

SONIDO Y AUDIO DIGITAL

PRINCIPIOS DE ACÚSTICA MUSICAL

Características del sonido:

El sonido, como bien sabemos, es lo que percibimos a través de nuestros oídos. Esta percepción se debe a que la masa de aire que nos rodea está vibrando. Vibrar significa que esta masa de aire se desplaza con un movimiento muy pequeño de vaivén, en un sentido y en otro, rápidamente y en forma periódica. El hecho que el movimiento sea periódico significa que este mismo movimiento de vaivén se repite constantemente en el tiempo. Al movimiento elemental que se repite en el tiempo se le llama ciclo. Entonces, el sonido es la vibración del aire percibida por nuestros oídos. Según veremos luego, no todas las vibraciones se manifiestan en forma de sonido en nuestros oídos.

Antes de seguir adelante veamos algunos ejemplos de movimientos periódicos o vibratorios.

·Un motor de automóvil funciona porque en su interior se produce una sucesión de explosiones continuas que, al expandirse, empujan un mecanismo que gira. Estas explosiones suceden a intervalos de tiempo regulares formando una vibración que percibimos como sonido. En este caso cada vuelta del motor es un ciclo elemental del movimiento vibratorio. Podemos incluso observar que a medida que aceleramos, el sonido es más agudo, pues aumenta la cantidad explosiones que se producen en el tiempo o, de otra forma, la cantidad de ciclos por cada unidad de tiempo.

·Si pulsamos la cuerda de una guitarra, esta se desplaza rápidamente en un sentido y en otro reiteradas veces produciendo una vibración que percibimos como sonido.

·Una aspiradora eléctrica tiene en su interior un motor que gira a velocidad constante y produce por lo tanto una vibración que también percibimos como sonido. En este último caso, el motor hace vibrar las partes metálicas y plásticas que lo rodean y estas, a la vez, comunican esa vibración al aire.

Al sistema o aparato que vibra se le llama fente sonora. En los ejemplos dados serían los motores del automóvil y la aspiradora y la cuerda de guitarra. La fuente, al vibrar, hace vibrar al aire que la rodea de la misma manera y éste, al tomar contacto con el tímpano de nuestros oídos, lo hace vibrar también, dándonos la sensación de sonido. Por esta simple razón, en ausencia de aire no hay sonido. Quiere decir esto que entre la fuente sonora y nuestros oídos tiene que haber un "medio" que vibre y se encargue de transportar las vibraciones de la fuente hasta los oídos. En el caso más común este medio de conducción es el aire, sin embargo podría ser agua, metal, madera, etc. En un ambiente que no contiene materia alguna (vacío) el sonido no se propaga y por lo tanto, no existe.

El sonido se estudia a través de sus tres cualidades fundamentales que son: altura, intensidad y timbre.

Altura:

La altura es la propiedad del sonido por la cual podemos distinguir distintos tonos, esto es, entre grave y agudo. Un LA 4 es más agudo que un RE 3 y por lo tanto decimos que la altura del LA 4 es mayor que la del RE 3. El parámetro físico relacionado con la altura del sonido es la FRECUENCIA. La frecuencia se mide en ciclos por segundo¹ y la unidad adoptada se llama HERTZ (se suele abreviar Hz.). Entonces, por ejemplo, si una fuente sonora (cuerda de guitarra, etc.) describe 440 ciclos completos en un segundo de tiempo, producirá un sonido de 440 Hertz. Un ciclo completo del movimiento de la cuerda cuando vibra es el desplazamiento que va desde la posición de reposo (antes de que se pulse) luego hacia abajo, hacia arriba (pasando por la posición de reposo) y por último hasta la posición de reposo. Este es el movimiento elemental que al repetirse rápidamente en el tiempo produce sonido. Si a la misma cuerda la llevamos lentamente con los dedos describiendo el mismo desplazamiento no producirá sonido, pues si bien el desplazamiento es igual, el movimiento no es periódico porque no se repite en el tiempo a una frecuencia dada. La altura o frecuencia del sonido que produce la cuerda dependerá de su espesor, el material con que está construída, la longitud y la tensión a la que está sometida. Por esta razón, dado que el espesor y el material de las cuerdas no podemos modificarlos, una guitarra se afina estirando más o menos sus cuerdas con el clavijero y se logran distintos tonos variando la longitud de las mismas al pisarlas entre los trastes.

Intensidad:

La intensidad del sonido es lo que percibimos como volumen. Un sonido más intenso suena más fuerte que otro con menos intensidad. En este caso, el parámetro físico relacionado es la presión acústica, que es la presión que ejerce el aire en vibración sobre nuestros oídos. Volviendo al ejemplo de la guitarra, la intensidad

¹Ciclos por segundo se refiere a la cantidad de ciclos que se producen en un segundo de tiempo.

del sonido que produce una cuerda, dependerá de la fuerza con la que se la pulse, lo que determina mayor o menor amplitud en el movimiento.

La unidad de medida de la intensidad del sonido adoptada universalmente es el DECIBEL. Para medir la intensidad del sonido en decibeles se utiliza un nivel de referencia que es el nivel de presión sonora más pequeño que el oído puede percibir. Entonces, el decibel es una medida "relativa" a este nivel de referencia e indica cuanto más fuerte o intenso es el sonido que se está midiendo respecto al nivel de referencia elegido.

El decibel no representa una relación lineal como sucede con los metros, los gramos, etc., en donde una longitud el doble de grande mide el doble de metros, etc. La relación entre el nivel de presión de referencia y el nivel de presión medido es logarítmica. Esto quiere decir que el decibel se define como el logaritmo de tal relación², esto hace que a cada aumento de 6 dB, el nivel de presión se duplica. Por ejemplo: si a un nivel de 20 dB le corresponde un nivel de presión de 100, a un nivel de 26 dB le corresponderá un nivel de presión de 200. Como puede verse, solo se aumentaron 6 dB y el nivel de presión se duplicó. Por esta razón, hay que tener en cuenta, y sobre todo en niveles grandes de intensidad, que la presión real sobre nuestros oídos se duplica cada 6 unidades de aumento expresadas en dB. Por ej., 114 dB de intensidad pueden ser escuchados casi sin problemas por el oído, sin embargo a 120 dB ya hay sensación de dolor y es porque la presión sonora real sobre los oídos se ha duplicado al aumentar el nivel en 6 dB (de 114 a 120 dB).

El decibel da lugar a veces a confusiones porque se utiliza también para medir señales eléctricas. Este es el caso de los medidores de volumen (vúmetros) que se encuentran en los equipos de audio. Aquí, la referencia es generalmente una señal eléctrica de 1 volt o 0,75 volts. Cuando la señal a medir es menor que la de referencia (menor que 1 o 0,75 volts según el caso) los decibeles son negativos; cuando es igual indican 0 dB y cuando es mayor los decibeles son positivos. El siguiente ejemplo muestra la equivalencia entre volts y decibeles con un nivel de referencia de 1 volt:

Señal medida, en volts	... 0,2 0,4 0,6 0,8 1 1,2 1,4 1,6	volts
Señal expresada en dB	... -14 -8 -4 -2 0 +1,6 +3 +4	dB

Para distinguir a los decibeles acústicos de los eléctricos se suele usar un subíndice con las letras SPL que significan en inglés Nivel de Presión Acústica (Sound Pressure Level). Debido a esta doble función de los decibeles conviene siempre aclarar si se está midiendo nivel de sonido acústico o una señal eléctrica relativa a ese sonido, que sería el caso del medidor de un equipo de audio.

