



De la cuerda a la nota

Cómo una vibración se convierte en algo que tu cerebro reconoce como una nota.

¿Te animaste con el experimento de batidos al final del tema anterior? Si lo hiciste, oíste por primera vez los batidos: esa pulsación que sube y baja cuando dos cuerdas están casi pero no exactamente al mismo tono. En este tema vamos a entender qué pasa físicamente cuando ocurre eso, y de paso vamos a desentrañar tres cosas: por qué tu cerebro percibe sonidos como notas, qué pasa cuando dos notas se rozan demasiado, y por qué hay zonas del mástil donde los acordes «se ensucian» y dejan de sonar limpios.

Cambio de marcha. El Tema 1 era principalmente cualitativo. En este vamos a empezar a meternos con números y proporciones — sin matemáticas duras, pero sí con cierta cantidad de cifras concretas, porque la física del sonido se entiende mejor cuando uno se atreve a contar.

Para llegar ahí tenemos que empezar por algo aparentemente sencillo: el movimiento que vibra. Una cuerda que vibra, una columna de aire que vibra, los pliegues vocales que vibran. Comparten una característica que vamos a estudiar a fondo: son **movimientos periódicos**, se repiten en el tiempo siguiendo un patrón. No todo sonido del mundo es periódico: el

chasquido de un dedo, una consonante explosiva como «p» o «t», el roce de la púa al iniciar la nota... son ruidos no periódicos. Pero la mayor parte de las notas musicales sí lo son al menos durante su parte estable, así que el modelo nos sirve.

§ 2.1

Vibración y movimiento periódico

Cuando una cuerda de tu guitarra vibra, los puntos de la cuerda se mueven hacia un lado y hacia el otro. Si lo hacen siguiendo un patrón que se repite, decimos que es un movimiento periódico. Para que un movimiento sea periódico estrictamente tiene que cumplir dos cosas: vuelve a su posición de partida y tarda siempre el mismo tiempo en hacerlo. El tiempo que tarda en completar un patrón y volver a empezar se llama **período**. El patrón básico que se repite es un **ciclo**.

Si grabas la vibración de una cuerda con un osciloscopio (un aparato que dibuja en una pantalla cómo varía algo en el tiempo), verás un dibujo ondulado que se repite. Si la nota es un La de 440 Hz, el patrón se repite 440 veces por segundo, así que el período dura $1/440$ de segundo: aproximadamente 2,3 milésimas de segundo. Demasiado rápido para verlo a simple vista, por eso necesitamos un osciloscopio en lugar del lápiz que usaríamos para registrar movimientos lentos.

§ 2.2

Movimiento armónico simple

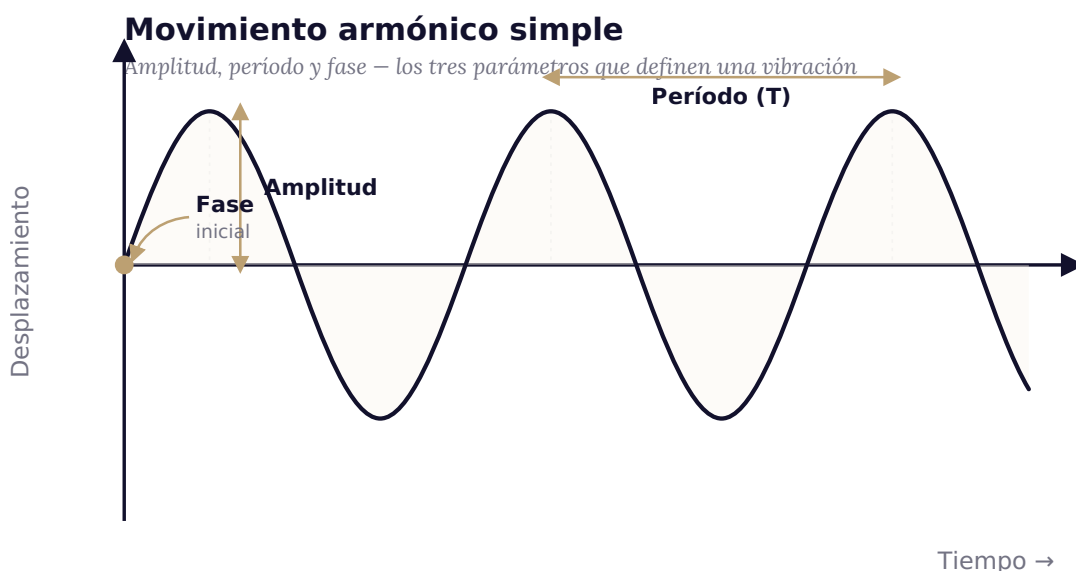
Hay un movimiento periódico que es el más sencillo de todos y que aparece por todas partes: el **movimiento armónico simple**, o M.A.S. para abreviar. Lo encuentras en un péndulo balanceándose, en un muelle al estirarse y volver, en cualquier proyección de un movimiento circular sobre una línea. Matemáticamente se describe con una función sinusoi-

dal: la onda perfectamente lisa que probablemente has visto en cualquier dibujo del sonido.

Tres parámetros lo definen completamente:

- La **amplitud**: la distancia máxima a la que se aleja del punto de equilibrio.
- El **período**: el tiempo que tarda en hacer un ciclo completo.
- La **fase**: en qué punto del ciclo está cuando empezamos a medir.

Veámoslo gráficamente:



► DIAGRAMA 1 • MOVIMIENTO ARMÓNICO SIMPLE

Para la música, los dos parámetros que más nos importan son la amplitud (que se relaciona con la sonoridad) y el período (con la altura). La fase importa cuando dos sonidos se superponen — lo veremos en un momento.

Una idea importantísima que vamos a usar muchas veces: cualquier movimiento periódico, por complicado que sea, se puede descomponer en una suma de movimientos armónicos simples. Esto se llama *teorema de Fourier* y es la razón por la que más adelante podremos hablar de «armónicos» como ladrillos básicos del sonido. Lo desarrollaremos en el Tema 4.

§ 2.3

Del período a la frecuencia

En música no usamos directamente el período, usamos su inverso, la **frecuencia**:

→ DEFINICIÓN

Frecuencia (f). Número de ciclos que se completan en un segundo. Es el inverso del período: $f = 1 / \text{período}$. La unidad es el **hercio (Hz)**: ciclos por segundo. Una cuerda al aire en un La estándar vibra a 440 Hz. La sexta cuerda al aire de tu guitarra (Mi grave, E2) vibra a unos 82 Hz; la primera al aire (Mi agudo, E4, dos octavas más arriba) a unos 330 Hz.

