

La música en casa

Apuntes sobre equipos de música estéreo

¡La banda de música en la habitación! Por ahora, la reproducción de audio es sólo una ilusión en el largo camino hacia el realismo.

La información proporcionada por fabricantes y aficionados, en ocasiones contradictoria, puede ser apabullante para un debutante. Estas notas —redactadas por un neófito con un equipo muy básico— son un compendio de informaciones, acertadas o no, que podrían ser útiles para iniciarse.

El oído es la herramienta más importante. Además de tiempo y paciencia, utilizaremos un flexómetro o un cordón, un sonómetro, un disco (lápiz o memoria) con frecuencias y ruido rosa, cinta de pintor o un rotulador, algún libro y mucha música.

06/05/2021

Jorge Fernández López

<http://www.jfl-forestal.es/maderas.html>

1. Alimentación eléctrica

1.1 Red eléctrica industrial y doméstica

Según Paul McGowan, la red industrial provee la potencia instantánea necesaria que los sistemas domésticos no pueden ofrecer. Los inversores domésticos para paneles fotovoltaicos, y los SAI, podrían generar corriente alterna distorsionada y con demasiada impedancia. En lugares donde las industrias o las líneas compartidas deterioren y trunquen la señal, los regeneradores pueden regenerar una onda perfecta; contrariamente a los filtros (regletas) que incrementan la impedancia sin recuperar los picos.

En la mayoría de los casos, el equipo se conectará directamente a la red.

1.2 Secuencia de encendido

Conviene seguir la siguiente secuencia de encendido para evitar dañar componentes que no estén protegidos: fuentes, DAC, preamplificador y amplificador; y la inversa para el apagado.

1.3 Alimentación

Los componentes separados tienen más espacio que los integrados para las fuentes de alimentación. Los picos de corriente necesitan buenas fuentes de alimentación y corriente alterna sin truncar. Cuando la fuente de alimentación es interna, la seguridad debe ser máxima y no puede comprometerse con diseños no profesionales (Majidimehr).

1.4 Ruidos eléctricos

Los componentes del sistema generan internamente un ruido de fondo que se percibe por los altavoces. Cuando la relación señal/ruido es suficiente, las interferencias no se escuchan en la silla.

Otros zumbidos, más molestos, podrían originarse por interferencias magnéticas, fuentes de alimentación inadecuadas, problemas de conexión, exceso de ganancia de amplificadores, exceso de sensibilidad de altavoces, o bucles de tierra/neutro. El primer paso debería acotar el problema en función de la frecuencia de la interferencia.

Los zumbidos más graves (50 Hz) pueden originarse por la proximidad de otro componente (McGowan). Se recomienda:

- Desconectar individualmente cada componente.
- Mover los cables.

- Usar conexiones balanceadas, o conexiones no balanceadas y cables de alimentación adecuadamente apantallados.

Los zumbidos medios o más agudos podrían deberse a una diferencia de potencial, entre neutros de equipos conectados por un cable audio apantallado, que genera una corriente por el apantallado. Se recomienda:

- Invertir enchufes o conectarlos a la misma regleta.
- Cortar el blindaje del cable audio del lado del amplificador.
- Aislar temporalmente la tierra con cinta de carroceros en el caso de que esté conectada al apantallado, o desactivar el interruptor de tierra en componentes profesionales. Por seguridad, una vez comprobado se deberá conectar la tierra.
- Verificar que los componentes estén conectados a la misma línea eléctrica.
- Usar conexiones balanceadas (Majidimehr).

2. Fuente

2.1 *Música*

La música es la piedra angular de la experiencia. Algunos álbumes suelen tener versiones superiores, tanto en vinilo como en disco compacto.

Paul McGowan comentó que los vinilos no tienen la calidad de las cintas maestras. Debido a la calidad de prensado, una misma grabación podría variar notablemente según la fábrica. Debido al deterioro de las cintas maestras, los vinilos nuevos de clásicos podrían haber sido grabados desde una versión digital. Las buenas versiones digitales, siempre que estén bien mezcladas y grabadas de cintas maestras, pueden ser excelentes. El trabajo del estudio de grabación y la calidad de la mezcla son más determinantes que el soporte físico. Con las herramientas y los programas adecuados, los vinilos se podrían digitalizar sin perder calidad¹.

2.2 *Analógica*

2.2.1 *Tocadiscos*

¡El sonido analógico!, es el más querido. Las fotos, las imágenes, los textos y la colocación del disco son ingredientes de la experiencia. Además, el formato no necesita conversión, y la distorsión es eufónica. Sin embargo, los vinilos tienen menos rango dinámico o separación estereofónica que los discos compactos, y su limpieza es laboriosa. Un buen sistema no es barato y precisa de varios ajustes: nivelar la mesa, equilibrar el brazo, ajustar la deriva y alinear el cartucho.

2.3 *Digital*

2.3.1 *Formatos*

Los datos binarios son leídos sin referencia temporal. Los discos compactos CD-DA usan el método PCM, guardando valores de 16 bits a una frecuencia de 44,1 kHz. Los discos compactos SACD guardan una capa PCM y otra PDM. La codificación DSD contiene una capa PDM con secuencias de 1 bit a 2,8224 MHz. DxD es PCM para poder trabajar en estudios con DSD, y MQA es un formato comprimido de PCM con pérdidas.

Los sistemas operativos actuales (2020) trabajando como servidores para un DAC, podrían no funcionar con la codificación PDM. El DoP es un contenedor que contiene la música en PDM pero que en su cabecera le indica al ordenador que es un PCM. El servidor enviará el DoP al DAC que eliminará la cabecera y leerá el contenido PDM interno.

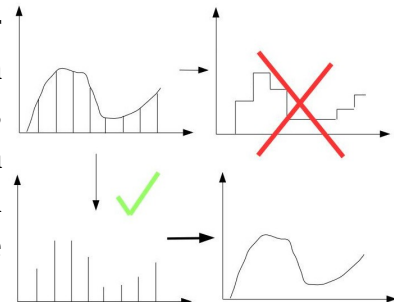
¹ [Ripping vinyl de PS Audio \(YouTube\)](#)

La transmisión de datos digitales tiene sus limitaciones. Los cables transportan señales cuasicuadradas imperfectas (errores temporales) que distorsionan la señal analógica en el DAC. En ocasiones, la difusión desde servidores externos o domésticos podría entrecortarse.

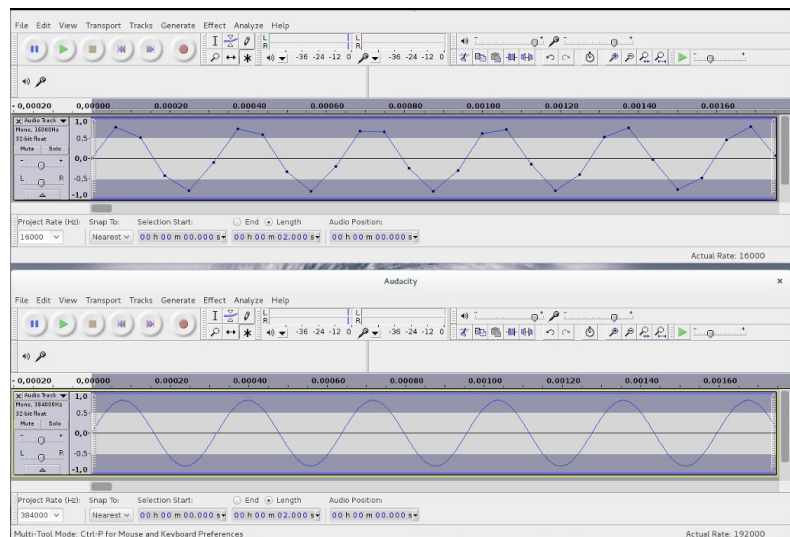
Los discos compactos son relativamente resistentes, aunque también pueden rayarse. Los discos compactos grabables CD-R —grabados desde una copia de seguridad en un disco duro— suenan exactamente igual que los originales.

2.3.2 Frecuencia Nyquist y profundidad de bits

La frecuencia de Nyquist es la frecuencia máxima que puede ser reproducida sin distorsión. Según el teorema, dos puntos son suficientes para representar una onda sinusoidal. Debido a las limitaciones del filtrado, conviene que la frecuencia de muestreo sea algo superior al doble de la frecuencia más elevada que se desea reproducir. Estas dos notas (Sol7) con muestreos de 16 kHz y de 384 kHz suenan exactamente iguales.



Según Akash Murhy² y Monty Montgomery³, las líneas o las escaleras que unen los puntos no son una representación real de los datos digitales. Los puntos son datos que determinan una solución matemática única (10.6 Ondas estacionarias), siempre que las frecuencias por encima de Nyquist se hubiesen eliminado. Las frecuencias muy cercanas al límite pueden tener variaciones de intensidad, debido a un «reflejo» de las frecuencias no filtradas.



La profundidad de bits determina la amplitud del rango dinámico. Un ruido («dithering») es introducido para poder pasar de 24 bits a 16 bits en la última parte del proceso. En un CD-DA de 16 bits y 44,1 kHz, el ruido es inaudible y todas las frecuencias audibles están presentes sin distorsión.

Según Mark Waldrep⁴, la frecuencia de muestreo de 96 kHz podría ser útil para registrar frecuencias hasta 48 kHz relacionadas con la música.