Para ubicarnos un poco veamos la intensidad medida en decibeles (dB SPL) de algunos sonidos y ruidos conocidos:

· Habitación de un hospital, de noche	20 a 30	dB
· Interior de un Teatro céntrico, en silencio	20 a 40	dB
· Calle residencial tranquila	45 a 55	dB
· Conversación a 1 metro	60 a 70	dB
· Motocicleta que pasa acelerando a 10 mts.	70 a 80	dB
· Tráfico intenso	80 a 90	dB
· Recital de rock, a 10 metros del parlante	95 a 115	dB
· Umbral de dolor	120 a 130	dB

Timbre:

Es la característica del sonido que permite distinguir el tipo de fuente que lo está produciendo. Si dos instrumentos tocan la misma nota, con la misma intensidad, sabremos perfectamente diferenciarlos debido al timbre característico de cada uno. Si bien es la característica del sonido más fácil de distinguir, es tal vez la más difícil de comprender analíticamente. De la misma forma que los colores se pueden formar con combinaciones de varios de ellos, un sonido cualquiera se puede analizar como un sonido fundamental y una suma de sonidos más pequeños llamados armónicos o sobretonos. Estos armónicos tienen diferentes frecuencias e intensidades en relación al fundamental y es esto justamente lo que determina el timbre de ese sonido. Las frecuencias cumplen una relación invariable respecto al fundamental y es que son múltiplos enteros del mismo. Entonces, si un sonido tiene una fundamental de frecuencia "f", los armónicos serán de frecuencias 2 x f, 3 x f, 4 x f, etc. Por ejemplo: si el fundamental es de 440 Hz., los armónicos serán de 880 Hz., 1760 Hz., 3520 Hz., etc. Lo que varía entonces en cada timbre es la intensidad de cada uno de estos armónicos en relación a la intensidad del primero de ellos, llamado fundamental. En general, los sonidos con armónicos de orden más alto son más brillantes, pues tienen componentes de frecuencias más altas.

² Precisamente se define como $20 \times \log(P_x/P_r)$, en donde P_x es el nivel del sonido a medir y P_r es el nivel de referencia.

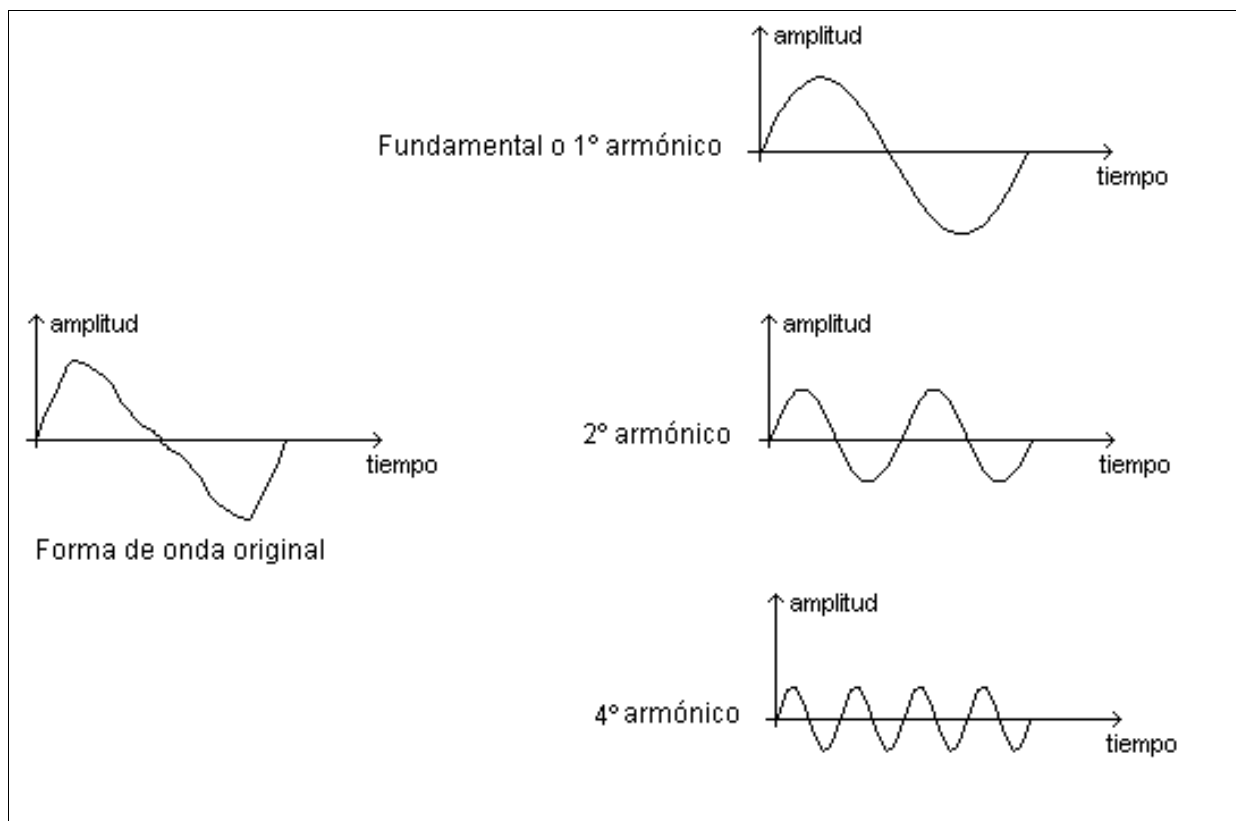
El timbre es una característica general de cada instrumento, ya que depende de muchos factores entre los que tiene principal importancia la caja de resonancia y la forma en que se excita a la fuente sonora. Por ejemplo las cuerdas de una guitarra y de un banjo se excitan de la misma forma, sin embargo las cajas de resonancia son distintas y por lo tanto sus timbres también. El fenómeno de la resonancia influye en el timbre porque los materiales que se utilizan para la construcción de los instrumentos también vibran y lo hacen reforzando solo a algunos armónicos del sonido original. Entonces, solo al reforzar la intensidad de algunos armónicos se modifica por lo tanto el timbre total que sale del instrumento. Por ejemplo, si se pinta una guitarra con esmalte sintético no sonará como antes debido a que la madera ya no vibrará como antes y no producirá esa contribución a los armónicos, modificándose por lo tanto el timbre. Los ecualizadores de audio o los controles de graves y agudos de un equipo de música son filtros o "coladores" de armónicos y por eso modifican el timbre del sonido.

No hay una medida para el timbre del sonido. Lo que se utiliza es un gráfico que representa la intensidad de cada armónico en relación al fundamental llamado ESPECTRO ARMÓNICO, del que hablaremos luego.