¿Por qué preferimos la frecuencia al período? Porque la sensación de altura crece con la frecuencia: cuanto mayor es la frecuencia, más agudo nos parece el sonido. Es más natural decir «el agudo está en 5.000 Hz» que «el agudo está en 0,0002 segundos por ciclo».

Rango musical real. El oído cubre de 20 Hz a 20 kHz, pero lo que de verdad usa la música cae en una franja mucho más estrecha. La nota más grave del piano (La0) está alrededor de **27,5 Hz**; la más aguda (Do8), alrededor de **4.186 Hz**. Por enci-

ma de 4 kHz lo que hay son los armónicos superiores de los instrumentos, no las notas que tocas con los dedos.

§ 2.4

Tonos puros

Si en lugar de tocar una nota con tu guitarra usas un sintetizador (o un generador de tonos online) y le pides una **senoide pura** —un sonido que sigue exactamente un movimiento armónico simple, sin nada más—, te llevas una sorpresa: suena pobre, casi artificial, como ya vimos en el Tema 1 con el ejemplo del pitido del microondas. El oído está acostumbrado a sonidos con armónicos; un tono puro suena raro precisamente porque le falta lo que el oído espera encontrar.

A pesar de eso, en este tema vamos a estudiar tonos puros, no porque sean comunes, sino porque son **los ladrillos con los que se construye todo lo demás**. Si entendemos cómo el oído percibe un tono puro, entenderemos cómo percibe los compuestos.

§ 2.5

Cómo el oído percibe la altura

Recordemos del Tema 1 cómo funciona el oído por dentro: la vibración llega al tímpano, los huesecillos la transmiten a la cóclea, dentro de la cóclea está la membrana basilar, y allí cada frecuencia activa una zona distinta. A esa organización la llamábamos *tonotopía*. Ahora vamos a entrar al detalle.

La membrana basilar es una estructura larga y estrecha (unos 35 mm de largo) que cambia su grosor y rigidez a lo largo de toda su longitud. Cerca de la entrada de la cóclea (la **base**, donde está la ventana oval) es estrecha y rígida; cerca del extremo opuesto (el **ápex**) es ancha y blanda.

Cuando llega una vibración de una frecuencia determinada, la membrana entera se mueve, pero hay una zona concreta donde la oscilación alcanza su máximo: la zona de resonancia para esa frecuencia. Las frecuencias agudas producen su máximo cerca de la base, las graves cerca del ápex.

Es decir: cada frecuencia que entra en el oído se traduce en un punto activo de la membrana basilar. La altura percibida la «lee» en buena parte de ese lugar donde la membrana está vibrando con más fuerza. Por eso decimos que la cóclea transforma un patrón en el tiempo (vibración del tímpano) en un patrón en el espacio (zona activa de la membrana), y a su vez ese patrón espacial en señales nerviosas a través de las células ciliadas.

Codificación temporal: el segundo mecanismo. Este modelo de «decodificación por lugar» no es la única manera que tiene el oído de identificar la frecuencia. Existe también una codificación temporal: las neuronas auditivas pueden disparar sincronizadamente con cada ciclo de la onda hasta unos **4-5 kHz**, y el cerebro usa también ese ritmo de disparo para reconocer la altura. En la práctica los dos mecanismos cooperan.

Aquí viene un dato sorprendente y robusto. Cada vez que doblamos la frecuencia, la zona activa se desplaza **aproximadamente la misma distancia** a lo largo de la membrana basilar: en torno a 3,5 mm en los modelos clásicos. No importa si la frecuencia inicial era 100 Hz o 1.000 Hz: el desplazamiento al doblarla es similar. **Lo que cuenta para la membrana basilar no es la diferencia entre dos frecuencias, sino la proporción entre ellas.**

Esto explica una cosa que llevamos siglos haciendo en música sin entender bien por qué funciona: la octava (que es exactamente doblar la frecuencia: $\times 2$) suena igual de «octava» tanto si vas de un La grave a otro un poco menos grave como si vas del La más agudo del piano al siguiente. Físicamente son saltos de frecuencia muy distintos (220 $\rightarrow$ 440 Hz

frente a 1.760 → 3.520 Hz), pero el oído los procesa como el mismo intervalo porque cubren la misma distancia en la membrana basilar.

La percepción de la altura es logarítmica. Cada octava es una multiplicación por dos, y el semitono temperado moderno corresponde a una multiplicación por la raíz duodécima de 2 ($\approx 1,0595$). No importa de qué nota partas: subir un semitono multiplica la frecuencia siempre por el mismo factor. Por eso en una guitarra los trastes están más juntos cuanto más subes por el mástil: representan el mismo salto musical pero en distancia física decreciente, porque el «cuerpo» de la cuerda que vibra se va acortando proporcionalmente.

También explica otra cosa: el rango de frecuencias musicalmente más relevante (de 20 a unos 4.000 Hz) ocupa más de dos tercios de la membrana basilar, mientras que el rango de 4 kHz a 16 kHz solo ocupa un tercio.

La música pasa donde la cóclea tiene más resolución.

§ 2.6

La altura es también una construcción cultural

Hasta aquí hemos descrito la altura como un fenómeno físico y fisiológico bastante limpio: una frecuencia entra, una zona de la membrana basilar se activa, el cerebro lee. Pero hay un detalle que conviene introducir ya, porque sin él el modelo se queda incompleto: cómo el cerebro CATEGORIZA esas alturas en notas concretas no es solo cuestión de fisiología. Es también cuestión de cultura y de aprendizaje.

El caso más espectacular es el del **oído absoluto**. Recuerda lo que dijimos en el Tema 1: el oído absoluto es la capacidad de identificar la altura concreta de una nota sin ninguna referencia externa. Cuando suena un La en mitad de una canción y alguien puede decir «ese es un La» sin tener delante un instrumento de referencia, es oído absoluto. Mozart lo tenía.

La gran mayoría de los músicos profesionales no, y aun así viven y trabajan perfectamente sin él.

