

■ LA NATURALEZA DEL SONIDO

Autor Sr. Federico Miyara

Ondas Sonoras

El sonido es el resultado de una perturbación que se propaga en un medio elástico. Por ejemplo cuando en alguna región del aire se produce una perturbación de presión, por ejemplo en la forma de una compresión, dicha región tiende a expandirse hacia las regiones vecinas. Esto produce a su vez una compresión en dichas regiones, que volverán a expandirse creando una compresión más lejos todavía. Este proceso se desarrolla en forma continua haciendo que la perturbación original se propague a través del aire alcanzando en algún momento la posición que ocupa algún receptor (por ejemplo un micrófono o un oído). El exceso de presión característico de la perturbación descripta se denomina **presión sonora**.

Este tipo de movimiento en el cual no es el medio en si mismo sino alguna perturbación lo que se desplaza se denomina **onda**. Existen muchos otros tipos de ondas, tales como las ondas de radio, la luz, la radiación del calor, las ondas sobre la superficie de un lago, los tsunamis, los movimientos sísmicos, etc. Cuando la onda tiene lugar en un medio líquido o gaseoso se denomina **onda acústica**. Cuando resulta audible, se llama **onda sonora**.

Una cuestión importante relativa a las ondas es que en las mismas hay algunas características o cualidades que se mantienen prácticamente constantes a lo largo del camino de propagación de las mismas. Entre estas características se encuentra la forma de onda y la energía total (siempre y cuando el medio sea no disipativo).

Las ondas acústicas viajan habitualmente a velocidad constante, que depende del medio y de las condiciones ambientales tales como la temperatura. A temperatura ambiente la velocidad del sonido en el aire es

$$c = 345 \text{ m/s} .$$

Esto significa que para recorrer una distancia de 345 m el sonido demora 1 s. En el agua el sonido viaja más de 4 veces más rápido que en el aire. Cuando hay gradientes de temperatura (variaciones de temperatura entre dos zonas), tal como sucede entre puntos distantes algunos cientos de metros, o que se encuentran a diferentes alturas, el camino que sigue el sonido es curvilíneo en lugar de recto. Esta es la razón por la cual nuestra percepción se confunde al intentar determinar auditivamente por dónde está pasando un avión.

Ondas periódicas

Introducimos el concepto de propagación de las ondas mediante una única perturbación en un medio. En realidad, la mayoría de las ondas son el resultado de muchas perturbaciones sucesivas del medio, y no sólo una. Cuando dichas perturbaciones se producen a intervalos regulares y son todas de la misma forma, estamos en presencia de una **onda periódica**, y el número de perturbaciones por segundo se denomina **frecuencia** de la onda. Se expresa en **Hertz (Hz)**, es decir ciclos por segundo (un ciclo es todo lo que sucede durante una perturbación completa). En el caso de las ondas sonoras la frecuencia está entre 20 Hz y 20000 Hz. Las ondas acústicas de menos de 20 Hz se denominan **infrasonidos**, y los de más de 20000 Hz se llaman **ultrasonidos**. Por lo general, ni unos ni otros son audibles por el ser humano. Algunos animales (por ejemplo el perro) pueden escuchar sonidos de muy baja frecuencia, tales como los creados por las ondas sísmicas durante un terremoto. Por esta razón los animales se muestran inquietos en los instantes previos a los terremotos: pueden escuchar la señal de advertencia que resulta inaudible para el ser humano. En forma similar, algunos animales escuchan ultrasonidos. El murciélago es un caso

notable, ya que escucha sonidos de más de 100000 Hz, que le permite orientarse por medio de señales acústicas según el principio del **sonar** (semejante al conocido radar).

Ondas aperiódicas

Aun cuando muchos sonidos son aproximadamente periódicos, como los sonidos producidos por los instrumentos musicales de altura determinada (guitarra, flauta, piano), la vasta mayoría de los sonidos naturales son **aperiódicos**, es decir que las sucesivas perturbaciones no se producen a intervalos regulares y no mantienen constante su forma de onda. Esto es lo que técnicamente se denomina **ruido**. Las ondas aperiódicas en general no producen sensación de altura. Algunos ejemplos son el ruido urbano, las consonantes, el ruido del mar y del mar, y el sonido de muchos instrumentos de percusión tales como los tambores o los platillos.