Forma de una onda y espectro armónico:

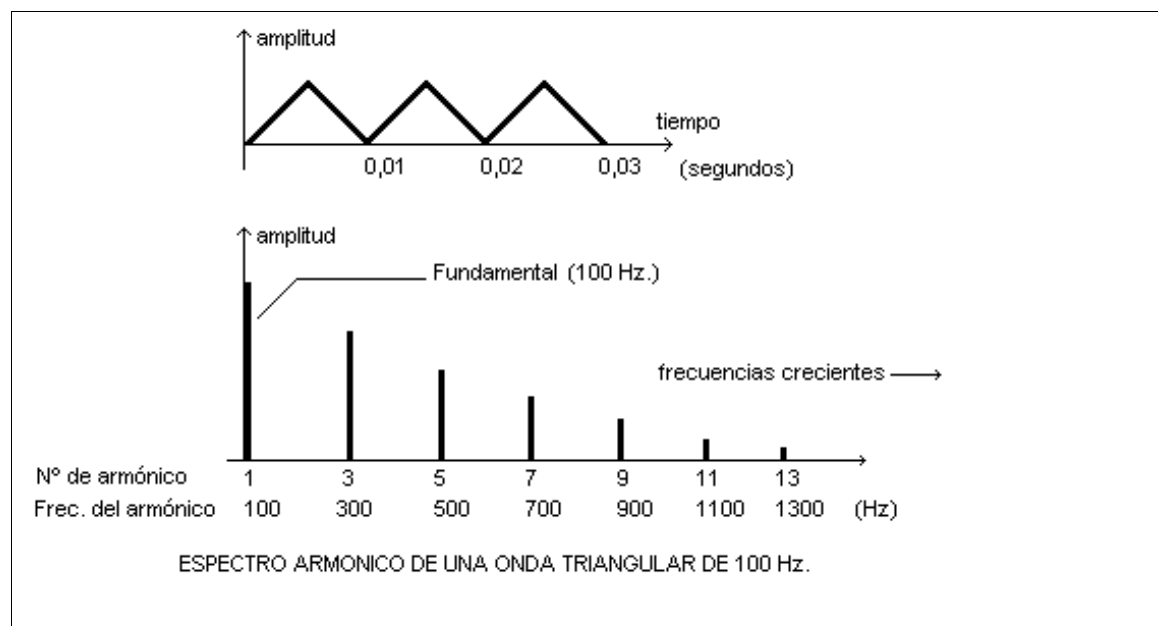
Cada sonido tiene una forma de onda característica que depende directamente del contenido de armónicos o sobretonos que contiene. A cada uno de los armónicos se lo llama un "tono puro" y se representa con una onda sinusoidal. Esta onda sinusoidal muestra cómo vibraría tal armónico si estuviera solo.

La figura siguiente muestra un sonido descompuesto en tres armónicos, de los cuales el tercero (el correspondiente al armónico número tres) está ausente. Nótese que las frecuencias del 1º, 3º y 4º armónicos son cada vez más grandes (entran más ciclos en el mismo tiempo) y que las intensidades son menores que la del fundamental :



Como es muy complicado dibujar una onda sinusoidal para cada uno de los armónicos de un sonido, lo que se hace es graficar con una barra vertical la intensidad de los mismos y estas barras se ubican sobre el eje horizontal que representa ahora a la frecuencia y no al tiempo. A este gráfico se le llama Espectro Armónico de la onda y da una idea clara de la cantidad de armónicos que tiene el sonido que se está estudiando. Supongamos que tenemos una onda triangular de 100 Hz., que equivale aproximadamente a un sol # 2 del piano. Al ser triangular debemos suponer que tiene armónicos, pues la única forma de onda que no tiene más que un solo armónico es la sinusoidal, que consiste solamente en el primer armónico o fundamental (por esta razón se la llama también Tono puro). En la parte superior de la figura siguiente se dibuja la onda con su forma y en función del tiempo, o sea el eje horizontal representa al tiempo. Vemos que un ciclo se cumple en una

centésima de segundo (0,01 seg.). En la parte inferior se grafica el espectro armónico de la onda y puede observarse la intensidad de cada armónico como también la frecuencia. Se ve claramente que los armónicos pares (2, 4, 6, etc.) están ausentes y que los impares van decreciendo en amplitud a medida que tienen frecuencias mayores. Cada forma de onda tiene su espectro armónico correspondiente.



Si por algún medio pudiéramos aumentar la intensidad de cada armónico de forma que no decrezcan tan rápido, la onda resultante se transformaría en cuadrada. Entonces, las dos partes de la figura se refieren a la misma cosa. La forma de onda está totalmente asociada al espectro armónico correspondiente. Sin embargo, la información que nos da el espectro es más útil en muchos casos porque representa a cada componente del sonido que se está estudiando. Veamos dos ejemplos concretos:

· Cuando se pone a punto un sistema de amplificación en una sala (estudio de grabación, etc.), se utiliza un aparato que genera un ruido que se caracteriza por contener todos los armónicos con la misma intensidad. A este ruido se le llama "ruido blanco". Luego, se amplifica éste con el sistema a probar y con un micrófono y otro aparato llamado "analyzer de espectro" se mide la intensidad de los armónicos que, a través de los parlantes, están sonando en la sala. El sistema deberá amplificar por igual a todas las frecuencias para estar a punto. Si no es así, con un ecualizador³ se aumentan o disminuyen las frecuencias que haga falta hasta que el analyzer de espectro indique que todos los armónicos están sonando con la misma intensidad.

· Un método de síntesis del sonido se basa en copiar con un analyzer de espectro el espectro armónico de un instrumento musical y luego tratar de generar electrónicamente los armónicos observados con las intensidades correspondientes. El sonido resultante es muy parecido al original porque contiene casi los mismos armónicos y por lo tanto la misma forma de onda que el instrumento original.

Entonces, resumiendo, el timbre de un instrumento o sonido dado se estudia a través su espectro armónico, el que ofrece información acerca de la intensidad de los armónicos o sobretonos presentes en el sonido. La forma de onda del sonido, que es la forma en cómo se mueve el aire durante un ciclo de la vibración, depende también de la cantidad de armónicos o sobretonos que tenga el mismo. Tanto la forma de la onda como su espectro armónico dan idea de lo mismo: el timbre del sonido. La forma de onda se visualiza con un osciloscopio⁴, mientras que el espectro armónico se observa con un analyzer de espectro.

Conviene aclarar que, para poder observar un sonido en un osciloscopio o en un analyzer de espectro, es necesario convertir la vibración del aire en electricidad. Esto se logra con un micrófono, el cual actúa como un "transductor" de energía, convirtiendo la energía mecánica del aire en energía eléctrica. En el caso de los analizadores de espectro para sonido, suelen venir unidades portátiles con un pequeño micrófono incorporado.

³Un ecualizador es un aparato que permite modificar el volumen de distintas frecuencias sin alterar las demás.

