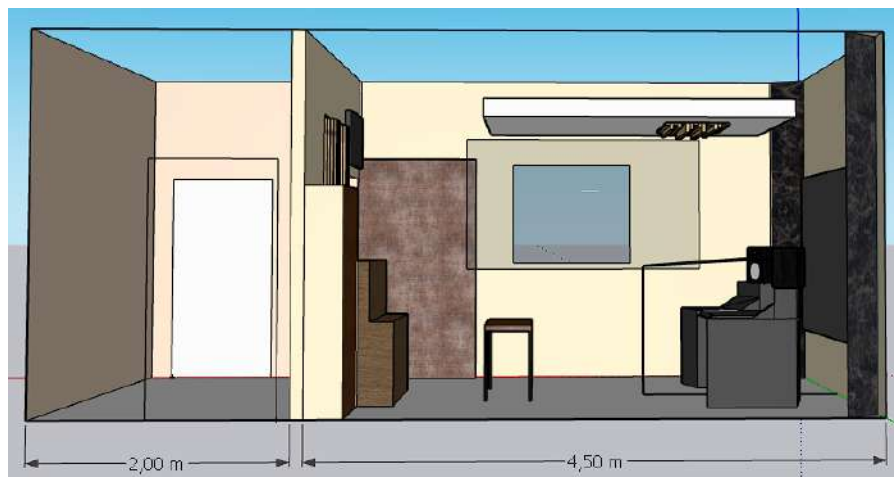
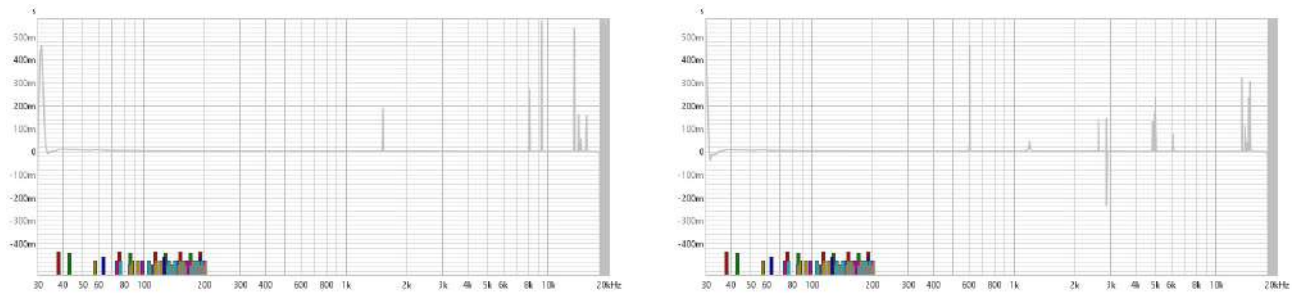


Figura 13: Vista en corte de la sala.

La presencia de una cancelación de esta magnitud en el sweet spot podría alterar de manera significativa la escucha del operador, por lo que se recomienda modificar esta condición. Una solución parcial podría incluir el desplazamiento del sistema de monitoreo y la reubicación del sweet spot a un punto donde no se tengan cancelaciones en otras frecuencias. Una solución más completa, aunque costosa, sería la reconstrucción del muro trasero. Se debería reemplazar por uno que provea de mayor aislamiento en bajas frecuencias, a modo de poder considerar la dimensión de $4,5\text{ m}$ como el largo de la sala. Esta solución corre con la ventaja de que permite mantener el diseño acústico preexistente de la sala, dado que el desplazamiento del sweet spot conllevaría a una re-evaluación de la disposición de materiales fonoabsorbentes y difusores, además de seguir presentando la problemática de la doble dimensión.

5.5 Fase Mínima

En la Figura 14 se observa el exceso de retardo de grupo para cada monitor en el sweet spot. Donde haya exceso de retardo de grupo, será imposible realizar una corrección.



(a) Exceso de retardo de grupo en el parlante L del sweet spot.

