



Por qué un piano no suena a guitarra

Armónicos, envolvente y formantes: de qué está hecho el timbre.

En los tres temas anteriores hemos hecho un viaje muy concreto: el Tema 1 nos sirvió para montar el sistema general (alguien emite, algo lleva la onda, alguien la recibe), y los Temas 2 y 3 entraron al detalle de las dos primeras cualidades del sonido —altura y sonoridad— centrándose en los tonos puros, que son la herramienta de laboratorio.

Ahora cambiamos de capítulo. Los tonos puros son utilísimos para entender la física, pero nadie pone una senoide en Spotify. La música real está hecha de notas con cuerpo, con presencia, con ese carácter que reconocemos a la primera. Una nota de una guitarra acústica, otra del mismo instrumento pero eléctrico, otra de un piano, otra de una flauta y otra de Rosalía cantando: cinco emisores tocando exactamente el mismo La a la misma sonoridad, y nuestro oído distingue uno por uno sin pestañear. ¿Cómo lo hace?

La respuesta tiene un nombre que ya hemos pronunciado varias veces: el **timbre**. Y este es el tema en que por fin lo desmontamos por dentro. Vamos a ver qué pasa cuando una cuerda real vibra, qué pasa dentro de un tubo de viento, qué teorema hace de pegamento entre todo lo que sabemos hasta ahora, por qué una nota tiene «vida» en el tiempo, y por qué

finalmente reconocemos a Rosalía con tres sílabas o un piano con un solo acorde.

Una observación que vale la pena dejar caer al principio. Pusimos una persona en la Luna en 1969. Y, sin embargo, **toda-
vía hoy no entendemos del todo cómo funciona
acústicamente un piano.** El violín Stradivarius, ese instrumen-
to mítico que se vende por millones, sigue siendo un misterio. Pruebas a ciegas relativamente recientes —especialmente las que coordinó la acústica francesa Claudia Fritz entre 2012 y 2014 con solistas profesionales— han mostrado que algunos vio-
lines modernos llegan a igualar a los Stradivarius e incluso a su-
perarlos en preferencia. Los instrumentos centenarios siguen guardando secretos.

§ 4.1

La cuerda que vibra: ondas estacionarias

Empecemos por el sitio más cercano: la cuerda de tu guitarra. Cuando la pulsas, ¿qué hace exactamente?

Imagina la cuerda fija en sus dos extremos: por un lado en la cejuela, por el otro en el puente. Esos dos puntos no se pueden mover, porque están sujetos. Cuando tu dedo o tu púa la desplaza, le has dado energía: la cuerda queda tensa fuera de su posición de reposo, y al soltarla las fuer-
zas elásticas la empujan hacia el equilibrio, se pasa por inercia hacia el otro lado, y se queda oscilando hasta que el rozamiento se lleva toda la energía.

Pero no vibra de cualquier manera. Lo curioso es que **la cuerda solo puede vibrar de ciertas formas concretas.** ¿Por qué? Porque los ex-
tremos están fijos: ahí, por fuerza, no puede haber movimiento. Esa exigencia se llama una *condición de contorno*, y restringe muchísimo cómo puede oscilar la cuerda. Las únicas formas que respetan esa

condición se llaman **modos propios** del sistema: son las «formas naturales» en las que la cuerda quiere vibrar.

La forma más simple cumple esa condición de la manera más sencilla posible: la cuerda se mueve toda hacia arriba, luego toda hacia abajo, con un solo «vientre» en el medio y los dos extremos quietos. Esa es la **fundamental**: la frecuencia más baja a la que puede vibrar. Pero no es la única posibilidad: la cuerda puede vibrar con un punto quieto en el medio (un **nodo**) y dos vientres a los lados moviéndose en sentidos opuestos. Eso es el segundo modo, que vibra al doble de la frecuencia fundamental: el **segundo armónico**. Puede vibrar con dos nodos intermedios y tres vientres alternantes (tercer armónico, tres veces la fundamental). Y así sucesivamente.

Veámoslo gráficamente:

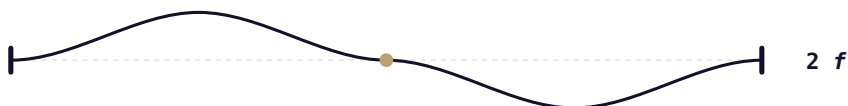
Modos de vibración de una cuerda

Cuatro primeros modos de una cuerda fija en ambos extremos

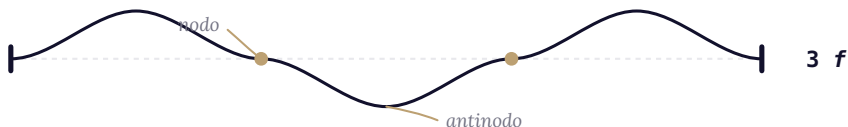
n = 1
Fundamental



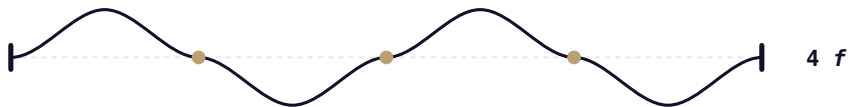
n = 2
Segundo armónico



n = 3
Tercer armónico



n = 4
Cuarto armónico



► DIAGRAMA 1 • MODOS DE VIBRACIÓN DE UNA CUERDA

Idea clave: en la cuerda real no se «elige» un modo, **vibran muchos a la vez**. Cuando pulsas la cuerda al aire, lo que produces es una superposición de la fundamental y todos sus armónicos, cada uno con su propia amplitud. La fundamental es lo que percibes como la altura de la nota; los armónicos viajan junto a ella y son los que dan al sonido su carácter.

Una pequeña observación sobre vocabulario: los *armónicos* son frecuencias múltiplos enteros de la fundamental ($2f$, $3f$, $4f$...). Cada una de esas posibilidades de vibración se llama un *modo*. La cuerda vibra «en muchos modos a la vez». Es vocabulario que vamos a usar el resto del tema, y verás que reaparece en los tubos de viento con el mismo significado.

¿De qué depende la frecuencia fundamental de una cuerda? De tres cosas, y solo tres: la **longitud** vibrante L (cuanto más larga, más grave), la **tensión** T (cuanto más tensa, más aguda) y la **masa por unidad de longitud** μ (cuanto más gorda, más grave).

→ FÓRMULA DE LA CUERDA VIBRANTE

$$f_1 = (1/2L) \cdot \sqrt{T/\mu}$$

No te asustes con la fórmula. Lo importante es lo que dice cualitativamente: bajas la frecuencia si haces la cuerda más larga, si la aflojas o si usas una más gorda; subes la frecuencia si la pisas en un traste para acortarla, si la tensas o si usas una más fina.