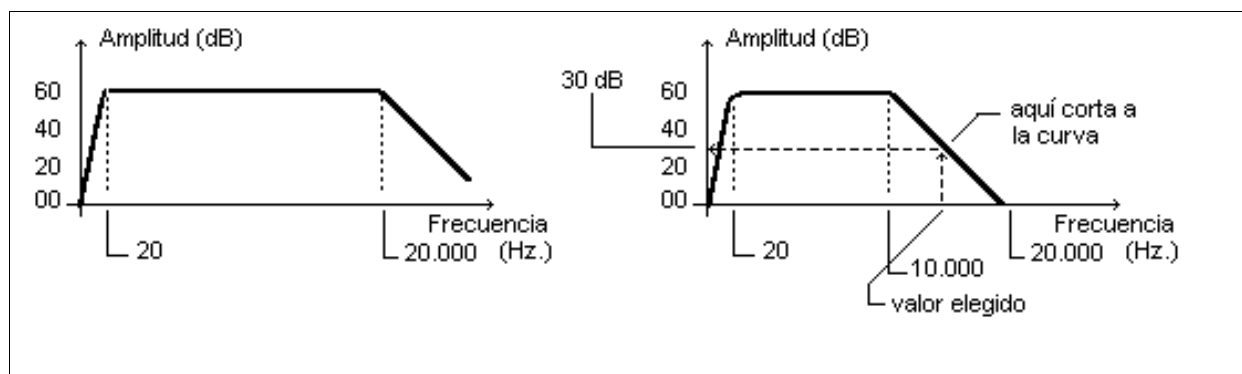
⁴El osciloscopio es un instrumento electrónico con una pantalla que permite ver cómo varía una corriente eléctrica, a través de una onda cuya forma depende de la corriente.

Espectro de audio:

Se llama espectro de audio al rango de frecuencias que puede captar el oído humano. Este rango va aproximadamente desde los 20 Hz. (sonido extremadamente grave) a los 20.000 Hz., que es supuestamente la frecuencia más aguda que puede percibir el oído humano. Frecuencias superiores a los 20.000 Hz. forman ya parte del "ultrasonido", pues exceden el límite de lo audible. Este rango se ha determinado estadísticamente a través de estudios practicados en varias personas y supone por lo tanto un valor medio. Quiere decir esto que algunas personas podrán no alcanzar este límite. También este espectro audible cambia con el correr de los años, por ejemplo, las personas de cierta edad comienzan a perder sensibilidad a las altas frecuencias de forma que escuchan más graves los sonidos.

El espectro de audio se puede modificar fácilmente en un sistema de amplificación o en un sintetizador de manera tal que el rango máximo de frecuencias que éste reproduzca sea inferior, o al menos distinto. Un amplificador ideal tiene que amplificar todas las frecuencias por igual para que sea realmente fiel, de lo contrario el mismo está modificando el timbre de la señal que está amplificando. A este funcionamiento "ideal" se le llama tener " Respuesta Plana". Por supuesto que esta condición de amplificar por igual todas las frecuencias debe mantenerse solo desde los 20 Hz. hasta los 20.000 Hz., ya que más allá de este rango el oído no percibe nada y por lo tanto no existe sonido. Un buen amplificador de audio se diseña para que tenga respuesta plana en este rango de frecuencias.

El siguiente ejemplo muestra dos gráficos típicos de un amplificador. En el primero, la respuesta en frecuencia es plana y por lo tanto es idealmente buena. En el segundo, se observa una caída en las frecuencias más altas, lo que implica un amplificador malo (como podría ser el amplificador de una pequeña radio AM portátil).



Podemos ver que en el gráfico de la derecha que, a partir de los 10.000 Hz. el amplificador comienza a dejar de amplificar. Esto se traducirá en una ausencia de agudos en general, pues todos los armónicos más agudos (de mayor frecuencia) de los sonidos que pasen por él no serán amplificados y por lo tanto "no existirán" para nuestros oídos.

Este tipo de gráficos, como muchos otros, se interpreta de la siguiente manera: primero se busca un valor en el eje horizontal que representa a las frecuencias. Luego, se sube verticalmente hasta cortar la curva y se observa en el eje vertical, que representa la amplificación, el valor que le corresponde para el valor elegido de frecuencia. En el gráfico de la derecha está ejemplificado esto y se observa que para el valor de frecuencia elegido (que serían unos 15.000 Hz.) la amplificación es de 30 dB.

Es importante comprender bien la interpretación de estos gráficos para poder trabajar luego con filtros de audio.

Señales de audio

Llamamos señal a la corriente eléctrica que representa al sonido dentro de un equipo electrónico. Entonces, una señal es una corriente eléctrica, generalmente muy pequeña, que circula por las distintas partes de un circuito desde la entrada del mismo hasta su salida.

Una señal puede obtenerse por distintos medios físicos (micrófonos, sensores, etc.) o electrónicos (sintetizadores de sonido). Al aparato que se encarga de convertir las vibraciones sonoras en una señal de audio y viceversa se lo llama "Transductor". Los transductores más conocidos por nosotros son el micrófono y el parlante. El primero convierte las variaciones de presión de aire que percibe en una señal eléctrica muy pequeña y el segundo, convierte esta misma señal amplificada en vibraciones de aire nuevamente para que lleguen en forma de sonido a nuestros oídos. Las señales que interesan en audio son siempre "alternas". Esto quiere decir que la corriente eléctrica fluye por los circuitos y los cables cambiando su sentido de circulación alternadamente, de la misma forma que lo hace el aire en vibración que impacta sobre la membrana de un micrófono: cuando la masa de aire hace presión sobre la membrana del micrófono la corriente fluye en un sentido y cuando esta masa de aire se retira de la membrana, provocando una depresión de aire, la corriente cambia su sentido. El siguiente esquema representa en forma simplificada dos fases del proceso de conversión

analógico del sonido en señal eléctrica y viceversa :

