

# 1. Principios de acústica

## 1.1. Introducción

Aunque se puede hacer música sin tener demasiados conocimientos de acústica, parece imposible comprender lo que es el sonido digital si no se tiene una idea de lo que es *el sonido* en general. Por ello, este capítulo describe de forma básica los aspectos físicos y matemáticos de las ondas sonoras que, junto con sus consecuencias psicológicas, son la base de toda experiencia musical. Empecemos pues por el principio.

## 1.2. ¿Que es el sonido?

Lo que entendemos por sonido es fruto de una compleja interacción entre un objeto vibrante, un medio transmisor (frecuentemente el aire), el oído, y el cerebro. Para que la vibración sea audible para un ser humano, este objeto debe oscilar aproximadamente entre 20 y 20.000 veces por segundo. Al oscilar, el objeto desplaza el aire que lo rodea, comprimiendo y descomprimiendo periódicamente las moléculas que lo integran, y modificando por consiguiente la presión del aire de forma periódica. Dado que las moléculas desplazadas van empujando a las contiguas, la variación periódica de la presión se propaga originando lo que recibe el nombre de *ondas sonoras*. Cuando las ondas llegan al oído, el cerebro interpreta estas variaciones de presión como *sonido*. Si la presión del aire que circunda el oído se mantiene constante, no oímos nada, u “oímos el silencio”.

Las ondas sonoras se propagan en el espacio, formando invisibles esferas centradas en el objeto que oscila. Conforme aumenta la distancia al origen y el radio de estas ondas, aumenta también el volumen y la masa de aire que éstas deben desplazar, por lo que las oscilaciones se hacen cada vez más débiles (la presión del aire varía cada vez menos, aunque siga haciéndolo con la misma frecuencia) hasta que, a una cierta distancia, se tornan imperceptibles.

Este principio es válido independientemente del objeto oscilador, que puede ser por ejemplo una cuerda (guitarras, violines, pianos, cuerdas vocales, etc.), una columna de aire semicerrada y excitada por una caña o una boquilla (saxofones, flautas, trompetas, órganos, etc.), una pieza de madera, metal, piel, piedra, etc. golpeada (percusiones), o un cono de papel (altavoces). En muchos casos, los objetos que entran en vibración son en realidad varios, como es el caso de la guitarra (o de la voz) donde lo que oímos es la suma de las vibraciones de las cuerdas y de la caja.

Asimismo, cuando estas ondas encuentran un obstáculo, parte de las moléculas que las componen son absorbidas por el material, mientras que las restantes son reflejadas. Este fenómeno origina que en la mayoría de los casos, lo que nos llega al oído sea una suma del sonido directo combinado con múltiples reflexiones de este sonido, ligeramente retardadas<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> El tiempo de estos retardos será proporcional a la distancia adicional recorrida, teniendo en cuenta que la velocidad del sonido en el aire, es de aproximadamente 344 m/s.

### 1.3. Características de los sonidos musicales

Para describir un sonido musical se utilizan tres términos: altura, timbre e intensidad. Todo sonido tiene una duración y, a lo largo de ésta, cualquiera de estos tres parámetros puede variar (los sonidos naturales jamás son perfectamente estables o constantes).

#### 1.3.1. La altura y la frecuencia

La altura está directamente relacionada con la frecuencia de la oscilación, pero ambos términos no son sinónimos. De hecho, muchos sonidos (como los percusivos) no tienen una altura definida. El motivo de esta aparente paradoja es que, mientras la frecuencia es una propiedad física indisoluble de todo aquello que, como el sonido, vibra u oscila, la altura es una cualidad subjetiva que percibimos sólo en algunos sonidos<sup>2</sup>. Si golpeamos, por ejemplo, un bombo o un platillo, podremos sin duda afirmar que el platillo suena más agudo que el bombo, pero no podremos decir si estos sonidos correspondían a un Do o a un La.

¿Que es lo que hace que un sonido posea o no una altura clara? Básicamente, su periodicidad. Es necesario que un sonido sea aproximadamente periódico, es decir que su frecuencia de oscilación no varíe (o varíe poco) dentro de un determinado lapso de tiempo, para que lleguemos a percibir una altura. En una escala temporal mayor, la frecuencia sí que puede variar, y en este caso, lo que percibiremos son alturas variables en el tiempo.