² [2. Sampling Theorem - Digital Audio Fundamental](#)

³ [Digital Show and Tell](#)

⁴ [High-Resolution Audio Demystified \(YouTube\)](#)

Amir Majidimehr realizó una prueba⁵ sobre un fichero a 192 kHz que muestra que una gran parte del espectro registra un que ruido no tiene correlación con la música.

2.3.3 *Lector de discos compactos*

Los lectores de discos compactos tienen un DAC interno. El reloj maestro determina la precisión temporal de los datos que recibe el DAC. Los datos analógicos se envían al preamplificador vía cables RCA o XLR.

2.3.4 *Transportes*

Los transportes son lectores de discos compactos que no tienen DAC. Suelen tener mejores relojes internos, fuentes, mecánica y memorias. La superficie del disco podría contener errores que los mejores transportes intentarían corregir y almacenar en una memoria. Los transportes sólo leen a velocidad simple datos PCM o PDM. Envían los datos al DAC del preamplificador o al externo vía conexión óptica, AES/EBU, coaxial o I²S. Estas conexiones, excepto I²S, fusionan datos y reloj con los métodos: simultáneo, adaptativo o asíncrono. Con el método asíncrono, el DAC externo marcará el ritmo de la conversión digital a analógica.

2.3.5 *Servidor y reproductor de red*

Los reproductores de red leen ficheros de Internet, del servidor o de un disco local. La conversión del fichero a música se realiza en este componente. La conexión de red RJ-45 suele ser la mejor opción para conectar un servidor a un DAC, aunque también puede presentar interrupciones. El control remoto suele ser un teléfono que depende de las actualizaciones del fabricante.

2.3.6 *Ordenador*

Los programas *Roon*, *JRiver*, *Audio Nirvana* catalogan, ecualizan, y envían la música digital al DAC por alguna de las conexiones disponibles. Estos programas se controlan remotamente (protocolo DNLA) con el móvil o la tableta. El ambiente electromagnético efervescente y el reloj del ordenador podrían ser algo bulliciosos.

⁵ [Inside High res Music \(YouTube\)](#)

3. Conexiones

3.1 *Analógicas*

3.1.1 *XLR*

Para cables largos —y cortos—, XLR es la mejor conexión, siempre que los equipos estén internamente completamente balanceados. Estos sistemas reducen el ruido y las interferencias. Transmiten la señal por uno de los cables, y por otro la señal invertida. El amplificador sólo amplificará las diferencias, e ignorará lo que sea común a los dos cables: las interferencias.

3.1.2 *RCA*

La conexión RCA es sencilla y funcional.

3.2 *Digitales*

3.2.1 *Coaxial (SPDIF) y AES/EBU*

El protocolo es unidireccional y en tiempo real. Por ello, el receptor no tiene control sobre la fuente. La fuente integra un reloj —impreciso en ordenadores— en la señal audio. El DAC intentará seguir el ritmo, y separar los datos del reloj y del audio. Los transportes buenos suelen tener buenos relojes y poca distorsión.

3.2.2 *I²S*

La señal del reloj y los datos se mantienen separados. Este protocolo se usa internamente entre transportes y DAC internos, siendo también la mejor conexión para DAC externos. Como no es estándar, los componentes conectados deberían ser de la misma marca. Los conectores pueden ser HDMI o de otro tipo.

3.2.3 *Ethernet*

Ethernet es un protocolo bidireccional, asíncrono, adecuadamente aislado, adaptado a grandes longitudes, óptimo para transmisión de ficheros entre el servidor y el reproductor de red, o audio en paquetes entre el servidor y el DAC.

A diferencia la conexión USB, la transmisión no necesita un controlador, aunque sí un servidor (DNLA), un lector de red o un programa para el servidor, y un teléfono o tableta para control.

3.2.4 *Óptica (TOSLINK)*

Los componentes emisores, los receptores ópticos y los cables, no suelen ser de buena calidad.

3.2.5 *USB (Clase audio 2)*

Según la versión, la conexión USB puede ser isócrona o asíncrona. La conexión isócrona envía paquetes al ritmo marcado por reloj maestro. En este caso, el DAC no puede corregir el servidor. La conexión asíncrona y bidireccional corrige este problema. El servidor envía (< 5 m) paquetes sin señal de reloj a la memoria del receptor. El receptor incorpora su propio reloj y solicita nuevos paquetes al servidor. Es la conexión más compleja y suele necesitar controladores actualizados. La alimentación eléctrica interna puede transmitir interferencias.

3.2.6 *Wi-Fi*

Los componentes deben garantizar la continuidad y la estabilidad de la señal. Según Paul McGowan, la calidad y el aislamiento del Wi-Fi es equiparable a Ethernet.

3.2.7 *Bluetooth*

El Bluetooth es la conexión más habitual entre teléfonos y altavoces activos. La calidad es algo menor.

4. DAC

4.1 *Reloj y tipos de conexión*

Los bits se agrupan en paquetes procesados al ritmo del reloj principal. La precisión temporal de este reloj determinará la posición temporal, y el nivel de cada punto de la onda. El reloj maestro será el de la fuente en conexiones unidireccionales, y el del DAC en asíncronas. Muchos preamplificadores o amplificadores integrados cuentan con buenos DAC internos. La calidad de los altavoces, del amplificador y del DAC externo deberían ser equiparables para percibir la mejora.

4.2 *DAC como preamplificador*

Un DAC externo que tenga un control muy preciso del volumen puede conectarse directamente al amplificador, siempre que las fuentes sean todas digitales. Si el DAC fuese compatible con Roon, el programa reduciría remotamente el volumen en el DAC. Paul McGowan recomienda ajustar el volumen en la parte más baja de la cadena.

5. Preamplificador

5.1 Tipos

Los preamplificadores pueden ser pasivos o activos. Los modelos activos pueden incrementar el volumen de la fuente, y tienen una resistencia de salida más baja.

Los controles de tono podrían producir cambios de fase y deberían poder desactivarse. Aún así, un ecualizador que pueda desactivarse podría ser útil para corregir —hasta un máximo de 3 dB— ciertas grabaciones.

Las vibraciones pueden producir ruidos en los componentes electrónicos más sensibles. Éste sería el caso de algún preamplificador de tubos que las transmite a los altavoces.

5.2 Cálculos de niveles de entradas y salidas, tensión, ganancia e impedancia

Las tensiones de entrada y salida de la fuente, del preamplificador y del amplificador, así como las ganancias, deben ser compatibles.

Para un amplificador de potencia, ganancia e impedancia conocidos, podemos conocer la tensión de salida necesaria del preamplificador para lograr el volumen máximo del amplificador (Audioholics):

Para un amplificador de 50 W_{RMS}, 8 Ω y 28 dB, buscamos la tensión de entrada necesaria para el máximo consumo:

$$\begin{aligned} P &= U \cdot I = \frac{U \cdot U}{R} = \frac{U^2}{R} & U_{\text{salida}} &= 20 \text{ V} \\ G &= 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_1} & G &= 20 \cdot \log \left(\frac{U_{\text{salida}}}{U_{\text{entrada}}} \right) \\ G &= 10 \cdot \log \frac{U_2^2/R}{U_1^2/R} = 20 \log \frac{U_2}{U_1} & 10^{G/20} &= 10^{28/20} = 25,1 = \frac{U_{\text{salida}}}{U_{\text{entrada}}} \\ & & U_{\text{entrada}} &= \frac{20 \text{ V}}{25,1} = 0,797 \text{ V}_{\text{RMS}} \end{aligned}$$

P: potencia [W]; *U*: tensión [V]; *I*: corriente [A]; *G*: ganancia [dB]

6. Amplificador

6.1 *Tipos y clases: A, A/B y D e híbridos*

Los amplificadores son fuentes de tensión. La capacidad de suministrar corriente instantáneamente depende de la calidad de la fuente de alimentación. Los picos de corriente dependen de la música y de las cajas acústicas (desfase e impedancia). Por fortuna, la música es compleja, y los picos de corriente suelen ser breves.

Los modelos de transistores de clase A/B o D suelen ser los más comunes. Los híbridos A/válvulas en la entrada y D en la salida (PS Audio) pueden ser excelentes. En el preamplificador, las válvulas no se desgastan tanto, ni limitan la potencia o el control de los graves. Algunos amplificadores de clase D tienen muy buen sonido, mucha potencia y control sobre los graves.

Los amplificadores de clase A pueden tener un sonido excelente, aunque son menos potentes y se calientan mucho. Sin embargo, algunos modelos con buenas fuentes son capaces de entregar picos de corriente considerables, más que algunos amplificadores a priori más potentes.

6.2 *Mono o estéreo*

En los amplificadores estéreo, una pequeña parte de la señal de cada canal podría afectar al otro («crosstalk»), bien por proximidad o porque comparten la misma fuente de alimentación. Dos amplificadores mono solucionan ese problema separando físicamente los canales.

6.3 *Potencia*

El amplificador debería ser más potente que las cajas acústicas, o al menos tener la potencia suficiente para el volumen deseado. Según Paul McGowan, el amplificador funciona adecuadamente hasta el 20% de su potencia máxima. Un amplificador muy pequeño, llevado al límite, podría aplanar las frecuencias más altas y dañar los agudos. Además, los amplificadores más potentes pueden proporcionar mejores bajos, sobretodo con cajas menos sensibles, con excesivo desfase y baja impedancia a determinadas frecuencias. Idealmente, los amplificadores deberían suministrar el doble de corriente a 4Ω que a 8Ω .