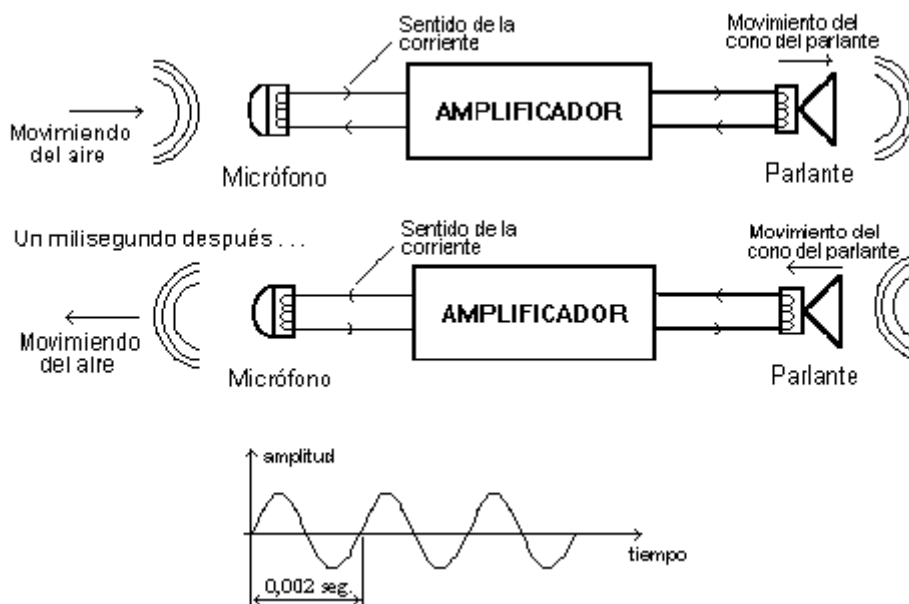


Figura 1.1

En la primera fase, el aire en vibración presiona sobre la membrana de un micrófono. La membrana se desplaza y genera en el bobinado del micrófono una corriente eléctrica que circula en el sentido que se muestra con flechas. Esta señal eléctrica, que no es otra cosa que la señal de audio, es muy pequeña, solo algunos milivoltios (pensemos que una pila tiene 1,5 volts ó 1.500 milivoltios), por lo que es indispensable agrandarla o amplificarla para que sea suficientemente potente como para luego mover el parlante. Esta función la cumple el amplificador, tomando corriente de la red de alimentación y entregándola por medio de sus terminales de salida al parlante. La corriente que entrega el amplificador tiene la misma forma que la señal de entrada, solo que su amplitud es considerablemente mayor, por lo tanto circula en el mismo sentido que la señal. Esta corriente, al circular por el bobinado del parlante, produce el efecto opuesto al del micrófono, es decir, hace que éste (el bobinado) se desplace proporcionalmente en un sentido. Como el bobinado está unido al cono móvil del parlante, éste se mueve, empujando a la masa de aire que lo rodea. Se ha convertido ahora la corriente eléctrica en sonido nuevamente. En la fase dos, el aire se mueve en sentido contrario y provoca una depresión que hace mover a la membrana hacia la izquierda⁵. Esto genera en el bobinado del micrófono una corriente que circula ahora en sentido contrario, como se indica con las flechas. En la salida del amplificador también la corriente cambia de sentido y hace mover al cono del parlante hacia la izquierda provocando una depresión de aire.

Este proceso se repite alternadamente mientras dure el sonido que llega al micrófono. En el ejemplo hemos supuesto un sonido con una frecuencia de 500 Hz., lo que equivale decir que cada ciclo dura $1/500 = 0,002$ segundos. Si cada ciclo completo dura 0,002 segundos, cada mitad del ciclo durará $0,002/2 = 0,001$ segundo, es decir, un milisegundo. Cada fase dura un milisegundo y se repite 500 veces en un segundo, es decir, la corriente cambia su sentido de circulación 500 veces por segundo. Si el sonido fuese de 2.000 Hz., la corriente cambiaría de sentido 2.000 veces por segundo.

Modelo unidireccional simplificado:

Una forma conveniente de tratar la señal de audio es imaginar que fluye en un solo sentido, desde el micrófono o fuente de señal hasta el parlante, pasando por el amplificador. Esto no genera ningún tipo de problemas y se adapta más a la idea que tenemos de algo que fluye, como por ejemplo un líquido por una manguera. De todas formas conviene tener presente la explicación anterior para entender, por ejemplo, por qué hacen falta por lo menos dos conductores para que se establezca la corriente eléctrica por los bobinados del micrófono y el parlante. Tratando el tema de esta manera, podemos pensar por ejemplo que la señal sale del micrófono, viaja por el cable hasta la consola de sonidos, entra en la consola y circula por sus circuitos de volumen, graves, agudos, etc.; luego sale de la consola e ingresa por otros cables a la unidad de potencia o amplificador. En éste se hace más fuerte o más grande para llegar finalmente, a través de otros cables, hasta

⁵Una depresión del lado izquierdo de la membrana implica que hay más presión del lado derecho, por lo tanto ésta se desplaza hacia la izquierda, como si fuera empujada por la mayor presión de la derecha.

los parlantes, en donde termina su viaje. Debido a la primera explicación, que es la situación real, sabemos que la corriente recorre este circuito tantas veces por segundo como frecuencia tenga la señal de entrada, sin embargo con el modelo unidireccional es más fácil imaginar el recorrido que va haciendo la señal, como se va modificando al pasar por la consola, etc.

Parámetros de una señal de audio:

La señal de audio analógica es una corriente eléctrica que varía en el tiempo de la misma forma que lo hace la onda de sonido que la produce. Por esto, tiene las mismas características asociadas a toda onda : frecuencia, amplitud y forma de onda (la cual indica el timbre del sonido). La diferencia reside en el hecho que ya no hablamos de variaciones de presión sino de cambios en el nivel de tensión de la señal eléctrica, los cuales se miden generalmente en volts o milivoltios. Para darnos una idea de algunos niveles de tensión veamos la siguiente tabla :

Fuente eléctrica	Nivel de tensión máx. en sus bornes
Red de alimentación domiciliaria (en Argentina	220 Volts
Una pila común	1,5 volts
Batería de un automóvil	12 volts
Un micrófono dinámico	0,2 - 2 Milivoltios
Un reproductor de discos compactos (Audio OUT)	300 Milivoltios

Las características principales serán :

Amplitud: se mide en milivoltios porque se refiere al nivel de electricidad. El rango de amplitudes normales va desde 0 volt hasta unos 500 milivoltios en los equipos que tienen un pequeño amplificador interno como los reproductores de cassettes, de discos compactos, DATs, minidisc, etc. Las tensiones en los terminales de conexión de parlantes de los amplificadores son del orden de varios volts, según la potencia y volumen al cual se encuentre y no se las considera como señales. Otra unidad de medida usada frecuentemente es el decibel eléctrico, del cual hablaremos luego.

Frecuencia: los rangos de frecuencias son los mismos que los del sonido, pues la señal es una copia de la onda de sonido que la produce, conservando las frecuencias que la componen. Recordemos que el rango audible se extiende aproximadamente desde los 20 Hz. hasta los 20.000 Hz. Como en el sonido, la frecuencia se mide en Hertz, que significa cantidad de ciclos de la señal por segundo.

Forma de onda: al igual que la frecuencia, la forma de onda se conserva. La forma de la señal de audio es teóricamente similar a la del sonido que la produce, variando solo su amplitud según si se amplifica o no. Al decir que se conserva la forma de onda implica que se mantiene el espectro armónico de la misma. Esto muchas veces no es tan cierto, pues es posible modificar dicho espectro con los controles de graves y agudos y, por otra parte, todos los equipos tienen algo de "distorsión armónica", que es el proceso por el cual se deteriora o distorsiona la relación de armónicos del sonido original, o sea la forma de onda.

Fase: esta característica, no mencionada antes, se refiere a la diferencia que puede existir entre el momento en que dos ondas pasan por un determinado nivel. Por ejemplo, cuando se produce realimentación midi estando la función "local" activa y llega al generador de sonidos del sintetizador el mismo mensaje Note On con una diferencia de tiempo, dada por el camino más largo que ha tenido que recorrer el mensaje que viajó por el circuito de realimentación, se generan dos ondas de sonido "desfasadas" que producen la anulación de algunos armónicos. Estas dos ondas están entonces desfasadas entre sí. El efecto "surround" que se utiliza para crear la sensación de sonido tridimensional se basa en cambios de fase producidos electrónicamente, pues el oído humano puede distinguir la fase entre dos ondas, determinando así la procedencia de la fuente sonora.