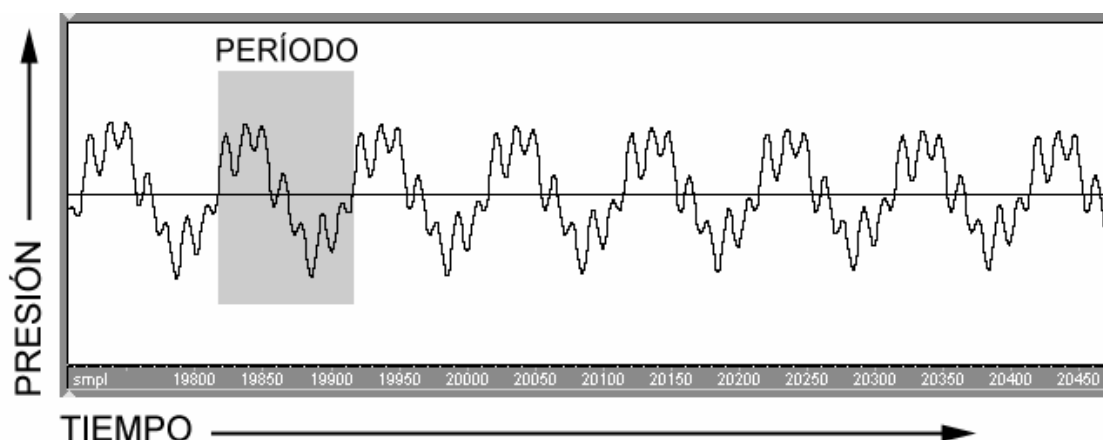


Figura 1.1. Variación de la presión en función del tiempo en un sonido periódico

En la figura 1.1 se muestra un sonido periódico, ya que la forma de la onda se repite claramente. La frecuencia de este sonido vendrá dada por el tiempo que dura este período, ya que ambas magnitudes son inversas. Si este período durase por ejemplo una centésima de segundo, su frecuencia sería de 100 Hz<sup>3</sup>.

<sup>2</sup>Por este motivo hemos añadido el epíteto "musicales", en el título de este apartado. Eso no significa que estos sonidos sean los únicos válidos para hacer música, y la percusión es un claro ejemplo de ello.

<sup>3</sup>El Hz o hertzio es la magnitud física que mide la frecuencia, e indica el número de veces por segundo que se repite determinado fenómeno.

### 1.3.2. La octava y las notas

Un fenómeno muy importante relacionado con la apreciación de las alturas, es el de la octava. Si escuchamos dos sonidos cuyas frecuencias guardan una relación de 2:1 (por ejemplo 400 Hz y 200 Hz), nos sonarán muy cercanos. El motivo es que entre los dos dista exactamente una octava. Dado que cada vez que se dobla la frecuencia se sube una octava, un sonido de 880 Hz estará dos octavas por encima de uno de 220 Hz. Esta idea de octava se repite en casi todas las culturas, a lo largo de la historia. Lo que sí varía enormemente de una cultura a otra es el número de subdivisiones que se aplican a la octava.

En la música occidental, la octava se divide en doce alturas o semitonos, de las cuales siete tienen “nombre propio” y corresponden a las teclas blancas de un piano. Las cinco restantes (que corresponden a las teclas negras) pueden tomar el nombre de la inmediatamente anterior, en cuyo caso se les añade el símbolo # (sostenido), o de bien la posterior, en cuyo caso se les añade el símbolo b (bemol). De esta forma las doce notas de una octava pueden nombrarse de dos maneras diferentes (“do, do#, re, re#, mi, fa, fa#, sol, sol#, la, la# y si”, o bien “do, reb, re, mib, mi, fa, solb, sol, lab, la, sib y si”). En la nomenclatura sajona las notas se designan mediante letras mayúsculas, de acuerdo con la siguiente equivalencia (que conviene tener presente, dado que, como se verá en la segunda parte de este libro, los programas MIDI la utilizan profusamente)<sup>4</sup>.