Durante mucho tiempo se pensó que el oído absoluto era una cuestión de genética: nacías con él o no. Era una marca de talento innato. Pero la psicoacústica estadounidense **Diana Deutsch** llevó esa hipótesis al banco de pruebas a principios de los años 2000 con una intuición muy interesante: si el oído absoluto se desarrolla cuando el cerebro infantil aprende a etiquetar alturas como categorías estables, debería ser más frecuente entre personas que crecen hablando una **lengua tonal**.

Ese tipo de lenguas existen y se llaman lenguas tonales. El mandarín es el ejemplo más famoso: en mandarín, una misma sílaba (digamos «ma») significa cosas distintas según el contorno de altura con que se pronuncia. «Ma» con tono alto y plano significa «madre». «Ma» con tono ascendente significa «cáñamo». «Ma» con tono descendente y luego ascendente significa «caballo». «Ma» con tono descendente brusco significa «regañar» o «insultar». Cuatro significados, una misma sílaba, distinguidos por el contorno de altura. El cerebro de un bebé que crece oyendo mandarín como lengua materna se entrena desde muy temprano a procesar la altura como dato semántico fundamental. Otras lenguas tonales son el vietnamita, el cantonés, el thai o el yoruba. Y aquí está la idea importante: un hablante nativo de mandarín, al usar todos los días esos cuatro contornos durante años de su infancia, está literalmente entrenando la misma maquinaria perceptiva que luego usará para distinguir un La de un Si.

El resultado del estudio de Deutsch fue contundente. Entre los estudiantes de conservatorio hablantes nativos de mandarín, la tasa de oído absoluto rondaba el **60-90%** según la edad de inicio en la música. Entre los estudiantes angloparlantes con formación musical equivalente, esa tasa caía a entre un **4 y un 14%**. Una diferencia enorme, de varias veces, que además crecía cuanto más tarde empezaba la formación musical.

La explicación más aceptada es que el cerebro infantil expuesto a una lengua tonal desarrolla espontáneamente categorías estables de altura

como parte del aprendizaje lingüístico, y esa codificación se reutiliza después para la música.

Léelo despacio. Lo que está diciendo este dato es que la altura, que parecía una propiedad neutra del sonido (una zona activa de la basilar), es también una construcción que tu cerebro aprende según el entorno cultural y lingüístico en el que creces. La maquinaria perceptiva básica es universal, sí; pero CÓMO esa maquinaria etiqueta y clasifica lo que recibe depende de la experiencia. Es un caso brutal de plasticidad cerebral —de la que hablábamos al final del Tema 1— aplicada específicamente a la percepción musical.

Y refuerza una idea que va a recorrer todo el libro: la música no es solo física, es física filtrada por un cerebro concreto, formado por una cultura concreta. En los siguientes apartados vamos a seguir mirando la altura desde el ángulo más físico (banda crítica, sonidos resultantes, fundamental ausente), pero conviene tener el dato de Deutsch en la cabeza como recordatorio de que ese ángulo es solo una mitad de la historia.

§ 2.7

DAP de frecuencia

Con esta advertencia cultural en mente, volvamos ahora al detalle fino de la percepción: no solo importa qué frecuencia suena, sino cuánto tiene que cambiar para que notes que ha cambiado.

Ya vimos en el Tema 1 el concepto de **diferencia apenas perceptible (DAP)**: el cambio mínimo en una magnitud que el oído puede detectar. Para la frecuencia hay una DAP concreta, y depende de varios factores: la propia frecuencia (en graves cuesta más percibir un cambio que en agudos), la intensidad del sonido, la duración (notas muy cortas son más difíciles de «etiquetar») y si el cambio es repentino o gradual.

A frecuencias bajas necesitamos un cambio porcentual mayor para notar diferencia. Como anécdota histórica: el psicofísico Stevens intentó en

1937 construir una escala musical donde cada nota estuviera separada de la siguiente por una DAP. No funcionó; las culturas musicales del mundo prefieren proporciones, no DAPs.

§ 2.8

Superposición de tonos puros

Hasta aquí hemos visto tonos puros aislados. En la música real casi siempre suenan varias frecuencias a la vez: dos notas de un acorde, dos voces, una orquesta entera. ¿Qué pasa cuando dos tonos puros llegan al oído al mismo tiempo?

La respuesta corta es que se **superponen linealmente**: el tímpano recibe la suma de las dos vibraciones. Físicamente es muy directo. Lo interesante es lo que el oído hace después con esa suma. Distinguimos tres casos básicos:

01

Misma frecuencia, misma fase, distinta amplitud

Resultado: una vibración con la misma frecuencia y la suma de las amplitudes. Suena más fuerte pero la altura no cambia. Si dos bajistas tocan exactamente la misma nota al unísono y en sincronía total, oyes la misma nota más fuerte.

02

Misma frecuencia, distinta fase

Si las dos ondas están desfasadas, el resultado es algo más sutil. En un caso extremo (180 grados de desfase), las dos ondas se cancelan: una empuja el aire hacia delante mientras la otra lo empuja hacia atrás, y el resultado es silencio. Es el principio en el que se basan los auriculares con cancelación de ruido: el aparato detecta el sonido externo, le envía a tu oído una onda en oposición de fase, y el ruido del avión o del metro desaparece como por arte de magia.

Distintas frecuencias

Aquí la cosa se pone interesante, porque el resultado depende de cuánto se diferencian las dos frecuencias. Vamos a verlo despacio en los apartados siguientes (batidos y banda crítica).