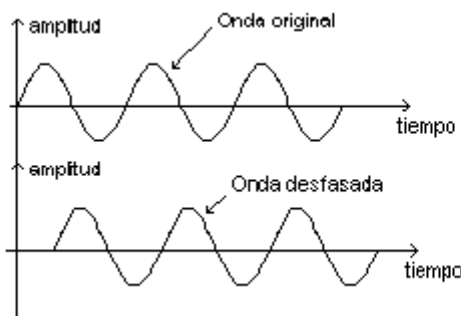


Figura 1-2 Diferencia de fase entre dos ondas

Sonido Digital y Analógico:

Cualquier proceso que se realice con el sonido requiere que se lo convierta a una corriente eléctrica para su posterior tratamiento. Cuando el sonido es convertido a electricidad se lo llama "señal". Entonces, lo que circula por el cable de un micrófono no es sonido sino que es una señal eléctrica proporcional al sonido. Esta señal también tiene una forma de onda que es igual o "análoga" a la forma de onda del sonido que la produjo. Por esta razón a esta forma de procesar el sonido se la llama "analógica", pues en todo momento la forma de onda de la señal es idéntica a la del sonido que la produjo. Por ejemplo, la gran mayoría de los amplificadores de audio son analógicos porque en todo momento las señales que manejan en su interior son análogas a la señal de entrada; podrán diferir en amplitud, pero la forma de onda en general se conserva. A continuación veamos algunos ejemplos de equipos de audio analógicos:

- Un deck de cassettes: utiliza principios magnéticos para grabar la cinta, pero estos campos magnéticos varían de la misma forma que las señales de audio que entran al aparato.
- Un disco de vinilo: es analógico porque el surco que se crea al realizar la grabación tiene la forma de la señal de entrada.
- Un piano eléctrico antiguo, del tipo Fender Rhodes, es también analógico por manejar en todo momento señales que varían de la misma forma que las fuentes que producen el sonido.

Otros sistemas analógicos se pueden definir por descarte, por no ser digitales. Esto es, si no es digital es analógico.

Sonido digital: el sonido digital surge como consecuencia del impresionante desarrollo tecnológico que ha tenido la electrónica. Consiste, básicamente, en asignar códigos binarios a cada parte de la onda de sonido a una velocidad muy grande. De esta forma se obtienen una gran cantidad de números binarios o códigos que representan a la señal de audio de entrada. Entonces, dentro del equipo digital, la forma de la señal ya no es "análoga" a la forma que tenía al ingresar, mas bien consiste en pulsos de corriente que representan a los ceros y unos del sistema binario. Por ejemplo, hay corriente = 1 y no hay corriente = 0. Así funciona cualquier sistema digital, solo con dos estados definidos que usualmente se designan por cero y uno. Esto se debe a dos razones fundamentales:

- Dos estados definidos son muy fáciles de lograr con cualquier sistema electrónico. Por ejemplo, hay corriente o no hay corriente; luz encendida o luz apagada; etc.
- Se puede utilizar el sistema de numeración binario para hacer cuentas y operaciones matemáticas con los dos estados. Se asigna un estado eléctrico al número cero y el otro al uno.

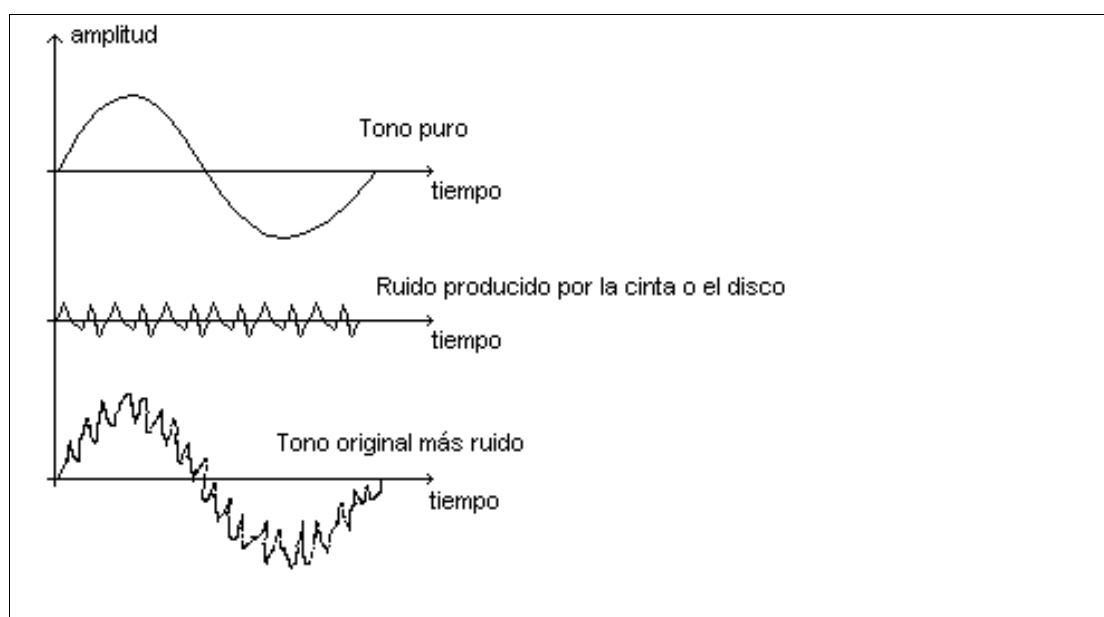
Como un dígito binario puede tomar solo los estados cero y uno, para representar una cifra dada se necesitan muchos dígitos más que en el sistema decimal, en donde un dígito puede tomar 10 valores distintos. Por esta razón se ha adoptado como unidad de información al conjunto de 8 dígitos binarios llamado Byte. Con un byte se pueden obtener 256 códigos distintos, mientras que con 8 dígitos decimales se podrían obtener 10 millones de códigos distintos. La razón por la cual se usa el sistema binario no es precisamente porque convenga sino que se debe a que los números binarios son fáciles de obtener o representar electrónicamente. Como sistema en sí, conviene el decimal pero esto es prácticamente imposible de implementar electrónicamente.

Un sistema digital, a parte de trabajar con números en vez de señales, permite memorizar datos o códigos binarios, lo que implica una gran ventaja: una determinada situación se codifica asignándole números binarios y luego se memoriza. Esto lo podemos ver cuando seleccionamos un sonido o program en un sintetizador. Al apretar solo un botón el sonido ya está listo, o sea todos los osciladores, parámetros, etc. que hacen el sonido se ajustan casi instantáneamente al seleccionar el program. Esto es así porque todos estos datos y parámetros están en una memoria. En los sintetizadores antiguos, este trabajo de ajustar los osciladores, parámetros, etc. había que hacerlo manualmente antes de tocar. Esta tarea llevaba varios minutos y hasta horas si el usuario no

era un experto. Esta es una de las razones por las que los tecladistas de los '70 utilizaban muchos teclados en un recital, pues los dejaban con el sonido que iban a usar para no tener que programarlos en la mitad del show. Desde este punto de vista, el sistema digital ofrece ya ventajas enormes. Sin embargo, en lo que concierne exclusivamente al sonido, hay otra gran razón por la que se utiliza el sistema digital y ésta es el "ruido". Se le llama ruido a toda señal no deseada que aparece en un equipo de audio. Por ejemplo:

- Si se pone el cable de un micrófono cerca de un transformador aparece un zumbido por los parlantes que llamamos ruido de línea.
- Cuando estamos con un equipo de música y alguien enciende un tubo fluorescente, se siente un click en el equipo. Esto también es ruido.
- Cuando escuchamos una cinta y el nivel de la música desciende, aparece un soplido característico que también se considera ruido.
- Al escuchar un disco de vinilo, la púa asienta sobre el mismo y produce ruido por rozamiento. Este ruido es captado y se suma a la señal de audio grabada en el disco.