Y eso explica de un golpe varias cosas que un guitarrista vive todos los días pero pocas veces piensa:

- En tu guitarra, las seis cuerdas tienen la misma longitud y similar tensión al afinar. ¿Por qué la sexta da un Mi grave y la primera un Mi agudo? **Por la masa:** la sexta es notablemente más gorda que la primera, fina como un alambre.

- Cuando pisas un traste, no cambias ni tensión ni masa: solo **acortas la longitud vibrante**. Cada traste sube la frecuencia un semitono ($\times 1,0595$, del Tema 2). Por eso los trastes están más juntos conforme subes hacia el cuerpo.
- Cuando afinas, lo que mueves es la **tensión**. La masa y la longitud son fijas; la única variable libre es cuánto giras la clavija.
- En un **piano**, las cuerdas no son todas iguales: las graves son largas y gordas (a menudo entorchadas) para conseguir frecuencias bajas sin que el piano mida cinco metros. Las agudas son cortas, finas y muy tensas.
- En el **violín**, las cuatro cuerdas tienen prácticamente la misma longitud. Lo que las diferencia es el grosor (masa) y la tensión.

§ 4.2

Dónde pulsas la cuerda: la excitación importa

Hay un detalle que un guitarrista experimentado conoce sin saber por qué, y que merece sección propia: **dónde pulsas la cuerda cambia profundamente cómo suena**, aunque la nota sea la misma.

La explicación es preciosa. Recuerda que la cuerda puede vibrar en muchos modos a la vez, y que cada modo tiene sus nodos en sitios concretos: el segundo armónico tiene un nodo en la mitad, el tercero en los tercios, el cuarto en los cuartos. Cuando pulsas la cuerda, estás dándole un empujón en un punto. Y ese punto decide qué armónicos se despiertan y cuáles se quedan callados.

→ REGLA DEL PUNTO DE PULSACIÓN

Si pulsas en un punto que **coincide con el nodo de un armónico**, ese armónico no se excita. Si pulsas en un punto donde el armónico tiene un **vientre**, lo excitas con fuerza.

Esto explica algunas cosas muy concretas:

01

Cerca del puente — sonido brillante

Cuando pulsas *cerca del puente* (sul ponticello en cuerda frotada, lo que en guitarra eléctrica buscas para riffs agresivos de funk, country o ciertos solos), el punto de excitación está lejos de los nodos de prácticamente todos los modos. Despiertas la fundamental y todos los armónicos, incluidos los más altos. El espectro queda lleno en la zona aguda y el sonido suena brillante, ácido, «metálico». Es el «twangy» o «chicken pickin'» de jerga.

02

Cerca del traste 12 — sonido dulce

Cuando pulsas *cerca del traste 12* o más allá hacia el mástil (sul tasto), estás justo encima del nodo del segundo armónico, así que el segundo armónico se debilita mucho. El cuarto, el sexto, el octavo (todos los pares) también pierden fuerza. El espectro queda dominado por la fundamental y los impares bajos: el sonido es dulce, redondo, casi flautado. Zona de baladas, acordes acústicos cálidos, acompañamientos de bossa.

03

Zona intermedia — equilibrio

En el medio entre estos dos extremos (donde está la pastilla central de una eléctrica, o cerca) tienes un equilibrio: presencia razonable de armónicos pero sin la agresividad del cerca-del-puente.

A esto hay que sumar otra variable: **con qué pulsas la cuerda**. La uña, la yema del dedo, una púa de plástico fina, una púa gruesa, una púa de carey, los dedos al hacer un ligado... cada uno transmite la energía de manera distinta. Una uña dura es más «afilada» y excita armónicos altos con facilidad. La yema del dedo, blanda y ancha, hace de filtro y atenúa

los armónicos más agudos: el sonido pierde brillo y gana calidez. Por eso un guitarrista clásico que toca con uña suena distinto al mismo que tocaría con yema, aunque sea el mismo instrumento.

Esta es la primera lección clarísima de que **el timbre no es solo «el instrumento»: es también cómo lo tocas**. Y ahora ya entiendes por qué los grandes guitarristas pueden cambiar de sonido sin cambiar de guitarra.

§ 4.3

De la cuerda al tubo: columnas de aire

La misma idea de «modos posibles según las condiciones de contorno» se aplica a los tubos de viento, pero con una vuelta de tuerca interesante. Cuando hablamos de oscilación en el aire de un tubo, podemos describir lo mismo desde dos puntos de vista: el *desplazamiento* de las partículas de aire o la *presión*. Donde el aire se mueve mucho, la presión apenas cambia; donde el aire no puede moverse, la presión sube y baja con máxima amplitud. Vamos a hablar en términos de presión.

Las condiciones de contorno dependen de si el extremo del tubo está abierto o cerrado:

- En un **extremo abierto**, el aire puede moverse libremente hacia fuera, así que la presión apenas oscila. Es un *nodo de presión*.
- En un **extremo cerrado**, el aire no puede moverse hacia fuera, así que la presión sube y baja con máxima amplitud. Es un *vientre de presión*.

Con esto, hay dos tipos básicos de tubo, y suenan distinto:

01 Tubo abierto en ambos extremos (flauta)

Las dos puntas son nodos de presión. Cumplen $L = n \cdot (\lambda/2)$. Producen una **serie completa de armónicos** (1, 2, 3, 4, 5...), igual que la cuerda. Por eso una flauta y una cuerda pulsada se parecen en la riqueza de su espectro, aunque luego sus timbres concretos sean distintos.

02 Tubo cerrado en un extremo (clarinete)

Un extremo es nodo, el otro vientre. Cumplen $L = n \cdot (\lambda/4)$ con n impar. De aquí salen dos consecuencias enormes: para la misma longitud, suena **una octava más bajo** que el tubo abierto; y produce **solo los armónicos impares** (1, 3, 5, 7...). Los pares no encajan en las condiciones de contorno.

Por eso los órganos de iglesia tienen muchos tubos tapados: para conseguir las notas más graves sin que el órgano tenga que ser una catedral entera. Un tubo abierto que produzca un Do grave necesita unos **5 metros**; uno tapado, **2,5 metros**.

¿A qué suena un instrumento al que le faltan los armónicos pares? A clarinete, exactamente. El clarinete (que se comporta acústicamente como un tubo cerrado en un extremo) tiene un timbre característicamente «redondo», «hueco», a veces descrito como «amaderado» en su registro grave. La flauta, en cambio, que sí tiene serie completa, suena más «brillante», más «transparente». No es romanticismo: la diferencia tímbrica está literalmente en qué armónicos están presentes y cuáles no.

§ 4.4

El teorema que lo explica todo: Fourier

En el Tema 2 dejamos una promesa colgando: dijimos que cualquier vibración periódica, por compleja que sea, se puede descomponer en una

suma de movimientos armónicos simples. Ahora podemos formalizarla un poco más, porque ya tenemos todos los ingredientes: ya sabemos qué son los modos de vibración, qué son los armónicos, y hemos visto cómo se generan en cuerdas y tubos reales. Esa idea se llama **teorema de Fourier**, en honor al matemático francés Joseph Fourier que la formalizó hace ya dos siglos, y es probablemente el resultado matemático más importante de toda la acústica musical.

