



Por qué algo suena fuerte

Energía, decibelios y el oído: cómo se mide eso que llamamos volumen.

En el Tema 1 dijimos que el sonido es energía elástica que viaja, y en el Tema 2 nos centramos en la altura: cómo el oído percibe las frecuencias y las convierte en notas. Ahora toca atender a la otra cualidad fundamental que prometimos para este tema: la **sonoridad**. Es decir, cómo de fuerte se oye un sonido.

El asunto tiene más miga de lo que aparenta. La sonoridad es uno de los lugares donde la física y la percepción más se separan: dos sonidos pueden tener la misma intensidad medida con un sonómetro y sonarnos uno mucho más fuerte que el otro, dependiendo de su frecuencia, de su duración, del momento del día e incluso del estado de ánimo. Igual que en el Tema 2 vimos que la octava no era un salto fijo en hercios sino una proporción, aquí veremos que la sonoridad no es una magnitud lineal sino **logarítmica**.

Y por el camino entenderemos por qué los altavoces del coche del vecino te molestan especialmente con los graves, por qué un concierto a bajo volumen «pierde brillo», y por qué los formatos comprimidos como MP3 funcionan exprimiendo agujeros del oído humano. Empecemos por entender un poco mejor la onda sonora misma.

Propagación de energía, no de materia

Cuando una cuerda de tu guitarra vibra, no envía aire hacia el oyente. Lo que envía es **energía**: la cuerda empuja las moléculas de aire que tiene al lado, esas a su vez empujan a las siguientes, y así sucesivamente, como una fila de piezas de dominó. Cada molécula de aire vibra alrededor de su posición pero no se mueve realmente del sitio. Lo que viaja de un punto a otro es el patrón de compresiones y expansiones, no el aire en sí. Por eso aunque el bajista esté a quince metros del oyente, el aire que estaba pegado al amplificador no llega al oyente: lo que llega es la perturbación que ese aire transmitió.

En el vacío no hay sonido. Aunque lo que viaja es energía y no materia, el sonido sí necesita un medio material para propagarse (aire, agua, una pared, una cuerda). Por eso las películas de ciencia ficción donde se oyen las explosiones en el espacio están físicamente equivocadas, aunque dramáticamente queden mejor: las naves estallan en silencio absoluto. La luz, en cambio, sí viaja por el vacío, porque no necesita medio. Esa es una diferencia fundamental entre las ondas sonoras (mecánicas) y las electromagnéticas.

Dicho de otra manera: una onda sonora es una secuencia de zonas de aire un poco más comprimido y un poco más expandido, alternándose y avanzando en el espacio. Donde la onda pasa, los puntos del medio oscilan en torno a su posición de equilibrio. Esa oscilación es la vibración que detecta tu tímpano.

Esto explica varias cosas que ves a diario. Cuando hablas frente a una vela, la llama no se apaga (el aire no viaja); pero si soplas, sí (porque entonces sí estás moviendo aire). Cuando alguien grita en una habitación cerrada, el sonido llega al pasillo no porque el aire de la habitación se

desplace, sino porque la pared transmite la vibración al aire del otro lado. Y cuando un avión rompe la barrera del sonido, el «boom» que oyes no es el aire del avión llegando hasta ti: es la onda de presión que ese avión generó al moverse más rápido que sus propias ondas pueden propagarse.

§ 3.2

Velocidad del sonido

¿A qué velocidad viaja una onda sonora? En el aire a temperatura ambiente, a unos **340 metros por segundo**, o sea, alrededor de 1.220 km/h. Es una velocidad cómoda de recordar: el sonido recorre un kilómetro en aproximadamente tres segundos. Por eso si ves un relámpago y empiezas a contar, cada tres segundos hasta que oyes el trueno equivalen a un kilómetro de distancia.

→ FÓRMULA

Velocidad del sonido en el aire: $v \approx 20,1 \cdot \sqrt{T}$, donde T es la temperatura absoluta en Kelvin (los grados centígrados más 273). A 20 °C ($T = 293$ K) sale algo más de **344 m/s**. En invierno, con la calle a 0 °C, baja a unos **331 m/s**. La diferencia es pequeña pero real: por eso las orquestas que ensayan en salas frías y luego tocan en salas calientes tienen problemas de afinación con los instrumentos de viento.

