Universidad de la República Oriental del Uruguay
Facultad de Artes
Escuela Universitaria de Música

APUNTES DE ACÚSTICA MUSICAL

eMe - estudio de Música electroacústica

Martín Rocamora

Abril de 2006

Índice general

Capítulo 1

Física del sonido

1.1. Naturaleza del sonido

El sonido es la sensación percibida por el oído debida a las variaciones rápidas de presión en el aire. Desde el punto de vista físico consiste en la vibración mecánica de un medio elástico (gaseoso, líquido o sólido) y la propagación de esta vibración a través de ondas. Surgen una serie de preguntas: ¿cómo es la energía sonora? ¿cómo se propaga la energía de un lugar a otro?.

Todos poseemos una idea intuitiva de las ondas a través de las olas del mar o las ondulaciones que se generan cuando una piedra golpea el agua de un estanque. Pero para comprender mejor la naturaleza del sonido imaginemos un tubo muy largo lleno de aire. El aire está formado por una cantidad muy grande de pequeñas partículas o moléculas.[1] Inicialmente, el aire dentro del tubo está en reposo (o más precisamente, en equilibrio).[2]

Supongamos que se mueve rápidamente el pistón hacia el interior del tubo (excitación impulsiva). Las partículas que se encuentran junto al pistón serán empujadas, mientras que las que se encuentran alejadas no. En la zona cercana al pistón el aire se encontrará más comprimido que lejos de él, es decir que la misma cantidad de aire ocupa menos espacio. El aire comprimido tiende a descomprimirse (como cuando se desinfla un globo) desplazándose y comprimiendo el aire próximo. Esta compresión implica nuevamente una tendencia a descomprimirse, por lo que la perturbación original se propaga a lo largo del tubo alejándose de la fuente (ver figura 1.1).

Es importante enfatizar que el aire no se mueve de un lugar a otro junto con el sonido. Ninguna de las partículas de aire se propaga con la onda, sino que se apartan temporalmente una distancia muy pequeña en torno a su posición de equilibrio. No hay traslado de materia, solamente la energía de la perturbación es la que se trasmite.

1.2. Ondas sonoras y su propagación

Las ondas sonoras son un tipo particular de ondas elásticas. Las ondas elásticas son las que pueden producirse y propagarse en un medio (sólido, líquido, gaseoso) que presente la propiedad

[1]El término partícula designa un volumen de un medio lo suficientemente pequeño como para que las variables acústicas tales como la presión, densidad y velocidad se consideren constantes dentro del volumen. Una partícula de aire es lo suficientemente grande como para contener millones de moléculas de aire.

[2]Este equilibrio es dinámico ya que las moléculas se mueven en todas direcciones debido a la agitación térmica, pero con la particularidad de que están homogéneamente distribuidas (en cada cm^3 de aire hay aproximadamente la misma cantidad de moléculas).

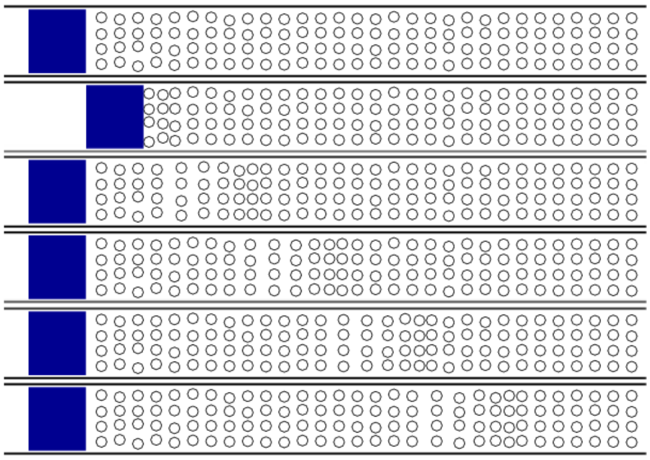


Figura 1.1: El movimiento del pistón produce una onda de presión que se propaga alejándose.

de poseer *elasticidad* y *masa*. Si una partícula de un medio de este tipo es desplazada de su posición de equilibrio, las fuerzas elásticas tenderán a retornarla a la posición original. La partícula desplazada de su posición de equilibrio al tener masa posee *inercia* y al moverse choca con las partículas próximas, haciendo que éstas también se muevan y pongan en movimiento a las partículas vecinas. La perturbación que originó el desplazamiento inicial se propaga a través de las oscilaciones de partículas elásticas próximas (como un efecto dominó).

Hay dos tipos básicos de ondas elásticas: *transversales* y *longitudinales*. En las ondas transversales el desplazamiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación, mientras que en las ondas longitudinales es paralelo. De acuerdo a lo que hemos analizado, las ondas sonoras son longitudinales, ya que las partículas de aire se desplazan de su posición de equilibrio y oscilan en la dirección de propagación de la onda sonora. Por el contrario las ondas que se generan en el agua de un estanque, formando círculos concéntricos con centro en el punto de perturbación, son ondas transversales, dado que el movimiento de las partículas de agua es perpendicular a la superficie (y a la dirección de propagación).[3] En muchos instrumentos musicales podemos identificar ondas transversales (como en la vibración de una cuerda).

El aire como medio posee algunas características relevantes para la propagación del sonido que vale la pena señalar:

- La propagación es lineal.[4] Esto permite que diferentes ondas sonoras se propaguen por el mismo espacio al mismo tiempo sin afectarse.

- El medio es no dispersivo. La velocidad de propagación de la onda en un medio elástico depende de las propiedades elásticas e inerciales del medio. Por esta razón las ondas se propagan a la misma velocidad independientemente de su frecuencia o amplitud.

[3]Considerar transversales las ondas generadas en el agua es en realidad una aproximación. El movimiento de las partículas de agua no es estrictamente vertical sino que describen una trayectoria circular.

[4]Si bien esto es una aproximación, es válida en el intervalo de los sonidos audibles.

- El medio es homogéneo. No existen direcciones de propagación privilegiadas por lo que el sonido se propaga esféricamente (en todas direcciones).

Como ya mencionamos la velocidad de propagación del sonido no depende de las características de la perturbación sino de las características del medio. Esto quiere decir que sonidos de intensidad muy diferente (por ejemplo, una explosión y un susurro) se propagan con la misma velocidad.

Considerando el aire como un gas ideal (cosa razonable a los efectos prácticos) se puede demostrar que la velocidad del sonido depende únicamente de la temperatura, de la siguiente forma,

$$c = 332\sqrt{1 + \frac{t}{273}}$$

donde t es la temperatura del aire en °C y c es la velocidad del sonido en m/s. En condiciones normales la velocidad del sonido en el aire es de aproximadamente 344 m/s a 20 °C (ó 1200 km/h, es decir 3 segundos para recorrer 1 km). Esta velocidad aumenta con la temperatura (0.18 % por °C), pero no cambia con la presión. Podemos apreciar que la velocidad del sonido en el aire es relativamente alta y normalmente la propagación parece instantánea. Sin embargo en algunos casos es muy notorio que esto no es cierto, por ejemplo en el caso de un relámpago. Un relámpago es una descarga eléctrica que produce a la vez luz y sonido. La luz viaja a una velocidad mucho más alta que la del sonido (300000 km/s) por lo que escuchamos el trueno cierto tiempo después de ver la luz del relámpago.

En otros medios la velocidad del sonido será diferente, en los líquidos es un poco mayor (1440 m/s en el agua) y mayor aún en los sólidos (5000 m/s en el acero).

No debemos confundir la velocidad de propagación de la onda sonora con la velocidad instantánea de las partículas (éstas realizan un movimiento oscilatorio más rápido).

1.3. Ondas periódicas

La mayoría de los sonidos de la naturaleza no son producto de una única perturbación del aire, sino de múltiples perturbaciones sucesivas. Un ejemplo de esto es el sonido producido al golpear un diapasón. Las barras de metal del diapasón se mueven oscilando de un lado a otro en forma periódica (repetidamente) y ponen en movimiento el aire a su alrededor de la misma forma. Analicemos el movimiento en cámara lenta. Consideremos el punto de la barra del diapasón que recibe el golpe inicial y las partículas de aire próximas a este punto. Podemos imaginar que en un momento las partículas se verán empujadas por el movimiento de la barra (como en el caso del pistón), produciéndose una compresión del aire próximo. El aire comprimido tenderá a descomprimirse y la perturbación se propagará, como ya analizamos. En un instante posterior la barra se mueve en sentido contrario, las partículas de aire (que antes fueron comprimidas) se desplazan ocupando el espacio liberado por la barra. La misma cantidad de partículas ocupa un espacio mayor, por lo que se produce una descompresión (ó rarefacción) del aire en esa zona. La rarefacción también se propaga de forma análoga a la compresión. Este proceso cíclico de compresión y descompresión se repite hasta que las barras del diapasón dejan de vibrar.[5]

Consideremos nuevamente el pistón, pero ahora en un movimiento periódico. Esto quiere decir que luego del movimiento inicial del pistón hacia el interior del tubo se produce un movimiento

[5]El movimiento se amortigua debido a la fuerza de rozamiento que disipa energía en forma de calor.

del pistón hacia el exterior del tubo, seguido de un nuevo movimiento hacia el interior y así sucesivamente. La sucesión de compresiones y rarefacciones del aire cerca del pistón genera una onda periódica que se propaga alejándose de la fuente. Luego de que la primera perturbación recorrió cierta distancia comienza la segunda.