(b) Exceso de retardo de grupo en el parlante r del sweet spot.

Figura 14: Gráficos de exceso de retardo de grupo.

Como se puede observar, el sistema es de fase mínima en casi todas las frecuencias. Esto es un punto positivo ya que permite realizar modificaciones con filtros activos en casi todo el espectro. Las frecuencias que presentan exceso de retardo de grupo son aproximadamente las de 30 Hz , 1600 Hz , 8000 Hz , 9200 Hz y un rango entre 15000 Hz y 17000 Hz . La de 30 Hz puede deberse a un efecto modal, y, el resto, a reflexiones no deseadas en superficies tales como el escritorio o los elementos decorativos del estudio (piano, muebles, etc.)

5.6 VSA y MSV

Siguiendo el procedimiento detallado anteriormente, se obtuvieron la Varianza del Promedio Espacial (VSA) y la Media de la Varianza Espacial (MSV) para las 12 respuestas en frecuencia correspondientes a las 6 posiciones de micrófono y ambos monitores. El ancho de banda considerado para el cálculo se encuentra entre 25 Hz y 128 Hz (frecuencia de Schroeder). La FFT tiene una resolución de $0,18\text{ Hz}$ aproximadamente. Los resultados de VSA y MSV obtenidos para cada monitor se especifican en la Tabla 1.

Tabla 1: Valores de VSA y MSV en dB^2 para cada monitor.

Fuente	VSA	MSV
Monitor Yamaha L	43,66	13,96
Monitor Yamaha R	38,65	10,36

Los valores obtenidos indican que el sistema no es adecuado para su ecualización, debido a una alta MSV y VSA (se esperarían valores menores a 3 dB^2 para la VSA y a 2 dB^2 para la MSV.) Esto implica que las respuestas en distintas posiciones varían de manera significativa, por lo que un filtro calculado para una posición puede no resultar idóneo para la siguiente.

5.7 Filtros de Corrección

En las Figuras 15, 16 y 17 se muestran las curvas predichas para L y R del promedio de respuestas, en el sweet spot y para la respuesta obtenida según el método móvil, respectivamente, una vez aplicado el filtro diseñado por REW. Se le enseñaron las distintas curvas de referencia al dueño del estudio, quien decidió utilizar la curva de Harman para adecuar la respuesta de la sala.

En el Anexo 6 se presentan los filtros utilizados para cada respuesta.



(a) Respuesta en frecuencia resultante de aplicar los filtros basados en la curva de Harman, para el promedio de las posiciones, monitor izquierdo (L).



(b) Respuesta en frecuencia resultante de aplicar los filtros basados en la curva de Harman, para el promedio de las posiciones, monitor derecho (R).

Figura 15: Gráficos corregidos de respuesta en frecuencia del promedio de las posiciones.



(a) Respuesta en frecuencia resultante en el Sweet Spot al aplicar los filtros basados en la curva de Harman; monitor izquierdo (L).



(b) Respuesta en frecuencia resultante en el Sweet Spot al aplicar los filtros basados en la curva de Harman; monitor derecho (R).

Figura 16: Gráficos corregidos de respuesta en frecuencia en el Sweet Spot.



(a) Respuesta en frecuencia obtenida según ISO-16283 al aplicar los filtros basados en la curva de Harman; monitor izquierdo (L).



(b) Respuesta en frecuencia obtenida según ISO-16283 al aplicar los filtros basados en la curva de Harman; monitor derecho (R).

Figura 17: Gráficos corregidos de respuesta en frecuencia según el método de la ISO-16283.

Si bien los picos y cancelaciones son inevitables, en especial el de 60 Hz del sweet spot, la corrección por filtros genera una respuesta mucho más plana que se asemeja a la referencia de la curva propuesta por Harman. Sin embargo, sería ideal modificar el posicionamiento del sweet spot dentro de la sala para evitar la cancelación pronunciada.