Cada aumento de 3 dB necesita el doble de potencia:

$$G = 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_1} = 10 \cdot \log 2 = 3 \text{ dB}$$

Si el rango de linealidad de un amplificador es el 20% de su potencia máxima, ¿cuál es la diferencia en decibelios con el 100% de la potencia?

$$G_m = 10 \cdot \log(P_{max}/P_{lineal}) = 10 \cdot \log(100 \text{ W}/20 \text{ W}) = 6,99 \text{ dB}$$

¿Cuánta potencia de amplificación se necesitaría para una presión sonora continua de 75 dB en el punto de escucha a 2,5 m, picos de 20 dB, sensibilidad de 85 dB/1 W a un metro, e impedancia de 8 Ω?

$$V_a = 75 \text{ dB}_{silla} + 20 \text{ dB}_{pico} + 7,96 \text{ dB}_{distancia} = 102,96 \text{ dB}$$

$$G = V_a + G_m - S_a$$

$$G = 102,96 \text{ dB} + 6,99 \text{ dB} - 85 \text{ dB}_{1 \text{ W}} = 24,95 \text{ dB}$$

$$G = 10 \cdot \log(P_{max}/P_{min}) \rightarrow G/10 = \log(P_{max}/P_{min}) \rightarrow 10^{(G/10)} = 10^{(\log(P_{max}/P_{min}))}$$

$$P_{max}/P_{min} = 10^{(G/10)} \rightarrow P_{max} = 10^{(G/10)} \cdot P_{min}$$

$$P_{max} = 10^{(24,95 \text{ dB}/10)} \cdot 1 \text{ W} = 312 \text{ W} [\text{mono}] \rightarrow 156 \text{ W/canal} [\text{estéreo}]$$

V_a : volumen del altavoz a 1m [dB]; S_a : sensibilidad altavoces [dB]

6.4 Factor de amortiguación

La relación entre la impedancia de entrada de amplificadores y la salida de preamplificadores debería ser igual o mayor de 10:1 (idealmente superior a 100:1). De manera análoga, la diferencia entre la impedancia de los altavoces y la salida del amplificador es indicativa de la capacidad de control. Los amplificadores de tubo no tienen tanto control sobre los altavoces como los de clase D. Los amplificadores modernos no necesitan un ajuste de impedancia manual por su baja impedancia de salida (divisor de tensión).

6.5 Ganancia

Una ganancia excesiva en el amplificador implicaría un nivel de salida del preamplificador demasiado bajo. Con altavoces muy sensibles, el ruido del sistema podría ser notable. Una ganancia escasa impedirá alcanzar la máxima potencia.

7. Cajas acústicas

7.1 *Tipos*

7.1.1 *Material*

El MDF/DM, lacado o cubierto con chapas de madera, y el contrachapado son los materiales más empleados por su precio, estabilidad, precisión de mecanizado y estética. La construcción debe ser sólida y rígida para evitar resonancias.

7.1.2 *Cajas acústica, paneles de membranas o de altavoces*

Las cajas pueden estar selladas, o tener un puerto, una línea de transmisión o un radiador pasivo.

Las cajas selladas se integran bien con los cajones de graves. Los graves no son tan potentes como en las cajas con puerto, aunque bajan más y son más rápidos. La menor sensibilidad de este sistema demanda más potencia o amplificación activa de una vía.

Las cajas con puerto podrían colorear, tener unos transitorios más lentos y una caída más brusca de bajos. Como contrapartida, las cajas con puerto tienen mayor sensibilidad y menos distorsión al reducir los desplazamientos.

Los paneles pueden ser electrostáticos, magnéticos o de altavoces. Los paneles suelen tener un sonido más abierto y rápido. Sin embargo, estos modelos tienen poca sensibilidad, menos dinamismo o bajos, y son difíciles de ubicar por la cancelación de las ondas traseras.

7.1.3 *Cajas activas o pasivas*

Las cajas activas —bien diseñadas— deberían tener filtros activos más eficaces. Los amplificadores internos pueden ser de clase D o AB. Como ejemplo híbrido, PS Audio optó por la amplificación interna (clase D) con acelerómetro para subgraves y graves, y filtro pasivo para medios y agudos. Los monitores activos profesionales para estudio suelen ser más baratos y más planos. Son herramientas de trabajo que tratan de limitar el sonido excesivamente colorido.

7.1.4 *Cajas de estantería y de columna*

Las cajas de estantería son idóneas para las habitaciones pequeñas, y la escucha cercana que permite reducir el volumen y la influencia de la habitación. Estos modelos ocasionan menos problemas modales, y desaparecen más fácilmente que las columnas. Aún siendo más económicas, las cajas de estantería necesitan unos soportes adicionales y amplificadores más potentes. El conjunto (cajas y soportes) suele ser más liviano que las columnas.

Las columnas grandes están diseñadas para locales mayores de 20 m². Tienen más rango dinámico, bajan más, mayor sensibilidad, y pueden tocar más alto que las cajas de estantería o las columnas más pequeñas. Sin embargo, los bajos podrían ser escasos —aún con grandes conos— o excesivos en función del diseño, de la distancia a la pared, de la geometría de la habitación, o cuando el amplificador no puede controlarlos adecuadamente.

7.1.5 Vías

Un excesivo número de transductores aumenta artificialmente el tamaño de los instrumentos. Cada vía adicional incrementa la complejidad del filtro y los problemas de fase. Suele ser suficiente una vía para ordenadores, dos vías para cajas de estantería, y tres vías para columnas. Tres vías permiten cruzar los agudos más arriba y lograr un sonido más suave. Los agudos no necesitan bajar tanto, ni los medios-graves subir en exceso. En los altavoces de dos vías, el altavoz medio-bajo no debería ser muy grande (10 a 14 cm) para mejorar la imagen, los medios, la velocidad y la suavidad de los agudos. Los transductores de medios y agudos deben ser sellados o estar aislados de los graves.

7.2 Ubicación

7.2.1 Altura

Los agudos deberían estar a la altura de las orejas. Las cajas de estantería necesitan unos pies con la altura suficiente.

7.2.2 Separación trasera, lateral y entre altavoces

Una buena ubicación mejora el escenario, la imagen y las frecuencias modales. Los discos bien grabados, como *Ultimate Demonstration Disc: Chesky Records' Guide to Critical Listening*, los tonos de prueba y el ruido rosa son muy útiles para ajustar el sistema. En GNU/Linux, estas pistas se pueden generar con *Audacity* y *sox*. En ocasiones, la posición atípica de los instrumentos o del cantante están en la propia grabación.

Un triángulo isósceles formado por los altavoces y la silla es la referencia de partida. Las cajas acústicas deben separarse de las paredes (evitando distancias similares o múltiples) para lograr profundidad y reducir la coloración de graves. Para que el escenario pueda ubicarse detrás de los altavoces, la distancia entre la parte frontal de las cajas y la pared estará entre 1 m y 1/3 de la longitud de la sala. La separación entre cajas (de 1,5 m a 4 m) incide en la intensidad del rango medio-bajo, en el ancho del escenario, y en la definición de la imagen central. No se recomienda colocar muebles o el televisor entre los altavoces.

El retraso de las primeras reflexiones debería ser mayor de 5 ms ó 1,7 m (Tarun; Alton Everest, 2001, p. 356). Una imagen inestable podría deberse a problemas en los altavoces, o a la intensidad de las primeras reflexiones. Las primeras reflexiones se tratan en el apartado absorción. Según Floyd y Toole (2008), el efecto peine que podrían producir las primeras reflexiones no sería

perceptible por la compensación de todas las reflexiones en sistemas estéreo. La absorción de las primeras reflexiones podría limitar este beneficio. Las primeras reflexiones se determinan con un espejo, o con una linterna y un disco compacto. Sentados en la silla, el espejo o el disco reflejarán la linterna o el transductor de agudos.

New Record Day recomienda colocar los altavoces (entre cintas separadas $\frac{1}{3}$ y $\frac{1}{4}$ de la pared) a ambos lados de la silla y sin inclinación. Se desplazarán hacia delante hasta que la imagen y el escenario sean óptimos. Sólo quedaría ajustar separación lateral entre las dos cintas, la inclinación y el giro.

Los altavoces se sitúan siempre después de ubicar la silla (ver apartado). Si todo está bien ajustado, el escenario debería surgir detrás de los altavoces, con una imagen precisa y resonancias modales atenuadas.

7.2.3 Inclinación

La inclinación modifica la cantidad de agudos, la posición lateral y longitudinal de la imagen, la profundidad, y la intensidad de las primeras reflexiones. La inclinación puede variar desde los altavoces paralelos (mayor profundidad), hasta una inclinación máxima con los agudos apuntando 50 cm detrás de la silla (mayor definición de la imagen). La inclinación reduce las primeras reflexiones con más homogeneidad que la absorción, para que estas puedan contribuir a la inteligibilidad y a la espacialidad. El ruido rosa y un barrido entre 500 Hz y 5 kHz pueden ser útiles para centrar la imagen; los cantantes no están siempre en el centro.