Lo que dice, en cristiano: si tenemos una vibración periódica cualquiera —la onda que produce una cuerda de guitarra, la que sale de una columna de aire, la que vibra en tus pliegues vocales cuando cantas—, se puede descomponer matemáticamente en una **suma de ondas sinusoidales puras**. Cada una con su propia frecuencia (que será la fundamental o un múltiplo entero suyo) y su propia amplitud.

Esa descomposición tiene un nombre que vamos a usar mucho: el **espectro** del sonido. El espectro es la «receta» de la nota: cuáles son los armónicos presentes y con qué intensidad relativa cada uno. **Es el DNI tímbrico del sonido**. Dos instrumentos distintos tocando la misma nota tienen la misma fundamental, sí, pero espectros diferentes. Y eso es precisamente lo que el oído usa para distinguirlos.

Una pequeña nota terminológica. Hemos usado «armónicos» suponiendo múltiplos enteros exactos de la fundamental: $2f$, $3f$, $4f$... En la práctica, los componentes del espectro de un instrumento real no caen siempre exactamente en esos múltiplos: hay pequeñas desviaciones (lo veremos en la inarmonicidad del piano). Por eso, para hablar con propiedad de los componentes que aparecen en un espectro real, los acústicos usan a menudo la palabra **parciales**: parcial es cualquier componente del espectro, sea exactamente un armónico o esté ligeramente desplazado.

Algunas formas de espectro que conviene reconocer:

- Si están todos los armónicos (1, 2, 3, 4, 5...) con peso significativo, el sonido será rico, «lleno», típico de cuerdas pulsadas, instrumentos de arco o tubos abiertos.

- Si faltan los armónicos pares y solo están los impares (1, 3, 5, 7...), el sonido será más hueco y oscuro, como en el clarinete.

- Si tiene casi solo la fundamental con armónicos muy débiles, el sonido será casi «puro», «limpio», parecido al pitido del microondas.

- Si tiene muchos armónicos altos reforzados, el sonido será «brillante», «metálico», «con presencia»: una guitarra eléctrica con distorsión, una trompeta forzada, un violín tocado con mucha presión del arco.

La regla es directa y útil de recordar: **más energía en los armónicos altos = más brillo. Menos energía en los altos = más calidez.**

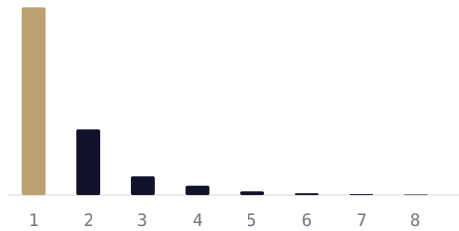
Veámoslo gráficamente:

Firmas espectrales

Misma nota, cuatro instrumentos – cada uno con su propia distribución de armónicos

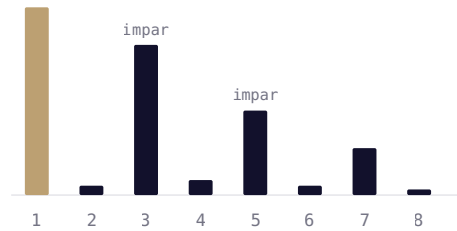
Flauta

casi un tono puro



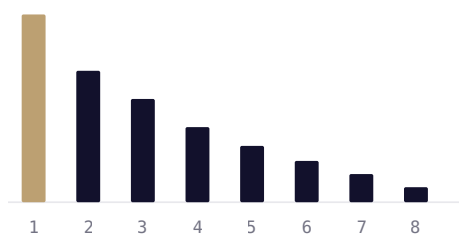
Clarinete

armónicos impares dominantes



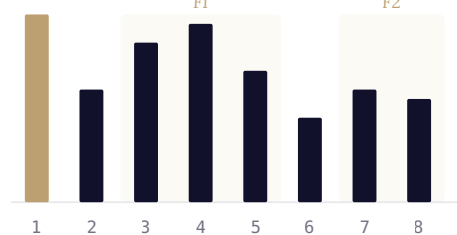
Guitarra

rica en armónicos



Voz humana

con refuerzos en formantes



► DIAGRAMA 2 • FIRMAS ESPECTRALES

Aquí hay un detalle conectado con el Tema 2. Recuerda la banda crítica: esas franjas perceptivas dentro de las cuales el oído deja de separar frecuencias como tonos distintos. Eso afecta también a los armónicos: a partir de cierto número, los armónicos consecutivos se acercan tanto en escala perceptiva que entran en la misma banda crítica y se mezclan en una «textura» de brillo difusa. Como regla aproximada, los acústicos suelen decir que los **primeros seis o siete armónicos llevan la mayor parte del peso del timbre**, pero es una aproximación, no un número fijo universal.

Otro detalle conectado con el Tema 2: el cerebro, cuando recibe un espectro armónico completo, reconstruye automáticamente la fundamental como «la nota». Y, como vimos, lo hace incluso si la fundamental falta físicamente (la fundamental ausente). Cualquier nota real ya viene con esa estructura de armónicos múltiplos enteros, así que el sistema auditivo siempre tiene material de sobra para identificar la fundamental aunque el altavoz del móvil se quede corto en graves.

Tres maneras de mirar un timbre: el marco de Grey

Hasta ahora hemos mirado el timbre como una foto fija: cuáles son sus armónicos, con qué intensidad, qué falta y qué sobra. Y ya hemos dejado caer que esa foto se queda corta: el timbre también vive en cómo nace, vive y muere la nota en el tiempo. Antes de entrar de lleno a esa parte temporal, conviene parar a poner orden.

A esta pregunta —si el timbre es una sola cosa o varias, y qué medimos exactamente al comparar dos timbres— le dio una respuesta elegante el musicólogo y psicoacústico estadounidense **John Grey en 1977**. Grey hizo escuchar a oyentes parejas de notas tocadas por distintos instrumentos y les pidió que valoraran cuán parecidas o distintas sonaban. Con técnicas estadísticas, buscó qué dimensiones bastaban para describir las diferencias percibidas. Encontró que **con tres dimensiones se explica la mayor parte de lo que el oído humano percibe como «carácter tímbrico»**:

01 Brillo

La presencia relativa de armónicos agudos en el espectro. Más energía en los armónicos altos, más brillo; menos, más calidez. La trompeta en una nota fuerte tiene brillo alto; una flauta en piano lo tiene bajo. La guitarra eléctrica con distorsión sube hasta lo más alto.