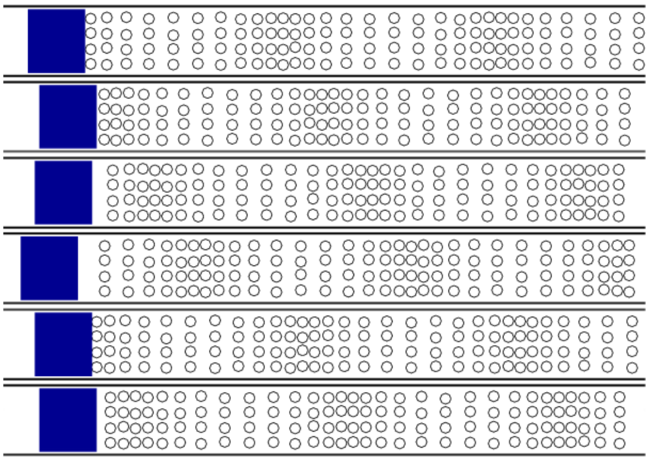


Figura 1.2: Un movimiento periódico del pistón produce una onda de presión periódica.

Definamos algunos parámetros de una onda periódica:

- La *frecuencia* (f) es la cantidad de ciclos de la onda periódica por segundo. Se mide en ciclos por segundo ó Hz. En el caso del pistón puede verse como la cantidad de perturbaciones (movimiento del pistón hacia el interior del tubo) por segundo.
- El *período* (T) es el tiempo necesario para que se complete un ciclo de la onda periódica. Se mide en unidades de tiempo (por ejemplo, segundos ó milisegundos).
- La *longitud de onda* (λ) es la distancia que recorre una onda en un período (T segundos). También puede verse como la distancia entre perturbaciones sucesivas en el espacio. Se mide en unidades de longitud (para las ondas sonoras resulta práctico usar metros o centímetros).

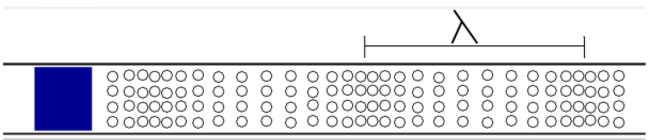


Figura 1.3: La longitud de onda (λ) de un movimiento periódico puede considerarse como la distancia entre perturbaciones sucesivas en el espacio.

Veamos cómo se relacionan estos parámetros. De la definición de frecuencia y período resulta claro que uno es el inverso del otro,

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{ó} \quad f = \frac{1}{T}.$$

¿De qué forma se relacionan la longitud de onda y la frecuencia de una onda sonora? Podemos aproximarnos a esta relación intuitivamente, recordando que la velocidad del sonido es constante, independientemente de su frecuencia. A mayor frecuencia el período es menor, ya que se relacionan en forma inversa. Si el período es menor, también lo será la distancia que recorre la onda sonora en un período (dado que la velocidad del sonido es constante). Definimos la longitud de onda como la distancia recorrida por la onda en un período, de donde surge que a mayor frecuencia menor longitud de onda. Del mismo modo a menor frecuencia mayor longitud de onda.

Para analizar esta relación con más detalle consideremos una onda periódica propagándose en determinada dirección. El tiempo que demora la onda en completar un ciclo es el período T. Por otro lado sabemos que la distancia que recorre en un período es la longitud de onda λ. La velocidad es justamente el cociente de la distancia recorrida y el tiempo empleado. De esto surge la relación,

$$\frac{\lambda}{T} = c \quad \text{ó} \quad \lambda f = c$$

donde c es la velocidad del sonido.

El rango de frecuencias audibles se puede considerar en forma muy aproximada entre los 20 Hz y los 20 kHz. Según la ecuación anterior, la longitud de onda del sonido se encuentra dentro de cierto rango de valores desde 1,7 cm a 17 m. Es importante observar que las longitudes de onda del sonido son comparables a las dimensiones de los objetos que nos rodean cotidianamente (desde la tapa de una botella hasta las dimensiones de una sala de conciertos). Esto es determinante en la forma en que se propaga el sonido, como veremos más adelante.

1.4. Movimiento armónico simple

El *movimiento armónico simple* describe el movimiento de sistemas simples, como un péndulo. Uno de los sistemas más simples que produce un sonido musical es el diapasón, que describimos anteriormente. El movimiento del diapasón es muy cercano a un movimiento armónico simple.

Consideremos el punto medio de la barra de un diapasón y derivemos la ecuación que describe el movimiento (ley de movimiento) de ese punto. Sea x el desplazamiento de este punto respecto a un eje de coordenadas fijo (ver figura 1.4).

Al golpear el diapasón, ponemos en movimiento la barra y alejamos al punto de su posición de equilibrio. Esto produce la aparición de una fuerza elástica que se opone al movimiento y tiende a retornar al punto a su posición de equilibrio. La fuerza elástica F_e es de la forma $F_e = -kx$, donde k es la constante de elasticidad que vincula la fuerza elástica con el desplazamiento x. El signo negativo indica que la fuerza tiene el sentido opuesto al desplazamiento, es decir se opone.

A continuación tomemos en cuenta la segunda ley de Newton, que establece que la fuerza neta sobre un cuerpo se vincula con su masa y la aceleración que éste adquiere a través de: $F = ma$, donde F es la fuerza neta, m es la masa y a la aceleración. Asumiendo que sólo la fuerza elástica actúa sobre el diapasón (dejemos de lado la fuerza de rozamiento) podemos plantear la segunda ley de Newton sustituyendo la fuerza neta por la fuerza elástica:

$$F = ma = -kx.$$

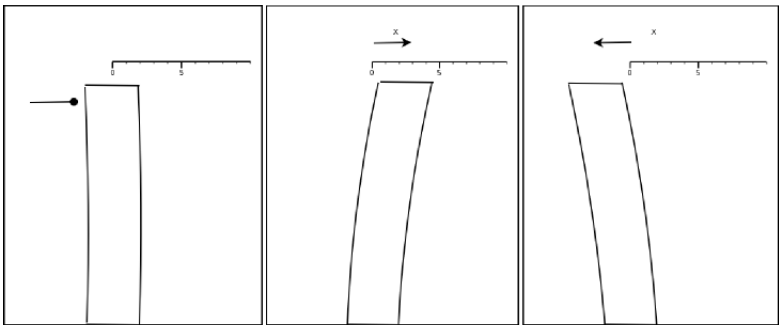


Figura 1.4: Esquema del movimiento de una barra del diapasón, indicando la posición del punto medio de la barra (x) en un eje de coordenadas fijo.

La ecuación anterior vincula la aceleración y la posición (desplazamiento) del punto analizado, por medio de un par de constantes, m la masa del punto y k la constante de elasticidad. Nuestro objetivo es obtener una ecuación que describa el movimiento de este punto. Recordando que la aceleración es la derivada segunda de la posición respecto al tiempo ($\frac{d^2x}{dt^2} = a$), podemos plantear la ecuación anterior como,

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -(k/m)x. \tag{1.1}$$

Para obtener la ecuación del movimiento a partir de la expresión anterior, debemos recordar que la derivada de las funciones *seno* y *coseno* es de la forma,

$$\frac{d}{dt}sen(\omega t) = \omega\ cos(\omega t) \quad \text{y} \quad \frac{d}{dt}cos(\omega t) = -\omega\ sen(\omega t)$$

donde ω es la frecuencia angular de oscilación de las funciones seno y coseno, y corresponde a $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$. Derivando una vez más, obtenemos la derivada segunda, que es de la forma,

$$\frac{d^2}{dt^2}sen(\omega t) = -\omega^2\ sen(\omega t) \quad \text{y} \quad \frac{d^2}{dt^2}cos(\omega t) = -\omega^2\ cos(\omega t).$$

Analizando las expresiones anteriores y la ecuación 1.1, es posible observar que tanto la función $sen(\omega t)$, como la función $cos(\omega t)$ satisfacen la ecuación, con $w = \sqrt{k/m}$. La diferencia entre $sen(\omega t)$ y $cos(\omega t)$ es simplemente que una es una versión retardada de la otra, es decir,

$$cos(\omega t) = sen(\omega t + \pi/2).$$

Aún más, si se considera una función seno o coseno con un desfasaje arbitrario ϕ es posible observar que también satisface la ecuación 1.1. El ángulo de fase ϕ está determinado exclusivamente por la elección del origen de tiempo, por lo que a los efectos de describir el movimiento es irrelevante. Dicho de otra forma, la forma del movimiento es la misma sin importar en que instante de tiempo comienzo a observarlo.