Electrónicamente, el ruido es también una corriente eléctrica que se suma a la señal, quedando la señal original distorsionada por el mismo. Veamos la siguiente figura, en donde se muestran la señal (sonido) que se quiere grabar en una cinta y el ruido generado:

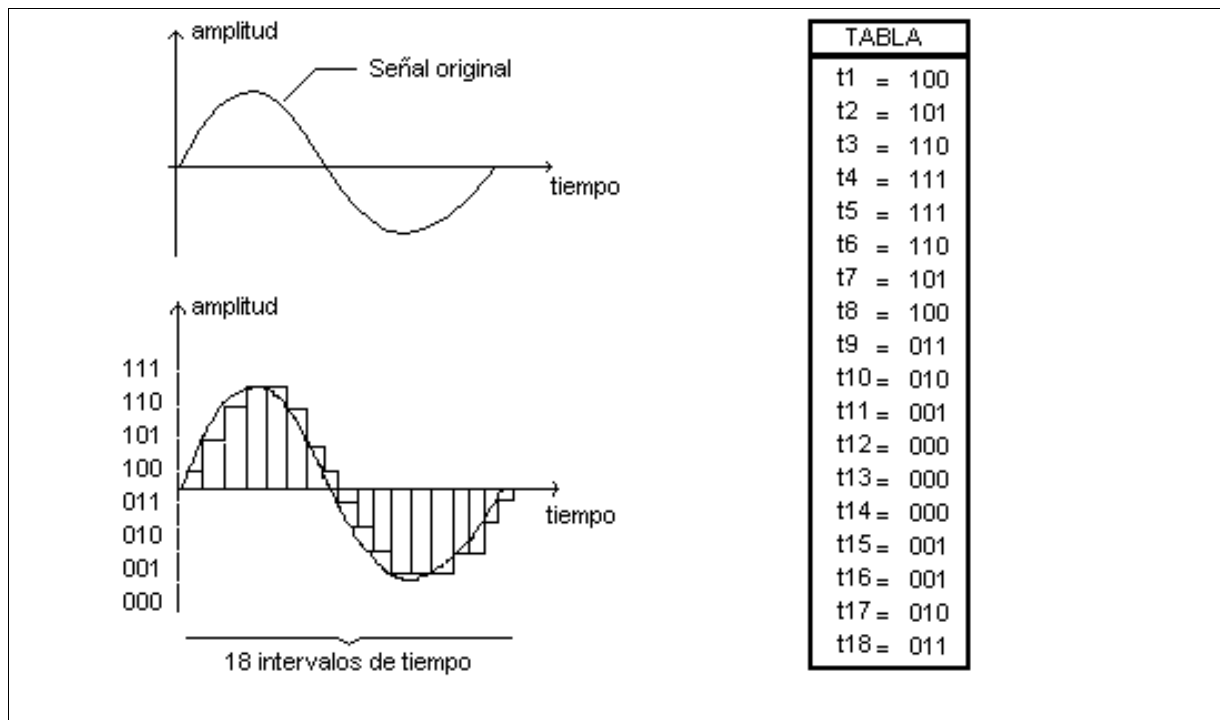


Podemos observar en el gráfico inferior a la señal original más el ruido que se le ha sumado. El resultado es una señal parecida a la original pero con crestas superpuestas producidas por el ruido. Veremos luego que al digitalizar una señal, se puede eliminar el ruido que producen los medios de reproducción como el disco y la cinta, no así con los demás ruidos eléctricos mencionados.

En un sistema digital, las señales de audio se codifican y quedan totalmente representadas por una gran cantidad de números binarios. El valor de cada número corresponde al valor que tiene la señal en un momento dado. Para lograr esto, se utiliza un circuito llamado "convertidor analógico-digital" que se encarga de medir constantemente la señal y entregar, con cada medición, un número proporcional al valor medido de la señal en ese instante. Podemos imaginar que este circuito mira constantemente cómo va creciendo la señal y, a intervalos de tiempo iguales, va entregando números binarios de 1 o dos bytes cuyo valor es el valor que tiene la señal en cada uno de esos instantes de tiempo. Por ejemplo, comienza a mirar y "ve" que la señal vale 10 milivoltios, entonces genera el número 00001010. Luego, unos 20 microsegundos⁶ después, mide nuevamente y "ve" que la señal vale ahora 14 milivoltios, entonces genera el número binario 00001110, y así sucesivamente, a razón de unas 44.000 mediciones por segundo.

Veamos un ejemplo gráfico de este proceso, que se llama muestreo:

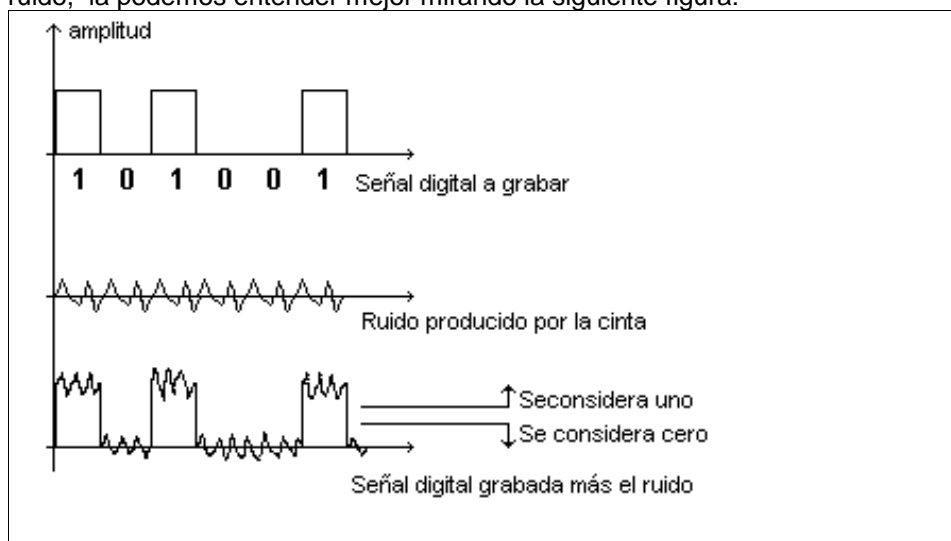
⁶Un microsegundo es la millonésima parte de un segundo.



Aquí hemos utilizado solo 18 intervalos de tiempo para "muestrear" un ciclo de una señal senoidal. En el eje vertical se representan números binarios que van del 0 al 7 (en binario), lo que se logra con tres bits. En la actualidad, por ejemplo si se trata de un disco compacto, se utilizan 44.100 intervalos de tiempo por segundo y se emplean 16 bits (dos bytes), con lo que se logran 65.536 niveles diferentes para codificar la señal. Observemos que en la figura hay solo 8 (de 0 a 7) niveles diferentes para codificar la señal, esto es debido a que a los fines del ejemplo se han utilizado solamente 3 bits.