Por último, debido a los motivos mencionados en la sección de MSV y VSA, cabe aclarar que los filtros son aplicables únicamente para la posición para la que fueron calculados.

5.8 Diferencias de Niveles entre Monitores L y R

Los resultados de diferencias de nivel para la posición de sweet spot se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Niveles en dB SPL en el punto 1 de medición.

Frec. [Hz]	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Global
Monitor Yamaha L	71,04	77,22	82,29	79,65	76,05	76,82	76,70	78,05	78,18
Monitor Yamaha R	69,79	76,52	81,13	79,44	74,79	75,98	75,81	76,50	77,25
Diferencias	1,24	0,70	1,17	0,21	1,27	0,84	0,88	1,55	0,93

Los resultados arrojan una diferencia global de casi 1 dB. Esto podría tener implicancias sobre la imagen estéreo del sistema, fundamentalmente teniendo en cuenta que para todas las bandas analizadas el monitor izquierdo tiene mayor nivel que el derecho. La diferencia máxima es de 1,55 dB para la banda de 8 kHz, seguido por la banda de 63 Hz con 1,24 dB. Que las mayores diferencias estén en ambos extremos del espectro también podría tener implicancias negativas, dada la influencia directa sobre la subjetividad de lo percibido.

Mayor detalle respecto a las diferencias de nivel entre parlantes se presenta en el Anexo B (6).

6. Conclusiones

El presente trabajo permitió realizar un diagnóstico acústico de una sala de control profesional mediante la combinación de mediciones in situ, procesamiento digital y modelado predictivo. Se evaluaron múltiples aspectos clave como la respuesta en frecuencia, el tiempo de reverberación, la distribución modal, la simetría en la reproducción estéreo y la viabilidad de correcciones mediante filtros digitales.

Se confirmó que el punto de escucha (sweet spot) presenta condiciones razonablemente controladas a partir de los 150 Hz, con valores de T20 y EDT que se estabilizan en torno a los 200–210 ms, lo cual concuerda con los criterios óptimos para monitoreo crítico en salas de control, tal como lo indica la bibliografía (Hirata, 1981). Sin embargo, en bajas frecuencias se registran valores de reverberación elevados (superiores a 0,7 s) y modos resonantes identificables, particularmente en la región de los 55–63 Hz, cuya influencia afecta la respuesta del sistema en el sweet spot.

El análisis modal realizado mediante el software AMROC valida estas observaciones, señalando un modo axial en 63 Hz y uno tangencial en 57 Hz. Asimismo, se constató que la frecuencia de Schroeder (128 Hz) coincide con lo calculado experimentalmente, lo que confirma que el análisis modal debe concentrarse por debajo de ese valor.

La evaluación de la respuesta en frecuencia promedio muestra curvas relativamente planas a partir de 150 Hz. No obstante, la asimetría entre los canales L y R, tanto en nivel como en respuesta espectral (con diferencias de hasta 1,5 dB), podría comprometer la percepción de la imagen estéreo. Esta situación se agrava por la ubicación del sweet spot, que coincide con un nodo modal de 60 Hz.

Finalmente, los resultados indican que el uso de herramientas como REW permite aplicar correcciones activas efectivas en gran parte del espectro, generando una respuesta plana al aplicar algún tipo de DSP con los filtros diseñados a los monitores de la sala. Sin embargo, se resalta que las cancelaciones modales profundas no pueden corregirse digitalmente y requieren soluciones acústicas pasivas, hecho que se ve reforzado por los resultados observables en las figuras de mérito.

En particular, la coincidencia entre el sweet spot y un nodo modal en la región de 60 Hz constituye un problema significativo, ya que provoca una cancelación imposible de corregir digitalmente. Esto representa una limitación estructural de difícil solución, dado que su corrección efectiva implicaría rediseñar completamente la ubicación de la mesa de trabajo y del punto óptimo de escucha.

En resumen, el estudio demuestra la importancia de los diagnósticos en salas de control, y aporta criterios objetivos para la toma de decisiones tanto en corrección digital como en intervenciones físicas.