En base a lo anterior, el movimiento armónico simple se describe a través de una sinusoide (seno o coseno), como,

$$x(t) = A\ sen(2\pi ft + \phi)$$

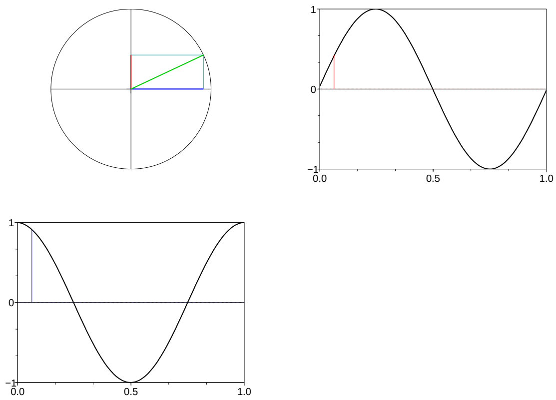
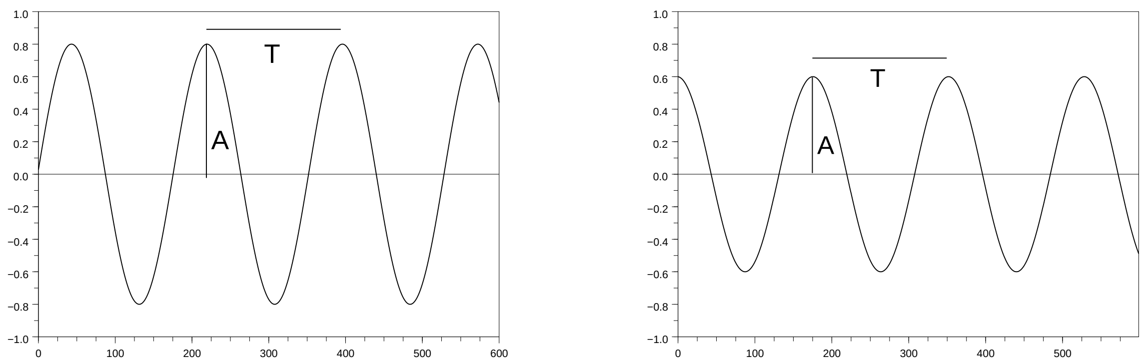


Figura 1.5: Representación gráfica del seno y el coseno de un ángulo. En el círculo trigonométrico el seno y el coseno corresponden a las proyecciones del ángulo en los ejes cartesianos (vertical seno, horizontal coseno).



(a) $A_1 sen(2\pi f_0 t + \phi_1)$ (b) $A_2 sen(2\pi f_0 t + \phi_2)$

Figura 1.6: Representación gráfica del movimiento armónico simple. El período en ambos casos es el mismo ($T = 1/f_0$), pero la amplitud y la fase inicial se indican a continuación, (a) $A_1 = 0{,}8$ $\phi_1 = 0$ (b) $A_2 = 0{,}6$ $\phi_2 = 90$ ($\pi/2$).

Su representación gráfica se observa en la figura 1.6. Es posible identificar los parámetros del movimiento, la amplitud A, el período $T = \frac{1}{f}$ y la fase inicial ϕ.

Por último es importante señalar que la frecuencia del movimiento está determinada por las propiedades del sistema oscilante, en particular la constante de elasticidad k y la masa m. Sin importar las características de la excitación (por ejemplo, un golpe al diapasón más o menos intenso), la frecuencia de oscilación será siempre $w = \sqrt{k/m}$. Si la masa aumenta, la frecuencia de oscilación disminuye (cosa que coincide con la experiencia, las cuerdas más graves son más masivas). Por otro lado, al crecer la constante de elasticidad, la fuerza elástica es mayor y la frecuencia de oscilación aumenta (lo que también debe resultar intuitivo, ya que aumentando la tensión y por ende la elasticidad de una cuerda, su frecuencia de oscilación aumenta).

1.5. Presión sonora

El sonido entonces es una sucesión de compresiones y rarefacciones del aire. Así como hicimos al analizar el diapasón, si nos ubicamos en un punto en el espacio (una posición fija) por el cual se propaga una onda sonora, veremos como la presión atmosférica aumenta y disminuye periódicamente.

La presión atmosférica se mide en *pascales* y es del orden de los 100.000 Pa (ó como en los informes meteorológicos de 1000 hPa). Sin embargo, los cambios de presión producidos por una onda sonora son muy pequeños respecto al valor de presión atmosférica. Los sonidos más intensos que se perciben implican un incremento de tan solo 20 Pa. Por esta razón es más razonable considerar únicamente la variación de presión provocada por el sonido, es decir distinguir la presión atmosférica en ausencia de sonido de la presión atmosférica en presencia de sonido. Al incremento de presión se lo denomina *presión sonora*, y consiste en la presión que se debe agregar a la presión atmosférica en ausencia de sonido para igualar la presión atmosférica en presencia de sonido.

Las presiones sonoras audibles varían en términos aproximados entre los 20 Pa y los 0,00002 Pa (ó 20 μPa, un μPa - micropascal - es la millonésima parte de un Pa).[6] Es importante señalar que es un rango muy importante de variación (de un millón de veces). Esta gran cantidad de cifras es incómoda de manejar y no resulta práctica.

Existe otra razón por la cual no es conveniente manejar la intensidad del sonido directamente en unidades de presión. La diferencia apenas perceptible (*DAP*) de un estímulo dado es habitualmente una buena unidad para la magnitud física correspondiente. Experimentos psicoacústicos indican que la diferencia apenas perceptible en intensidad sonora es más o menos proporcional a la intensidad del sonido[1]. En forma simplificada esto quiere decir que un mismo incremento en intensidad es más notorio para un sonido de menor intensidad que para un sonido de mayor intensidad. Veamos un ejemplo para aclarar estas ideas. Supongamos que un sonido determinado tiene una presión sonora de 1 Pa y esta se incrementa al doble, es decir a 2 Pa. Consideremos otros dos sonidos de diferentes intensidades e incrementemos la presión sonora también en 1 Pa, por ejemplo de 5 Pa a 6 Pa y de 18 Pa a 19 Pa. La siguiente tabla muestra en cada caso la relación de presiones.

p_1	p_2	$\frac{p_2}{p_1}$
1	2	2
5	6	1,2
18	19	1,06

Si bien en todos los estímulos el incremento de presión es el mismo (1 Pa), la relación de presiones es muy diferente. Las experiencias sobre la percepción de la intensidad indican (en términos muy aproximados) que en el primer caso se percibirá un incremento de intensidad de el doble, en el segundo caso se percibirá un incremento mucho menor y en el último caso el incremento tal vez sea imperceptible. Si en el primer caso, luego de pasar de 1 Pa a 2 Pa quisiera incrementar nuevamente la presión sonora de forma de percibir un incremento de intensidad equivalente al anterior, debería pasar de 2 Pa a 4 Pa. En forma más general esto quiere decir que un incremento

[6] Los límites de intensidad audibles (el umbral de audibilidad y el umbral de dolor) varían con la frecuencia del sonido, como se verá más adelante en el capítulo de psicoacústica.

en progresión geométrica de presión (1, 2, 4, 8, ..., etc) se percibe como un incremento en progresión aritmética en intensidad (1, 2, 3, ..., etc), lo que sugiere el uso de la función logaritmo para representar la intensidad sonora.[7]

Por las razones mencionadas se introduce una magnitud diferente para la intensidad sonora, que de acuerdo a lo que hemos visto, debería comprimir la escala de intensidades a un rango de valores más pequeño y utilizar valores relativos. Se define entonces el *Nivel de Presión Sonora* (NPS o SPL por su sigla en inglés), una magnitud en decibeles (dB) de forma de comprimir la escala de intensidades y de considerar valores de presión sonora relativos a una presión sonora de referencia. La presión sonora de referencia elegida es $p_{ref} = 20\ \mu Pa$ que corresponde a la mínima presión sonora audible. La expresión para el NPS es,

$$NPS(dB) = 20\ log(\frac{p}{p_{ref}})$$

donde p es la presión sonora, p_{ref} la presión de referencia y log indica el logaritmo decimal ó logaritmo en base 10.

La mínima presión audible (que corresponde al nivel de referencia) equivale a 0 $dB\ NPS$. Por otra parte establecimos el límite de audición en 20 Pa, un millón de veces la presión de referencia, lo que equivale a 120 $dB\ NPS$. El rango audible de intensidad sonora es entonces de 120 $dB\ NPS$.

$$NPS_{ref} = 20\ log(\frac{p_{ref}}{p_{ref}}) = 20\ log(1) = 0\ dB$$

$$NPS_{max} = 20\ log(\frac{p_{max}}{p_{ref}}) = 20\ log(1{,}000{,}000) = 120\ dB$$

1.6. Representación de una onda sonora en el tiempo

Según la naturaleza del sonido que hemos analizado, en un punto fijo en el espacio la presión aumenta y disminuye por efecto de la onda sonora. Una representación muy usual del sonido, denominada *oscilograma*, muestra esta variación de presión en el tiempo.[8] Consiste en graficar el valor de presión sonora en cada instante de tiempo, para un punto fijo en el espacio. El eje horizontal (abscisas) representa el tiempo, y el eje vertical (ordenadas) la presión sonora (ver figura 1.7). Los valores positivos de este gráfico representan compresiones y los negativos descompresiones.

