RUIDOS Y VIBRACIONES

NOCIONES GENERALES.

EL SONIDO Y EL RUIDO

Oscilaciones acústicas

El sonido es un fenómeno esencialmente oscilatorio, por lo que debemos hacer un breve repaso a los fundamentos del movimiento oscilatorio, definiendo a la vez los términos que la caracterizan.

Decimos que una partícula está oscilando cuando pasa a iguales intervalos de tiempo por posiciones idénticas, respecto a un punto de reposo, estando animada de la misma velocidad. Ejemplos típicos son el cuerpo suspendido mediante un resorte (Fig. 1.6) o el péndulo de un reloj.

La denominación oscilación acústica o vibración acústica se reserva para el caso del movimiento de una parte o partículas dentro de un medio elástico alrededor de su punto de equilibrio.

En general se suele hablar de “oscilaciones acústicas” y de “vibraciones mecánicas”, y por lo expuesto se deduce que las oscilaciones acústicas son mecánicas (lo que no puede decirse de las oscilaciones electromagnéticas, por ejemplo). No obstante el término “vibraciones” se reserva para oscilaciones (de baja frecuencia) de máquinas, partes de ellas, fundamentos de la misma, etc.

Desde el punto de vista histórico, la acústica, como su nombre lo indica, estaba vinculada con la audición. Vale decir estudiaba las vibraciones capaces de provocar sensación auditiva. En la actualidad este campo se ha expandido en forma que abarca “sonidos” no audibles, como los ultra e infrasonidos.

Todo movimiento periódico simple se caracteriza por su amplitud y su frecuencia (Fig. 1.1.A.). La primera (A), es la elogación o apartamiento de la partícula respecto a su posición de equilibrio. En cambio la segunda (f) es las veces por segundo que la partícula pasa por un mismo punto desplazándose en el mismo sentido.

A su ves, al tiempo que demora dicho pasaje se lo denomina período (T) y su expresión es:

$$T = \frac{1}{f} \text{ (seg.)} \qquad (1.1)$$

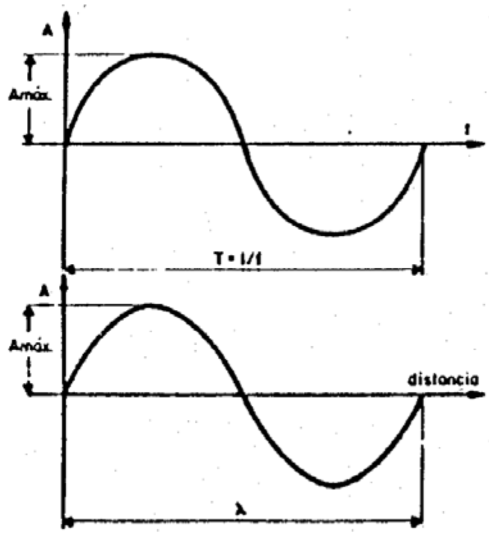

Fig. 1. 1 - Oscilación senoidal. (a) Variación en función del tiempo. (b) Variación en función de la distancia.

La amplitud es una magnitud variable con el tiempo, siendo su expresión:

$$a = Am \text{ sen } 2\pi ft = Am \text{ sen } wt \quad (1.2)$$

El medio y la propagación

Nos hemos referido a una partícula dentro de un medio elástico; oscilando alrededor de su punto de reposo. Ahora bien, al oscilar la partícula dentro del medio, arrastra en su movimiento a las partículas vecinas, las que a su vez hacen lo propio con las que están en su proximidad, etc. A este fenómeno lo denominamos propagación.

La perturbación se propaga mediante ondas, que pueden ser longitudinales cuando el movimiento de las partículas se realiza a lo largo de la dirección de la perturbación, o transversales cuando el movimiento de aquéllas es perpendicular a la dirección de la perturbación. Las primeras se propagan tanto en los líquidos como en los gases; las segundas se encuentran únicamente en los sólidos (Fig. 1.2).