Referencias

1. ISO 16283-1:2015, *Acústica. Medición in situ del aislamiento acústico en los edificios y en los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo*, 2015.
2. Room EQ Wizard (REW). Software de medición y análisis acústico. Disponible en: <https://www.roomeqwizard.com/>, 2025.
3. D. Davis y C. Davis, “The LEDE - Concept for the Control of Acoustic and Psychoacoustic Parameters in Recording Control Rooms”, *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 28, no. 9, pp. 585–595, septiembre 1980.
4. E. Völker, “Control Room for Music Monitoring,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 33, no. 6, pp. 452–462, junio 1985.
5. P. Newell, *Recording Studio Design*, Elsevier Ltd., 2003.
6. K. R. Anderson, A. Smith y D. Forgette, “Acoustical Analysis of a Home Recording Studio,” California State Polytechnic University at Pomona, Multiphysics Simulation Laboratory, Department of Mechanical Engineering, 2014.
7. F. A. Everest and K. Pohlmann, *Master Handbook of Acoustics*, 4ª ed. New York: McGraw-Hill, 2001. [En línea]. Disponible en: <https://archive.org/details/masterhandbookof00ever> (consultado Jul. 2025).
8. M. R. Schroeder, "New Method of Measuring Reverberation Time," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 37, no. 3, pp. 409–412, 1965.
9. R. Bucklein, “The Audibility of Frequency Response Irregularities,” *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 29, no. 1/2, pp. 126–131, 1981.
10. S. Olive, P. Schuck, and J. Ryan, “The Detection Thresholds of Resonances at Low Frequencies,” *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 45, no. 3, pp. 116–127, 1997.
11. R. H. Bolt, “Note on Normal Frequency Statistics for Rectangular Rooms,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 18, no. 1, pp. 130–133, 1946.
12. M. Loudon, “Dimension-Ratios of Rectangular Rooms with Good Distribution of Eigentones,” *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 24, no. 2, pp. 101–104, 1971.
13. O. J. Bonello, “A New Criterion for the Distribution of Normal Room Modes,” *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 29, no. 9, pp. 597–606, 1981.
14. T. J. Cox, P. D’Antonio, and M. R. Avis, “Room Sizing and Optimization at Low Frequencies,” *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 52, no. 6, pp. 640–651, 2004.
15. Todd Welti, *Investigation of Bonello Criteria for Use in Small Room Acoustics*, AES Convention Paper 7849, Audio Engineering Society, Northridge, CA, USA, 2009. Disponible en: <https://aes2.org/publications/elibrary-page/?id15044>
16. International Organization for Standardization, “ISO 3382-1: Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces,” ISO, Ginebra, 2009.
17. Anon., *Introduction to Digital Filters: With Audio Applications*, 2nd print ed., Charleston, S.C., BookSurge, 2008.
18. Ken C. Pohlmann, *Principles of Digital Audio*, 2nd edition, Indianapolis, Ind., USA: H.W. Sams, 1989.
19. Yamaha Corporation, *Serie MSP Studio*, Disponible en: https://es.yamaha.com/es/products/proaudio/speakers/msp_studio_series/index.html, [Accedido: julio de 2025].

20. Audient, *Nero - Controlador de monitores*, Disponible en: <https://audient.com/es/productos/monitor-controllers/nero/overview/>, [Accedido: julio de 2025].
21. Rational Acoustics, *Smaart Suite v9 - Licencia Perpetua*, Disponible en: <https://www.rationalacoustics.com/products/smaart-suite-v9-perpetual>, [Accedido: julio de 2025].
22. A. Farina, *Aurora Plug-In Suite for Acoustical Measurements and Signal Processing*, University of Parma, Italy. [Online]. Available: <https://www.aurora-plugins.it>
23. Hirata, Y., Matsudaira, T. K., & Nakajima, H. (1981). *Optimum Reverberation Times of Monitor Rooms and Listening Rooms*. Presented at the 68th Convention of the Audio Engineering Society, Hamburg. Preprint No. 1730.
24. AMROC Room Mode Calculator. *amcoustics.com*. Disponible en: <https://amcoustics.com/tools/amroc>.