En otros medios la velocidad cambia drásticamente. En el agua viaja a unos **1.500 m/s**; en el acero, a unos **5.000 m/s**. Por eso si pegas la oreja a una vía de tren puedes oír un tren acercarse antes de que el sonido te llegue por el aire: el acero conduce las vibraciones mucho más rápido. Lo mismo pasa con los nadadores en una piscina: si meten la cabeza bajo el agua oyen al monitor mucho más lejos de lo que parecería razonable.

§ 3.3

Longitud de onda y sus consecuencias

Si la velocidad de propagación es v y la frecuencia del sonido es f , hay una relación geométrica fundamental: $\lambda = v / f$. Donde λ (lambda) es la **longitud de onda**: la distancia entre dos crestas consecutivas de la onda en el espacio, o lo que es lo mismo, la distancia que recorre la onda en un período. Para un La de 440 Hz en el aire:

→ CÁLCULO

$\lambda = 340 / 440 \approx 0,77$ metros. Es decir, la «huella» espacial de un La es de unos 77 cm. Para frecuencias más graves, las longitudes de onda son mucho mayores. Un Mi grave de tu guitarra a 82 Hz tiene una longitud de onda de unos **4 metros**. Para el bombo de la batería, en torno a los 60 Hz, hablamos de casi **6 metros**.

Esta diferencia de tamaño tiene consecuencias musicales y arquitectónicas muy reales, pero conviene distinguir tres mecanismos físicos distintos que a menudo se confunden:

01

Difracción — los graves rodean obstáculos

Cuando una onda se encuentra un obstáculo de tamaño comparable o menor a su longitud de onda, lo bordea y continúa al otro lado. Cuanto mayor es la longitud de onda, más obstáculos puede rodear. Por eso cuando oyes música desde la habitación de al lado a través de la puerta entreabierta, los graves llegan claros pero los agudos quedan amortiguados: los graves rodean el marco de la puerta sin problema, los agudos no tanto.

02

Transmisión — los graves atraviesan paredes mejor

Una pared cerrada también deja pasar parte del sonido a su través, haciendo vibrar el material. Como las paredes son más rígidas para frecuencias altas que para frecuencias bajas, las graves las hacen vibrar con más facilidad y se transmiten al otro lado. Por eso cuando el vecino pone música a tope tú oyes los golpes del bombo y la línea del bajo pero apenas entiendes la voz: la pared filtra los agudos al transmitir.

03

Absorción selectiva

Los materiales blandos y porosos (espuma, cortinas, tapizados, sofás) absorben sobre todo las frecuencias medias y agudas, pero apenas tocan las graves. Esa es una de las razones por las que un salón con muchos textiles «se come» los agudos de la música pero deja sentir los graves intactos.

Los tres fenómenos —difracción, transmisión y absorción— se dan a la vez en cualquier situación real, y juntos explican el comportamiento característico de los graves: **son los que rodean obstáculos, los que atraviesan paredes y los que escapan menos a la absorción.** Por eso los oyes desde lejos, desde el piso de arriba, desde la calle.

Modos propios de una sala. Si la longitud de onda de una nota es comparable o mayor que las dimensiones de una habitación, la onda no se comporta como en un campo abierto: sufre múltiples reflexiones que se solapan con el sonido directo. En ciertas posiciones se refuerza una frecuencia y en otras se cancela parcialmente. Resultado: los graves no suenan iguales en todos los puntos del salón. A veces el bajo «está» en una esquina y «desaparece» un metro más allá. Por eso los sistemas de cine en casa con subwoofer suelen sonar mal en salones pequeños sin tratamiento acústico.

En la guitarra esto explica por qué las cuerdas graves se sienten más «presentes» en el cuerpo que las agudas: las longitudes de onda largas

hacen vibrar la caja, los muebles y hasta el suelo. Cuando tocas un Mi grave en una habitación, no es el oído quien primero lo nota: **es el pecho**.