Do	Re	Mi	Fa	Sol	La	Si
C	D	E	F	G	A	B

Conviene indicar que antes de J.S.Bach (siglo XVIII), la división de la octava se basaba en las teorías del filósofo griego Pitágoras, según la cual los intervalos formados por cada nota y la siguiente no eran siempre idénticos. Para simplificar la construcción de instrumentos, en el siglo XVIII se decidió dividir la octava en doce partes iguales, por lo que actualmente, la relación de frecuencias entre cualquier nota y la siguiente es siempre igual a  $2^{1/12}$  (1.05946). De esta forma, al avanzar doce semitonos (una octava), obtenemos un factor de  $(2^{1/12})^{12}$  que es efectivamente igual a 2.

### 1.3.3. El timbre y los armónicos

El timbre podría definirse como el "color" de un sonido, y es lo que nos ayuda a caracterizar y distinguir diferentes tipos de instrumentos, o a reconocer a las personas por su voz. Un La de 440 Hz en una clarinete suena diferente que el mismo La en un saxo; aunque ambos tienen la misma altura, sus timbres no son iguales. La figura 1.2, que muestra fragmentos de estos dos sonidos, junto con un tercer fragmento correspondiente a onda sinusoidal pura de la misma altura, nos puede ayudar a comprender la naturaleza física del timbre. En los tres fragmentos, el período es el mismo (pues tienen la misma altura), pero sus formas son diferentes.

---

<sup>4</sup> En el apéndice B se indican las frecuencias de todas las notas MIDI, y se puede observar como efectivamente, estas frecuencias se duplican en cada nueva octava.