02 Carácter del ataque

Cómo arranca la nota: abrupta (un golpe seco), progresiva (subiendo de cero a su pico), con ruido (un soplido o un rasgueo), casi sin transitorio. Una nota de piano tiene un ataque brusco con mucho contenido transitorio; una nota de arco tiene ataque progresivo; una de órgano arranca casi instantáneamente y limpia. Esta dimensión es la que más rápido le da información al oído sobre qué instrumento está sonando.

03 Evolución espectral

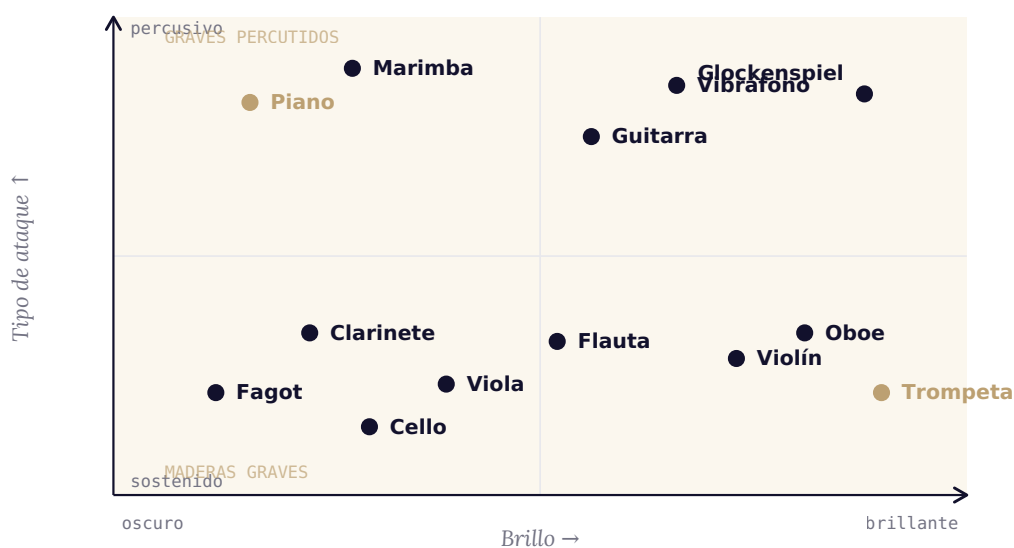
Cómo cambia el espectro a lo largo de la nota mientras suena. Una flauta tiene una evolución bastante plana. Una nota de piano evoluciona mucho: el ataque concentra muchos armónicos altos que se apagan rápidamente, dejando una cola dominada por los más graves. Un saxo con vibrato tiene una evolución que oscila a la frecuencia del vibrato.

La gracia del marco de Grey es que **resume en tres ejes algo que sin orden parece infinitamente complejo**. Cualquier timbre se puede colocar aproximadamente en este espacio tridimensional, y los instrumentos cercanos en él (dos cuerdas frotadas, por ejemplo) suenan parecidos, mientras que los lejanos (un piano y un trombón) suenan muy distintos.

Veámoslo gráficamente:

Espacio tímbrico

Un mapa donde instrumentos perceptualmente parecidos quedan cerca



Adaptado del espacio tímbrico de J. Grey (1977)

► DIAGRAMA 3 · ESPACIO TÍMBRICO DE GREY

La conexión limpia con lo que viene a continuación: la dimensión 1 (brillo) la hemos medido sobre el espectro. Las dimensiones 2 y 3 (carácter del

ataque y evolución espectral) tratan de cómo evoluciona la nota EN EL TIEMPO. Para describirlas necesitamos otra herramienta.

§ 4.6

ADSR: el tiempo es parte del timbre

Acuérdate del experimento del Tema 1, ese de invertir una nota grabada con Audacity y escucharla del revés. Las frecuencias presentes son las mismas, el espectro es prácticamente idéntico, y aun así la nota invertida no parece tu instrumento. ¿Por qué? Porque **el timbre incluye también cómo nace, vive y muere la nota en el tiempo.**

Para describir esa evolución, los acústicos y productores usan un esquema sencillo de cuatro fases, conocido como **ADSR** (siglas en inglés de *attack, decay, sustain, release*):

A

Ataque

El momento en que la nota nace, desde el silencio hasta su pico de sonoridad. Es donde más información del instrumento se concentra. Si recortas digitalmente solo el ataque de un piano y lo escuchas suelto, lo reconoces como piano sin esfuerzo. Si recortas solo el sostenido sin el ataque, mucha gente confunde un piano con un órgano. **El ataque lleva el sello del instrumento.**

D

Decaimiento

La nota baja desde su pico inicial hasta el nivel sostenido. En instrumentos como la guitarra o el piano esta fase no termina en un nivel estable, sino que el decaimiento continúa de manera prolongada hasta el silencio: en estos instrumentos no hay sostenido propiamente dicho, son siempre instrumentos en decaimiento.

S

Sostenido

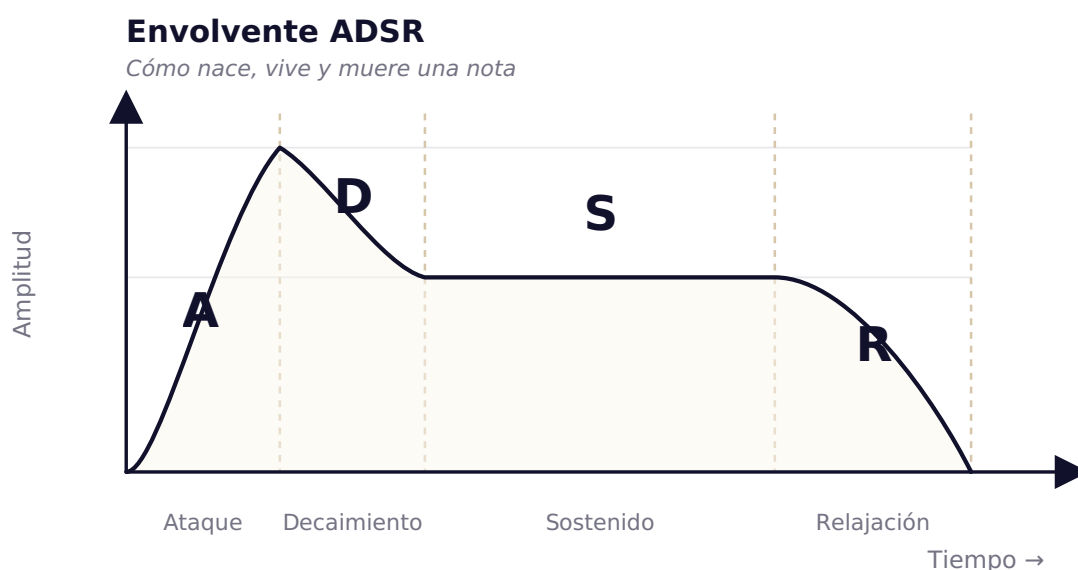
Solo aparece como tal en instrumentos que pueden mantener la nota mientras siga llegando energía: el violín mientras pasas el arco, el viento mientras soplas, el órgano mientras pisas la tecla. En guitarra y piano, esta fase no existe físicamente: lo que parece «sostenido» es en realidad la cola del decaimiento.