Batidos

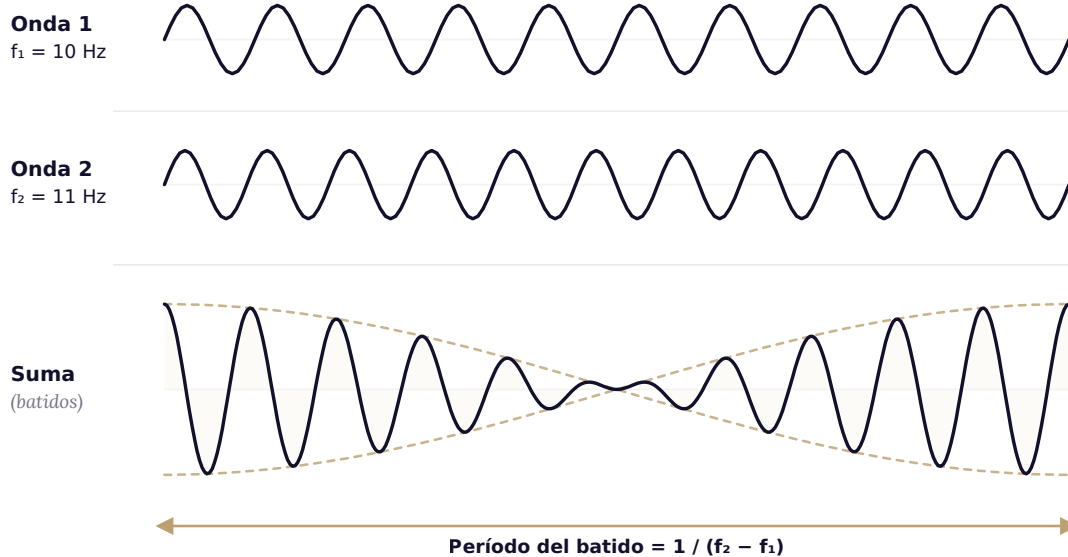
Imagina dos cuerdas de tu guitarra que deberían dar la misma nota pero una está ligeramente desafinada respecto a la otra. Por ejemplo, la sexta cuerda pisada en el quinto traste y la quinta cuerda al aire, que deberían dar las dos un La (110 Hz). Si están bien afinadas suenan al unísono. Si no, oyes algo característico: el sonido total parece tener una sonoridad que sube y baja rítmicamente, como un wah-wah lento. Eso son los **batidos**.

¿Por qué pasa esto? Porque cuando dos vibraciones de frecuencias parecidas pero no iguales se superponen, alternan momentos en que se refuerzan (las crestas coinciden, el sonido suena más fuerte) con momentos en que se cancelan parcialmente (las crestas de una caen sobre los valles de la otra, el sonido se debilita). Matemáticamente, esa suma se puede describir como una vibración cuya frecuencia es el promedio entre las dos originales, pero con la amplitud variando lentamente al ritmo de la diferencia entre ellas. En la jerga de producción de audio, esto es una *modulación de amplitud*: una onda «rápida» cuyo volumen sube y baja al ritmo de una onda «lenta». Esa segunda capa lenta es lo que oyes como wah-wah. El oído sigue recibiendo dos frecuencias físicamente distintas, pero las percibe como una sola que pulsa.

Veámoslo gráficamente:

Batidos

Cuando dos frecuencias cercanas se suman, el resultado pulsa



► DIAGRAMA 2 · BATIDOS

La frecuencia con la que sube y baja el volumen es **exactamente la diferencia** entre las dos frecuencias originales. Si una cuerda da 110 Hz y la otra 112 Hz, oirás dos batidos por segundo. Si ajustas la cuerda más cerca y se queda en 110,5 Hz, los batidos se vuelven más lentos: medio batido por segundo. Cuando los batidos desaparecen del todo, las dos frecuencias coinciden exactamente.

El truco de los guitarristas finos. Los batidos son la herramienta clásica para afinar a oído, mucho más precisa que la pura intuición auditiva: incluso si tu oído no llega a distinguir 110 de 110,5 Hz como notas distintas, sí distingue claramente «hay batidos» de «no los hay». Por eso un guitarrista experto puede afinar sin afinador electrónico con una precisión sorprendente.

Banda crítica y el tono que se aleja

Ahora hagamos un experimento mental. Tomamos dos tonos puros: uno fijo a frecuencia f_1 , otro variable a frecuencia f_2 . Empezamos con $f_2 = f_1$ (unísono) y vamos subiendo f_2 poco a poco. ¿Qué oímos en cada etapa?

01 **f_2 muy cerca de f_1**

Un solo sonido de altura intermedia y los batidos lentos que acabamos de describir.

02 **Alejando f_2 : aparece la rugosidad**

Los batidos se vuelven más rápidos. A partir de cierta velocidad —en torno a 15-20 batidos por segundo en condiciones típicas, aunque la cifra depende de la frecuencia base y del nivel del sonido— ya no los percibimos como pulsos individuales. Lo que sentimos en cambio es una **rugosidad**: una sensación áspera, como si el sonido estuviera «sucio». El oído sigue recibiendo dos frecuencias, pero el cerebro ya no las separa en pulsos discretos sino en una textura.

03 **Más lejos: dos tonos diferenciados**

La rugosidad se mantiene, pero ya empezamos a distinguir dos tonos diferenciados, en lugar de uno solo modulándose. La transición no es brusca: hay una franja en la que percibimos a la vez «dos tonos» y «rugosidad». Es importante: estamos hablando de un continuo perceptivo, no de fronteras nítidas.

04 **Más allá del umbral: limpieza**

Solo cuando la diferencia entre f_1 y f_2 supera un umbral concreto —diferente para cada zona del rango auditivo— la rugosidad desaparece.

ce y los dos tonos suenan limpios e independientes. Ese umbral se llama **banda crítica**.

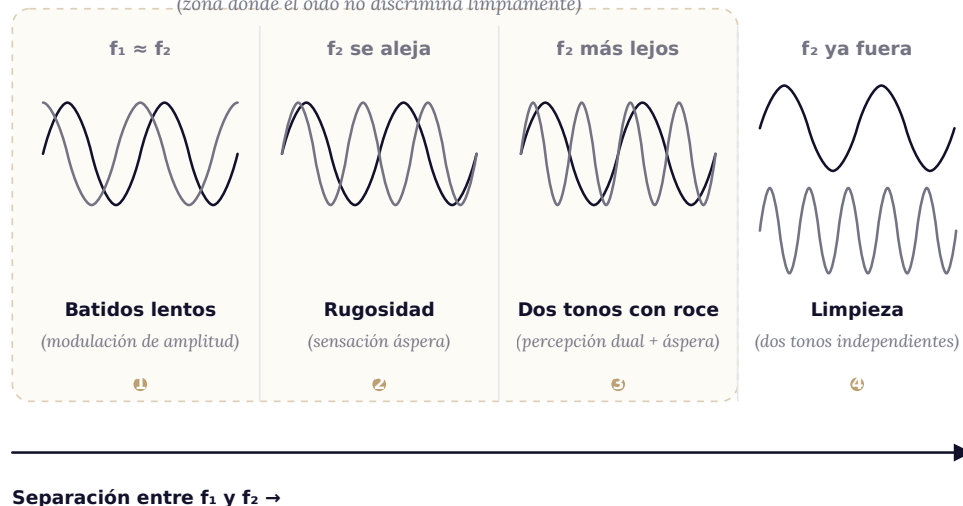
Veámoslo gráficamente:

Banda crítica

El tono que se aleja: cuatro estados según la separación

BANDA CRÍTICA

(zona donde el oído no discrimina limpiamente)



► DIAGRAMA 3 · BANDA CRÍTICA

Físicamente, la banda crítica corresponde al hecho de que cada frecuencia activa no un punto sino una **región** de la membrana basilar (de uno o dos milímetros de ancho aproximadamente). Cuando dos frecuencias caen lo bastante cerca como para que sus regiones de resonancia se superpongan, el oído las trata como interactuando: por eso aparecen los batidos primero y la rugosidad después. Cuando se separan lo suficiente, sus regiones ya no se solapan y el oído las procesa como sonidos independientes.