Anexo A: Imágenes de la medición

Se presentan imágenes de la jornada de medición en la Figura 18.



(a) Posición 3.



(b) Posición 1.



(c) Posición 5.



(d) Posición 4.



(e) Posición 5.



(f) Micrófono móvil.

Figura 18: Registro fotográfico de las posiciones de fuente y micrófono.

Anexo B: Diferencias de nivel entre monitores por punto

Se vuelven a presentar en la Figura 19 la ubicación espacial de los 6 puntos de medición analizados para un acceso más directo.

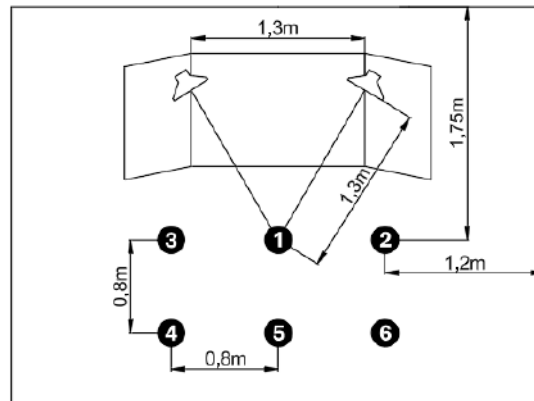


Figura 19: Disposición de los puntos de medición.

A continuación se presentan las diferencias de nivel de presión sonora entre monitores para cada punto de medición en las Tablas 3, 4, 5, 6, 7 y 8. Su evaluación se hace con la reproducción de ruido rosa desde 25 Hz a 18 kHz durante 20 segundos.

Tabla 3: Niveles en dB SPL y SNR en el **punto 1** de medición.

Frec. [Hz]	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Global
Monitor Yamaha L	71,04	77,22	82,29	79,65	76,05	76,82	76,70	78,05	78,18
Monitor Yamaha R	69,79	76,52	81,13	79,44	74,79	75,98	75,81	76,50	77,25
Ruido de fondo	51,67	49,33	46,49	41,19	39,11	37,48	35,97	36,80	45,92
SNR	19,36	27,89	35,81	38,45	36,94	39,34	40,73	41,25	32,26
Diferencias L y R	1,24	0,70	1,17	0,21	1,27	0,84	0,88	1,55	0,93

Tabla 4: Niveles en dB SPL y SNR en el **punto 2** de medición.

Frec. [Hz]	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Global
Monitor Yamaha L	65,74	74,46	80,72	75,36	74,11	75,43	72,73	74,00	75,57
Monitor Yamaha R	68,96	78,80	81,03	80,13	77,11	73,92	75,18	74,32	77,50
Ruido de fondo	51,67	49,33	46,49	41,19	39,11	37,48	35,97	36,80	45,92
SNR	14,07	25,12	34,24	34,17	35,00	37,95	36,77	37,21	29,65
Diferencias L y R	3,23	4,34	0,30	4,77	2,99	1,51	2,45	0,32	1,92

Tabla 5: Niveles en dB SPL y SNR en el **punto 3** de medición.

Frec. [Hz]	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Global
Monitor Yamaha L	70,52	79,23	80,97	80,93	77,93	75,41	75,97	75,81	78,11
Monitor Yamaha R	65,69	73,15	80,12	74,27	73,67	74,23	72,64	72,69	74,78
Ruido de fondo	51,67	49,33	46,49	41,19	39,11	37,48	35,97	36,80	45,92
SNR	18,85	29,90	34,48	39,73	38,81	37,93	40,00	39,01	32,19
Diferencias L y R	4,83	6,09	0,85	6,65	4,26	1,18	3,32	3,12	3,33

Tabla 6: Niveles en dB SPL y SNR en el **punto 4** de medición.