§ 3.4

Energía, potencia, intensidad y presión

Para hablar con propiedad de «lo fuerte que suena algo», la física tiene varias magnitudes encadenadas. Conviene distinguirlas:

- **Energía** es la capacidad total de hacer trabajo. Se mide en julios (J). Una nota larga lleva más energía total que una nota corta, aunque suenen igual de fuerte.
- **Potencia** es la energía entregada por unidad de tiempo. Se mide en vatios (W). Es la magnitud que describe a una fuente sonora: una guitarra eléctrica a tope puede emitir potencias del orden de 1 vatio acústico, una orquesta sinfónica completa en su clímax llega a algunos vatios.
- **Intensidad sonora** es la potencia que llega por unidad de superficie. Se mide en vatios por metro cuadrado (W/m^2). Tiene en cuenta que la energía se reparte: cuanto más lejos estés de la fuente, más se diluye sobre una superficie mayor. Si te alejas al doble de distancia, la intensidad cae a la cuarta parte. Esto se llama *ley del cuadrado inverso*, y describe cómo se atenúa el sonido en campo libre.
- **Presión sonora** es la oscilación de presión que la onda produce en el aire al pasar. Se mide en pascales (Pa). Es la magnitud que el oído realmente «siente». Una conversación normal genera presiones del orden de 0,01 Pa; el umbral del dolor está en torno a 20 Pa; la presión atmosférica de fondo, para comparar, es de unos 101.000 Pa. El sonido es una pequeñísima variación rizada por encima de esa presión de fondo enorme.

Las dos magnitudes (intensidad y presión) están relacionadas matemáticamente: la intensidad es proporcional al cuadrado de la presión. En otras palabras, si la presión sonora se dobla, la intensidad se cuadruplica. Esta relación al cuadrado es la razón por la que veremos dos fórmulas distintas para los decibelios.

Una nota importante: todo lo anterior describe el sonido en un **campo libre ideal**, sin reflexiones. En interiores reales hay reflexiones, absorciones y reverberación, y la ley del cuadrado inverso se rompe parcialmente: los puntos lejanos no caen tanto en intensidad como predice la teoría, porque reciben también la energía rebotada del entorno.

§ 3.5

El rango del oído humano



Aquí viene una de las cifras más asombrosas de la psicoacústica.

El rango dinámico del oído. El umbral del oído —la intensidad mínima que un oyente joven y sano detecta a 1.000 Hz— está en torno a **10^{-12} W/m²** (una millonésima de millonésima de vatio por metro cuadrado). El umbral del dolor está en torno a **1 W/m²**. Entre uno y otro hay un factor de **un billón (10^{12})**. Doce órdenes de magnitud en intensidad. Una proeza biológica.

Manejar esos números directamente es incómodo. Decir que una conversación normal está en torno a 10^{-6} W/m² y un avión en 10^0 W/m² no transmite nada al cerebro humano: son escalas demasiado dispares para sentirlas. Por eso la acústica usa otra unidad, mucho más manejable, basada en logaritmos.

Un inciso rápido: logaritmos

Si hace tiempo que no tocas matemáticas, conviene refrescar qué es un logaritmo decimal antes de seguir. Para los números que son potencias de diez, el logaritmo decimal es muy intuitivo: cuenta cuántos ceros tiene el número.

→ LOGARITMOS DECIMALES

$$\log(1) = 0 \cdot \log(10) = 1 \cdot \log(100) = 2 \cdot \log(1.000) = 3 \cdot \log(1.000.000) = 6$$

Para números intermedios el logaritmo da valores con decimales ($\log(2) \approx 0,3$, $\log(50) \approx 1,7$), pero la idea esencial es la misma: **el logaritmo «comprime» multiplicaciones en sumas**. Multiplicar por 10 equivale a sumar 1 al logaritmo; multiplicar por 100 equivale a sumar 2. Esa es la propiedad que vamos a explotar para manejar el rango brutal del oído.

El decibelio

El **decibelio (dB)** es una unidad relativa: no mide cantidades absolutas, sino cuántas veces más grande es algo respecto a una referencia. Hay dos fórmulas según qué magnitud estemos midiendo:

→ LAS DOS FÓRMULAS DEL DECIBELIO

Para intensidades: Nivel (dB) = $10 \cdot \log_{10} (I / I_0)$

Para presiones sonoras: Nivel (dB) = $20 \cdot \log_{10} (p / p_0)$

¿Por qué dos fórmulas? Porque la intensidad es proporcional al cuadrado de la presión, y al pasar la presión por el logaritmo ese cuadrado se convierte en un factor 2. **Las dos fórmulas dan el mismo número de decibelios para el mismo sonido:** están construidas para ser coherentes entre sí. Las referencias estándar son $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ y $p_0 = 20 \text{ } \mu\text{Pa}$, ambas correspondientes al umbral de audición a 1.000 Hz.