⚠ **¿Cómo de ancha es la banda crítica?** Depende de la frecuencia. En la zona grave (por debajo de 200 Hz) abarca del orden de **tres o cuatro semitonos**; en la zona aguda (por encima de 1 kHz) se queda en menos de un semitono. En hercios: a 100 Hz son unos 90 Hz, a 1.000 Hz unos 160 Hz, a 5.000 Hz se acerca a los 1.000 Hz. Los acústicos a veces usan también una unidad llamada *Bark*, donde 1 Bark = 1 banda crítica.

Importante para guitarristas: los acordes graves del mástil tienden a sonar más turbios que los mismos acordes una octava arriba. No es tu imaginación. Un acorde mayor lleva una tercera mayor entre la fundamental y la nota intermedia (cuatro semitonos). Si tocas un Do mayor con la fundamental en Do2 (~65 Hz), esos cuatro semitonos están dentro o muy cerca del ancho de la banda crítica en esa zona, y el oído los percibe interactuando. El resultado se ensucia. Si tocas el mismo acorde dos octavas más arriba, la tercera mayor se sale holgadamente de la banda crítica y el acorde suena cristalino.

Por la misma razón, las terceras y otros intervalos cerrados se evitan en posiciones graves tanto en piano como en guitarra: caen dentro de la banda crítica y la sensación es turbia. La armonía clásica orquestal suele reservar las octavas y quintas para los graves (intervalos amplios que se salen sobradamente de la banda crítica) y dejar las terceras y otros intervalos cerrados para las voces medias y agudas. No es una regla arbitraria; **es la fisiología del oído condicionando la práctica musical.**

§ 2.11

Sonidos resultantes

Cuando dos frecuencias están muy alejadas (más allá de la banda crítica) y suenan a sonoridad alta, ocurre algo curioso: empezamos a oír una **ter-**

cera frecuencia que no estaba en ninguno de los dos tonos originales. Se llama **sonido resultante**, y es un fenómeno físico real que ocurre principalmente dentro de la cóclea.

¿Por qué pasa? La cóclea no es un transductor perfectamente lineal, sobre todo a niveles altos. Cuando le llegan amplitudes grandes, lo que sale al sistema nervioso ya no es exactamente la suma de las dos ondas, sino una versión distorsionada que contiene combinaciones nuevas: $f_2 - f_1$, $2f_1 - f_2$, $f_1 + f_2$ y otras. La más fácil de oír es la diferencia $f_2 - f_1$, que es la que vamos a tabular.

Veamos qué pasa con f_1 fija y f_2 variando hacia arriba (tomando $f_1 =$ La 440 Hz como referencia):

INTERVALO	F2	SONIDO RESULTANTE (F2-F1)	RELACIÓN CON F1
Octava	$2 \cdot f_1$	f_1	unísono con f_1
Quinta justa	$(3/2) \cdot f_1$	$(1/2) \cdot f_1$	octava por debajo
Tercera mayor	$(5/4) \cdot f_1$	$(1/4) \cdot f_1$	dos octavas por debajo
Séptima armónica	$(7/4) \cdot f_1$	$(3/4) \cdot f_1$	cuarta justa por debajo

Una pequeña aclaración: la séptima armónica natural (razón $7/4$) es un intervalo «puro» que aparece de forma natural en la serie de armónicos y que nuestro oído reconoce, pero que no está exactamente representado en el piano moderno (el temperamento igual lo desplaza). Es normal que no te suene de tu instrumento: lo veremos a fondo en el Tema 5 cuando hablemos de afinaciones y temperamentos.

Como ves, los sonidos resultantes generan tonos extras que están por debajo del más grave de los dos originales. Eso es una pista importante para entender la fundamental ausente, que viene a continuación. Para que el efecto se note hay que tocar fuerte: los sonidos resultantes son no

lineales y crecen rápidamente con la amplitud. Por eso son más una curiosidad acústica interesante que una herramienta musical habitual.

§ 2.12

Fundamental ausente

Hay un segundo fenómeno relacionado pero conceptualmente distinto: la **fundamental ausente**. También aparece cuando suenan varias frecuencias a la vez, también nos hace oír una nota que no está físicamente, pero no ocurre por distorsión del oído sino por **reconstrucción** del sistema auditivo.

El sistema auditivo está acostumbrado a oír sonidos compuestos de armónicos: una nota de guitarra es la fundamental f_0 más sus múltiplos $2 \cdot f_0$, $3 \cdot f_0$, $4 \cdot f_0$, etcétera (lo veremos a fondo en el Tema 4). Cuando recibe varias frecuencias que reconoce como «armónicos consecutivos» de algo (por ejemplo $3 \cdot f_0$ y $4 \cdot f_0$), reconstruye automáticamente cuál sería esa f_0 ausente y la «oye» como si estuviera ahí.