Espectro

El concepto de **espectro** es de importancia capital en Acústica. Cuando introdujimos el concepto de frecuencia, dijimos que las ondas periódicas tienen asociada una frecuencia. Sin embargo, esto es sólo parte de la verdad, ya que por lo general dichas ondas contienen varias frecuencias a la vez. Esto se debe a un notable teorema matemático denominado Teorema de Fourier (en honor a su descubridor, el matemático francés Fourier), que afirma que cualquier forma de onda periódica puede descomponerse en una serie de ondas de una forma particular denominada **onda senoidal** (o **senoide**, o **sinusoide**), cada una de las cuales tiene una frecuencia que es múltiplo de la frecuencia de la onda original (**frecuencia fundamental**). Así, cuando escuchamos un sonido de 100 Hz, realmente estamos escuchando ondas senoidales de frecuencias 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, 400 Hz, 500 Hz, etc. Estas ondas senoidales se denominan **armónicos** del sonido original, y en muchos instrumentos musicales (como la guitarra) son claramente audibles.

¿Qué sucede con un sonido original cuya forma de onda ya es senoidal? Cuando uno intenta aplicar el teorema de Fourier a una senoide, el resultado es que tiene *un solo armónico*, de la misma frecuencia que la senoide original, por supuesto. (Nótese que el Teorema de Fourier no dice que *todas* las formas de ondas deban tener *varios* armónicos, sino más bien que cualquier forma de onda puede obtenerse por superposición de cierta cantidad de senoides, cantidad que puede reducirse a una sola, que es lo que ocurre con las ondas senoidales.) El hecho de que cada onda senoidal tiene una única frecuencia ha llevado a llamar también **tonos puros** a las ondas senoidales.

La descripción de las ondas senoidales que componen un sonido dado se denomina espectro del **sonido**. El espectro es importante debido a varias razones. Primero porque permite una descripción de las ondas sonoras que está íntimamente vinculada con el efecto de diferentes dispositivos y modificadores físicos del sonido. En otras palabras, si se conoce el espectro de un sonido dado, es posible determinar cómo se verá afectado por las propiedades absorbentes de una alfombra, por ejemplo. No puede decirse lo mismo en el caso en que se conozca sólo la forma de onda.

En segundo lugar, el espectro es importante porque la percepción auditiva del sonido es de naturaleza predominantemente espectral. En efecto, antes de llevar a cabo ningún otro procesamiento de la señal acústica, el oído descompone el sonido recibido en sus componentes frecuenciales, es decir en las ondas senoidales que, según el teorema de Fourier, conforman ese sonido. Por ese motivo, con algo de práctica es posible por ejemplo reconocer las notas de un acorde.

¿Qué puede decirse del espectro de los sonidos aperiódicos? El teorema de Fourier puede extenderse al caso de sonidos aperiódicos. Éstos pueden ser tan simples como los sonidos de una

campana o tan complejos como el así llamado **ruido blanco** (un ruido similar al que capta una emisora de FM en ausencia de señal o de portadora). En el primer caso, el espectro es discreto, vale decir un conjunto de frecuencias claramente diferenciadas, aunque no serán ya múltiplos de ninguna frecuencia. Podemos tener, por ejemplo, 100 Hz, 143,3 Hz, 227,1 Hz, 631,02 Hz. En el segundo caso, tenemos ¡todas las frecuencias! Esto es lo que se denomina un espectro **continuo**.

Intensidad sonora

¿Por qué algunos sonidos son más intensos que otros? Hay muchas razones, pero la causa principal es atribuible a la amplitud. La **amplitud** de un sonido es el máximo exceso de presión (o presión sonora) en cada ciclo. En el caso del ruido o de los sonidos aperiódicos, la amplitud puede estar cambiando continuamente. En este caso se acostumbra a obtener algún tipo de promedio.

■ NIVELES SONOROS

Presión Sonora

En primer lugar tenemos la **presión atmosférica**, es decir la presión del aire ambiental en ausencia de sonido. Se mide en una unidad SI (Sistema Internacional) denominada **Pascal** (1 Pascal es igual a una fuerza de 1 newton actuando sobre una superficie de 1 metro cuadrado, y se abrevia 1 Pa). Esta presión es de alrededor de 100.000 Pa (el valor normalizado es de 101.325 Pa). Podemos luego definir la **presión sonora** como la diferencia entre la presión instantánea debida al sonido y la presión atmosférica, y, naturalmente, también se mide en Pa. Sin embargo, la presión sonora tiene en general valores muchísimo menores que el correspondiente a la presión atmosférica. Por ejemplo, los sonidos más intensos que pueden soportarse sin experimentar un dolor auditivo agudo corresponden a unos 20 Pa, mientras que los apenas audibles están cerca de 20 μ Pa (**mPa** es la abreviatura de micropascal, es decir una millonésima parte de un pascal). Esta situación es muy similar a las pequeñas ondulaciones que se forman sobre la superficie de una profunda piscina. Otra diferencia importante es que la presión atmosférica cambia muy lentamente, mientras que la presión sonora lo hace muy rápido, alternando entre valores positivos (presión instantánea mayor que la atmosférica) y negativos (presión instantánea menor que la atmosférica) a razón de entre 20 y 20.000 veces por segundo. Esta magnitud se denomina **frecuencia** y se expresa en ciclos por segundo o **hertz (Hz)**. Para reducir la cantidad de dígitos, las frecuencias mayores que 1.000 Hz se expresan habitualmente en **kilohertz (kHz)**.