R

Relajación

La fase final, cuando se interrumpe la fuente de energía o se silencia activamente la nota (sueñas la cuerda, dejas de soplar, sueñas la tecla del piano que apaga la nota con un fieltro). El sonido cae al silencio.

Veámoslo gráficamente:



► DIAGRAMA 4 • ENVOLVENTE ADSR

ADSR aplicado a la **guitarra**: ataque seco y muy rápido (la cuerda pasa de quieta a vibrando con todo en una fracción de segundo), seguido de un decaimiento que se prolonga hasta el silencio (no hay sostenido), y una relajación rápida cuando apoyas la mano o el sonido se ha apagado solo. Eso es lo que la distingue tímbricamente, por ejemplo, de un órgano,

que tiene ataque más blando, sostenido prácticamente plano y relajación instantánea cuando sueltas la tecla.

ADSR aplicado a la **batería**: percusión = casi todo es ataque. Un golpe de caja es prácticamente solo la fase A; el resto se va apagando en un decaimiento más rápido o más lento según el parche y la afinación. Por eso los percusionistas hablan de «el cuerpo» del golpe (decaimiento) y «el chasquido» (ataque): son cosas distintas que tocan controlar de forma independiente.

El ruido del ataque importa más de lo que parece. El ataque de cualquier nota real contiene mucho **ruido inicial**, no solo armónicos limpios. La púa rascando la cuerda, el aire pasando por el bisel de la flauta, el martillo del piano golpeando, los labios entrando en vibración: son pequeños caos acústicos antes de que la vibración periódica se establezca. Las señales *periódicas* producen una altura definida; las *aperiódicas* (ruido sin patrón repetitivo claro) percibimos como ruido sin altura. El ataque de una nota real es una mezcla rápida de las dos. Si lo recortas, le quitas al instrumento gran parte de su identidad.

ADSR es esencialmente la herramienta operativa para describir las dimensiones 2 y 3 del marco de Grey: el ataque corresponde directamente a su dimensión de carácter del ataque, y las fases D-S-R describen la evolución espectral. La primera dimensión, el brillo, queda fuera del ADSR porque se mide sobre el espectro y no sobre la amplitud.

§ 4.7

Un inciso rápido: resonancia

Hemos usado varias veces la palabra «resonador» (Tema 1), «zona de resonancia» (Tema 2) y ahora vamos a hablar de «resonancias fijas». Conviene tener clara la idea general antes de seguir.

→ RESONANCIA

Lo que ocurre cuando un sistema que tiene sus propios modos naturales de vibración recibe un estímulo a una frecuencia cercana a uno de esos modos: el sistema responde con una amplitud mucho mayor que con cualquier otra frecuencia. Es lo que pasa cuando empujas un columpio justo en el momento adecuado de cada balanceo: tu empuje, aunque sea pequeño, se acumula y el columpio sube cada vez más.

En acústica esto pasa por todas partes: la membrana basilar resuena en una zona concreta para cada frecuencia, una caja de guitarra resuena con más facilidad en ciertos modos del aire que contiene, una cavidad de la garganta resuena con frecuencias preferidas, una cuerda resuena solo en sus modos propios. Todas esas situaciones son la misma idea: **hay una frecuencia donde el sistema «coopera» y todo lo demás se queda en el ruido**. Cuando un cuerpo tiene varias frecuencias de resonancia preferentes y no controlables por la nota tocada, esas frecuencias actúan como filtro. Y eso nos lleva directamente al concepto siguiente.

§ 4.8

Formantes: la huella del cuerpo

Hay un fenómeno más, especialmente importante para la voz humana pero también presente en muchos instrumentos: las resonancias del cuerpo del instrumento, que llamamos **formantes**.

Acuérdate del Tema 1: en el emisor distinguíamos el *elemento excitado* (lo que vibra y fija la altura) y el *resonador* (lo que amplifica y colorea). Los formantes son, esencialmente, las frecuencias en las que el resonador «responde» especialmente bien. Dicho de otra manera: **el resonador actúa como un filtro** que deja pasar (o refuerza) ciertas frecuencias del espectro y atenúa otras. Cuando el espectro original sale del elemento excitado y atraviesa el resonador, sale modificado: con bumps en las fre-

cuencias de los formantes, y con depresiones en las que están entre ellos.

Lo crucial, especialmente claro en la voz, es que **esas frecuencias son una propiedad del cuerpo del resonador, no de la nota que estás tocando**. Cuando cantas un La grave o un La agudo, la fundamental cambia, pero las cavidades de tu garganta y boca siguen teniendo el mismo tamaño y por tanto las mismas frecuencias preferidas. Esos formantes refuerzan ciertos armónicos del espectro y dejan otros más débiles, sin importar la nota.

Las vocales son formantes. Cuando dices «aaa», «iii» u «ooo», estás cambiando la forma de tu boca y por tanto sus formantes. Las vocales no dependen de la altura: puedes decir «aaa» en grave o en agudo y se sigue reconociendo como una «a». Lo que reconoce tu oído no es una frecuencia concreta, **es un patrón de formantes**. Cada vocal tiene un patrón característico de dos o tres formantes principales.

En instrumentos, el efecto de los formantes existe pero suele ser menos rotundo que en la voz. La caja de una guitarra tiene resonancias preferentes (asociadas al volumen interior, a los modos propios del aire encerrado, a las maderas) y esas resonancias dan a cada guitarra su sello propio: es lo que hace que dos modelos distintos de la misma marca suenen sutilmente distintos aunque toques la misma nota.

El «singer's formant». Para la voz cantada el control de los formantes es decisivo: una soprano profesional aprende a «ajustar» su tracto vocal para reforzar un cuarto formante alrededor de **3 kHz** —justo donde el oído humano es más sensible, por las curvas de Fletcher-Munson del Tema 3— que la hace audible por encima de la orquesta sin esfuerzo. Es la razón por la que una voz operística llena una sala de 2.000 personas sin amplificación cuando un cantante sin entrenamiento se queda corto.

Y los compositores serios juegan deliberadamente con todo esto. El húngaro Béla Bartók, en muchas piezas de su llamada «música nocturna» (la más famosa, el cuarto movimiento de la suite «Al aire libre» de 1926), construye sonoridades evocativas de la naturaleza nocturna —cantos de aves, ranas, grillos, sonidos lejanos en la oscuridad— agrupando intervalos disonantes en racimos densos, ataques cortos y texturas que cambian constantemente. No es decoración: Bartók está usando deliberadamente todo lo que llevamos visto en este tema como material expresivo principal. La acústica deja de ser solo física para convertirse en herramienta narrativa.