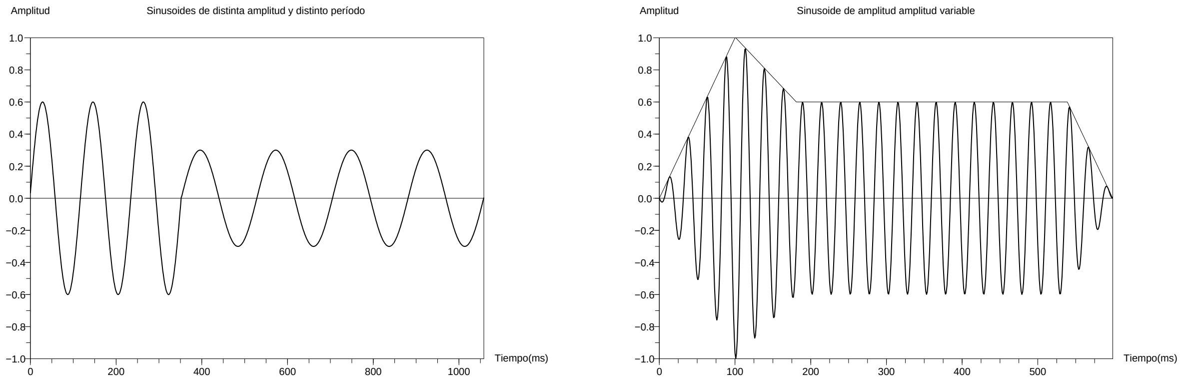
El oscilograma permite interpretar rápidamente algunas características del sonido. En particular, muestra claramente la *amplitud* del sonido (ver figura 1.7(a)). La *amplitud* o *valor de pico* es el valor máximo que alcanza la oscilación en un período.

Observando el patrón de repetición de la oscilación es posible determinar su período. El período es justamente el tiempo necesario para que el patrón oscilatorio se repita en el oscilograma.

La amplitud de los sonidos reales cambia con el tiempo. Se denomina *envolvente de amplitud* a la linea que se obtiene uniendo los picos de amplitud de cada período. Esta es otra de las características del sonido que se pone claramente de manifiesto en el oscilograma (ver figura 1.7(b)).

[7] La percepción de sonoridad se tratará en forma más rigurosa en el capítulo de psicoacústica.

[8] Esta variación de presión sonora puede traducirse a la variación de otra magnitud. Por ejemplo un micrófono es un trasductor de variación de presión sonora a variación de una magnitud eléctrica (voltaje o corriente).



(a) (b)

Figura 1.7: Oscilograma: evolución temporal de la presión sonora en un punto en el espacio. Abscisas - Tiempo (en segundos o milisegundos, ms), Ordenadas - Amplitud (se suele representar en valores normalizados entre -1 y 1). El oscilograma muestra claramente algunas propiedades del sonido, como amplitud, envolvente de amplitud y período. (a) Sinusoides consecutivas de diferente amplitud y período. (b) Sinusoide de amplitud variable, se indica la envolvente de amplitud como una recta que une los picos.

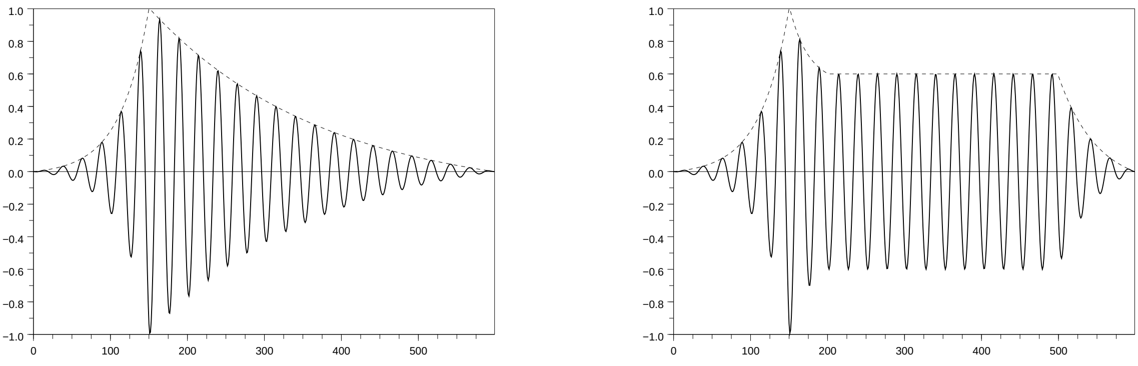
1.7. Oscilaciones

Si un sistema recibe una única fuerza y comienza a oscilar, el tipo de oscilación se denomina *oscilación libre*. Si nada perturbara el sistema este seguiría oscilando indefinidamente. En la naturaleza la fuerza de rozamiento (o fricción) amortigua el movimiento hasta que finalmente se detiene. Este tipo de oscilación se llama *oscilación amortiguada* y su amplitud varía exponencialmente decayendo con cierta constante de tiempo (ver figura 1.8(a)). El movimiento oscilatorio real de un diapasón corresponde a una oscilación amortiguada, su amplitud decae exponencialmente hasta extinguirse, debido a la fuerza de rozamiento. Una cuerda pulsada también corresponde a una oscilación amortiguada.

Si se continúa introduciendo energía al sistema podemos contrarrestar la amortiguación logrando una *oscilación autosostenida*. Esta oscilación se caracteriza por tener además de un ataque y un decaimiento, una fase intermedia casi estacionaria (ver figura 1.8(b)). Una cuerda frotada es un ejemplo de oscilación autosostenida.

Una *oscilación forzada* puede producirse al aplicar una excitación periódica de frecuencia diferente a la frecuencia propia de oscilación del sistema, logrando que este vibre a la frecuencia de la excitación. Se denomina generador al elemento que produce la excitación y resonador al sistema que se pone en vibración. Este tipo de oscilación forzada es la que se produce en las cuerdas de una guitarra que vibran por “simpatía”. No siempre es posible obtener una oscilación forzada, sino que depende de la relación entre las características del generador y el resonador.

En el caso de una oscilación forzada, cuando la frecuencia del generador coincide con la del resonador, se dice que el sistema está en resonancia. La magnitud de la oscilación del resonador depende de la magnitud de la excitación pero también de la relación entre las frecuencias de excitación y de resonancia. Cuanto mayor es la diferencia de frecuencias menor será la ampli-



(a) (b)

Figura 1.8: Una oscilación libre se ve amortiguada por la fuerza de rozamiento, por lo que su amplitud decae con el tiempo. Si se continúa introduciendo energía al sistema, es posible contrarrestar este decaimiento, lo que recibe el nombre de oscilación autosostenida. (a) Oscilación amortiguada, la envolvente de amplitud decae exponencialmente. (b) Oscilación autosostenida, existe una fase estacionaria en la envolvente de amplitud.

tud de la oscilación. Por el contrario cuando las frecuencias coinciden exactamente una pequeña cantidad de energía de excitación puede producir grandes amplitudes de vibración.

En un caso extremo el sistema resonador puede llegar a romperse, como cuando un cantante rompe una copa de cristal al dar una nota aguda.

Muchos instrumentos musicales tienen un elemento resonador que determina el timbre del instrumento favoreciendo algunos parciales de la oscilación original.

1.8. Superposición de ondas

Mencionamos que las ondas sonoras se propagan sin afectarse unas a otras, incluso cuando su diferencia de intensidad es muy grande (linealidad del medio). Sin embargo, el sistema auditivo es sensible a la presión sonora total. Es necesario analizar como se combinan o superponen diferentes ondas sonoras. La forma de onda resultante de la superposición de ondas se obtiene sumando algebraicamente cada una de las ondas que componen el movimiento. A continuación analizaremos la superposición de distintos tipos de ondas simples.

Superposición de sinusoides de igual frecuencia

Si superponemos ondas sinusoidales de igual frecuencia (pero distinta amplitud y fase) obtenemos una sinusoidal de igual frecuencia pero de amplitud y fase determinada por la amplitud y fase de sus componentes (ver figura 1.9). En algunos casos la amplitud de los componentes se suma produciendo una resultante de amplitud mayor, y en otros casos la amplitud se resta dando como resultado una sinusoide de menor amplitud que sus componentes. Eventualmente las ondas podrían cancelarse, si tuvieran igual amplitud y estuvieran a contrafase (diferencia de fase de 180°, ó π), como en la figura 1.9(d) pero con ambas sinusoides de igual amplitud.