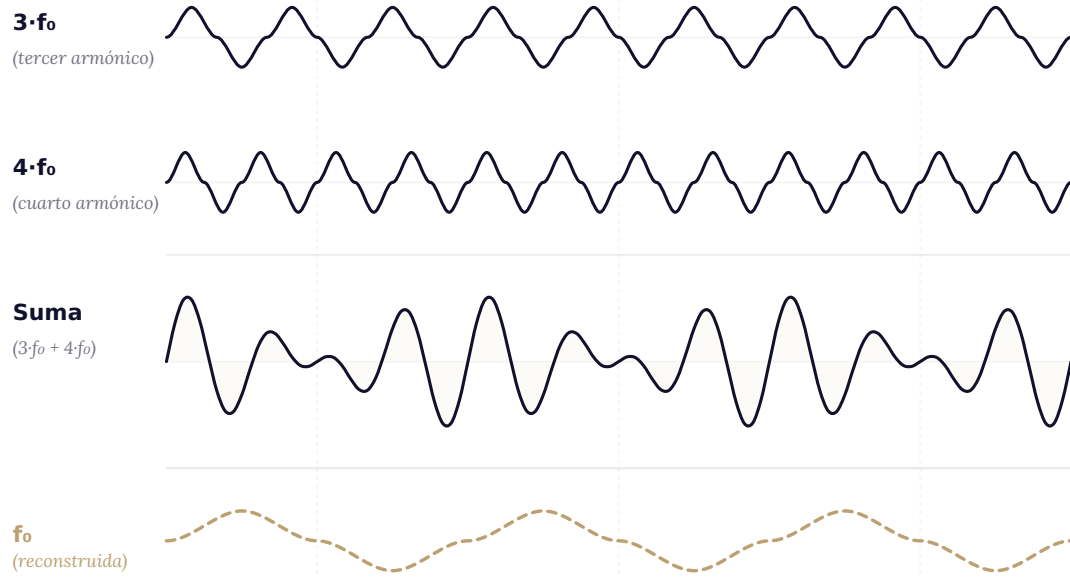
Hay una pista física importante. Cuando varios armónicos de la misma fundamental suenan a la vez, su suma tiene una **periodicidad común**: la onda resultante se repite cada $1/f_0$ segundos, aunque f_0 no esté presente como componente. El sistema auditivo es muy sensible a esa periodicidad temporal y la usa para «saber» cuál es la fundamental, incluso cuando no llega físicamente a su oído. No es magia: el patrón está ahí, codificado en el ritmo con que se repite la suma de los armónicos.

Por ejemplo: si llegan a tu oído 660 Hz y 880 Hz juntos, tu sistema auditivo reconoce que serían el tercer y el cuarto armónico de una fundamental de 220 Hz que no está sonando, y la reconstruye. Esa f_0 reconstruida es la fundamental ausente.

Veámoslo gráficamente:

Fundamental ausente

Dos armónicos suenan; el oído reconstruye la fundamental que no está



► DIAGRAMA 4 • FUNDAMENTAL AUSENTE

INTERVALO ENTRE F1 Y F2	F2	FUNDAMENTAL AUSENTE
Octava	$2 \cdot f_1$	f_1
Quinta	$(3/2) \cdot f_1$	$(1/2) \cdot f_1$
Cuarta	$(4/3) \cdot f_1$	$(1/3) \cdot f_1$
Tercera mayor	$(5/4) \cdot f_1$	$(1/4) \cdot f_1$
Tercera menor	$(6/5) \cdot f_1$	$(1/5) \cdot f_1$

Una matización importante: en algunas filas (especialmente la octava) la fundamental común que aparece en la columna de la derecha coincide con un tono que ya está físicamente presente. En esos casos no hay «ausencia» propiamente dicha. El fenómeno se ve más limpio cuando los tonos presentes son armónicos superiores —por ejemplo $3 \cdot f_0$ y $4 \cdot f_0$ sin f_0 misma—.

La diferencia clave entre sonido resultante y fundamental ausente:

- El **sonido resultante** existe físicamente como una vibración real generada en la cóclea por distorsión no lineal. Algunos productos de distorsión son incluso medibles desde el exterior del oído como *emisiones otoacústicas* (un fenómeno fascinante: el oído también emite sonido, no solo lo recibe).
- La **fundamental ausente**, en cambio, no existe como componente físico separado en el espectro: no hay una senoide sonando en f_0 . Lo que sí existe es un patrón temporal que se repite con el período de f_0 , y el sistema auditivo lo interpreta como una fundamental presente.

Por qué sigues oyendo el bajo en el móvil. La fundamental ausente es importantísima musicalmente porque explica algo que vives a diario: cuando escuchas música por unos auriculares de mala calidad o por el altavoz del móvil —que físicamente no pueden reproducir frecuencias graves— sigues oyendo el bajo. ¿Cómo? Porque tu sistema auditivo reconstruye la fundamental ausente a partir de sus armónicos, que sí caben en lo que reproduce el altavoz. Lo mismo pasa cuando una orquesta toca y tú estás muy lejos: las graves se atenúan más con la distancia, pero tu sistema auditivo sigue oyendo «el bajo».

§ 2.13

Cuando la afinación depende del timbre: el gamelán

Antes de cerrar el tema, conviene parar a deshacer una asunción escondida que hemos arrastrado desde el principio sin hacerla explícita. Hasta aquí hemos descrito la altura como una propiedad bastante universal: una frecuencia activa una zona de la membrana basilar, las octavas son siempre el doble, los armónicos son múltiplos enteros de la fundamental. Y, gracias a eso, hemos podido construir intervalos como la octava, la quinta o la tercera mayor con razones numéricas limpias (2:1, 3:2, 5:4)

que coinciden con armónicos consecutivos y por eso producen sensaciones reconocibles de consonancia.

Pero hay una premisa metida ahí que conviene poner sobre la mesa: estamos suponiendo que los sonidos tienen **espectros armónicos**, es decir, que sus componentes son múltiplos enteros de la fundamental. Esa premisa se cumple, con muy buena aproximación, en casi todos los instrumentos occidentales: cuerdas pulsadas o frotadas, columnas de aire en tubos, voz humana. ¿Qué pasa si cambiamos la premisa?

Vámonos al otro lado del mundo. En Indonesia, especialmente en Java y Bali, hay una tradición musical milenaria llamada **gamelán**. Un gamelán es una orquesta de instrumentos tradicionales compuesta principalmente de metalófonos —barras o láminas metálicas afinadas que se golpean con macillos— y gongs de distintos tamaños. Acompañan tambores, una flauta, instrumentos de cuerda y a veces voces. Suena —si nunca lo has escuchado, búscalo en YouTube con términos como «gamelan gong kebyar Bali» para el estilo balinés o «Javanese gamelan slendro pelog» para escuchar las dos escalas tradicionales que veremos enseguida— como una textura brillante, metálica, pulsante, repleta de capas, con un ataque característico de cada golpe. Acústicamente, no se parece a una orquesta occidental.