§ 4.9

El piano real no es un piano ideal: inarmonicidad

Casi todo lo que hemos contado supone que los armónicos están perfectamente alineados como múltiplos exactos de la fundamental: si la fundamental es 100 Hz, el segundo armónico está a 200 Hz, el tercero a 300, etcétera. En cuerdas finas y flexibles ideales esto es verdad con muy buena aproximación. Pero las cuerdas reales tienen **rigidez**, no son perfectamente flexibles, y eso introduce un pequeño desvío: los armónicos superiores están un poco más altos de lo que tocaría según la fórmula ideal. A ese desvío se le llama **inarmonicidad**.

En la guitarra es pequeño y casi imperceptible. En el piano, por el contrario, es lo bastante grande como para tener consecuencias reales en cómo se afina el instrumento.

Stretch tuning: afinar «mal» para que suene bien. Si afinaras un piano de modo que cada cuerda tuviera su fundamental exactamente correcta, los armónicos superiores quedarían chocando con las fundamentales de las notas más agudas, y el piano sonaría desafinado consigo mismo. Para evitarlo, los afinadores profesionales afinan las notas graves un poquito más bajas y las agudas un poquito más altas de lo que dictaría la teoría pura, de manera que los armónicos coincidan con las fundamentales correspondientes. No es un error, es un **ajuste sistemático y deliberado para compensar la inarmonicidad**: el resultado es un piano que suena correcto al oído, aunque un afinador electrónico sin compensación podría detectar que las octavas están «un poquito mal» en términos puros.

Es un detalle precioso de la acústica del piano: **los pianos profesionales se afinan ligeramente «mal» según la matemática pura precisamente para que suenen bien según el oído**. La fisiología del instrumento le dicta a la práctica musical, no al revés.

§ 4.10

Reverberación y acústica de salas

En el Tema 3 mencionamos brevemente la reverberación; es hora de desarrollarla porque está íntimamente conectada con el sonido de los instrumentos en una situación real.

Cuando una nota suena en una sala, no llega al oyente solo el sonido directo desde el instrumento. Llegan también las reflexiones en paredes, techo y suelo, cada una con un retardo distinto y una intensidad menor. Y conviene distinguir, dentro de esas reflexiones, dos fases que se suceden:

01 Reflexiones tempranas

Las primeras que llegan al oyente, normalmente en los primeros **50-80 ms** tras el sonido directo. Son pocas y discretas, y vienen de las superficies más cercanas. El cerebro las usa para construir la sensación de «estar en un espacio» y para localizar la fuente: dependiendo de cómo lleguen, percibimos una sala grande, pequeña, alargada, viva o seca.

02 Cola difusa (reverberación tardía)

Lo que viene después: una densidad enorme de reflexiones que se han ido rebotando entre todas las superficies de la sala y que ya no se distinguen como ecos individuales. Es la «cola» sonora que decae después de que la fuente original se ha callado. Eso es lo que solemos llamar «reverberación» en el lenguaje cotidiano.

La medida estándar es el **tiempo de reverberación T_{60}** : el tiempo que tarda el sonido en caer 60 dB después de que la fuente se ha apagado. Cifras típicas:

- Una **catedral grande**: 6 a 10 segundos.
- Una **sala de conciertos sinfónicos**: 1,8 a 2,2 segundos.
- Una **iglesia mediana**: 3 a 5 segundos.
- Un **teatro o auditorio para palabra**: 0,9 a 1,2 segundos.
- Una **habitación normal**: 0,5 a 1 segundo.
- Un **estudio de grabación** bien tratado: 0,2 a 0,4 segundos.

Cada uso pide su tiempo de reverberación. La música sinfónica romántica fue compuesta pensando en salas con T_{60} alrededor de 2 segundos: ese tiempo permite que los acordes se «fundan» entre sí. La música electrónica de club, por contraste, suena bien en espacios más secos donde el ritmo no se emborrona. El canto gregoriano se compuso para catedrales con 6 o 7 segundos: las notas largas se solapan creando una textura ar-

mónica continua que en una sala seca no funcionaría. Y por eso el discurso, que necesita inteligibilidad de las consonantes, se hace muy difícil en una catedral: las consonantes se enmascaran (Tema 3) bajo la cola reverberante de las palabras anteriores.

→ FÓRMULA DE SABINE

$$T_{60} \approx 0,16 \cdot V / A$$

donde V es el volumen de la sala en metros cúbicos y A es la «absorción total» (suma de superficie por coeficiente de absorción de cada material). Lo cualitativo es claro: **salas grandes tienen más reverberación; salas con muchos materiales absorbentes** (cortinas, alfombras, paneles, gente con abrigo) **tienen menos**. Los coeficientes de absorción van desde 0,01 (mármol pulido, casi reflector total) hasta 0,9 (paneles acústicos profesionales, casi absorbente total).

Hay una sutileza importante: el tiempo de reverberación no es el mismo para todas las frecuencias. Los materiales absorben más en unas frecuencias que en otras, así que en la mayoría de salas reales **los agudos se apagan antes que los graves**. Por eso una catedral suena con más «cuerpo» y menos «brillo»: la cola reverberante es predominantemente grave.

La reverberación no es solo un efecto del espacio: es parte del sonido. Los productores de estudio añaden reverberación digital a las grabaciones precisamente porque sin ella un sonido suena «antinatural», «demasiado seco», «sin lugar». Una guitarra grabada con micrófono pegado a las cuerdas, sin reverberación, suena como si flotara en el vacío. Añadirle un poco de reverberación la coloca en un espacio creíble. **El cerebro espera reverberación; cuando no la tiene, lo nota.**

El cerebro que escucha el timbre

Hasta aquí hemos hablado del timbre desde el lado físico. Toda esa física ocurre en el aire, antes de que la onda toque el tímpano. Pero el timbre no existe sin un cerebro que lo procese, y ese procesamiento añade un par de cosas que merece la pena tener delante. Conectan, por cierto, con lo que vimos en el Tema 1: **la música como fenómeno pan-cerebral**, un cerebro protagonista activo de la escucha.

Tu cerebro separa flujos auditivos automáticamente. Imagínate por un momento la situación más cotidiana del mundo: estás en una terraza de la calle Princesa un sábado al mediodía. Suena la música de la cafetería, pasan coches, alguien habla por el móvil en la mesa de al lado, un autobús urbano se detiene a tu derecha, hay un pájaro cantando, tu hijo te está pidiendo algo. Lo asombroso no es que oigas todo eso: es que tu cerebro **lo separa automáticamente en flujos distintos** sin que tengas que hacer nada consciente. El psicólogo cognitivo canadiense **Albert Bregman**, en los años 80, le puso nombre: *análisis de escena auditiva*.