Cuando un sonómetro o un manual técnico dice «85 dB SPL», se refiere a este nivel de presión sonora: SPL son las siglas de *Sound Pressure Level* en inglés. En contextos musicales y de protección auditiva (como los avisos⁸ de NIOSH del Tema 1), los dB que se manejan son siempre dB SPL salvo que se indique otra cosa.

Regla mental: una multiplicación de intensidad por 10 corresponde a sumar **10 dB**. Una multiplicación por 100, 20 dB. Una multiplicación por mil, 30 dB. La escala es logarítmica: cada 10 dB que subes, el sonido es físicamente diez veces más intenso. En cuanto a la sensación, una regla aproximada útil: **cada incremento de unos 10 dB hace que un sonido nos parezca aproximadamente el doble de fuerte.**

Conviene fijar algunos niveles cotidianos como referencia:

NIVEL	SITUACIÓN
0 dB	Umbral de audición. Lo más bajo que puede oír un oído joven.
20 dB	Biblioteca silenciosa, susurro suave.
40 dB	Zumbido de fondo de un piso tranquilo, conversación lejana.
60 dB	Conversación normal en un salón.
70 dB	Calle con tráfico ligero.

85 dB	Límite de seguridad para exposición prolongada (NIOSH). Por encima, el oído sufre con el tiempo.
90 dB	Motocicleta pasando a tu lado.
100 dB	Martillo neumático, banda de rock en local pequeño sin protección.
110 dB	Discoteca, concierto en zona cercana al escenario.
120 dB	Umbral del dolor. Avión despegando muy cerca.
140 dB	Lesión auditiva inmediata. Explosión.

Una nota sobre la «A» de los 85 dB(A) que mencionamos en el Tema 1. El oído humano no es igualmente sensible a todas las frecuencias, de modo que un sonido de 85 dB en frecuencias graves no resulta tan dañino como 85 dB en la zona donde el oído es más sensible. Por eso, para evaluar el riesgo auditivo de un ruido, los sonómetros aplican una *ponderación A* que penaliza los graves y agudos extremos en función de cómo el oído los oye. El resultado se mide en **dB(A)**, y es la unidad estándar para temas de seguridad auditiva en el trabajo.

Aviso especialmente para músicos: un guitarrista en un ensayo de banda con batería sin amplificación está alrededor de los **100-110 dB(A)** durante las horas que dura el ensayo. Sin protección auditiva, eso es exposición acumulada que se va a hacer notar con los años. No es alarmismo, es matemática. La sordera profesional de músicos no es leyenda urbana.

Sumar sonidos no es sumar dB. Si dos guitarras tocan a 80 dB cada una de manera incoherente (sin sincronización exacta de fase, lo habitual en música real), juntas no dan 160 dB ni $80+80$, sino aproximadamente **83 dB**. Doblar el número de fuentes incoherentes idénticas suma solo 3 dB. Un coro de cuarenta voces no es cuarenta veces más sonoro que una sola: son aproximadamente 16 dB más, lo cual perceptualmente es solo unas tres o cuatro veces más fuerte. Por eso un coro grande no aplasta a un solista bien colocado.

§ 3.8

Sonoridad: lo que oímos

Hasta aquí la física. Ahora la psicoacústica. La **sonoridad** —cómo de fuerte nos parece un sonido— no coincide exactamente con la intensidad o presión medida en dB. Hay tres razones principales para esa discrepancia:

01 El oído no es igualmente sensible a todas las frecuencias

Es muy sensible en torno al rango de la voz humana (entre 1.000 y 4.000 Hz) y mucho menos sensible en los extremos graves y agudos. Un tono puro de 50 Hz a la misma intensidad física que uno de 2.000 Hz nos parecerá mucho más débil.

02 La sonoridad depende del nivel

La curva de sensibilidad del oído cambia con el volumen. A volúmenes bajos perdemos sensibilidad sobre todo en los graves; a volúmenes altos la curva se aplana. Esto tiene un nombre y un efecto comercial famoso: el botón *loudness* de los amplificadores antiguos compensaba esa pérdida de graves a bajo volumen, realzándolos artificialmente.