La diferencia tiene una base física muy clara, aunque la forma de convertirla en música es estética y cultural. Los instrumentos metálicos —a diferencia de las cuerdas y los tubos— tienen un comportamiento acústico muy distinto: cuando vibran, sus componentes espectrales NO son múltiplos enteros de la fundamental. Son lo que en el Tema 4 llamaremos **parciales inarmónicos**: frecuencias que aparecen en el espectro pero que no encajan en la serie limpia $1f$, $2f$, $3f$, $4f$... Por dar una idea: un gong puede tener su fundamental seguida de componentes en razones aproximadas tipo $2,4f$, $4,1f$, $5,8f$ o similares en lugar de la serie limpia $2f$, $3f$, $4f$ de un instrumento armónico. La forma del espectro deja de ser uniforme y previsible.

La consecuencia profunda: lo que en el oído occidental llamamos «afinación natural» no es una propiedad mística del sonido. Es la afinación que produce consonancia **cuando los espectros son armónicos**. La tercera mayor justa (razón 5:4) suena dulce con un piano o una guitarra porque el quinto armónico de la fundamental coincide con el cuarto armónico de la tercera. Pero si los parciales no son múltiplos enteros, esos puntos de coincidencia desaparecen y los puntos de roce aparecen en sitios distintos.

Por eso las escalas tradicionales javanesas y balinesas no son escalas occidentales mal afinadas. **Son escalas adaptadas a los espectros que producen sus instrumentos.** Las dos principales son *slendro* y *pelog*, y conviene aclarar de entrada que no son plantillas universales fijas: son familias de afinación que varían entre conjuntos, regiones y prácticas concretas.

→ DEFINICIONES

Slendro. Familia de afinaciones pentatónicas (cinco notas) que reparte la octava de manera aproximadamente uniforme, con intervalos típicamente en torno a los 240 cents cada uno (entre un tono y un tono y medio temperado).

Pelog. Familia de afinaciones heptatónicas (siete notas) con distribución muy irregular: combina intervalos pequeños (100-150 cents) con saltos grandes (hasta 350 cents).

Si tocas una pelog en un piano occidental, sonará tan rara que te parecerá un piano averiado. Pero tocada en su contexto, con instrumentos cuyos espectros la hacen sonar consonante, funciona perfectamente.

El ombak: batidos buscados, no evitados. En muchas tradiciones del gamelán, las parejas de instrumentos del mismo tipo se afinan deliberadamente con una pequeña diferencia entre ellos. Uno se afina un poco más alto, otro un poco más bajo. Cuando suenan juntos, producen batidos lentos, ese wah-wah que conocemos. Pero en lugar de evitarse —como haríamos en occidente, donde los batidos son señal de desafinación— se buscan, porque producen una textura vibrante característica del gamelán que los músicos llaman **ombak** (literalmente, «ola»). La banda crítica hace exactamente lo mismo que haría en tu oído si oyeras dos guitarras desafinadas; lo que cambia es lo que la cultura lee como «bonito».

Léelo despacio. Lo que el gamelán nos enseña, además de ser uno de los géneros musicales más fascinantes del mundo, es que la afinación occidental no es la única solución posible al problema de combinar sonidos. Es una solución, muy buena, para instrumentos con espectros armónicos. Cambia el timbre del instrumento y cambia la afinación natural que le corresponde. **La consonancia, vista de cerca, depende del timbre tanto como de las notas que se eligen.**

Refuerza una vez más el principio holístico que recorre el libro entero: las cualidades del sonido (altura, sonoridad, timbre) no son compartimentos estancos. La altura «natural» depende del timbre. El timbre depende del instrumento, que depende de la cultura, que depende del cerebro que aprende a oírlo desde la infancia. Todo está enredado.

Volveremos sobre estas ideas en el Tema 4 (cuando estudiemos a fondo los espectros inarmónicos en instrumentos como el piano y la batería) y en el Tema 5 (cuando veamos cómo la cultura occidental construyó sus temperamentos para resolver problemas que el gamelán nunca tuvo).

Lo que has visto en este tema

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

01 Toda vibración periódica se mide con tres parámetros: **amplitud, período y fase**. Para la música, la amplitud (sonoridad) y el período (altura) son los más relevantes.

02 La **frecuencia** es el inverso del período ($f = 1/T$) y se mide en hercios (Hz). Es preferible al período porque crece con la sensación de altura.

03 La membrana basilar codifica la frecuencia como una **posición espacial**: cada frecuencia activa una zona concreta. Doblar la frecuencia (subir una octava) supone aproximadamente el mismo desplazamiento ($\sim 3,5$ mm). Por eso la percepción de la altura es **logarítmica**: octava = $\times 2$, semitono $\approx \times 1,0595$.

04 La altura no es solo fisiología: también es una **categoría cultural y lingüística** que el cerebro infantil aprende. Diana Deutsch mostró que la incidencia del oído absoluto es muchísimo más alta entre hablantes nativos de lenguas tonales (mandarín, vietnamita) que entre angloparlantes.

05 Cuando dos tonos puros suenan juntos pueden producir **batidos** (si están muy cerca), **rugosidad** (si están dentro de la banda crítica), o sonar como dos tonos independientes (si están más allá). La banda crítica es ancha en graves (varios semitonos) y estrecha en agudos (menos de un semitono): por eso los acordes graves se ensucian y los agudos suenan limpios.

06

Los **sonidos resultantes** son frecuencias extras que aparecen físicamente en la cóclea por distorsión no lineal cuando dos tonos suenan fuerte.

07

La **fundamental ausente** es una frecuencia que el sistema auditivo reconstruye a partir de los armónicos presentes. No existe como componente espectral aislado, pero la periodicidad temporal sí está en la forma de onda que llega al oído. Por eso sigues oyendo el bajo aunque el altavoz del móvil no lo reproduzca.

08

La **afinación natural depende del timbre**. Los instrumentos del gamelán indonesio tienen parciales inarmónicos, y sus escalas (slendro y pelog) están adaptadas a esos espectros, no a la serie armónica natural. La consonancia, vista de cerca, no es una propiedad universal sino el resultado de combinar la fisiología del oído con el timbre concreto de los instrumentos de cada cultura.

Práctica

Para probar en casa

Cuatro experimentos cortos para aterrizar conceptos:

01

Afinación con batidos

Coge la quinta cuerda al aire (que debería dar un La de 110 Hz) y la sexta cuerda pisada en el quinto traste (que debería dar también un La). Si suenan exactamente igual, no oirás batidos. Si una está desafinada, oirás el wah-wah característico. Cuanto más rápido es el wah-wah, más desafinadas están; cuanto más lento, más cerca de afinar. Cuando desaparezca, has llegado.