La Fig. 1.2 ilustra estas dos situaciones. En a) observamos una serie de bolitas sin unión alguna entre ellas, que ejemplifican la situación de las moléculas en un medio gaseoso o líquido. La única forma que una de ellas ponga en movimiento al resto, es empujándolo a la que tiene al costado, o sea efectuando una perturbación longitudinal. La última de la fila, a su vez en el caso de tener un obstáculo, podrá ejercer una “presión” debido a su imposibilidad de desplazarse, y esa presión sería análoga a la presión sonora que ejercen las moléculas contra un obstáculo.

La Fig. 1.2.c ilustra la situación en la cual las bolitas están atadas una a otra, es decir, hacen aparecer una resistencia de corte. En este caso es posible la propagación transversal.

En el caso que nos ocupa, el medio de propagación más frecuente es el aire. Por lo tanto hablamos de “presión sonora” ya que la propagación es longitudinal y el movimiento molecular origina presiones y rarefacciones o sea ondas alternas de presión. Volviendo a la Fig. 1.2.b, tendremos presión máxima en los puntos donde las bolitas se juntan, sucediendo todo lo contrario en los puntos intermedios.

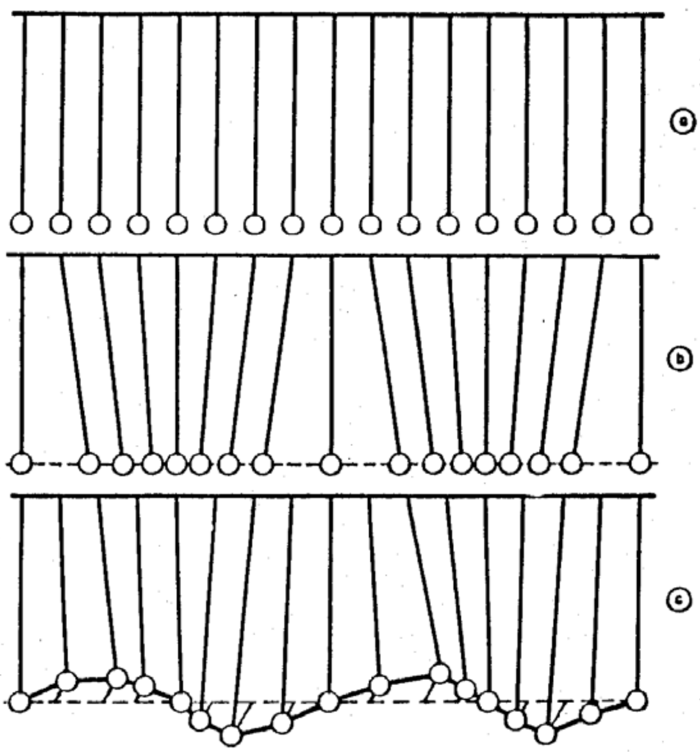

Fig. 1.2 - Propagación de ondas. (a) Péndulos en reposo; (b) Propagación longitudinal; (c) Propagación transversal.

Es evidente, que esta imagen es instantánea y transcurrido el tiempo

$$T/2 = 1/2f$$

la situación se invierte, ya que la perturbación ha “avanzado”. Más claramente, las partículas del aire oscilan cada una alrededor de su punto de equilibrio, sin que éste se desplace. Lo único que avanza es la perturbación, propagándose el sonido.

Es interesante detenerse en este punto y hacer la siguiente reflexión: si un observador está ubicado en el punto de reposo de una partícula, podrá observar su oscilación y se referirá al desplazamiento de la misma como un fenómeno oscilatorio en el que la amplitud varía según (1.2), y la velocidad según:

$$u = \frac{dA}{dt} = w\ Am \cos wt \qquad (1.3)$$

En cambio, otro observador situado en el camino de la perturbación, la verá pasar (verá pasar su frente) animada de la velocidad C, que es la velocidad de propagación y que es independiente de u. Del mismo modo observará que esta propagación se manifiesta en forma de onda de presión, similar a la propagación ondulatorio de la perturbación que provoca la caída de una piedra en la superficie tranquila del agua del estanque. Esta onda de presión tendrá una longitud l, que es función de la velocidad de propagación C y de la frecuencia de la onda, siendo su expresión (Fig. 1.1.B):