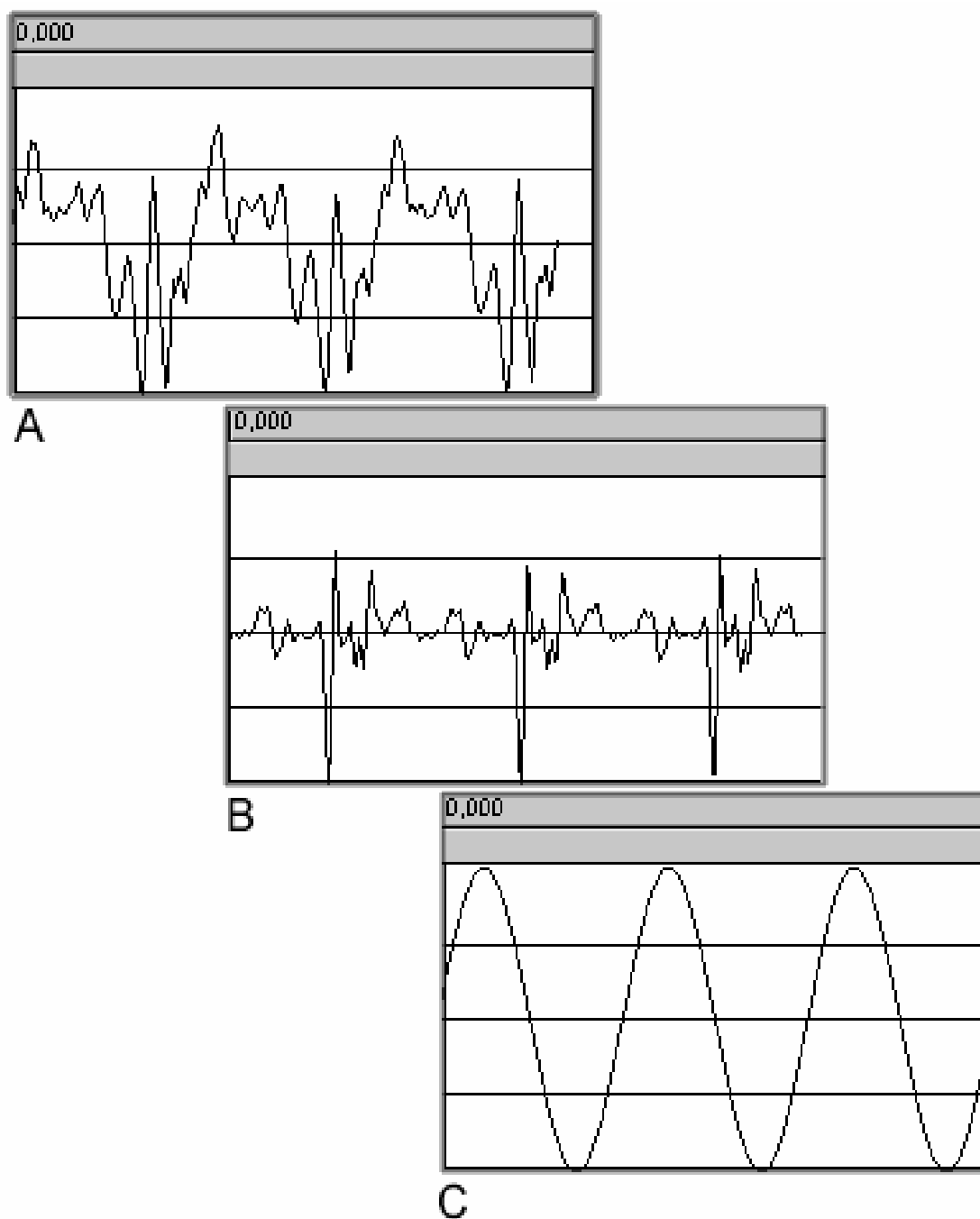


Figura 1.2. Fragmentos de tres sonidos de la misma altura (La de 440 Hz) en un clarinete (a), un saxofón (b) y una onda sinusoidal pura (c)

El motivo de esta diferencia de forma, es que las ondas de los sonidos naturales son más complejas porque vibran con varias frecuencias simultáneas. En la naturaleza no se encuentran sonidos puros con una sola frecuencia, como el de la figura 1.2.c; éstos sólo son obtenibles por medios electrónicos.

En los sonidos naturales, la frecuencia de vibración más grave es la que determina normalmente el período y la altura, y se denomina *frecuencia base*. Las restantes frecuencias, que suelen ser múltiplos de la frecuencia base se denominan *armónicos*, y cada tipo de instrumento tiene, por su construcción, una serie diferente de armónicos de amplitudes diferentes, que son los que definen su timbre y otorgan las "señas de identidad" al instrumento.

Las matemáticas relacionadas con este concepto, fueron establecidas en el siglo XIX por el físico Jean-Baptiste Fourier, que descubrió que toda señal periódica, por compleja que esta sea, puede descomponerse como una suma de señales sinusoidales armónicas, es decir de frecuencias múltiplos de la original. En la figura 1.3 se muestra la descomposición de una onda periódica (d) en sus varias ondas sinusoidales simples armónicas, de amplitudes diferentes. Dicho de otro modo, la señal d es la resultante de sumar de las señales a, b y c.