Nivel de Presión Sonora

El hecho de que la relación entre la presión sonora del sonido más intenso (cuando la sensación de sonido pasa a ser de dolor auditivo) y la del sonido más débil sea de alrededor de 1.000.000 ha llevado a adoptar una escala comprimida denominada escala logarítmica. Llamando **Pref** (presión de referencia a la presión de un tono apenas audible (es decir 20 μ Pa) y **P** a la presión sonora, podemos definir el **nivel de presión sonora (NPS) L_p** como

$$L_p = 20 \log (P / Pref),$$

donde **log** significa el logaritmo decimal (en base 10). La unidad utilizada para expresar el nivel de presión sonora es el **decibel**, abreviado **dB**. El nivel de presión sonora de los sonidos audibles varía entre 0 dB y 120 dB. Los sonidos de más de 120 dB pueden causar daños auditivos inmediatos e irreversibles, además de ser bastante dolorosos para la mayoría de las personas.

Nivel Sonoro con Ponderación A

El nivel de presión sonora tiene la ventaja de ser una medida objetiva y bastante cómoda de la intensidad del sonido, pero tiene la desventaja de que está lejos de representar con precisión lo que realmente se percibe. Esto se debe a que la sensibilidad del oído depende fuertemente de la frecuencia. En efecto, mientras que un sonido de 1 kHz y 0 dB ya es audible, es necesario llegar a los 37 dB para poder escuchar un tono de 100 Hz, y lo mismo es válido para sonidos de más de 16 kHz.

Cuando esta dependencia de la frecuencia de la sensación de sonoridad fue descubierta y medida (por Fletcher y Munson, en 1933,), se pensaba que utilizando una red de **filtrado** (o **ponderación de frecuencia**) adecuada sería posible medir esa sensación en forma objetiva. Esta red de filtrado tendría que atenuar las bajas y las muy altas frecuencias, dejando las medias casi inalteradas. En otras palabras, tendría que intercalar unos controles de graves y agudos al mínimo antes de realizar la medición.

Había sin embargo algunas dificultades para implementar tal instrumento o sistema de medición. El más obvio era que el oído se comporta de diferente manera con respecto a la dependencia de la frecuencia *para diferentes niveles físicos del sonido*. Por ejemplo, a muy bajos niveles, sólo los sonidos de frecuencias medias son audibles, mientras que a altos niveles, todas las frecuencias se escuchan más o menos con la misma sonoridad. Por lo tanto parecía razonable diseñar tres redes de ponderación de frecuencia correspondientes a niveles de alrededor de 40 dB, 70 dB y 100 dB, llamadas A, B y C respectivamente. La **red de ponderación A** (también denominada a veces **red de compensación A**) se aplicaría a los sonidos de bajo nivel, la red B a los de nivel medio y la C a los de nivel elevado. El resultado de una medición efectuada con la red de ponderación A se expresa en **decibeles A**, abreviados **dB(A)** o algunas veces **dB(A)**, y análogamente para las otras.

Por supuesto, para completar una medición era necesaria una suerte de recursividad. Primero había que obtener un valor aproximado para decidir cuál de las tres redes había que utilizar, y luego realizar la medición con la ponderación adecuada.

La segunda dificultad importante proviene del hecho de que las curvas de Fletcher y Munson (al igual que las finalmente normalizadas por la ISO,) son sólo promedios estadísticos, con una desviación estándar (una medida de la dispersión estadística) bastante grande. Esto significa que los valores obtenidos son aplicables a poblaciones no a individuos específicos. Más aún, son aplicables a poblaciones jóvenes y otológicamente normales, ya que las mediciones se realizaron con personas de dichas características.

La tercera dificultad tiene que ver con el hecho de que las curvas de Fletcher y Munson fueron obtenidas para **tonos puros**, es decir sonidos de una sola frecuencia, los cuales son muy raros en la Naturaleza. La mayoría de los sonidos de la vida diaria, tales como el ruido ambiente, la música o la palabra, contienen muchas frecuencias simultáneamente. Esta ha sido tal vez la razón principal por la cual la intención original detrás de las ponderaciones A, B y C fue un fracaso.