7.2.4 Escucha cercana

Cuando la distancia entre la silla y los altavoces es de 1,2 m a 1,8 m, la influencia de la habitación y la necesidad de amplificación son menores. El sonido directo es preponderante, se perciben mejor los detalles y se molesta menos a los vecinos. Las cajas acústicas pequeñas como las Harbeth P3ESR son idóneas.

7.3 Rangos

Tipo	Rango	Descripción
Subgraves	(20), 30 a 60 Hz	Trueno lejano. Resonancias. Presión. El tramo más bajo no es necesario para la música y consume muchísima potencia. 41,2 Hz a -3 dB (Mi_1) podría ser un buen compromiso para teclado, órgano, bombo, tuba y bajo.
Bajos o graves	60 a 250 Hz	Ritmo, bajos y calidez. Mal ajustada la intensidad, sonaría demasiado grueso, con poca transparencia y presencia de medios-bajos; o excesivamente delgado con falta de ritmo, escenario y ambiente. Inicio de voces y otros instrumentos.
Medios bajos	250 a 500 Hz	Intensidad de voces e instrumentos, timbre de los bajos. Inicio de violín, platillos o flauta.

Medios	500 Hz a 2 kHz	Intensidad y timbre de voces e instrumentos. Inteligibilidad. Fatiga.
Medios altos	2 a 4 kHz	Presencia de percusiones, voces e instrumentos. Efecto bocina. Fatiga
Presencia	4 a 6 kHz	Presencia y ambiente. Fatiga.
Brillo	6 a 20 kHz	Brillo de los armónicos, más metálicos o suaves. Sensación de espacio. Sibilancia. Fatiga.

Tabla 1: Rangos de frecuencias

7.4 Espectro

Según Tarun, hay marcas que tienden a ser muy brillantes: Klipsch; moderadamente brillantes: KEF, Focal, B&W, PMC; más neutras: Monitor Audio, ATC, PSB, Dali; cálidas: Whaferdale, Tannoy, Elac, Dynaudio, ProAc; y muy cálidas: Harbeth. Peter Comeau comentó en el canal Thomas & Stereo que los transductores con exceso de medios o altos podrían llamar la atención. En ese caso, las cajas podrían no desaparecer o incluso fatigar.

Paul McGowan recomienda -1 ó -2 dB en el rango medio, entre 250 y 4000 Hz. Añade que para que el cajón de graves no se oiga, es necesario que las cajas acústicas desciendan lo suficiente de manera controlada. Matthew Poes indicó en una entrevista con Gene DellaSala (Audioholics) que una reducción entorno 2 kHz podía mermar la inteligibilidad.

La transmisión de los graves es por presión y los objetos no impiden su paso. Por encima de la frecuencia de transición, los medios y los agudos son análogos a haces luminosos.

7.5 Características técnicas

7.5.1 Sensibilidad

Una sensibilidad igual o superior a 90 dB reduce notablemente la necesidad de potencia y mejora el rango dinámico. Algunos altavoces extremadamente sensibles podrían colorear y producir más ruido de fondo con ciertos amplificadores. La unidad es dB / 2,83 V a 1 m para 8 Ω, ó dB / 1 W ya que $1\text{ W} = (2,83\text{ V})^2 / 8\ \Omega$. Los vatios consumidos varían en función de la impedancia de cada frecuencia. Un altavoz de 4 Ω consume 2 W para esos mismos decibelios. Convendría reducir 3 dB de la sensibilidad indicada por el fabricante para 8 Ω.

7.5.2 Filtros

El filtro pasivo influye notablemente en la calidad del sonido, la imagen, la profundidad del escenario, la distorsión y la potencia consumida. Según Paul McGowan, los condensadores de película serían mejores y más longevos. La frecuencia de cruce entre medios y agudos debería ser el doble de la resonancia de los agudos. Para el agudo, la salida a la frecuencia de resonancia debería

ser igual o inferior a -18 dB. El medio no debería subir en exceso para reducir la distorsión que podría interpretarse erróneamente como un exceso de agudos.

7.5.3 Impedancia y desfase

La impedancia y el desfase varían con la frecuencia. La impedancia mínima no debería ser inferior al 8% de la nominal, sobretodo si el desfase fuese importante.

7.5.4 Dispersión y direccionalidad

Una buena dispersión tiene que ser lineal, uniforme y suave para que el timbre no cambie en diferentes puntos de escucha. Idealmente, el volumen de todas las frecuencias tiene que reducirse uniformemente al desviarse del eje central. La direccionalidad del altavoz graves-medios tiene que ser similar a los agudos a la frecuencia de cruce. Los altavoces de mayor diámetro tienen una dispersión más cerrada en las frecuencias agudas. A partir de una determinada frecuencia, la dispersión empieza a cerrarse. Las frecuencias más bajas son omnidireccionales.

$$v_{\text{dispersión}} = \frac{c}{\theta_{\text{altavoz}}}$$

$v_{\text{dispersión}}$: frecuencia reducción dispersión [Hz]; c : velocidad del sonido [343,2 m/s];
 θ_{altavoz} : diámetro del altavoz [m]

Según Matthew Poes en Audioholics, un altavoz de diámetro 16,5 cm o mayor podría tener problemas de integración. Explicó que una guía bien diseñada podría ser útil para cerrar la dispersión de los agudos.

Los transductores de 10 cm a 14 cm (dos vías) pueden integrarse con los agudos y con los cajones de graves activos. Una dispersión amplia suena espacial y abarca más asientos, aunque podría crear problemas de reflexión e imagen. Los diseños más direccionales enfocan la imagen, aún sin absorción que no siempre es uniforme. Las dispersiones muy estrechas podrían sonar a bocina en ciertos modelos con pabellones.

7.5.5 Distorsiones

Las cajas con puerto producen menos movimiento del medio-bajo a la frecuencia de resonancia de la caja, lo que reduciría el efecto Doppler de las frecuencias medias. Por debajo de esta frecuencia, existiría un riesgo mecánico asociado a grandes desplazamientos si el filtro no fuese el adecuado. Un puerto pequeño podría producir soplidos y dejar pasar frecuencias indeseadas.

La caja sellada limita mecánicamente las excursiones y distorsiones más extremas. Un cono más grande mueve más aire con menos desplazamiento.

Un altavoz de medios-bajos cruzado demasiado alto, o con un filtro de orden excesivamente bajo, podría ser estridente o causar fatiga. Los altavoces de medios-bajos de 10 a 13 cm llegan más arriba que los de 16 cm.

7.6 Volumen

7.6.1 Volumen óptimo

El volumen se ajusta percibiendo el tamaño natural de los cantantes o instrumentos individuales. Ésto sólo es posible cuando el escenario está detrás de los altavoces. Cuando no se logra ese escenario, un aumento de volumen implica un aumento del conjunto pero no de cada elemento del grupo (McGowan). El sonómetro es fundamental para no excederse y proteger el oído. En efecto, nuestro oído no es tan bueno estimando el volumen absoluto, como el relativo o la localización. Para determinar las necesidades de amplificación del apartado 6.3, al volumen en la silla se sumarán los decibelios perdidos en función de la distancia, así como los picos de música. Los picos de música varían entre 6 dB de la música comprimida y los 25 dB del directo.

$$V_a = V_s + V_p + V_{rd}$$
$$V_{rd} = 20 \cdot \log \frac{d_r}{d_s}$$

V_s : volumen en la silla [dB]; V_p : volumen pico [dB]; V_{rd} : reducción de volumen con la distancia [dB]; d_r : distancia de referencia para sensibilidad: 1 m; d_s : distancia a la silla [m]

$$V_{rd} = 20 \cdot \log \frac{1 \text{ m}}{2,5 \text{ m}} = -7,96 \text{ dB}$$

7.6.2 Suma de decibelios

Los decibelios se pueden estimar por la diferencia entre fuentes o calculando:

Diferencia	Sumar
De 0 a 1 dB	3 dB
2 a 3 dB	2 dB
4 a 8 dB	1 dB
9 ó más dB	0 dB

Tabla 2: Suma de decibelios

$$V_{total} = 10 \cdot \log (10^{(V_1/10)} + 10^{(V_2/10)})$$

7.6.3 Presión acústica

El volumen se mide por diferencia de presiones. La presión de referencia ($P_2 = 20 \mu\text{Pa}$) se establece a 0 dB para el mínimo que se pueda percibir a 3 kHz (Alton Everest, p. 54). Si a nivel eléctrico la potencia dobla cada 3 dB, el oído percibe que el volumen se duplica cada 6 dB ó 10 dB.

$$V = 10 \cdot \log \frac{P_1^2}{P_2^2} = 20 \cdot \log \frac{P_1}{P_2}$$

7.7 Soportes para cajas de estantería

Los soportes permiten elevar los agudos a la altura de las orejas e introducir suficiente retraso con el suelo para reducir problemas de imagen y cancelaciones. Una masilla tipo Blu-Tack es una opción para «pegar» los altavoces.

8. Cajones de graves activos

8.1 *Características generales y uso*

Los cajones de graves activos no son imprescindibles pero añaden presencia, profundidad al escenario, realismo, precisión, tono y ritmo. Los modelos sellados para música (REL, B&W, SVS) suelen ser más precisos, pequeños y rápidos que sus homólogos para cine. Un transductor graves activo es una vía adicional especializada como lo sería el transductor de agudos en su rango. Los altavoces principales no necesitan bajar tanto, lo que permite usar transductores de medios-graves más rápidos y pequeños (10 cm a 14 cm) que se integren mejor con los agudos (7.5.4 Dispersión y direccionalidad).