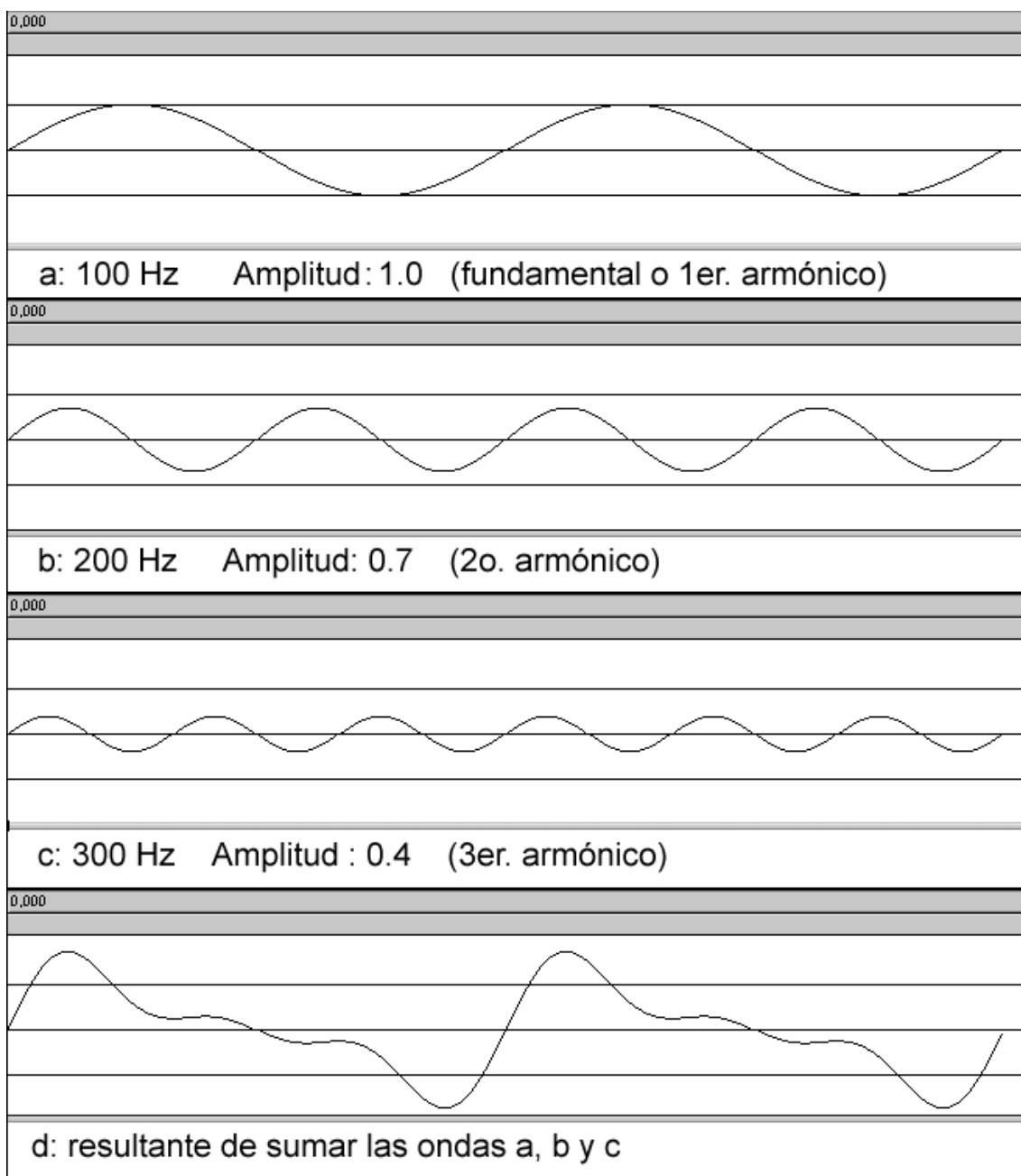


Figura 1.3. Descomposición de Fourier de una señal periódica en varias señales sinusoidales

Cuando el sonido no es periódico, su descomposición no puede llevarse a cabo mediante frecuencias múltiplos por lo que los factores dejan de ser números enteros. En estos casos tenemos sonidos inarmónicos, en los cuales se hace difícil apreciar una altura precisa.

### 1.3.4. La intensidad y los decibelios

Si la altura viene determinada por el número de oscilaciones por unidad de tiempo, la intensidad depende del cuadrado de la amplitud de estas oscilaciones, o la diferencia entre las presiones máxima y mínima que la onda puede alcanzar. La percepción de la intensidad sonora es, en realidad, un fenómeno auditivo muy complejo, mucho más que el de la altura, y lo que sigue es una inevitable simplificación.

Las intensidades de diferentes sonidos pueden variar, aunque parezca increíble, en varios millones de órdenes de magnitud (es decir, el sonido más intenso que podamos oír, lo será varios millones de veces más, que el más tenue). Por ello, la intensidad se mide en una escala logarítmica, los decibelios (dB), de acuerdo con la siguiente fórmula

$$\text{Nivel de intensidad en decibelios (dB)} = 10 \times \log_{10} (\text{amplitud}^2 / \text{amplitud referencia}^2)$$

Esta expresión determina un nivel o diferencia de intensidad entre dos amplitudes. El origen (0 dB) corresponde al umbral de audición (mínimo sonido audible). Por debajo de este valor tenemos el auténtico silencio, aunque en el mundo en que vivimos la experimentación del silencio se hace francamente difícil, por lo que muchos de nosotros probablemente no lleguemos a conocer nunca el significado real de esta palabra. Por encima de los 130 dB se produce una sensación dolorosa. Valores superiores prolongados llegan a destrozar el tímpano. En la tabla 1.1 siguiente se muestran algunos valores típicos.