Frec. [Hz]	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Global
Monitor Yamaha L	70,74	71,41	76,72	76,97	76,29	71,96	72,93	72,59	74,37
Monitor Yamaha R	65,19	73,47	76,61	75,18	73,78	71,93	71,98	72,39	73,44
Ruido de fondo	51,67	49,33	46,49	41,19	39,11	37,48	35,97	36,80	45,92
SNR	19,06	22,08	30,23	35,78	37,18	34,49	36,96	35,79	28,44
Diferencias L y R	5,54	2,06	0,11	1,79	2,52	0,04	0,95	0,20	0,92

Tabla 7: Niveles en dB SPL y SNR en el **punto 5** de medición.

Frec. [Hz]	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Global
Monitor Yamaha L	68,12	73,01	77,27	76,42	74,37	72,98	73,16	74,43	74,38
Monitor Yamaha R	67,59	72,28	78,83	75,58	73,76	72,82	72,82	73,30	74,37
Ruido de fondo	51,67	49,33	46,49	41,19	39,11	37,48	35,97	36,80	45,92
SNR	16,44	23,68	30,78	35,23	35,25	35,50	37,19	37,64	28,46
Diferencias L y R	0,52	0,73	1,56	0,84	0,61	0,15	0,34	1,13	0,01

Tabla 8: Niveles en dB SPL y SNR en el **punto 6** de medición.

Frec. [Hz]	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	Global
Monitor Yamaha L	64,64	73,92	75,90	74,12	74,10	72,94	71,90	72,99	73,35
Monitor Yamaha R	69,48	72,55	77,54	77,04	76,34	72,44	73,47	71,40	74,60
Ruido de fondo	51,67	49,33	46,49	41,19	39,11	37,48	35,97	36,80	45,92
SNR	12,97	24,59	29,41	32,92	34,98	35,46	35,94	36,19	27,43
Diferencias L y R	4,84	1,36	1,64	2,93	2,24	0,49	1,56	1,59	1,25

Anexo C: Filtros de ecualización para los monitores



Figura 20: Filtros aplicados a la respuesta promedio para el monitor izquierdo (L), basados en la curva de Harman.

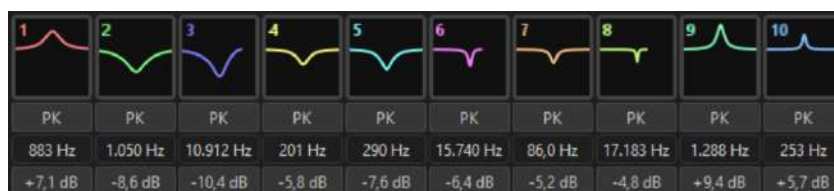


(a)



(b)

Figura 21: Filtros aplicados a la respuesta promedio para el monitor derecho (R), basados en la curva de Harman.



(a)



(b)

Figura 22: Filtros aplicados a la respuesta en el Sweet Spot para el monitor izquierdo (L), basados en la curva de Harman.



(a)



(b)

Figura 23: Filtros aplicados a la respuesta en el Sweet Spot para el monitor derecho (R), basados en la curva de Harman.



(a)



(b)

Figura 24: Filtros aplicados a la respuesta obtenida del método de la ISO-16283 para el monitor izquierdo (L), basados en la curva de Harman.



(a)



(b)

Figura 25: Filtros aplicados a la respuesta obtenida del método de la ISO-16283 para el monitor derecho (R), basados en la curva de Harman.

Pregunta

Teniendo en cuenta lo ocurrido en la práctica, donde la sala real no es contemplada por el campo acústico debido al grosor de la pared trasera, ¿Es posible predecir este comportamiento, es decir, a partir de qué frecuencia la pared presenta un cambio de impedancia suficientemente grande para contener al campo? ¿Como afecta la impedancia acústica en función del grosor de la pared para cada frecuencia?