Los cajones de graves se pueden ubicar en puntos donde no se produzcan silencios o picos, y permiten cambiar el volumen de graves con independencia de los medios o agudos.

La conexión de nivel bajo o línea (conector RCA) se realiza en la salida del preamplificador. La conexión de nivel alto, o de altavoces, varía en función del tipo de cajón de graves y de amplificador. En los amplificadores A, B, y AB, los cables se conectan directamente a los bornes del amplificador, pudiendo conectar los altavoces principales a las conexiones del amplificador o de los cajones de graves. La conexión puede diferir con los amplificadores clase D, diferenciales, de tubos y los monobloques. La conexión al negativo, que no es neutro en los amplificadores diferenciales, y puede no ser cero en los clase D, podría dañar ambos aparatos (consultar manuales). Según REL, los monobloques necesitarán dos cajones de graves, no siendo adecuado el uso de un único cajón. El mismo fabricante indica que la conexión a amplificadores de tubo se hará inicialmente en el borne de 8 Ω , aunque las cajas principales estén conectadas a otro borne positivo.

Para música estéreo, las habitaciones necesitarían dos cajones de 20 a 25 cm, los salones unidades de 30 cm. Las principales entradas y regulaciones podrían ser: entrada de nivel alto, entrada de línea, ganancia, frecuencia de cruce (filtro paso bajo), fase, filtro paso alto, y si el presupuesto lo permitiese, ecualización paramétrica... Según Paul McGowan, la mejor conexión es la entrada de nivel alto.

8.2 *Ajustes*

8.2.1 *Conceptos*

La frecuencia de cruce se ajusta por debajo de la frecuencia mínima (- 3 dB) de las cajas principales. Las frecuencias inferiores a 80 Hz no son direccionales. Los filtros de cuarto orden o superiores (-24 dB/octava) reducen más rápidamente las frecuencias superiores. Si hubiese opacidad o saturación en el rango medio-bajo, habría que reducir el volumen o la frecuencia de cruce. La música no necesita bajar de 30 Hz. En habitaciones pequeñas, convendría atenuar por debajo de 60

Hz para reducir los modos mono-nota. La fase se ajusta con un barrido o un tono a la frecuencia de cruce buscando el ajuste que produzca mayor volumen.

Según Paul McGowan, no se debería usar el filtro paso alto interno para eliminar los bajos de las cajas principales. A cambio de una menor distorsión de los satélites, habría cambios de fase y retrasos adicionales en la señal no previstos en el diseño. El cajón de subgraves debe completar, no sustituir.

Un cajón de graves bien ajustado no llama la atención en ningún momento. Sí podrían hacerlo las vibraciones de muebles, cuadros, cristales o de los pies del cajón. Aunque unos trozos de cámara de aire puedan amortiguar adecuadamente, también existen soluciones comerciales.

8.3 Ubicación

Después ajustar la silla y las cajas acústicas, los cajones de graves se deberían situar relativamente cerca de los altavoces, para no incrementar en exceso el retardo o los problemas de fase. Dos cajones producen una presión más uniforme que un cajón, mejoran la imagen estéreo y reducen la variación entre asientos. Colocando un cajón a la izquierda y después a la derecha del punto de escucha, o ambos cajones a la vez, buscaremos dos posiciones con bajos relativamente uniformes. Los cajones de graves irán en esos puntos. Dos cajones pueden intensificar o reducir diferentes modos en función de la distancia entre ellos. A diferencia de las cajas principales, los cajones de graves activos sí pueden colocarse en puntos que coincidan cerca de las paredes: son ajustables, y no producen medios o agudos.

9. Cables

9.1 Cables para altavoces

9.1.1 Introducción

Según el artículo *Le point sur les haut-parleurs* de la revista *Nouvelle Électronique*, la resistencia reduce toda la señal uniformemente. La inductancia y la capacitancia de los cables comunes no serían relevantes para la mayoría de amplificadores en las instalaciones domésticas. El autor aclara que los cables no se deben separar para no aumentar la inductancia parásita.

La inductancia suele variar inversamente a la capacitancia. Los valores excesivamente altos de inductancia ($> 5 \mu\text{H}$) podrían reducir las altas frecuencias, mientras los de capacitancia más extremos podrían afectar a algunos amplificadores. Los cables deberían ser flexibles y ligeros, estar compuestos por múltiples hilos delgados con poca separación, y contar con buenos conectores.

Tarun argumenta que los diferentes grados de pureza de cobre (OFC, OCC) no tienen importancia. Los cables de altavoz conducen corrientes relativamente altas, no son sensibles a las interferencias y no deben ser apantallados o blindados.

9.1.2 Resistencia y sección

La sección se puede calcular con las siguientes fórmulas:

$$\begin{aligned}\rho_{\text{Cu}} &= 17 \text{ m}\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m} \\ R_{\text{cable}} &= 2 \cdot \rho \cdot \frac{l}{S} \\ R_{\text{altavoz}} &= 0,8 \cdot Z_{\text{nominal}} \\ \Delta V &= 20 \cdot \log \frac{R_{\text{altavoz}}}{(R_{\text{cable}} + R_{\text{amplificador}} + R_{\text{altavoz}})}\end{aligned}$$

ρ : resistividad [$\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$]; R : resistencia [Ω]; Z : impedancia [Ω]; l : longitud [m]; S : sección del cable [mm^2]; ΔV : diferencia de volumen [dB]

La siguiente tabla resume las longitudes máximas para las impedancias y secciones más comunes, así como una resistencia de salida del amplificador de $100 \text{ m}\Omega$:

Sección	-0,3 dB		-0,5 dB	
	4 Ω	8 Ω	4 Ω	8 Ω
0,75 mm ²	0,3	3	2	6
1,5 mm ²	0,5	6	4	12
2,5 mm ²	1	9	6	21
4 mm ²	2	15	10	33

Tabla 3: Longitud máxima [m]

9.1.3 Inductancia

Para 20 kHz, una reducción del 1% de la tensión (método de Matrix-HiFi)⁶ o de decibelios se produciría por encima de 5 μH para altavoces de 8 Ω:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 20 \text{ kHz} \cdot 5 \mu\text{H} = 0,6 \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{8^2 + 0,6^2} = 8,02 \Omega$$

$$\Delta V = 20 \cdot \log \frac{R_{\text{altavoz}}}{(Z_{\text{cable}} + R_{\text{altavoz}})}$$

$$V_2 = \frac{V_1}{Z} \cdot R$$

L	X _L	Z	ΔV
0,1 μH	0,0 Ω	8,00 Ω	0,0 dB
0,2 μH	0,0 Ω	8,00 Ω	0,0 dB
0,5 μH	0,1 Ω	8,00 Ω	0,0 dB
1,0 μH	0,1 Ω	8,00 Ω	0,0 dB
2,0 μH	0,3 Ω	8,00 Ω	0,0 dB
5,0 μH	0,6 Ω	8,02 Ω	0,0 dB
10,0 μH	1,3 Ω	8,10 Ω	-0,1 dB
20,0 μH	2,5 Ω	8,39 Ω	-0,4 dB
50,0 μH	6,3 Ω	10,17 Ω	-2,1 dB

9.2 Conexiones

Las interconexiones no balanceadas (RCA) sí deberían ser apantalladas. Los cables balanceados (XLR), siempre que los componentes estén internamente balanceados, pueden alargarse para reducir la longitud de los cables de altavoz y aislar la cadena musical.

9.3 Alimentación

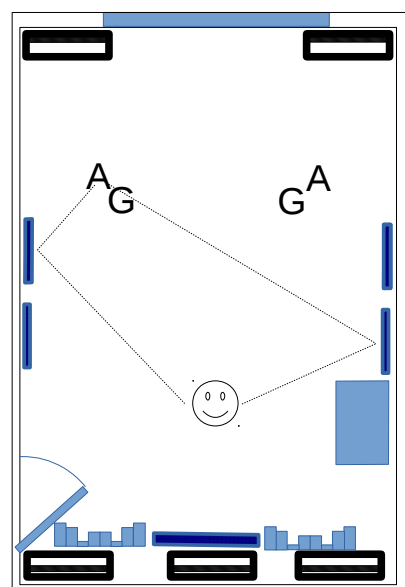
Los cables que alimentan a los equipos suelen cruzarse con muchas conexiones sensibles. Conviene separarlos de las conexiones y que sean apantallados.