Descripción	Nivel (dB)	Relación de intensidad
Despegue de cohete espacial	190	10 <sup>19</sup>
Despegue de un reactor	150	10 <sup>15</sup>
Umbral de dolor	130	10 <sup>13</sup>
Concierto de heavy metal	120	10 <sup>12</sup>
Martillazos sobre una plancha metálica (a 50 cm)	110	10 <sup>11</sup>
Tráfico en calle concurrida	70	10.000.000
Conversación normal (a 1 m)	60	1.000.000
Restaurante concurrido	50	100.000
Casa en la ciudad	40	10.000
Iglesia vacía	30	1.000
Estudio de grabación	20	100
Umbral de audición	0	1

Tabla 1.1. Ejemplos de niveles sonoros en dB.

He aquí algunas consideraciones adicionales:

- El oído no es normalmente capaz de distinguir diferencias inferiores a 3 dB.
- La intensidad de un sonido decrece aproximadamente en 6 dB cada vez que se dobla la distancia.

### 1.3.5 El rango dinámico

La diferencia entre los valores mínimos y máximos en dB, que un sistema puede producir se denomina *rango dinámico*. En la tabla 1.2 se indican algunos valores típicos.

Clarinete	86
Piano	94
Disco compacto	96
Trombón	107
Orquesta sinfónica	120

Tabla 1.2. Varios ejemplos de rangos dinámicos (en dB).

En la mayoría de dispositivos de audio (amplificadores, pletinas de casete, reproductores de compactos, altavoces, etc.) este valor figura entre las especificaciones técnicas, como rango dinámico o relación señal/ruido<sup>5</sup>. En un aparato electrónico, el rango dinámico indica la diferencia entre el nivel máximo que el dispositivo puede emitir, y el nivel del ruido existente cuando no hay señal (el ruido de fondo). Cuanto mayor sea esta diferencia, más limpio será el sonido del dispositivo. En una cadena de varios dispositivos de audio (emisor, amplificador, altavoces, etc.) el valor real, es decir el máximo rango dinámico que podremos llegar a apreciar, corresponderá al del dispositivo con peores características.

En aparatos de cierta calidad, este valor suele estar comprendido entre los 80 y los 95 dB. Tal como se indica en la tabla 1.2, en los reproductores de compactos, y en cualquier otro dispositivo de sonido digital de 16 bits, este valor no podrá nunca ser superior a 96 dB (en el próximo capítulo explicaremos la razón), pero incluso pocas veces se alcanza este máximo teórico, ya que la circuitería analógica presente en el dispositivo tiende a añadir ruido.

## 1.4. El sonido analógico

Hasta la aparición de los ordenadores, el sonido se grababa siempre de forma analógica. Pero ¿qué significa exactamente este término?

El término *analógico* se utiliza actualmente en contraposición a *digital*. Las señales analógicas son funciones de variables continuas (frecuentemente del voltaje) cuyas evoluciones temporales imitan (son una *analogía* de) las señales originales. La representación gráfica de un sonido grabado analógicamente tendrá aproximadamente la misma forma que el sonido original, pero la curva indicará variaciones de voltaje, en lugar de variaciones de presión de aire. Estas nuevas señales analógicas se obtienen por medio de transductores, término con el que se designa a todo dispositivo capaz de convertir una magnitud física en otra.

El micrófono y los altavoces son los dos transductores básicos utilizados en la grabación y reproducción del sonido. En primer lugar, el micrófono convierte la variación de la presión de

---

<sup>5</sup> Aunque ambos términos no son exactamente idénticos, de momento podemos obviar la diferencia.

aire ejercida sobre su membrana, en una señal de voltaje variable en el tiempo. Este voltaje puede ser grabado, utilizando diferentes tecnologías, sobre una cinta magnética o en los surcos de un disco de vinilo. Cuando deseamos reproducir el sonido, la señal eléctrica generada por el cabezal de la pletina o la aguja del tocadiscos, es amplificada y enviada a los altavoces, donde un nuevo transductor la convierte en un campo magnético capaz de desplazar y de hacer oscilar (con las frecuencias originales) los conos de papel de los altavoces. Conviene resaltar que aunque la grabación se realice digitalmente, tal como se describe en el próximo capítulo, “Principios de sonido digital”, se seguirán llevando a cabo las transducciones analógicas en el micrófono y en los altavoces. En la figura 1.4 se esquematizan los dos procesos de grabación alternativos.