03 La sonoridad depende de la duración y del contexto

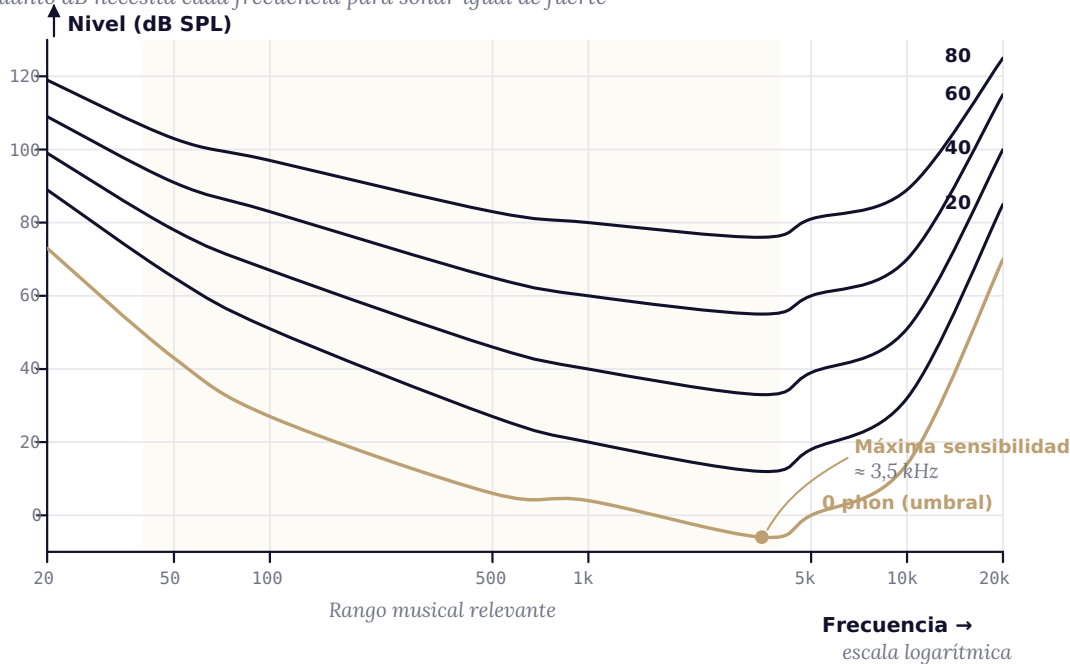
Notas muy cortas (menos de unos 200 ms) suenan más débiles que notas largas a la misma intensidad. Y un sonido aislado en silencio nos parece más fuerte que el mismo sonido sumergido en un ambiente ruidoso.

Para describir todo esto, los psicoacústicos construyeron las **curvas de igual sonoridad**, también conocidas como **curvas isofónicas** o **curvas de Fletcher-Munson**, en honor a los dos investigadores que las publicaron en 1933.

Veámoslo gráficamente:

Curvas de igual sonoridad

Cuánto dB necesita cada frecuencia para sonar igual de fuerte



► DIAGRAMA 1 • CURVAS DE IGUAL SONORIDAD

Cada curva representa los puntos donde un oyente típico percibe la misma sonoridad. Por ejemplo, la curva de 40 fón pasa por todos los pares

(frecuencia, intensidad) que nos parecen igual de fuertes que un tono de 1.000 Hz a 40 dB. La forma de las curvas tiene tres rasgos importantes:

- La **sensibilidad máxima** está en torno a 3.000-4.000 Hz, justo donde nuestras consonantes nos resultan más informativas. El oído humano resulta especialmente sensible justo en el rango del habla — un detalle nada casual, dado el papel que juega el lenguaje en nuestra especie.
- En los **graves** la sensibilidad cae mucho. A 60 Hz necesitas una intensidad mucho mayor para que te suene igual de fuerte que un sonido de 1.000 Hz. Por eso los graves se «pierden» con el volumen bajo, y por eso los altavoces pequeños del móvil parecen «no tener bajos»: no es solo cosa de los altavoces, es también de tu oído.
- A **volúmenes altos las curvas se aplanan**. La curva de 100 fón es mucho más uniforme que la de 20 fón. Consecuencia musical: una mezcla hecha en estudio a 90 dB suena bien en estudio, pero al escucharla en casa a 50 dB pierde brillo y graves. Los productores tienen que tener en cuenta el nivel típico de escucha del oyente final.