Estudios posteriores mostraron que el **nivel de sonoridad**, es decir la magnitud expresada en una unidad llamada **fon** que corresponde al nivel de presión sonora (en decibeles sin ponderación) de un tono de 1 kHz igualmente sonoro, no constituía una auténtica escala. Por ejemplo, un sonido de 80 fon no es el doble de sonoro que uno de 40 fon. Se creó así una nueva unidad, el **son**, que podía medirse usando un **analizador de espectro** (instrumento de medición capaz de separar y medir las frecuencias que componen un sonido o ruido) y algunos cálculos ulteriores. Esta escala, denominada simplemente como **sonoridad**, está mejor correlacionada con la sensación subjetiva de sonoridad, y por ello la ISO normalizó el procedimiento (en realidad dos procedimientos diferentes según los datos disponibles) bajo la Norma Internacional **ISO 532**. En la actualidad existen inclusive instrumentos capaces de realizar automáticamente la medición y los cálculos requeridos para entregar en forma directa la medida de la sonoridad en **son**.

Ponderación A y Efectos del Ruido

Desde luego, lo anterior no responde la pregunta de cuán molesto o perturbador resultará un ruido dado. Es simplemente una escala para la sensación de sonoridad. Varios estudios han enfocado esta cuestión, y existen algunas escalas, como la escala **noy** que cuantifica la ruidosidad bajo ciertas suposiciones, y por supuesto, en función del contenido de frecuencias del ruido a evaluar.

Podemos apreciar, por lo tanto, que no hay disponible en la actualidad ninguna escala que sea capaz de dar cuenta exitosamente de la molestia que ocasionará un ruido a través de mediciones objetivas, simplemente porque la molestia es una reacción muy personal y dependiente del contexto.

¿Por qué, entonces, ha sobrevivido y se ha vuelto tan popular y difundida la escala de ponderación A?

Es una buena pregunta. La razón principal es que diversos estudios han mostrado una buena correlación entre el nivel sonoro A y el **daño auditivo**, así como con la **interferencia a la palabra**. Sin otra información disponible, el nivel sonoro con ponderación A es la mejor medida única disponible para evaluar y justipreciar problemas de ruido y para tomar decisiones en consecuencia. También exhibe una buena correlación, según han revelado diversos estudios, con la disposición de las personas afectadas por contaminación acústica a protestar en distintos niveles.

Es interesante observar que a pesar de que la escala de decibeles A fue originalmente concebida para medir sonidos de bajo nivel, ha demostrado ser más adecuada para medir daño auditivo, resultado de la exposición a ruidos de nivel elevado. Ignoro cómo se descubrió esta relación, pero probablemente se pueda atribuir a la carencia de otros instrumentos de medición, a la suerte accidental, o al uso consciente de todos los tipos de instrumentos disponibles para superar las circunstanciales fronteras del conocimiento.

Con respecto a su utilización en cuestiones legales, por ejemplo en la mayoría de las ordenanzas y leyes sobre ruido, es porque proporciona una medida objetiva del sonido de alguna manera relacionada con efectos deletéreos para la salud y la tranquilidad, así como la interferencia con diversas actividades. No depende en el juicio subjetivo de la policía ni del agresor ni del agredido acústicamente. Cualquiera en posesión del instrumental adecuado puede medirlo y decir si excede o no un dado límite de aceptabilidad legal o reglamentario. Esto es importante, aún cuando no sea la panacea. Probablemente en el futuro irán surgiendo mediciones más perfeccionadas y ajustadas a diferentes situaciones.

Apéndice

NOTA DEL AUTOR: La tabla siguiente pertenece a la Noise Pollution Clearinghouse, y su utilización aquí en versión traducida es gentileza de esa organización.

La tabla de decibeles (dB) a continuación compara algunos sonidos comunes y muestra cómo se clasifican desde el punto de vista del daño potencial para la audición. El ruido comienza a dañar la audición a niveles de alrededor de 70 dBA. Para el oído, un incremento de 10 dB implica duplicar la sonoridad.

Niveles Sonoros y Respuesta Humana		
Sonidos característicos	Nivel de presión sonora [dB]	Efecto
Zona de lanzamiento de cohetes (sin protección auditiva)	180	Pérdida auditiva irreversible
Operación en pista de jets Sirena antiaérea	140	Dolorosamente fuerte
Trueno	130	
Despegue de jets (60 m) Bocina de auto (1 m)	120	Máximo esfuerzo vocal
Martillo neumático Concierto de Rock	110	Extremadamente fuerte
Camión recolector Petardos	100	Muy fuerte
Camión pesado (15 m) Tránsito urbano	90	Muy molesto Daño auditivo (8 Hrs)
Reloj Despertador (0,5 m) Secador de cabello	80	Molesto
Restaurante ruidoso Tránsito por autopista Oficina de negocios	70	Difícil uso del teléfono
Aire acondicionado Conversación normal	60	Intrusivo
Tránsito de vehículos livianos (30 m)	50	Silencio
Líving Dormitorio Oficina tranquila	40	
Biblioteca Susurro a 5 m	30	Muy silencioso
Estudio de radiodifusión	20	
	10	Apenas audible
	0	Umbral auditivo