⁶ <http://matrixhifi.com/>

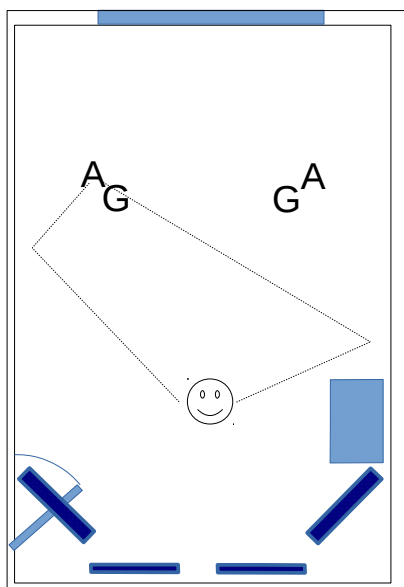
10. Habitación

10.1 Geometría y construcción

Las habitaciones pequeñas ($3,5 \text{ m} \times 5,5 \text{ m}$, $< 55 \text{ m}^3$) aportan más calidez y detalle, aunque sufren de resonancias modales y coloración. Las habitaciones grandes ($> 120 \text{ m}^3$) transmiten más especialidad, tardan más en acumular frecuencias modales, pero producen más reverberación, un sonido menos directo o detallado. Quizás, las habitaciones medianas ($4,5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$) sean las más adecuadas. El volumen no debería ser inferior a 43 m^3 (Gilford, 1959, citado en Alton Everest). Por debajo de ese volumen mínimo, las trampas de graves no podrían solucionar las resonancias modales. La simetría es importante para todos los elementos: paredes, puertas, ventanas y muebles. Las frecuencias modales mal repartidas, características de locales pequeños o con dos/tres dimensiones idénticas/proporcionales, producen picos y valles perceptibles. Las habitaciones dedicadas a la música no suelen usarse para otras tareas. Una habitación pensada para más actividades podría ser más útil y convivial.



Difusor
Trampa graves fricción
Trampa de medios-agudos
Trampa graves diafragmática
G, A: Cajón de graves, altavoz



El ruido del exterior reduce el rango dinámico disponible y la inteligibilidad. Existen diferentes elementos que ayudarían a reducir su intensidad: distancia a las fuentes de ruido, árboles o barreras artificiales, ventanas aislantes, paredes masivas de hormigón o ladrillo externas y paredes internas flexibles, ausencia de grietas, suelos suspendidos, puertas aislantes o vestíbulos con dos puertas.

Si no quisiéramos molestar, ningún muro podría contener las frecuencias más graves. En los pisos o en las habitaciones pequeñas habría que limitar las frecuencias más graves y el volumen.

Las ventanas y los espejos no deberían coincidir con los puntos de primera reflexión. No obstante, las ventanas tienen una absorción similar a los paneles de yeso, absorbiendo algo a 125 Hz y reflejando el resto (Lohan). Por ello, no necesitan un tratamiento especial fuera de las primeras reflexiones. Las paredes inclinadas o curvas, adecuadas para grandes y complejos espacios de difusión y reflexión, se deberían dejar para las salas de grabación más grandes, pero no para la sala de control o de escucha (Alton Everest, p. 283).

Las salas de escucha comunes son más previsibles con paredes paralelas. La geometría de la habitación debería cumplir las recomendaciones de Louden, Sepmeyer o el siguiente rango:

$$1.1L_y/L_z \leq L_x/L_z \leq 4.5L_y/L_z - 4 ; L_x < 3L_z ; L_y < 3L_z$$

Lx: longitud; Ly: anchura; Lz: altura

Altura	Ancho	Longitud
1	1,4	1,9
1	1,3	1,9
1	1,5	2,5

Tabla 4: Louden

Altura	Ancho	Longitud
1	1,14	1,39
1	1,28	1,54
1	1,6	2,33

Tabla 5: Sepmeyer

La orientación más habitual sería en el sentido longitudinal. Esta opción reduce las cancelaciones, e incrementa el espacio para el escenario, la posición de la silla y la difusión.

10.2 Escenario e imagen

10.2.1 Definición

La imagen se define como la ubicación precisa de los instrumentos o voces, en un plano derecha-izquierda. El escenario podría definirse como la percepción de las dimensiones del lugar de grabación: profundidad, ancho, altura y ambiente.

10.2.2 Ajustes

Según Floyd y Toole (2008), el sonido directo aporta información direccional. La reflexión indica la distancia a la pared. Los efectos de la reflexión dependen del retraso y del nivel sonoro relativo al sonido directo. La proporción de sonido directo se puede aumentar acercando los altavoces al oyente, y manteniendo las primeras reflexiones tempranas. El refuerzo de estas primeras reflexiones mejora la inteligibilidad incrementando la proporción de sonido directo frente a las reflexiones tardías (>50 ms). Las reflexiones tardías de las salas grandes pueden atenuarse con absorbentes o con difusión. En las salas domésticas, el mobiliario común suele ser suficiente. Las salas de mezcla y las salas de escucha no tienen los mismos objetivos. Si en las primeras, un espacio libre de reflexiones es útil para realizar la mezcla, en las salas de escucha o de grabación, las reflexiones y la difusión son necesarias. La absorción doméstica sólo reduce unos decibelios, no es uniforme, y colorea el espectro. Sin las reflexiones de primer orden, de las que derivan los

siguientes órdenes, se perdería la difusión, el escenario y el ambiente. Las reflexiones contribuyen a la profundidad del escenario y que éste se independice de los altavoces.

Si la imagen y los instrumentos fuesen estables y bien definidos, las primeras reflexiones no se deberían tratar. Del ruido rosa, debería percibirse una línea vertical centrada entre los dos altavoces. Una desviación en alguna frecuencia indicaría un problema en la posición de los altavoces o de la silla, alguna asimetría en la habitación, un exceso de reflexión, o alguna diferencia de nivel de algún altavoz.

10.3 Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación T60 es el tiempo para que un sonido fuerte se atenúe 60 dB. La reverberación orienta sobre el volumen de la habitación. Las salas grandes deben tener tiempos de reverberación mayores. Para músicas lentas en grandes salas o iglesias se podría llegar a 2,5 s. En salas pequeñas, el tiempo oscilará entre 0,25 y 0,5 s. Tiempos muy bajos, característicos de un exceso de absorción, apagan el sonido y la presencia, reducen el tamaño aparente de la sala y son desagradables; tiempos muy altos hacen que las voces y los sonidos cortos sean ininteligibles, y el contraste entre músicos no sea nítido. Para mejorar una habitación vacía, añadiremos absorción con paneles acústicos, muebles, una librería, alfombras, cortinas delgadas, cojines y gente. En una habitación, un armario abierto con ropa situado en la pared trasera, es un excelente panel acústico. Las cortinas gruesas absorben en exceso las frecuencias medias-altas y altas (Lohan).

10.4 Eco flotante

Una distorsión ecoica podría producirse por el rebote rápido y perpendicular entre dos paredes paralelas. La coloración ocurriría en el rango medio y medio-alto (1 a 4 kHz) con un pico entorno a 2 kHz (Halmrast, 2019). El sonido se vuelve más cortante, duro e incluso metálico. Este efecto que se podría percibir en un baño alicatado, no es tan común en la sala de escucha. Unas palmas dadas por uno mismo emiten perpendicularmente a diferencia de la música. El test del aplauso o palmadas se debería realizar desde la posición del altavoz y escuchando en la silla (Lohan). La distorsión ecoica se puede atenuar con absorción (7 cm), difusión o una biblioteca.

10.5 Frecuencia Schroeder

La frecuencia Schroeder (200 a 500 Hz), característica de cada habitación, delimita dos comportamientos bien diferentes. Por debajo del límite, las frecuencias tienden a desplazarse como olas, con importantes variaciones entre picos y nulos. Por encima, las frecuencias son más direccionales, como haces luminosos o bolas de billar. En este caso, las reflexiones de las paredes reducen las variaciones entre picos y valles. La difusión de paredes y difusores ayudan a distribuir las frecuencias medias y agudas. La absorción, aún siendo útil para las primeras reflexiones, tendría el efecto contrario.

10.6 Ondas estacionarias

Las ondas estacionarias modales necesitan un tiempo para formarse y desaparecer. Las ondas estacionarias bien repartidas reducen la potencia necesaria. Sólo dos o más frecuencias estacionarias demasiado juntas (menos de 5 Hz) o separadas (más de 25 Hz) se perciben negativamente. La ubicación de la silla (10.11 Silla) se puede optimizar de oído, midiendo cada frecuencia (archivo Complementos.tar.gz) con un sonómetro, y escuchando canciones como *Thanks to you* de Boz Scaggs del álbum *Dig*, o la pista 27 del disco *Ultimate Demonstration Disc* de Chesky Records.

Las frecuencias modales teóricas se pueden calcular con la siguiente fórmula:

$$v_{\text{modal}} = \frac{c}{2 \cdot d_{\text{muros}}}$$

d_{muros} : distancia entre muros [m]

$$v_{i,\text{modal}} = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{n_{i,\text{long}}^2 / d_{\text{longitud}}^2 + n_{i,\text{ancho}}^2 / d_{\text{ancho}}^2 + n_{i,\text{alt}}^2 / d_{\text{altura}}^2}$$

n : nº de orden de la frecuencia modal

Tipo	Efecto
Axial	2
Tangencial	1
Oblicuo	0,5

Tabla 6: Tipos de frecuencias modales

La flexibilidad de las paredes y los muebles pueden modificar la respuesta teórica. Los modelos informáticos para locales no rectangulares tampoco son precisos. Las frecuencias axiales, o dos tangenciales juntas, son las que mayor efecto tienen.