Las pistas que usa el cerebro son cuatro, y todas son indicios perceptivos:

- El **timbre** propiamente dicho (espectro + ADSR + formantes): dos fuentes con timbres distintos tienden a oírse separadas aunque suenen al mismo tiempo y a la misma altura.
 - La **posición espacial**: dos fuentes que llegan al oído desde direcciones distintas se separan más fácilmente. Es uno de los motivos por los que la grabación estéreo nos parece «más natural» que el mono.
 - El **ataque común**: sonidos que empiezan exactamente a la vez tienden a agruparse en un mismo flujo. Si los dos violines de una orquesta atacan una nota a la vez, tu cerebro lo oye como «los violines»; si una llega 30 ms tarde, ya empieza a oírse como dos cosas separadas.
-

- La **armonicidad**: los componentes que comparten una misma fundamental se agrupan automáticamente y se oyen como una sola nota, no como muchos parciales sueltos.

Bregman aplicado al escenario. Para un guitarrista, todo esto es muy práctico. Cuando tocas en una banda, lo que estás haciendo —querámoslo o no— es darle al cerebro del oyente material para que separe tu guitarra del resto. Eso te empuja a buscar voicings que no compitan con el rango del bajo, registros que no choquen con la voz, un timbre con personalidad propia (ecualización, tipo de pulsación, posición de pulsado, efectos) para que tu instrumento se identifique claro y no se mezcle «como barro» con los demás.

El timbre es más rápido que el ritmo. Hay un experimento que conviene conocer porque cambia cómo piensas sobre la importancia relativa de cada componente del lenguaje musical. En 2008, los musicólogos **Robert Gjerdingen y David Perrott** publicaron un estudio en el que reproducían a oyentes habituales fragmentos musicales extremadamente breves —en algunos ensayos, de solo **250 milisegundos**, un cuarto de segundo— y les pedían que clasificaran cada fragmento por estilo: jazz, blues, rock, clásica, country, electrónica, pop latino. El resultado fue contundente: los oyentes acertaban muy por encima del azar.

La pregunta inmediata es: ¿qué demonios se puede procesar en 250 milisegundos? En un cuarto de segundo es imposible procesar ritmo (apenas hay tiempo para un solo pulso), imposible procesar armonía, imposible procesar melodía. **Lo principal que el cerebro puede analizar en ese tiempo es el TIMBRE.** Lo que está usando el oyente para acertar el estilo es, sobre todo, la mezcla concreta de timbres característicos de cada género.

La implicación para tu música. Tu oyente te identifica como «guitarrista de jazz», «guitarrista de blues» o «guitarrista de funk» antes de que toques cuatro compases. Lo hace en una fracción de segundo, antes de que la música haya tenido tiempo de «decir» nada estructuralmente. La identidad sonora de tu música está, en una parte enorme, **en los detalles tímbricos:** calidad y tipo de cuerdas, posición de pulsación, ecualización, amplificación, micros, espacio de grabación, efectos. Cuidar el timbre no es un lujo de productor: es probablemente el factor que más rápidamente comunica tu propuesta estilística al oyente.

Y todo esto, ya lo habrás visto venir, encaja perfectamente con el principio holístico del libro y con lo que dijimos en el Tema 1: **la música no vive solo en las ondas que se propagan por el aire, vive en el cerebro que las procesa.** El timbre, que parecía una propiedad del instrumento, resulta ser también una propiedad del modo en que tu cerebro hace análisis de escena auditiva. La física pone el material; el cerebro lo organiza.

Recap

Lo que has visto en este tema

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

01

Una cuerda fija en sus extremos solo puede vibrar en una serie discreta de **modos propios:** la fundamental (que percibimos como altura) y sus armónicos (múltiplos enteros). En la cuerda real vibran todos a la vez, superpuestos. La frecuencia fundamental depende de longitud, tensión y masa por unidad de longitud según $f_1 = (1/2L) \cdot \sqrt{(T/\mu)}$.

02 **Dónde y con qué pulsas la cuerda** cambia profundamente el espectro: cerca del puente despiertas más armónicos altos (sonido brillante), cerca del traste 12 los atenúas (sonido dulce). El tipo de pulsación (uña, yema, púa) modifica también el espectro. El timbre no es solo «el instrumento»: es también cómo lo tocas.

03 En tubos de viento, las condiciones de contorno cambian según los extremos sean abiertos o cerrados. Un **tubo cerrado** en un extremo suena una octava más bajo y **solo produce armónicos impares**: por eso el clarinete suena tan distinto a la flauta.

04 El **teorema de Fourier** afirma que cualquier vibración periódica se puede descomponer en una suma de tonos puros con frecuencias múltiplos enteros de la fundamental. Esa descomposición es el **espectro**, el DNI tímbrico de la nota. Más energía en armónicos altos = sonido más brillante; menos = más cálido.

05 El **marco de John Grey (1977)** reduce el timbre a tres dimensiones perceptivas: brillo (presencia de armónicos altos), carácter del ataque (cómo arranca la nota) y evolución espectral (cómo cambia el espectro mientras suena).

06 El timbre no es solo el espectro estático. Es también la evolución temporal de la nota (**ADSR**: ataque, decaimiento, sostenido, relajación) y las resonancias del cuerpo del instrumento (**formantes**), que actúan como filtro espectral. Las tres componentes juntas son lo que hace que reconozcas a Rosalía con tres sílabas.

07 La **reverberación** es la cola sonora de las reflexiones del entorno, separable en reflexiones tempranas (primeros 50-80 ms) y cola difusa. Cada uso musical pide su tiempo de reverberación característico (catedral 6-10 s, sala sinfónica 2 s, estudio 0,3 s). La fórmula de Sabine $T_{60} \approx 0,16 \cdot V/A$ relaciona ese tiempo con el volumen y la absorción total.

08

El cerebro no es un receptor pasivo del timbre: hace **análisis de escena auditiva** (Bregman) usando timbre, posición espacial, ataque común y armonicidad; y **reconoce estilos musicales en 250 ms** (Gjerdingen y Perrott, 2008) basándose principalmente en el timbre. La identidad sonora de tu música está, en una parte enorme, en los detalles tímbricos antes que en las notas que tocas.

Práctica

Para probar en casa

Cuatro experimentos cortos para aterrizar conceptos:

01

La excitación cambia el sonido

Pulsa la sexta cuerda al aire (Mi grave) en tres puntos distintos: **muy cerca del puente**, en una **posición intermedia** (sobre la pastilla central, o la boca acústica), y por último **cerca del traste 12**. Notarás tres timbres muy distintos del mismo Mi: brillante cerca del puente, equilibrado en medio, dulce cerca del 12. Lo que ha cambiado no es la nota: es la receta de armónicos que has despertado. Si quieres llevarlo más lejos, repite con uña, yema y púa. Y para terminar, apoya muy suavemente el dedo sobre la cuerda exactamente en el traste 12 y púlsala: oirás un Mi una octava más arriba con un timbre limpio y casi flautado. Lo que has hecho es forzar a la cuerda a vibrar solo en su segundo modo.