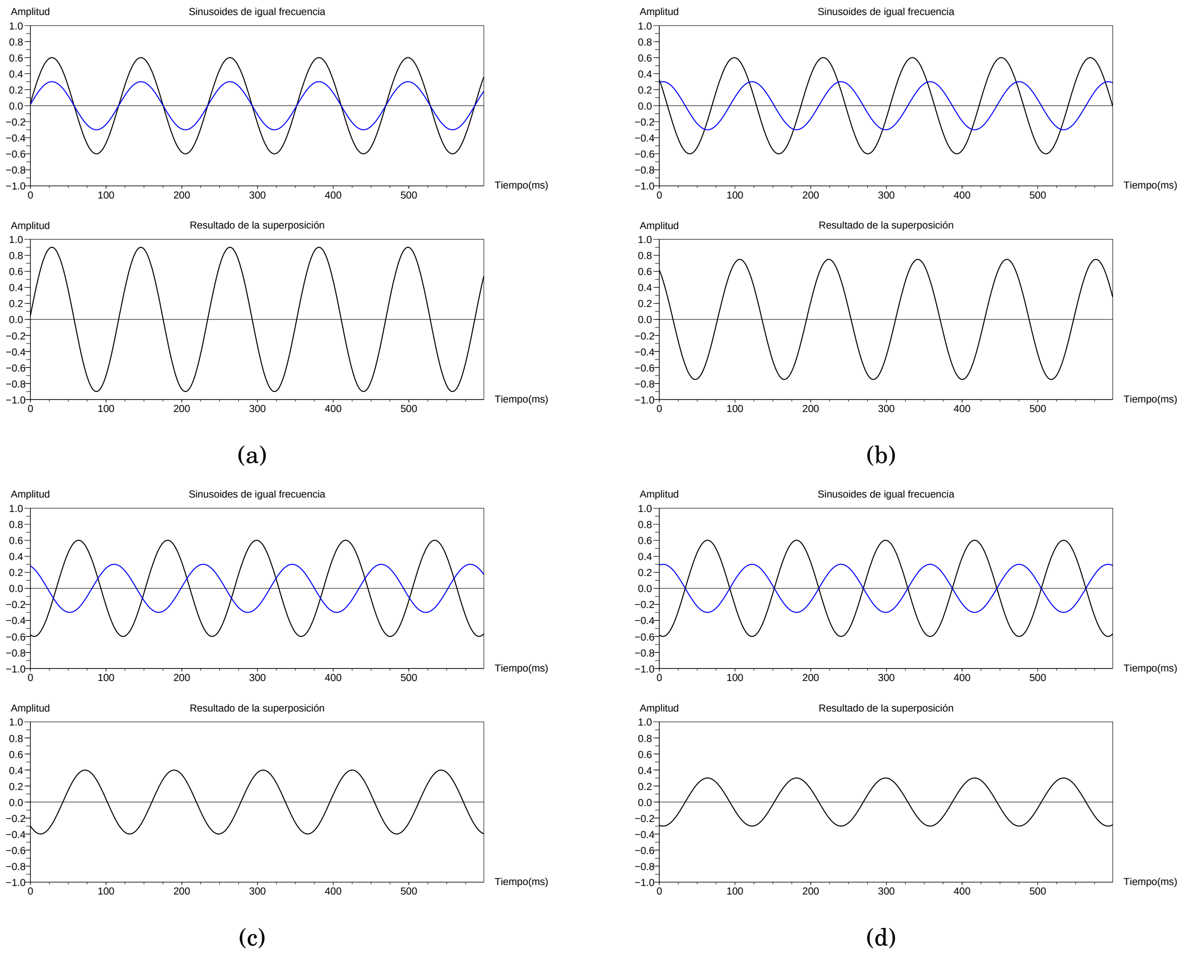


Figura 1.9: Superposición de sinusoides de igual frecuencia pero distinta amplitud y fase. La onda resultante tiene la misma frecuencia que sus componentes. La fase y la amplitud están determinadas por la amplitud y la diferencia de fase de sus componentes.

Superposición de armónicos

Un caso importante de superposición es cuando la frecuencia de los componentes se relaciona de forma *armónica*. Los armónicos de una frecuencia fundamental f_0 son aquellas frecuencias f_k múltiplos enteros de f_0, es decir,

$$f_k = kf_0 \quad \text{con} \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

Dos frecuencias se relacionan de forma armónica si son múltiplos enteros de una frecuencia fundamental.[9] Si se superponen componentes armónicos, la onda resultante es periódica, y su período

[9]Esta frecuencia fundamental debe estar en el rango audible.

corresponde al período de la frecuencia fundamental f_0 (ver figura 1.10). La forma de la onda resultante está determinada por la amplitud y la fase inicial de cada componente. Por esta razón, superponiendo los mismos armónicos pero con diferentes amplitudes y fases se obtienen distintas formas de onda (ver figuras 1.10 y 1.11).

Incluso en el caso en que la componente fundamental no esté presente en la superposición, la onda resultante de la combinación de armónicos tiene un período dado por esta frecuencia, $T = \frac{1}{f_0}$, como en el ejemplo de la figura 1.12(a).

Se denomina *serie armónica* a un sonido formado por componentes armónicos. Los ejemplos que analizamos hasta el momento de superposición de los armónicos 1, 2 y 3 constituyen series armónicas. Pero los componentes de una serie armónica pueden no ser múltiplos consecutivos, por ejemplo un sonido armónico puede estar formado por la serie armónica: 1, 3 y 5 (f_0, $3f_0$ y $5f_0$), como en ejemplo de la figura 1.12(b). Del mismo modo, la frecuencia fundamental puede no formar parte de la serie armónica, así como vimos en el ejemplo de la figura 1.12(a).

Pulsaciones

La superposición de ondas de frecuencia cercana produce un fenómeno particular denominado pulsación o batido.

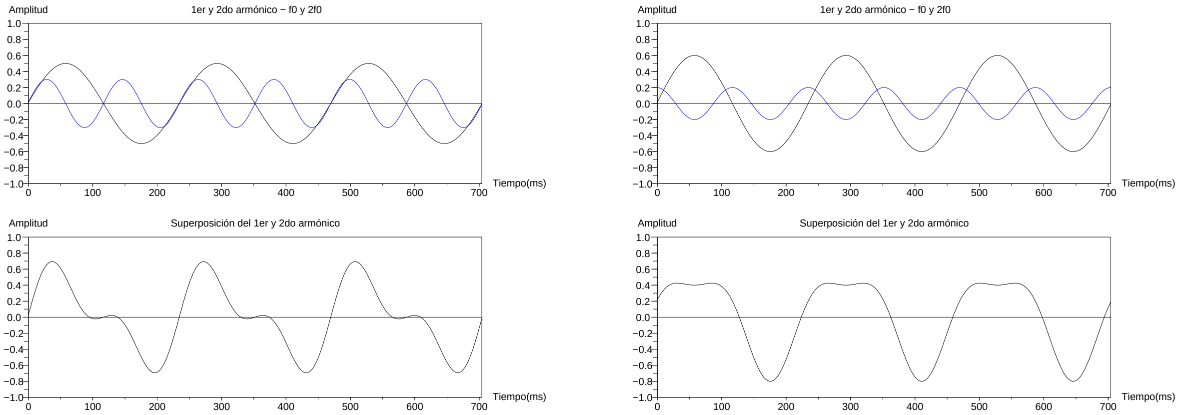
Consideremos la superposición de dos sinusoides de frecuencias f_1 y f_2, tal que $f_2 = f_1 + \Delta f$ (ver figura 1.13). El resultado de la superposición es una oscilación de frecuencia igual al promedio de las componentes $f_s = \frac{f_1+f_2}{2}$. El cambio de fases entre una y otra componente debido a su diferencia de frecuencia produce que la amplitud de la resultante tenga una amplitud variable, La amplitud de la onda resultante cambia a una frecuencia igual a la diferencia entre las frecuencias presentes, $f_b = |f_2 - f_1| = \Delta f$ (el $|.|$ indica valor absoluto). Esta variación de amplitud es lo que se percibe como una pulsación o batido de la onda resultante.

Este fenómeno es frecuente en la música y se presenta en diversas situaciones, como por ejemplo al afinar dos cuerdas de guitarra. El batido tiene además una importancia particular ya que se vincula con la resolución en frecuencia del sistema auditivo. Si las frecuencias son muy cercanas, el sistema auditivo no es capaz de discriminarlas y se percibe, como ya mencionamos, una frecuencia única promedio de las presentes. Al aumentar la diferencia se comienza a percibir un sonido áspero y al seguir aumentando llega un punto en que las componentes son percibidas como frecuencias diferentes.[10]

Ondas estacionarias

Dos ondas iguales viajando en la misma dirección pero en sentidos opuestos forman un *patrón de onda estacionaria*. La onda resultante no se propaga, sino que oscila presentando puntos de amplitud mínima (*nodos*) y puntos de amplitud máxima (*antinodos*). La figura 1.14 muestra un ejemplo de un patrón de onda estacionaria producido por dos sinusoides viajando en sentidos opuestos, se indica la ubicación de un nodo y un antinodo.

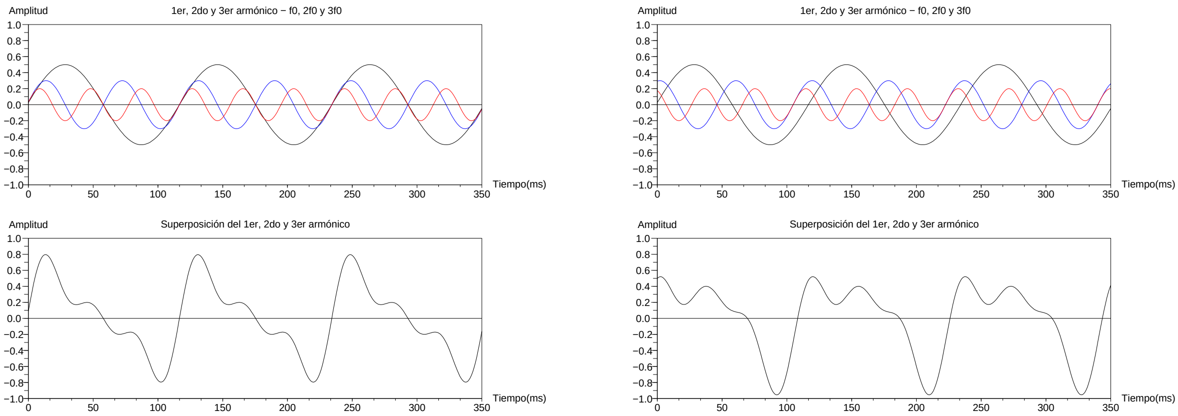
[10] El fenómeno de batido se verá con más detalle en el capítulo de psicoacústica.



(a) (b)

Figura 1.10: Superposición de primer y segundo armónico (f_0 y $2f_0$). La onda resultante es periódica de período $T = \frac{1}{f_0}$. La forma de onda resultante depende de la cantidad de armónicos que se superponen, pero también de la amplitud y fase de cada uno de ellos.