Las frecuencias modales se representan con las siguiente fórmula:

$$y = \left| \sin \left(2 \cdot \pi \cdot v_{\text{modo}} \cdot \frac{x - \frac{c}{4 \cdot v_{\text{modo}}}}{c} \right) \right|$$

x : posición; y : altura

10.7 Difusión

10.7.1 Descripción

La difusión QRD distribuye las reflexiones tardías en varias direcciones, mejora la difusión o el ambiente, y reduce el eco flotante sin absorber frecuencias. No se recomienda la difusión si la

reverberación es excesiva, ni para las primeras reflexiones. La difusión debe limitarse a las frecuencias medias (500 a 3000 Hz), debido a la profundidad necesaria para los graves, y a que los agudos no necesitan difusión. Un difusor con mayor número primo será más grande y pesado, aunque difundirá un espectro más amplio y preciso. Si la difusión fuese excesiva, los elementos del escenario podrían ser demasiado anchos y emborronar la imagen (McGowan). El efecto de un número insuficiente de difusores no será perceptible (Lohan). Según Jens Eklund de Resonator Stockholm (difusores Optifusser), la difusión sería útil cuando el retraso de la reflexión fuese inferior a 12 ms, incluso 20 ms, por debajo 2 m a 3,4 m entre la silla y la pared. Para distancias mayores, la pared sería un buen difusor. Además, los difusores requieren una distancia mínima para que la reflexión sea uniforme.

Un sonido natural se obtiene equilibrando absorción, difusión y reflexión.

10.7.2 Teoría

La longitud de onda de una frecuencia se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\lambda = \frac{c}{v}$$

λ : longitud de onda [m]; c : velocidad del sonido [343,2 m/s]; v : frecuencia [Hz]

La distancia entre la silla y el difusor debe ser suficiente:

$$d_{ds} \geq 3 \cdot \lambda_{f.min}$$

d_{ds} : distancia difusor-silla [m]; $\lambda_{f.min}$: longitud de la frecuencia mínima [m]

El ancho de la ranura depende la frecuencia máxima y de la mínima:

$$a = \frac{\lambda_{f.max}}{2} \begin{cases} a \geq 25 \text{ mm} \text{ y} \\ a \leq 0,137 \cdot \lambda_{f.min} \end{cases}$$

a : ancho de la ranura [m]

La frecuencia mínima, o frecuencia de diseño, es el valor más alto de las siguientes fórmulas:

$$P = \frac{\lambda_{f.min}}{2} \rightarrow v_{min} \geq \frac{c}{2 \cdot P}$$

P : profundidad de diseño [m]

$$v_{min} \geq \frac{c}{a \cdot N}$$

N : número total de ranuras

La profundidad de cada ranura se obtiene multiplicando el factor de proporcionalidad por la profundidad del escalón:

$$s_n = n^2 \cdot \text{mod}(p)$$

s_n : factor de proporcionalidad; n : número de ranura; p : número primo

$$d_n = s_n \cdot e$$

$$e = \frac{P}{p}$$

d_n : profundidad de la ranura [m]; e : profundidad escalón [m]

n	p						
	5	7	11	13	17	19	23
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1
2	4	4	4	4	4	4	4
3	4	2	9	9	9	9	9
4	1	2	5	3	16	16	16
5	0	4	3	12	8	6	2
6		1	3	10	2	17	13
7		0	5	10	15	11	3
8			9	12	13	7	18
9			4	3	13	5	12
10			1	9	15	5	8
11			0	4	2	7	6
12				1	8	11	6
13				0	16	17	8
14					9	6	12
15					4	16	18
16					1	9	3
17					0	4	13

18	1	2
19	0	16
20		9
21		4
22		1
23		0

Tabla 7: Factor de proporcionalidad

10.7.3 Ejemplo de difusor QRD n° 7

Si el difusor se tuviese que colocar a 120 cm de la silla, la frecuencia mínima debería ser mayor de 857,5 Hz.

La frecuencia máxima se estima por tanteo. Para 3500 Hz, la longitud de onda es 0,098 m y el ancho de ranura 0,049 m. Si no cumpliera con los criterios adicionales, habría que modificar la frecuencia máxima.

La frecuencia mínima en función del ancho total de las ranuras sería:

$$v_{min} \geq \frac{c}{a \cdot N} = \frac{343,2 \text{ m/s}}{0,049 \text{ m} \cdot 8} = 875,5 \text{ Hz}$$

La frecuencia mínima en función del número de ranuras es mayor que la propuesta inicialmente de 858 Hz. El valor más alto es la frecuencia de diseño o mínima. La frecuencia mínima depende de la máxima. Si quisiéramos modificar el rango, habría que reiterar los cálculos con otros valores. Para la frecuencia de diseño comprobaremos el ancho de la ranura:

$$a = 0,049 \text{ m} \leq 0,137 \cdot \lambda_{f.min} = 0,053 \text{ m}$$

En difusores con números primos bajos, la profundidad real del difusor podría ser menor que la profundidad necesaria para la frecuencia mínima. La profundidad máxima sería:

$$P = \frac{\lambda_{f.min}}{2} = 0,196 \text{ m}$$

Sólo queda calcular la profundidad de cada ranura:

$$d_n = s_n \cdot e$$

$$e = \frac{P}{p} = \frac{0,196 \text{ m}}{7} = 0,028 \text{ m}$$

n	s _n	d _n
0	0	0,000 m
1	1	0,028 m
2	4	0,112 m
3	2	0,056 m
4	2	0,056 m
5	4	0,112 m
6	1	0,028 m
7	0	0,000 m

Tabla 8: Profundidad de las ranuras

Los modelos comerciales pueden tener ocho ranuras, siete o sólo seis. El modelo con $p+1$ ranuras podría usarse individualmente. El difusor con p ranuras es asimétrico y puede asociarse con otro colocado al revés (n: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 - 6, 5, 4, 3, 2, 1, 0). La variante más estrecha con $p-1$ ranuras se puede fabricar con un marco que tenga una anchura $a/2$, y la profundidad equivalente a las ranuras eliminadas (n: 0 y 7); los marcos combinados de varios paneles forman la ranura que falta (n: | 1, 2, 3, 4, 5, 6 || 6, 5, 4, 3, 2, 1 |).

10.8 Absorción pasiva

10.8.1 Conceptos

La absorción de graves, imprescindible en la sala de control y grabación, no sería una opción en salas de escucha más pequeñas. La cantidad de elementos necesarios para atenuar pasivamente las resonancias graves suele ser considerable. Por ejemplo, un panel de espuma acústica de 100 × 50 × 25 cm separado a 1,2 m rebaja entre 0,3 dB y 1 dB la resonancia de 70 Hz. La mejora —bajos más uniformes y precisos— se percibe en toda la sala. La absorción de frecuencias medias y altas es mucho más económica y ocupa menos espacio.

La absorción por resonancia se ubica en los puntos de máxima presión. La absorción por fricción se realiza en los puntos de máxima velocidad.

10.8.2 Paneles de absorción porosos

Estos paneles reducen la reverberación, las cancelaciones, las primeras reflexiones y las resonancias. El tratamiento necesario depende de la geometría de la sala, del volumen de la música, o de la cantidad de personas, muebles y telas. Los paneles se ubican siempre en el punto de máxima velocidad ($1/4$ de onda), y deberían tratar «uniformemente» todo el espectro. La absorción comercial más común sólo absorbe agudos, reduce armónicos y apaga el sonido. Si la imagen es estable y precisa, las primeras reflexiones laterales no deberían tratarse para mantener la difusión y la integridad espectral. Sin embargo, la absorción es útil en los puntos de primera reflexión situados detrás de la silla (parte central de la pared trasera) cuando la distancia es insuficiente para la

difusión, y que el retraso es inferior a 5 ms (1,72 m). Los materiales deben ser seguros e higiénicos. Un material con una resistividad al flujo de aire más baja, compensada por más espesor, produce un respuesta espectral más uniforme. Los paneles de absorción ocupan más espacio que los resonadores o los paneles diafragmáticos. Pueden recubrirse con madera o una tela gruesa cuando no se desee absorber frecuencias agudas. Las ondas reflejadas por el reflector serán de una tamaño similar o inferior al panel. La fabricación es sencilla.

Las pantallas móviles (biombos) de 10 a 20 cm permiten ajustar la frecuencia en función de la distancia a la pared, aunque ésta no debe superar el espesor de la trampa. La separación entre la trampa y la pared debería ser:

$$d_p = 1/4 \cdot \frac{c}{v}$$

d_p : distancia de la trampa a la pared [m]

10.8.3 Paneles de membrana o diafragmáticos, y resonadores Helmholtz

Los resonadores Helmholtz y los paneles de membrana o diafragmáticos reducen una determinada resonancia con más eficacia que los paneles de absorción, sin mermar las frecuencias medias y altas. Este método suele complementar el tratamiento por absorción de amplio espectro. Se ubican en puntos de máxima presión (sonómetro). Más difíciles de fabricar (muy rígidos, herméticos y pesados), deben diseñarse y ajustarse por medición. Los elementos pueden ser modulares o integrarse en las paredes. Por su tamaño, estos cajones pueden modificar la acústica y crear nuevos problemas al reducir el tamaño efectivo del local.