02

Recortar el ataque de un sonido

Graba en Audacity una sola nota larga de tu guitarra (al menos cuatro segundos). En el editor, selecciona aproximadamente los primeros 50-100 ms del sonido (donde está el ataque) y bórralo, dejando solo la parte sostenida y la cola. Escucha lo que queda: el sonido pierde gran parte de su identidad como guitarra, suena más a «cuerda en general» o incluso a «órgano». Sin el ataque, el cerebro pierde una parte enorme de la información que usa para identificar el instrumen-

to. Es la prueba en directo de que el timbre vive también en el tiempo.

03

Estimar la reverberación de un espacio

Da una palmada fuerte y seca en distintos espacios y escucha la cola. En un salón normal apenas oyes el «tail»; en un baño con azulejos, el sonido tiene una pequeña cola brillante; en un portal vacío con mármol, una cola larga y reflectante; en una iglesia, varios segundos. Si quieres ser más cuantitativo, graba la palmada con la app de notas de voz del móvil y mira la cola en la forma de onda: el tiempo desde el pico hasta que el sonido se confunde con el ruido de fondo es una estimación grosera del T_{60} .

04

Reconocer un estilo en 250 milisegundos

Abre Audacity y carga cinco o seis canciones de estilos muy distintos (jazz, rock pesado, pop electrónico, clásica orquestal, flamenco, reggaetón). De cada una, extrae un fragmento muy corto de aproximadamente 250 ms. Reproduce los seis en orden aleatorio sin saber cuál es cuál, intentando identificar el estilo. Acertarás más de lo que tu intuición predice. Estás replicando en pequeño el experimento de Gjerdingen y Perrott: tu cerebro reconoce el estilo basándose en el timbre, mucho antes de que haya tiempo para procesar ritmo, melodía o armonía.

Glosario

Glosario rápido del tema

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

TÉRMINO	DEFINICIÓN
 Onda estacionaria	Vibración atrapada entre dos puntos fijos, con un patrón espacial estable de nodos y vientres.

• Nodo	Punto que permanece en reposo en una onda estacionaria.
• Vientre	Punto de máxima oscilación en una onda estacionaria.
• Modo de vibración	Forma específica en la que un sistema vibrante puede oscilar cumpliendo sus condiciones de contorno.
• Condiciones de contorno	Restricciones físicas en los extremos de un sistema vibrante que determinan qué modos son posibles.
• Resonancia	Respuesta amplificada de un sistema cuando se le estimula a una frecuencia cercana a uno de sus modos propios.
• Fundamental	El modo de vibración más bajo en frecuencia. Asociada a la altura percibida.
• Armónicos	Modos superiores cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la fundamental.
• Parciales	Componentes de un espectro real, exactamente armónicos o ligeramente desplazados (inarmonicidad).
• Densidad lineal (μ)	Masa por unidad de longitud de una cuerda. A mayor densidad, fundamental más grave.
• Tubo abierto	Tubo con ambos extremos abiertos. Produce serie completa de armónicos. $L = n \cdot (\lambda/2)$.

• Tubo cerrado	Tubo con un extremo cerrado y otro abierto. Solo armónicos impares, octava más bajo. $L = n \cdot (\lambda/4)$ con n impar.
• Nodo de presión	Punto donde la presión del aire apenas oscila (típico de extremos abiertos).
• Vientre de presión	Punto donde la presión del aire oscila con máxima amplitud (extremos cerrados).
• Teorema de Fourier	Cualquier vibración periódica se descompone en suma de tonos puros con frecuencias múltiplos enteros de la fundamental.
• Espectro	Distribución de los armónicos presentes en un sonido y la intensidad relativa de cada uno. DNI tímbrico de la nota.
• Marco de Grey (1977)	Clasificación divulgativa del timbre en tres dimensiones perceptivas: brillo, carácter del ataque y evolución espectral.
• Brillo	Cualidad tímbrica asociada a la presencia relativa de energía en armónicos altos.
• Carácter del ataque	Cómo arranca la nota (brusco, progresivo, ruidoso, limpio). Segunda dimensión del marco de Grey.
• Evolución espectral	Cómo cambia el espectro a lo largo de la nota. Tercera dimensión del marco de Grey.
• Señal periódica	Vibración que se repite en el tiempo siguiendo un patrón fijo. Produce altura definida.

• Señal aperiódica	Vibración sin patrón repetitivo. Percibida como ruido sin altura asociada.
• ADSR	Modelo de la evolución temporal de una nota: ataque, decaimiento, sostenido y relajación.
• Ataque	Fase inicial de una nota, desde el silencio hasta su pico. Contiene gran parte de la información tímbrica.
• Decaimiento	Caída desde el pico inicial al nivel sostenido (o al silencio, en guitarra y piano).
• Sostenido	Fase central donde la nota se mantiene. Solo en instrumentos con fuente continua (viento, arco, órgano).
• Relajación	Fase final, cuando se interrumpe la fuente y la nota se apaga.
• Transitorios	Variaciones rápidas y aperiódicas durante el ataque (ruido del rasgueo, del aire, del macillo).
• Formante	Frecuencia de resonancia del cuerpo del instrumento o tracto vocal. Refuerza ciertos armónicos del espectro.
• Tracto vocal	Conjunto de cavidades (garganta, boca, senos nasales) que actúan como resonador en la voz humana.
• Singer's formant	Cuarto formante reforzado alrededor de 3 kHz que las sopranos profesionales desarrollan para audibilidad orquestal.

• Inarmonicidad	Pequeño desvío de los armónicos de una cuerda real respecto a los múltiplos enteros exactos, por su rigidez.
• Stretch tuning	Técnica de afinación de pianos que compensa la inarmonicidad afinando graves más bajos y agudos más altos.
• Reflexiones tempranas	Primeras reflexiones tras el sonido directo (50-80 ms). Construyen la sensación de espacio.
• Cola difusa	Densidad alta de reflexiones posteriores indistinguibles. Es la «reverberación» en sentido cotidiano.
• T₆₀ (tiempo de reverberación)	Tiempo que tarda el sonido en caer 60 dB tras detenerse la fuente.
• Coeficiente de absorción	Medida (0 a 1) de cuánta energía sonora absorbe un material. 0 = reflector, 1 = absorbente total.
• Fórmula de Sabine	$T_{60} \approx 0,16 \cdot V/A$. Relaciona el tiempo de reverberación con el volumen y la absorción total de la sala.
• Análisis de escena auditiva	Mecanismo perceptivo (Bregman) por el que el cerebro separa fuentes sonoras usando timbre, posición, ataque común y armonicidad.
• Flujo auditivo	Una de las «voces» o fuentes que el cerebro identifica como entidad separada dentro de una escena sonora compleja.



@sonidopropio ·
sonidopropio.com

Tema 4 · v11

🕒 Última edición: jun 2026