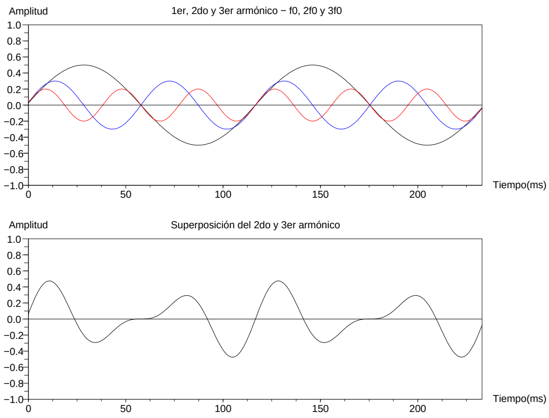
(a) amplitudes: $A_1 = 0{,}5$ $A_2 = 0{,}3$ - fases: $\phi_1 = \phi_2 = 0$.
(b) amplitudes: $A_1 = 0{,}6$ $A_2 = 0{,}2$ - fases: $\phi_1 = 0$ $\phi_2 = \frac{\pi}{2}$.



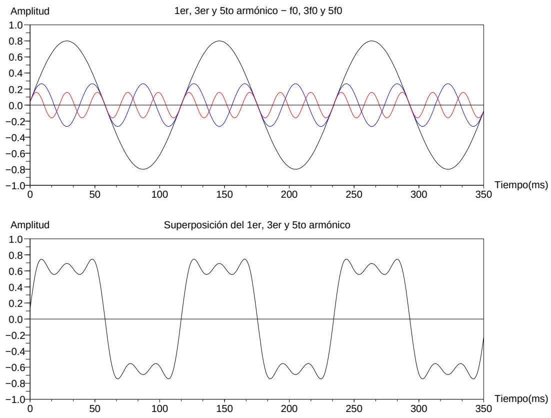
(a) (b)

Figura 1.11: Superposición de primer, segundo y tercer armónico (f_0, $2f_0$ y $3f_0$). Nuevamente es posible apreciar que la onda resultante es periódica de período $T = \frac{1}{f_0}$. Superponiendo los mismos armónicos, pero con fases y amplitudes distintas en cada caso, se obtienen formas de onda resultante diferentes, lo que puede apreciarse al comparar estos dos ejemplos.

(a) amplitudes: $A_1 = 0{,}5$ $A_2 = 0{,}3$ $A_3 = 0{,}2$ - fases: $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = 0$.
(b) amplitudes: $A_1 = 0{,}5$ $A_2 = 0{,}3$ $A_3 = 0{,}2$ - fases: $\phi_1 = 0$ $\phi_2 = \frac{4\pi}{10}$ $\phi_3 = \frac{6\pi}{10}$.



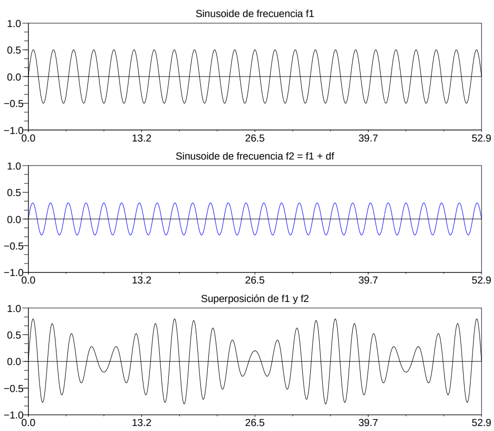
(a)



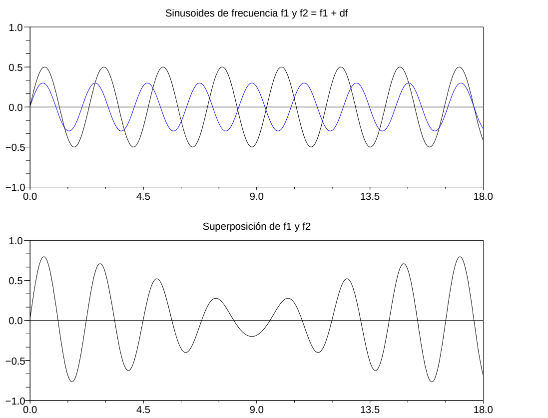
(b)

Figura 1.12: Una serie armónica es un sonido compuesto por componentes de frecuencia en relación armónica, como en estos ejemplos.

(a) Superposición de segundo y tercer armónico. Si bien la sinusoide de frecuencia fundamental f_0 no forma parte de la combinación, el período de la onda resultante es $T = \frac{1}{f_0}$.
(b) Superposición de primer, tercer y quinto armónico. Los componentes de una serie armónica no tienen que ser necesariamente armónicos consecutivos.

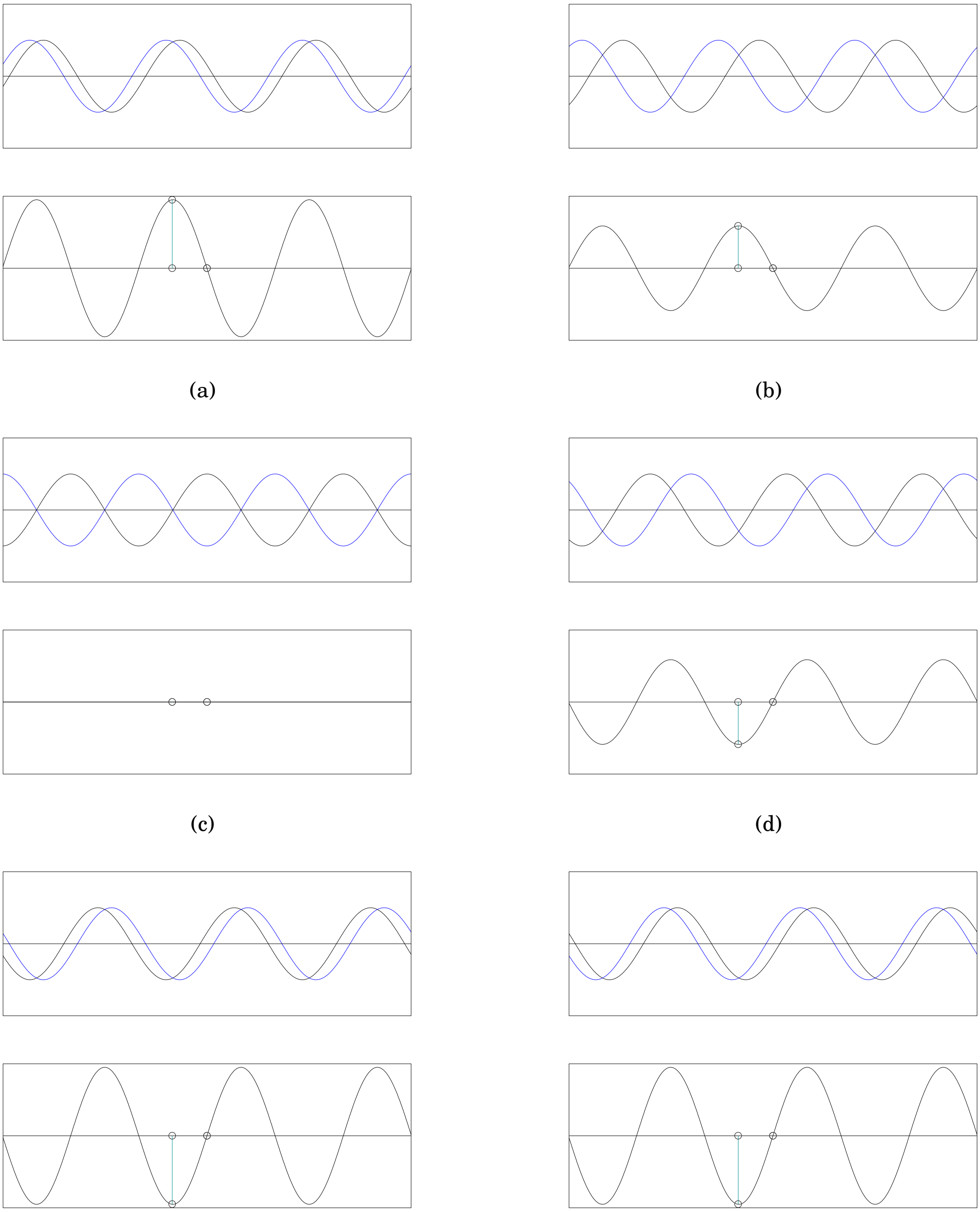


(a) Ejemplo de batido



(b) Detalle de superposición

Figura 1.13: Superposición de componentes de frecuencia cercana. La onda resultante tiene una frecuencia igual al promedio de las componentes y su amplitud varía a una frecuencia dada por la diferencia.