→ UNIDADES DE SONORIDAD

Fón. Mide nivel de sonoridad: un sonido tiene N fón si suena igual de fuerte que un tono de 1.000 Hz a N dB SPL. Hace comparable la sonoridad de cualquier sonido con una referencia universal.

Son. Unidad más experiencial: $1 \text{ son} \approx 40 \text{ fón}$, y la escala se construye de modo que **doblar los son significa que el sonido nos parece subjetivamente el doble de fuerte**.

El paralelismo con la altura es directo: el dB es a la sonoridad lo que el hercio es a la altura, mientras que el son es a la sonoridad lo que la nota musical es a la altura. Una es magnitud física, la otra perceptiva.

Hay un fenómeno relacionado con la sonoridad que merece sección propia: el **enmascaramiento**. Es lo que pasa cuando un sonido fuerte «tapa» a otro y el oído deja de percibirlo, aunque ambos estén físicamente presentes.

El caso más cotidiano lo anticipamos en el Tema 1: subes el volumen del coche al meterte en la M-30 porque «no se oye», aunque no has tocado el dial de la música. Lo que ha pasado es que el ruido de la carretera (frecuencias graves de motor y neumáticos) ha enmascarado las frecuencias bajas de la música, y necesitas más intensidad para que vuelva a destacar por encima del ruido de fondo.

Físicamente, el enmascaramiento es ante todo un fenómeno mecánico de la membrana basilar. Cada sonido produce su zona activa en la membrana, y esa zona —recordemos del Tema 2 que abarca una región, no un punto— se solapa con la de cualquier otro sonido cercano en frecuencia. Si un sonido es mucho más intenso que otro y sus zonas de resonancia se solapan, el sonido más débil queda enterrado: simplemente no produce activación distinguible en las células ciliadas. **La banda crítica que vimos en el Tema 2 reaparece aquí:** el enmascaramiento es máximo cuando los dos sonidos caen dentro de la misma banda crítica.

El enmascaramiento tiene asimetrías interesantes:

- Los **graves enmascaran a los agudos mejor que al revés**. Un bombo fuerte tapa los platillos. Pero un platillo fuerte no tapa el bombo. Por eso en una mezcla mal hecha lo primero que se «come» todo es la línea del bajo y el bombo: ahogan al resto si no están bien controlados.
- El enmascaramiento ocurre también **en el tiempo**, no solo en frecuencia. Un sonido fuerte «tapa» sonidos suaves que llegan justo después suyo (durante varias decenas de milisegundos), e incluso —

contraintuitivamente— sonidos suaves que han llegado justo antes. Es lo que llaman enmascaramiento temporal hacia delante y hacia atrás.

Cómo funcionan los MP3. Los formatos de audio comprimido (MP3, AAC, Opus) aprovechan exactamente el enmascaramiento. El algoritmo analiza la señal, identifica qué frecuencias están enmascaradas (es decir, cuáles no las oírías porque hay otras tapándolas) y las descarta. El archivo resultante pesa una décima parte del original. A bitrates altos (256 kbps o más) la mayoría de oyentes no distinguen el comprimido del original; a bitrates bajos aparecen artefactos audibles. Es uno de los grandes triunfos de la ingeniería del audio aplicada a la fisiología del oído: **aprovecha lo que el oído ya descartaba por sí mismo.**

Por qué te cuesta entender a alguien en una discoteca. La música cubre las frecuencias del habla y enmascara las consonantes, que son lo que da inteligibilidad al lenguaje. Por eso la gente se acerca a tu oído (reduce la distancia, aumenta la intensidad de la voz cerca del tímpano) y exagera las consonantes. No es por gritar más alto: es por sortear el enmascaramiento.

§ 3.10

Reverberación: una mención breve

Hasta aquí hemos hablado del sonido como si llegara directamente de la fuente al oyente, pero en la realidad hay otra capa importante: las reflexiones del entorno. Cuando un sonido se emite en una sala, no llega al oyente solo el sonido directo; llegan también ondas que han rebotado en las paredes, el techo, los muebles. Esas ondas reflejadas tardan más en llegar y van decayendo en intensidad, formando una cola sonora característica que llamamos **reverberación**.