A simple vista pareciera que mientras más bits de resolución se utilicen, más parecida va a ser la señal digital a la muestreada. Esto es así, sin embargo, mientras más bits se utilizan más pequeña es la diferencia entre un nivel y su adyacente haciendo más difícil la detección. Por esta razón solo equipos de muy alta calidad trabajan con resoluciones de 20 o 24 bits.

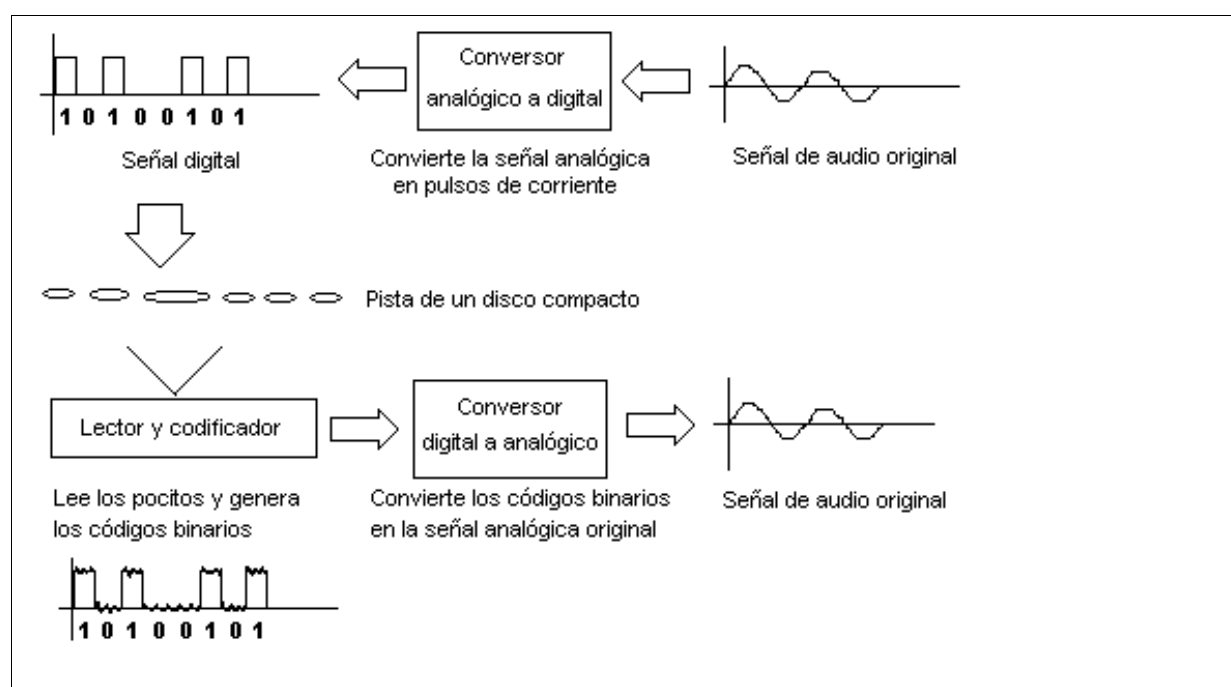
Resumiendo, en un sistema de grabación digital, lo que se graba son los códigos correspondientes a la señal de audio y no la señal misma, como en los sistemas analógicos. Este proceso de digitalización se conoce con el nombre PCM, que significa "Modulación por Pulsos Codificados". La gran diferencia, por la cual se elimina el ruido, la podemos entender mejor mirando la siguiente figura:



La señal de audio (analógica) se convierte a digital antes de ser grabada. Esto quiere decir que ya no va a ser una señal continua sino que será una sucesión de unos y ceros correspondientes a los códigos o números binarios que resultaron en la conversión. Suponemos que un uno es un pulso de corriente eléctrica y un cero corresponde cuando no hay corriente (podría ser al revés). Entonces, en la cinta se grabarán solo pulsos de

corriente y espacios de no-corriente que representan a los unos y ceros de los números binarios. En el ejemplo hemos supuesto que se está grabando el código 101001 que corresponde al valor que tenía la señal analógica en un determinado instante. En el gráfico siguiente se representa el ruido que produce la cinta y en el inferior, los pulsos de corriente más el ruido sumados. Puede verse que, como en el ejemplo anterior, la forma de la señal (la señal digital en este caso) es parecida a la original pero con el ruido superpuesto. La gran diferencia es que "al sistema digital no le importa si los pulsos están deformados". Este considera que un pulso es un uno si supera un cierto nivel y considera que es un cero cuando la corriente baja de un determinado nivel. Entonces, el ruido no afecta en el proceso de grabación, pues no distorsiona la señal (la señal digital). Recordemos que la señal digital representa, a través de números o códigos, a la señal analógica que corresponde al sonido.

La gran diferencia de calidad del disco compacto respecto al de pasta es debido a que en el primero se graban estos pulsos de la señal digital por medio de pequeños pocitos que son iluminados por un diodo láser que emite un haz de luz infrarroja. La luz se refleja de distinta manera según haya pocitos o no y este reflejo es captado por unos elementos sensibles a la luz (fotodiodos) que genera pulsos de corriente eléctrica formando así la señal digital. Esta señal digital se re-convierte luego mediante un proceso inverso al que se usó al digitalizarla y aparece la señal igual a la señal analógica original, la que corresponde al sonido grabado. Entonces, según lo visto, las distorsiones, ruido, etc. que pudieran surgir en el proceso de grabación desaparecen, pues al detector digital no le va a importar la forma exacta de los pocitos, solo va a reaccionar ante la presencia o no de pocitos y lo va a traducir en pulsos de corriente que representarán a los unos y ceros de la señal digital.



En esta figura se ha representado esquemáticamente y en forma simplificada el proceso que tiene lugar en la grabación y reproducción de un disco compacto. Se muestran dos ciclos de una señal analógica cualquiera (de un micrófono, etc.) que son digitalizados por el convertor A/D. Luego, se ve solo un código de 8 bits (recordemos que se usan unos 44.000 por cada segundo) de la señal digital. En el disco, se traducen los pulsos de corriente representados en la señal digital en pocitos que forman la pista del disco. Para darnos una idea, un disco compacto tiene unos 5,7 kilómetros de pista con unos 1.600 millones de pocitos. Luego, cuando se reproduce el disco, los pocitos son leídos por el diodo láser y los fotodiodos y son traducidos otra vez a pulsos de corriente que forman la señal digital. Estos pulsos pueden no ser exactos en su forma, pero al circuito codificador no le va a importar mientras se distingan los unos de los ceros. Los pulsos de corriente que representan los números binarios que generó el convertor A/D en el proceso de grabación, son ahora convertidos en una señal analógica que coincide con la señal original que se digitalizó en el proceso de grabación. La señal de audio reproducida estará libre de ruido, ya que éste se suma en el proceso de grabación y justamente allí la señal es digital, por lo que no es afectada. Este mismo principio de digitalización se utiliza para grabar audio en una computadora, para grabar las cintas digitales DAT, los Minidisc y los cassettes digitales DCC. Todos estos medios de grabación tienen muy alta calidad por no tener ruido.

FIN