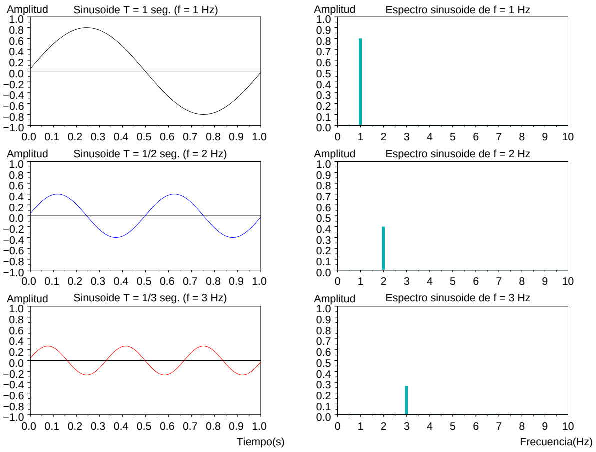
(a) (b) (c) (d) (e) (f)

Figura 1.14: Ondas iguales viajando en sentido opuesto forman un patrón de onda estacionaria. Se indica la ubicación de un nodo y un antinodo del patrón resultante.

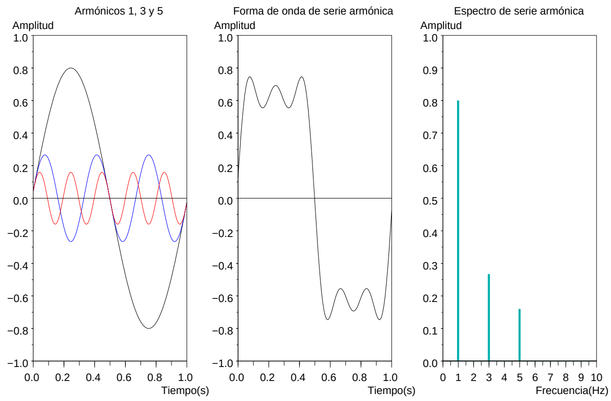
1.9. Representación de una onda sonora en frecuencia

Espectro

Hasta el momento hemos considerado la representación del sonido a través del oscilograma. Una alternativa de mucha utilidad consiste en describir el sonido a través de sus componentes en frecuencia. Esta representación recibe el nombre de *espectro*, o representación espectral. El eje horizontal (abscisas) representa la frecuencia y el eje vertical (ordenadas) la amplitud.[11] En la figura 1.15(a) se observa la representación espectral de sinusoides de frecuencia 1, 2 y 3 Hz. De la misma forma, la representación en frecuencia de la serie armónica compuesta por los armónicos 1, 3 y 5, con una fundamental de $f_0 = 1$ Hz, consiste en tres componentes en frecuencia: 1, 3 y 5 Hz respectivamente (ver figura 1.15(b)).



(a) Espectro de sinusoides



(b) Espectro de serie armónica

Figura 1.15: Representación en frecuencia de: (a) sinusoides de 1, 2 y 3 Hz, (b) serie armónica de fundamental $f_0 = 1$ Hz compuesta por los armónicos 1, 3 y 5 (1, 3 y 5 Hz).

Teorema de Fourier

Hemos analizado anteriormente la superposición de sinusoides de igual frecuencia f_0 y de sinusoides de frecuencia en relación armónica con frecuencia fundamental f_0. Observamos que la onda resultante es periódica, de período $T = \frac{1}{f_0}$. La forma de onda resultante será diferente si superponemos distinta cantidad de componentes. Pero aún superponiendo los mismos componentes, es posible obtener ondas periódicas distintas, alterando la amplitud y la fase inicial de cada componente.

La superposición de sinusoides es de especial relevancia debido a la teoría de Fourier. En el siglo XIX, el matemático y físico francés Fourier estableció que cualquier onda periódica puede ser representada por superposición de sinusoides de frecuencia en relación armónica. La frecuencia

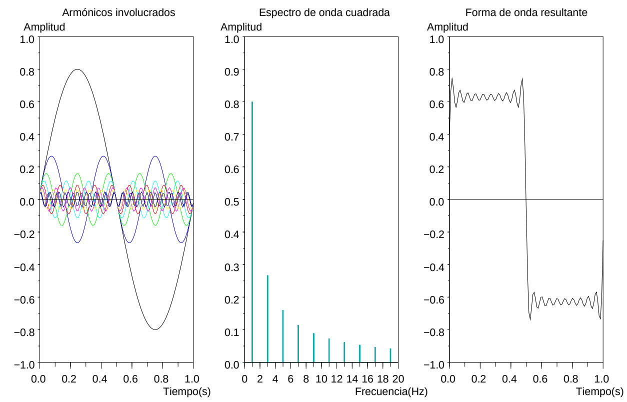
[11]Más precisamente las ordenadas representan valores proporcionales a la amplitud. La relación de proporcionalidad está dada por la Transformada de Fourier. En estas representaciones esquemáticas del espectro usaremos directamente valores de amplitud.

fundamental de los armónicos está dada por la frecuencia de repetición de la onda periódica a representar. Esta idea se conoce con el nombre de *teorema de Fourier* y ha tenido un enorme impacto en la física, la matemática y en consecuencia en la tecnología.

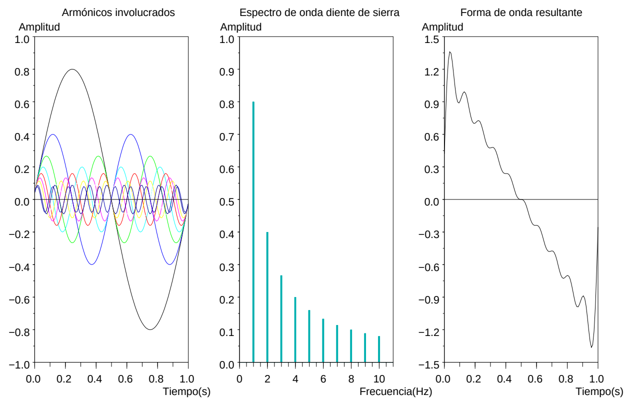
El teorema de Fourier establece además un procedimiento matemático para obtener la amplitud y la fase de cada armónico necesario para representar la onda periódica bajo análisis. La determinación de los componentes de un movimiento periódico se denomina *análisis de Fourier*, y la combinación de una serie de armónicos en un movimiento complejo recibe el nombre de *síntesis de Fourier*.

En la figura 1.16 se examinan dos ejemplos de análisis de Fourier de formas de onda ideales, una *onda cuadrada* 1.16(a) y una onda *diente de sierra* 1.16(b). Una onda cuadrada consiste en dos niveles de amplitud (uno positivo y otro negativo) que se alternan en el tiempo, cada uno de ellos por un tiempo $\frac{T}{2}$. La onda diente de sierra tiene una bajada en forma de rampa y una rápida subida (vertical), que se repite en cada período T.

Las cantidades determinadas en el análisis son la frecuencia de cada componente (o dicho de otra forma, los armónicos involucrados), y la amplitud y fase inicial de cada armónico. En este ejemplo los valores obtenidos del análisis de Fourier son los siguientes. Para la onda diente de sierra se deben combinar todos los armónicos, mientras que en la onda cuadrada se deben combinar los armónicos impares. La amplitud de cada armónico es inversamente proporcional al múltiplo al que correponden. La fase inicial de cada armónico es nula. En las figuras se observa una síntesis de Fourier de cada una de las ondas, usando un número de 10 componentes. Si aumentáramos el número de componentes las ondulaciones se eliminarían gradualmente, aproximándose cada vez más a la forma de onda ideal.



(a)



(b)

Figura 1.16: Ejemplos de síntesis de Fourier de ondas ideales: (a) onda cuadrada, (b) diente de sierra. Se utilizan 10 componentes en la síntesis.

La teoría de Fourier plantea que los sonidos periódicos pueden descomponerse como superposición de armónicos de frecuencias discretas, múltiplos enteros de una frecuencia fundamental. Los sonidos reales sin embargo, no son estrictamente periódicos, ya que por ejemplo su amplitud varía con el tiempo (como observamos anteriormente). A pesar de ello, es posible aplicar en estos casos una versión más genérica del análisis de Fourier. Puede demostrarse matemáticamente que un sonido variable en el tiempo tiene un espectro continuo, en el cual todas las frecuencias están presentes con determinada intensidad. Si el sonido cambia lentamente, las frecuencias discretas correspondientes a los armónicos, seguirán siendo las más intensas. Por el contrario, si el cambio es importante de un ciclo al siguiente, la característica discreta del espectro desaparecerá y la representación en frecuencia será una curva continua que cubre un rango amplio de frecuencias.

Tipos de espectro del sonido

Según las características de su espectro es posible clasificar al sonido en tres grandes categorías: sonidos de *espectro armónico*, *espectro inarmónico* y *espectro continuo (o rudio)*.

Espectro armónico

Este tipo de sonidos están formados por componentes armónicos, es decir múltiplos enteros de una frecuencia fundamental. Tal como vimos, su forma de onda es periódica, de período $T = \frac{1}{f_0}$. Su espectro presenta una característica discreta, siendo las frecuencias correspondientes a los armónicos las componentes espectrales más salientes.

La mayoría de los sonidos musicales de altura definida forman parte de esta categoría.

Espectro inarmónico

Los sonidos de espectro inarmónico están formados por un conjunto de componentes discretos en frecuencia que no presentan una relación armónica. Se suele denominar *parciales* a estos componentes. La forma de onda resultante no es periódica, y el espectro también presenta un carácter discreto con picos espectrales ubicados en la frecuencia de cada parcial.

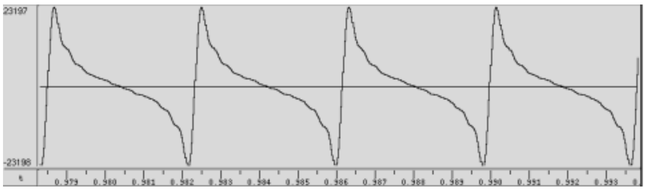
Ejemplos de sonidos de espectro inarmónico son el sonido de campanas o placas de metal.