Las trampas diafragmáticas pueden ser de paneles semi-rígidos como el contrachapado, o flexibles como un vinilo muy denso. No he podido averiguar si la siguientes fórmulas son correctas:

$$v_{p.flexible} = \frac{600}{\sqrt{M \cdot d}}$$

$$v_{p.semirigido} = 1,34 \cdot v_{p.flexible}$$

v : frecuencias de resonancia de los paneles [Hz]; M : densidad del panel frontal [kg/m^2];
 d : distancia al panel trasero [cm]

Las trampas Helmholtz con paneles perforados con agujeros de 5 a 10 mm de diámetro son para frecuencias medias. Las trampas compuestas por uno o varios de tubos de longitud variable de diámetro entre 5 a 10 cm tratan con eficacia las resonancias bajas. Sin embargo, estas trampas también tienen inconvenientes: el cálculo, la rigidez y la exposición al absorbente si fuese tóxico.

10.8.4 Resistencia al flujo de aire

Material	ρ_c [kg / m ³]	Espesor [mm]	σ [Pa·s/m ² ; rayls/m]
Lana de roca	30		22 000
Lana de roca	60		15 000
Lana de roca	80		28 000
Lana de roca		40	15 000
Poliéster	16		4000
Poliéster	30		13 000
Espuma		25	13 000
Espuma		50	18 000
Espuma		75	25 000

Tabla 9: Resistencia al flujo de aire

10.9 Absorción activa

Las preciadadas trampas activas (PSI Audio AVAA) son eficaces y compactas. Mejoran toda la habitación —como la absorción pasiva—, a diferencia de la corrección digital de sala o la ecualización.

10.10 Corrección digital de sala y ecualización

10.10.1 Octavas

El número de octavas entre dos notas se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$N_o = \log_2\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

$$\log_a(u) = \frac{\ln u}{\ln a} \rightarrow \log_2\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = \frac{\ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)}{\ln 2}$$

N_o : número de octavas

10.10.2 Ecualización de las resonancias modales

La ecualización no debería hacerse antes de situar adecuadamente la silla y los altavoces, o tratar la sala si fuese posible.

Por encima de la frecuencia de transición, nuestro oído filtra e interpreta las notas que proceden de todas las direcciones como no podría hacerlo un micrófono. Por ello y para evitar desfases, la corrección de sala sólo funciona para graves en una posición determinada. Los nulos tampoco se deben ecualizar (McGowan, Poes).

Los notas un poco bajas se podrían aumentar hasta un máximo de 3 dB (riesgo de recorte, truncado o «clipping»). Los ecualizadores analógicos no tienen la precisión necesaria para corregir los estrechos picos modales. Las frecuencias modales son acumulativas y se perciben más con notas largas.

10.10.3 Ecualización de los archivos

La ecualización de pistas con *Audacity* o *sox* funciona muy bien, siempre que se controle el recorte o truncado. Este método es barato, y no añade distorsión o ruido por fluctuación de la señal (*jitter*). Sin embargo, este proceso es más laborioso y rígido que la ecualización con DSP. Las pistas ecualizadas se pueden leer desde el disco duro o grabar en discos compactos.

La ecualización con *Audacity* ha sido la siguiente:

Frecuencia [Hz]	Amplitud [Hz]	Reducción [dB]
71	± 5	- 6
130	± 5	- 6

Tabla 10: Ecualización con *Audacity*

La ecualización de una canción con *sox* en *GNU/Linux Debian Jessie* puede ser muy precisa:

```
sox -S Canción.flac Canción_ecualizada.flac gain -0.5 equalizer
34.65 0.16o -12 equalizer 43.65 0.24o 3 equalizer 51.91 0.14o 3
equalizer 69.3 0.15o -9 equalizer 92.5 0.09o 3 equalizer 130.81
0.10o -6
```

La ecualización de todo el disco con *sox* en *GNU/Linux Debian Jessie* se realiza con un fichero ejecutable que contiene el siguiente guión:

```
#!/bin/bash
#Ecualización de las pistas de la carpeta

for i in *.flac
do
    name=`echo $i | cut -d'.' -f1`;
    #sox -S "$i" "${name}_e.flac" equalizer 35 0.23o -9 equalizer
70 0.17o -9 equalizer 130 0.10o -6
    sox -S "$i" "${name}_sox.flac" gain -0.5 equalizer 34.65 0.16o
-12 equalizer 43.65 0.24o 3 equalizer 51.91 0.14o 3 equalizer 69.3
0.15o -9 equalizer 92.5 0.09o 3 equalizer 130.81 0.10o -6
    echo "Ecualizando ${i}..."
    rm "$i"
done
```

10.10.4 Extracción de las pistas

En GNU/Linux también hay programas gráficos que extraen pistas. Sin embargo, los guiones ejecutables pueden ser más rápidos y cómodos para grandes series:

```
#!/bin/bash
```

```
# Para verificar el disco y lector borrar la almohadilla
# cdparanoia -d /dev/sr0 -A
# Extrae todas las pistas en formato *.wav
cdparanoia -d /dev/sr0 -w -B -v
```

10.10.5 *Grabación del disco*

Otro guión ejecutable que automatiza la grabación del disco a partir de ficheros *.flac:

```
#!/bin/bash
#Grabación de un disco CD-R Audio

#Conversión de los ficheros
for i in *.flac; do ffmpeg -i "$i" "${i}.wav"; done
#Grabar disco
wodim -v -pad dev=/dev/sr0 -sao -audio *.wav
#Borrar ficheros *.wav
rm *.wav
```

10.10.6 *Ecualización con DSP*

El DSP (miniDSP, Dirac...) puede estar integrado en el cajón de subgraves, en el DAC, entre la fuente y el preamplificador, o después del preamplificador. Según la posición que ocupe el DSP en la cadena, la música podría necesitar una conversión ADC/DAC. Las tensiones de entrada y salida deben ser compatibles.

La ecualización paramétrica en el cajón de graves añade un retraso, pero limita la doble conversión a las frecuencias más bajas, y resuelve los problemas modales más graves que no podrían tratarse con trampas de graves. Las frecuencias estacionarias menos graves, como las producidas por los altavoces de estantería, se podrían tratar con absorción pasiva.

10.10.7 *Ecualización en el ordenador*

Los ordenadores pueden ecualizar mediante programas (*Roon, JRiver...*) que utilizan filtros generados por REW⁷ —magnífico programa—, o un ecualizador paramétrico manual.

10.11 *Silla*

La silla se coloca antes que los altavoces en el punto que tenga los bajos más uniformes. No debe estar cerca de las paredes, en el centro de la habitación, en un bache o en un pico de frecuencias modales (10.6 *Ondas estacionarias*). ¿Una silla espartana o un cómodo sofá? Siempre que el respaldo no haga de reflector, ambas soluciones son adecuadas.

⁷ Room EQ Wizard

11. ¿Y ahora qué?

Es la pregunta que me hago ahora y que todavía no tiene respuesta. Lo que sí sé es que un sistema estéreo básico bien configurado, sin problemas evidentes que nos distraigan, puede crear una ilusión musical muy tangible.

El conocimiento es siempre una excelente inversión. Recomiendo el disco de *Chesky Records* titulado *Ultimate Demonstration Disc: Chesky Records' Guide to Critical Listening* para probar diferentes aspectos del sistema, y comprender la terminología de esta afición. Para los usuarios más técnicos, los libros *Master Handbook of Acoustics* de *Alton Everest*, o *Sound reproduction: Loudspeakers and rooms* de *Toole y Floyd* son grandes referencias. También existen canales técnicos en YouTube (teoría, pruebas, mediciones) como: *Akash Murthy*, *Erin's Audio Corner*, *Audio Science Review*, *Audioholics...*; y otros para descubrir música, ver equipos y crear comunidad: *Francisco del Pozo*, *The Hans Beekhuizen Channel*, *PS Audio*, *A British Audiophile*, *Thomas & Stereo*, *Mexicaudio Hifi HiEnd*, *De Audiofilos y Locos*, *NPR Music...*

¿Y ahora qué? Descubrir nuevos artistas en las radios *Radio 3* y *Fip*, o en los canales citados, comprar música si se puede, compartirla y disfrutarla.

12. Referencias

- Alton Everest, Frederick. *Master Handbook of Acoustics*. USA: McGraw-Hill, 2001. 615 p.
- DellaSala, Gene. Audioholics [en línea]. Tampa (Florida, EUA). Disponible en: <https://www.audioholics.com/>
- Halmrast, Tor. *A very simple way to simulate the timbre of flutter echoes in spatial audio*. Paris (France): EAA SpatialAudio Signal Processing Symposium, Sep 2019. pp.115-119, 10.25836/sasp.2019.37.hal-02275197
- Lohan, Jesco. Acoustics Insider [en línea]. Disponible en: <https://www.acousticsinsider.com/>
- Majidimehr, Amir. Audio Science Review [en línea]. Disponible en: [Audio Science Review \(forum\)](#) y [Audio Science Review \(YouTube\)](#).
- Erin. Erin's Audio Corner [en línea]. Disponible en: <https://www.erinsaudiocorner.com/> y Erin's Audio Corner (YouTube).
- McGowan, Paul. PS Audio [en línea]. Boulder (EUA). Disponible en: <https://www.psaudio.com>
- McGowan, Paul. *Audiophile's Guide*. Boulder (EUA): Viceroy Press LLC, 2020.
- Tarun. A British Audiophile [vídeos]. Disponible en: <https://www.youtube.com/channel/UCMADmrBg2mMall8bpC4anQQ>
- Toole, Floyd E. *Sound reproduction: Loudspeakers and rooms*. Burlington (USA): Focal Press, 2008. 550 p. ISBN: 978-0-240-52009-4