→ TIEMPO DE REVERBERACIÓN

Se mide habitualmente como el tiempo que tarda el sonido en caer **60 dB** después de haberse callado la fuente original. En una **catedral grande** puede ser de 6 o 7 segundos; en un **estudio de grabación** bien tratado, de menos de medio segundo; en una **habitación normal**, en torno a un segundo.

La reverberación afecta a la sonoridad percibida (los reflejos refuerzan el sonido directo durante el primer instante) y al carácter del espacio: una catedral, una sala de conciertos y un salón normal tienen reverberaciones tan distintas que reconocemos en qué tipo de lugar estamos solo por escuchar una palmada. Pero la reverberación es protagonista del Tema 4, donde hablaremos de los instrumentos y de la acústica de salas. Aquí quédate con la idea: **la sonoridad que tú percibes nunca es solo la del sonido directo, lleva siempre un fondo de reflejos.**

Recap

Lo que has visto en este tema

Si tuvieras que quedarte con seis ideas de este tema, serían estas:

01

Una onda sonora propaga **energía, no materia**, pero necesita un medio material para hacerlo (en el vacío no hay sonido). Las moléculas de aire vibran en su sitio; lo que viaja es el patrón de compresiones y expansiones.

02

La velocidad del sonido en el aire es de unos **340 m/s** a temperatura ambiente. La longitud de onda ($\lambda = v/f$) determina cómo el sonido interactúa con los obstáculos a través de tres mecanismos: **difracción** (los graves rodean obstáculos), **transmisión** (los graves atraviesan paredes con más facilidad) y **absorción selectiva** (los materiales blandos absorben más los agudos que los graves).

03

Las magnitudes físicas relevantes son la **potencia** (W), la **intensidad** (W/m^2) y la **presión sonora** (Pa). El oído responde sobre todo a la presión. El rango de intensidades audibles cubre **doce órdenes de magnitud**. Por eso usamos el **decibelio**: una escala logarítmica donde cada 10 dB equivale a multiplicar la intensidad por 10 y se percibe aproximadamente como un sonido el doble de fuerte. La convención estándar en acústica musical es **dB SPL**.

04

La **sonoridad subjetiva no coincide con la intensidad física**. El oído pondera las frecuencias de manera no uniforme (más sensible en torno a 3-4 kHz, menos en los extremos) y la curva de ponderación cambia con el nivel. Las **curvas de Fletcher-Munson** resumen este comportamiento; el **fón** y el **son** son las unidades específicas para la sonoridad subjetiva.

05

Por encima de **85 dB(A) prolongados**, el oído sufre. Para músicos esto es relevante: ensayos largos, conciertos sin protección y auriculares a tope se acumulan en daño irreversible.

06

El **enmascaramiento** es el fenómeno por el que un sonido fuerte tapa a otro más débil. Su origen es principalmente mecánico, en la membrana basilar (relacionado con la banda crítica del Tema 2). Los graves enmascaran a los agudos más que al revés, y el enmascaramiento ocurre tanto en frecuencia como en tiempo. Es la base de los formatos comprimidos como MP3 y la razón física de por qué subes el volumen del coche en una autopista.

Práctica

Para probar en casa

Tres experimentos cortos para aterrizar conceptos:

01 **Difracción y graves**

Pon una canción con bajo prominente en un altavoz de la habitación, sal al pasillo y deja la puerta entreabierta. Escucha desde el pasillo: los graves del bombo y el bajo llegan razonablemente claros mientras que la voz y los platillos suenan amortiguadas. Después abre del todo la puerta: los agudos vuelven a entrar con claridad. Estás comprobando la difracción: las ondas largas (graves) rodean el marco de la puerta sin esfuerzo, las cortas (agudos) no. Si después haces el mismo ejercicio con la puerta cerrada, oirás la combinación de difracción (por las rendijas) y transmisión (a través de la puerta misma).

02 **Loudness y curvas Fletcher-Munson**

Pon una canción que conozcas bien a un volumen bastante alto durante un par de minutos. Después bájala a un volumen muy bajo (apenas audible). Notarás dos cosas: por un lado, la mezcla «se desequilibra» — los graves y los agudos parecen apagarse antes que los medios, así que la canción suena «más plana», más concentrada en las frecuencias de la voz. Por otro, si tu equipo tiene un botón «loudness», «bass boost» o similar, al activarlo a bajo volumen la mezcla recupera el balance. No es magia: es el equipo compensando la curva isofónica de tu oído.