Espectro continuo ó ruido

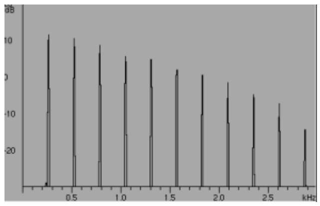
Los sonidos formados por una gran cantidad de parciales muy próximos reciben el nombre de espectro continuo ó ruido. Su espectro no presenta una característica discreta como en los casos anteriores, sino que consiste en una curva continua que se extiende en un amplio rango de frecuencias. Su forma de onda no muestra periodicidad, por el contrario parece aleatoria.

Los soplidos o el ruido del mar son ejemplos de sonidos de espectro continuo que encontramos en la naturaleza. Existen dos tipos de ruido artificiales (generados electrónicamente) que son particularmente relevantes: el *ruido blanco* y el *ruido rosa*. El espectro del ruido blanco es una curva constante en frecuencia, es decir todas las frecuencias están presentes con igual intensidad (de donde proviene el nombre de *blanco* por analogía con la luz blanca que tiene todos los colores con igual intensidad). El ruido rosa no tiene un espectro constante, sino que tiene la particularidad de que en cada octava tiene la misma cantidad de energía sonora. Por esa razón las frecuencias bajas tienen mayor intensidad que las altas. Ambos tipos de ruido tienen aplicaciones en electroacústica.

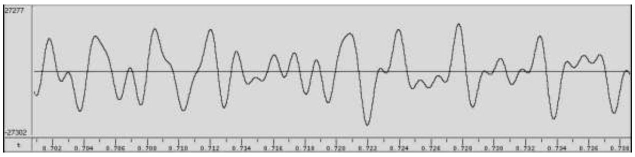
En la figura 1.17 se presentan ejemplos de los distintos tipos de sonidos descriptos, su forma de onda y su espectro.



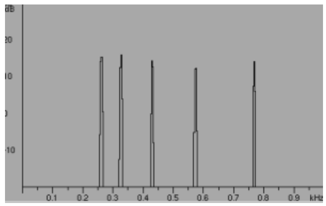
(a) Sonido de espectro armónico



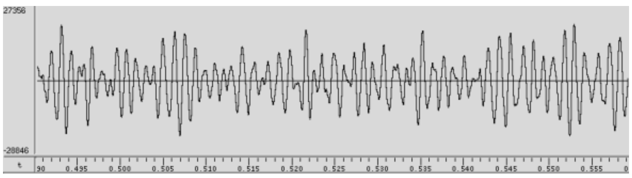
(b) Espectro armónico



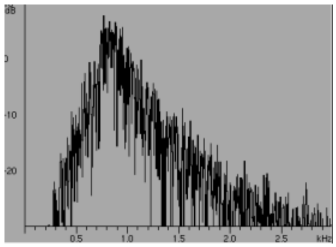
(c) Sonido de espectro inarmónico



(d) Espectro inarmónico



(e) Ruido



(f) Espectro continuo

Figura 1.17: Ejemplo de los distintos tipos de espectro del sonido. Espectros calculados usando la herramienta proporcionada por el editor de onda. Forma de onda - izquierda, espectro - derecha.

(a)(b) Once primeros armónicos de Do central (261,626 Hz, 523,252 Hz, 784,878 Hz, ..., etc).
(c)(d) Cinco parciales de frecuencias 267 Hz, 532 Hz, 641 Hz, 764 Hz y 1071 Hz (no armónicas).
(e)(f) Banda de ruido en torno a los 830 Hz.

1.10. Propagación frente a obstáculos

Como ya mencionamos, al aire libre, las ondas sonoras se propagan en todas direcciones, como ondas esféricas. Se denomina *frente de onda* al conjunto de puntos de la onda sonora que se encuentran en fase, o de otra forma, una superficie continua que es alcanzada por la perturbación en un instante. Dentro del tubo de un pistón el frente de onda es plano (ver figura 1.18), mientras que en el monopolo (esfera pulsante) al aire libre el frente de onda es esférico. A determinada distancia de la fuente las ondas esféricas pueden considerarse ondas planas.

En algunos casos es útil considerar que una fuente sonora emite *rayos sonoros*, similares a los rayos luminosos. Estos rayos son curvas perpendiculares a los frentes de onda. Al ser el aire un medio homogéneo las curvas son líneas rectas.

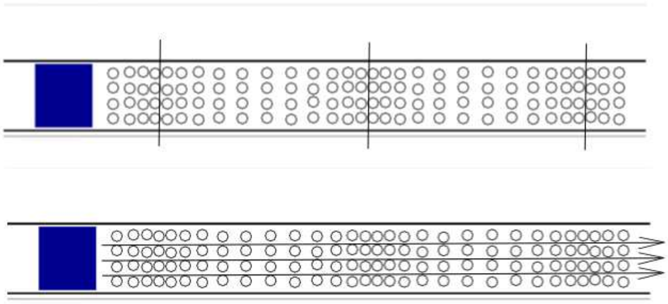


Figura 1.18: Esquema de frentes de onda planos (indicados con lineas verticales) y rayos sonoros (indicados con flechas) en un pistón.

Reflexión

Cuando una onda sonora propagándose encuentra un obstáculo, como por ejemplo un plano, parte de la energía sonora se trasmite al obstáculo y otra parte es reflejada (figura 1.19(a)). En presencia de superficies reflectoras la onda deja de ser esférica para volverse sumamente compleja debido a la superposición con las reflexiones (figura 1.19(b)). Se denomina *campo sonoro* a la forma en que se distribuye el sonido en diversos puntos dentro de un determinado espacio como una sala o al aire libre.

Una de las formas de interferencia más usuales entre dos ondas sonoras es la que se produce entre una onda proveniente de la fuente sonora y una reflexión de la misma que viaja en la misma dirección. Esto produce un patrón de onda estacionaria. Existirán puntos en el espacio de mínima amplitud (nodos) y puntos de máxima amplitud (antinodos). En estas condiciones la escucha es defectuosa. Por esta razón, en muchos espacios cerrados dedicados a la audición se evitan los planos paralelos como forma de prevenir este tipo de interferencia.

Difracción

Las ondas luminosas poseen una longitud de onda muy pequeña (de 0,6 μ metros). Sabemos por experiencia que la luz se propaga en línea recta y arroja sombras bien definidas. Por otra parte, las olas del océano tienen una longitud de onda de varios metros. También sabemos que

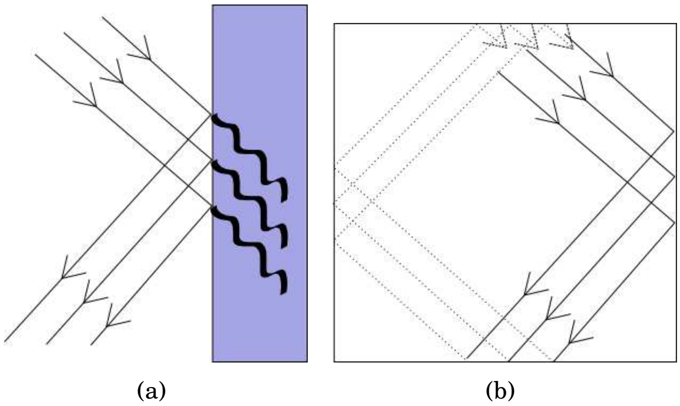


Figura 1.19: Esquema de onda sonora (a) reflejada en un plano, y (b) en presencia de múltiples superficies reflectoras, como por ejemplo en una sala.

fluyen alrededor de un pilote que sobresalga del agua y son poco afectadas por el mismo. Estos ejemplos ilustran un hecho sumamente importante: las ondas son afectadas por objetos grandes comparados con su longitud de onda. Frente a objetos grandes las ondas arrojan sombras y parecen moverse en línea recta. Pero las ondas son poco afectadas por objetos pequeños comparados con su longitud de onda y pasan a través de tales objetos.

La longitud de onda de las ondas sonoras está a medio camino respecto a los objetos que nos rodean, por lo que en general muestran un comportamiento mixto. Las ondas graves (de longitud de onda grande) son capaces de eludir objetos ordinarios y por ejemplo pueden dar vuelta una esquina. Por el contrario los agudos tienden a propagarse en línea recta y arrojan sombras acústicas. Sabemos por experiencia que los graves de un parlante se dispersan en todas direcciones pero si salimos de la habitación donde está el parlante perdemos las frecuencias agudas.

La difracción es de especial importancia en nuestra capacidad de localización del sonido, ya que la cabeza y las orejas representan obstáculos para el sonido que arrojan sombras acústicas, en el rango de frecuencias de medias a agudas. La diferencia de intensidad percibida por cada oído es una de las pautas usadas para la ubicación de la fuente.

Bibliografía

[1] J. G. Roederer, *Acústica y psicoacústica de la música*, Ricordi, 1997

[2] F. Miyara, *Acústica y sistemas de sonido*, 3^{ra} edición, UNR, 2003

[3] K. Steiglitz, *A digital signal processing primer*, Addison Wesley, 1996

[4] C. Gil, M. Vaquero, *Sonido profesional*, Cap. 1 *Física del sonido*, 4^{ta} edición, Paraninfo, 1999