02

Banda crítica en el mástil

Toca un acorde de Do mayor abierto y luego el mismo acorde en posición de cejilla en el octavo traste. Compara cómo suenan: el grave es más turbio, el agudo más cristalino. Estás oyendo en directo el efecto de la banda crítica. Si quieres llevarlo más lejos, prueba a tocar una tercera primero en zona grave y luego en zona aguda del mástil: la diferencia es escandalosa.

03

Fundamental ausente con auriculares de móvil

Pon una canción con bajo prominente (funk, reggae o trap) en los altavoces del móvil sin auriculares, en una habitación silenciosa. Oirás el bajo aunque el altavoz pequeño no pueda reproducir frecuencias graves: tu sistema auditivo lo está reconstruyendo a partir de los armónicos que sí caben en el altavoz. Después escúchala en unos buenos auriculares: notarás la diferencia de calidad, claro, pero el bajo «estaba ahí» en los dos casos. Solo que en uno era físico y en el otro mental.

04

El ombak del gamelán y tus dos cuerdas

Busca en YouTube «gamelan gong kebyar Bali ombak» y escucha 30 segundos con atención. Vas a notar una textura vibrante, una especie de «ondulación» continua del sonido. Eso es el ombak: batidos lentos producidos por afinar deliberadamente parejas de instrumentos con una pequeña diferencia. Ahora coge tu guitarra y desafina muy ligeramente la primera cuerda respecto a su afinación correcta (un cuarto de giro de clavija basta). Toca esa primera cuerda al aire junto con la segunda pisada en el quinto traste (que también es un Mi). Vas a oír los mismos batidos que en el gamelán: el mecanismo físico es idéntico, la diferencia está solo en si tu cultura lee eso como «desafinación» o como «ombak». El bucle del capítulo se cierra solo.

Glosario rápido del tema

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

TÉRMINO	DEFINICIÓN
● Movimiento periódico	Movimiento que se repite en el tiempo siguiendo un patrón fijo.
● Período (T)	Tiempo que tarda un movimiento periódico en completar un ciclo.
● Ciclo	El patrón básico que se repite en el movimiento periódico.
● M.A.S.	Movimiento armónico simple: el movimiento periódico más sencillo, descrito por una función sinusoidal.
● Amplitud	Distancia máxima al punto de equilibrio en una vibración.
● Fase	En qué punto del ciclo se encuentra una vibración en un instante dado.
● Frecuencia (f)	Número de ciclos por segundo. Inverso del período.
● Hercio (Hz)	Unidad de frecuencia: ciclos por segundo.
● Senoide pura / Tono puro	Sonido producido por un único movimiento armónico simple.

• Teorema de Fourier	Cualquier vibración periódica puede descomponerse como suma de movimientos armónicos simples.
• Base (cóclea)	Extremo de la cóclea cercano a la entrada. Allí resuenan las frecuencias agudas.
• Ápex (cóclea)	Extremo lejano de la cóclea. Allí resuenan las frecuencias graves.
• Zona de resonancia	Región de la membrana basilar donde una frecuencia concreta produce su máxima vibración.
• Codificación por lugar	Mecanismo por el que el oído identifica una frecuencia según la zona de la membrana basilar que activa.
• Codificación temporal	Mecanismo complementario: las neuronas auditivas disparan sincronizadamente con cada ciclo hasta unos 4-5 kHz.
• Octava	Intervalo en el que la frecuencia se dobla. Equivale a un desplazamiento aproximadamente constante (~3,5 mm) en la basilar.
• Percepción logarítmica	El oído distingue intervalos como proporciones, no como diferencias absolutas (octava = $\times 2$, semitono $\approx \times 1,0595$).
• Oído absoluto	Capacidad de identificar la altura concreta de un sonido sin referencias externas.

• Lengua tonal	Lengua en la que el contorno de altura con que se pronuncia una sílaba forma parte de su significado (mandarín, vietnamita, cantonés, yoruba).
• Superposición lineal	El oído recibe la suma directa de las dos vibraciones cuando dos sonidos llegan a la vez.
• Modulación de amplitud	Variación periódica de la amplitud de una onda al ritmo de otra onda más lenta.
• Batidos	Variación rítmica de la sonoridad cuando dos frecuencias muy cercanas se superponen.
• Cancelación de fase	Anulación de dos ondas que llegan en oposición de fase. Principio de los auriculares con cancelación de ruido.
• Rugosidad	Sensación áspera cuando dos frecuencias caen dentro de la banda crítica a velocidades de batido demasiado altas.
• Banda crítica	Región de frecuencias dentro de la cual dos sonidos no se perciben como independientes. Más ancha en graves, más estrecha en agudos.
• Sonido resultante	Frecuencia adicional generada físicamente en la cóclea por distorsión no lineal cuando dos tonos suenan a alta intensidad.
• Distorsión no lineal	Comportamiento del oído que genera frecuencias adicionales no presentes en la señal original con amplitudes grandes.

● Emisiones otoacústicas	Sonidos que el propio oído emite hacia el exterior, medibles con un micrófono adecuado.
● Fundamental ausente	Frecuencia que el sistema auditivo reconstruye a partir de los armónicos presentes. No existe como componente espectral aislado.
● Periodicidad común	Cuando varios armónicos de una misma fundamental suenan juntos, su suma se repite con el período de la fundamental.
● Séptima armónica natural	Intervalo de razón $7/4$, presente en la serie de armónicos pero no exactamente representado en el temperamento igual.
● Gamelán	Orquesta tradicional indonesia (Java y Bali), compuesta principalmente de instrumentos metálicos con espectros inarmónicos.
● Parcial inarmónico	Componente del espectro cuya frecuencia NO es múltiplo entero de la fundamental.
● Slendro	Familia de afinaciones pentatónicas tradicionales indonesias, con intervalos típicamente en torno a los 240 cents.
● Pelog	Familia de afinaciones heptatónicas tradicionales indonesias, con intervalos irregulares (100-150 cents y hasta 350 cents).
● Ombak	Textura vibrante característica del gamelán, producida por afinar parejas de instrumentos con una pequeña diferencia.



@sonidopropio ·
sonidopropio.com

Tema 2 · v11

🕒 Última edición: jun 2026