03 **Enmascaramiento práctico**

Pon música de fondo en un ordenador a volumen moderado. Llama a alguien por teléfono o videollamada y pídele que te lea un par de frases. Notarás que cuesta más entender lo que te dicen que con la música apagada — sobre todo las consonantes, que son las que más cargan la inteligibilidad. Estás midiendo cuánto enmascara la música a la voz hablada en las frecuencias críticas.

Glosario

Glosario rápido del tema

Términos técnicos introducidos en este tema, en una línea cada uno:

TÉRMINO	DEFINICIÓN
• Onda longitudinal	Onda en la que las partículas del medio oscilan en la misma dirección de propagación (caso del sonido en el aire).
• Onda transversal	Onda en la que las partículas oscilan en dirección perpendicular a la propagación (caso de ondas en una cuerda tensa).
• Velocidad del sonido	Distancia que recorre una onda sonora por unidad de tiempo (~340 m/s en aire a temperatura ambiente).
• Longitud de onda (λ)	Distancia entre dos crestas consecutivas. Se calcula como $\lambda = v/f$.
• Difracción	Capacidad de una onda de rodear obstáculos. Más marcada cuanto mayor es la longitud de onda respecto al obstáculo.
• Transmisión	Paso de la energía sonora a través de un material (pared, puerta) que vibra al recibirla.
• Absorción	Pérdida de energía sonora cuando una onda es «tragada» por un material poroso o blando, mayor en frecuencias medias y agudas.
• Modos propios	Frecuencias en las que una sala «resuena» debido a sus dimensiones, generando refuerzos y cancelaciones desiguales.
• Energía	Capacidad de hacer trabajo (julios, J).
• Potencia	Energía entregada por unidad de tiempo (vatios, W).

● Intensidad sonora	Potencia recibida por unidad de superficie (W/m^2).
● Presión sonora	Oscilación de presión en el aire al pasar la onda (pascales, Pa). Magnitud que el tímpano detecta directamente.
● Ley del cuadrado inverso	La intensidad cae con el cuadrado de la distancia a la fuente, en campo libre.
● Umbral de audición	Intensidad mínima detectable. Por convenio, 10^{-12} W/m^2 o $20 \text{ } \mu\text{Pa}$ a 1.000 Hz .
● Umbral del dolor	Intensidad a partir de la cual el sonido produce dolor físico ($\sim 1 \text{ W/m}^2$).
● Decibelio (dB)	Unidad logarítmica relativa a una referencia. Intensidades: $10 \cdot \log(I/I_0)$; presiones: $20 \cdot \log(p/p_0)$.
● dB SPL	Nivel de presión sonora referenciado a $20 \text{ } \mu\text{Pa}$. Convención estándar en acústica musical.
● dB(A)	Decibelios medidos con ponderación A, que penaliza graves y agudos extremos. Convención estándar en seguridad auditiva.
● Logaritmo decimal	Operación que comprime multiplicaciones en sumas. $\log(10)=1$, $\log(100)=2$, $\log(1000)=3$.
● Sonoridad	Sensación subjetiva de cuán fuerte suena un sonido. No coincide exactamente con la intensidad física.

• Curvas isofónicas / Fletcher-Munson	Gráficas que muestran qué intensidades a qué frecuencias producen la misma sensación de sonoridad.
• Fón	Unidad de nivel de sonoridad. Un sonido tiene N fón si se percibe igual de fuerte que un tono de 1.000 Hz a N dB SPL.
• Son	Unidad de sonoridad subjetiva. Doblar los son significa que el sonido se percibe el doble de fuerte. 1 son $\approx$ 40 fón.
• Loudness (efecto)	Pérdida relativa de graves y agudos a volúmenes bajos, debida a la forma de las curvas isofónicas.
• Enmascaramiento	Fenómeno por el que un sonido fuerte impide percibir otro más débil de frecuencia cercana, principalmente por solapamiento en la membrana basilar.
• Enmascaramiento temporal	Enmascaramiento que actúa también sobre sonidos que llegan justo antes o justo después del sonido enmascarante.
• Reverberación	Persistencia del sonido en un espacio tras callar la fuente, debida a las reflexiones del entorno.
• Tiempo de reverberación	Tiempo que tarda el sonido en caer 60 dB tras detenerse la fuente.