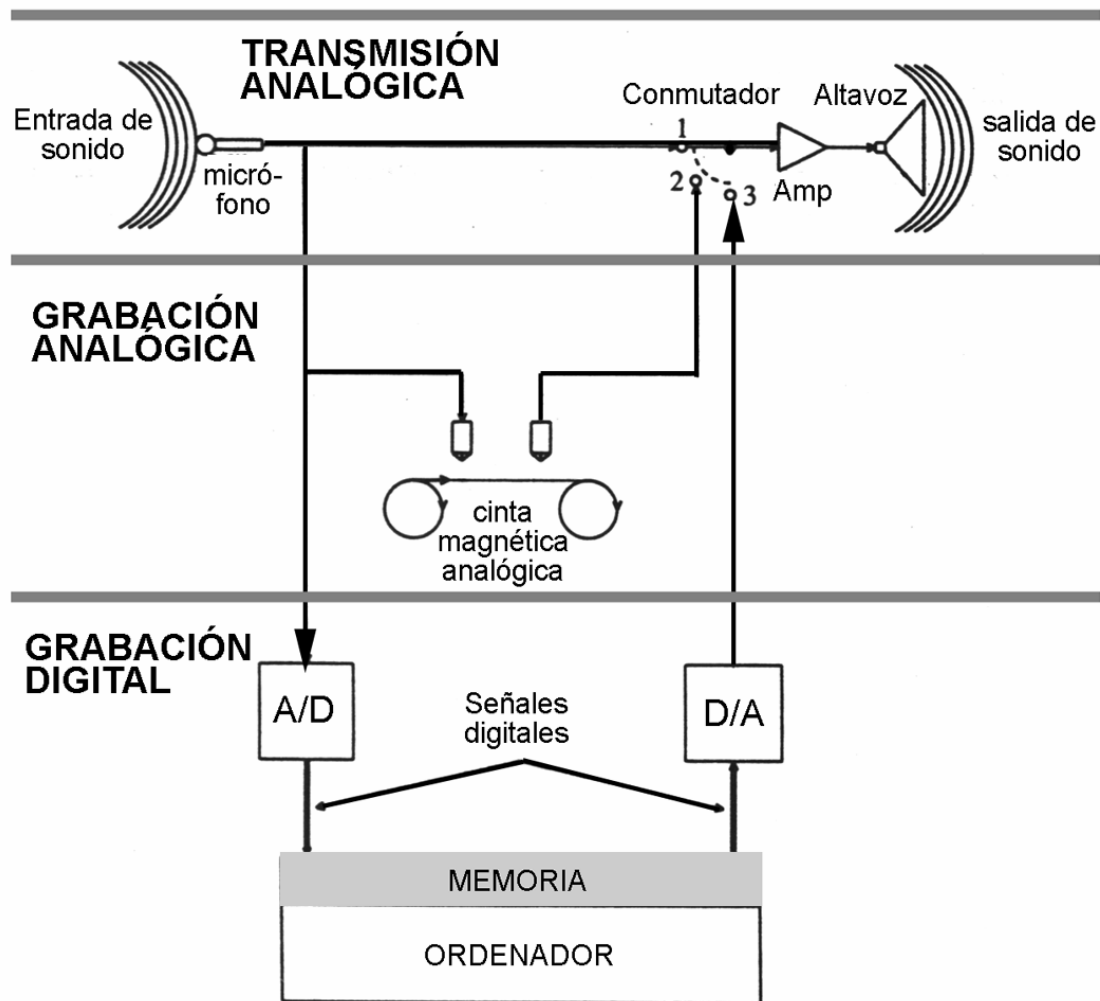


Figura 1.4. Esquema de los procesos de grabación analógica y digital

Al contrario de lo que opina la mayoría, una grabación analógica no tiene por qué sonar peor que una grabación digital (en condiciones óptimas, suena de hecho mejor). Sus inconvenientes radican en que la señal analógica se degrada mucho más rápidamente (las cintas magnéticas se desmagnetizan, y los surcos en el vinilo se desgastan), y que en cada nueva generación se produce una pequeña pero inevitable pérdida, de forma que, a cada nueva copia, la señal se parece cada vez menos a la original.



Por estas razones el sonido digital ha tomado definitivamente el relevo del analógico. Al margen de la discutible cuestión de la calidad, en este libro se verá porque el sonido digital aporta un sinfín de nuevas y excitantes posibilidades en la manipulación, creación y experimentación sonoras.