$$\lambda = \frac{C}{f} \qquad (1.4)$$

De este modo, la presión en un punto del aire producida por la fuente sonora es una función no sólo del tiempo, sino también de la distancia que media entre la fuente y el punto en cuestión:

$$p = P \, sen \, w \, (t + x/C) \qquad (1.5)$$

donde p: presión instantánea; P: su máximo valor; x: distancia entre la fuente y el punto; y C: velocidad del sonido. Esta ecuación, que es válida solamente para una onda plana, nos indica:

a) Que la presión máxima es independiente de la distancia (P no es función de x).

b) Que en todo punto, p varía con la misma frecuencia w = 2πf.

c) Que el único efecto de x es retardar el instante en el que la presión toma el mismo valor que tiene en el origen (donde x = O).

Velocidad de Propagación

Existe una marcada dependencia entre las características del medio y la velocidad con la que se propaga la perturbación en dicho medio: en los sólidos se deduce teóricamente que la velocidad depende del módulo de elasticidad (E) y de la densidad del medio (p), resultando:

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad \textbf{(1.6)}$$

en los líquidos interviene el índice de compresibilidad x = 1/E, resultando:

$$C = \sqrt{\frac{1}{x\rho}} \qquad \textbf{(1.7)}$$

Para el caso de los gases, hay que tomar en cuenta que las dilataciones y compresiones producidas por las ondas sonoras, se suceden a una velocidad que no permite el intercambio de calor con el medio ambiente, es decir, que son fenómenos adiabáticos.

En estos casos el módulo de elasticidad de la (r.6) toma el valor de:

$$E = K \, P \qquad \textbf{(1.7)}$$

K es la relación entre los calores específicos a presión y a volumen constante. K = 1,41 para los gases diatómicos (como el aire).

Es así como para estos gases resulta:

$$C = \sqrt{\frac{1.41P}{\rho}} \qquad \textbf{(1.8)}$$

Ahora bien, tanto p como P son funciones de la temperatura. De allí, que aparezcan expresiones en las que C resulte función únicamente de la temperatura, como por ejemplo en la expresión correspondiente a la velocidad del aire:

$$C = 20.05\sqrt{^{o}C + 273} \qquad \textbf{(1.9)}$$

donde ˚C es la temperatura en grados Celsius.

Los valores de las velocidades de propagación en diversos medios y/o materiales están medidos y tabulados en los manuales que contienen las características de los mismos. Por ejemplo, encontramos para el aire a 0 ˚C y presión normal 332 m/seg.; para el agua 1,500 m/seg., y para el hierro 5,365 m/seg.

Interferencia

Es otro fenómeno bien conocido cuando se trabaja con fenómenos periódicos. Si una partícula está sometida simultáneamente a dos o más fuerzas, es evidente que su desplazamiento obedecerá a la resultante de ellas. En el caso de ondas periódicas, la resultante será también un desplazamiento periódico, si bien su período y amplitud serán función de las frecuencias y amplitudes de las ondas actuantes.

En el campo de la acústica reviste particular atención la interferencia de dos ondas de igual frecuencia, ya que corresponde al caso de una onda producida por una fuente y reflejada por ejemplo en una pared. Entonces es cuando se producen las llamadas ondas estacionarias.

Todo sucede como si la misma pared se convirtiera en una fuente sonora de igual frecuencia que la original.

La combinación de ambas presiones (la directa y la reflejada) produce una presión resultante:

$$p = (P_1 + P_2)\left[\cos 2\pi(1 - \frac{x}{\lambda})\right]\cos\omega t \qquad \textbf{(1.10)}$$

comparando la 1.5 (onda progresiva) con la 1.10 (onda estacionaria) se comprueba que en la última, para los valores de:

$$x = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, ..., (2n-1)\frac{\lambda}{4}$$

es siempre p = 0, en cambio para:

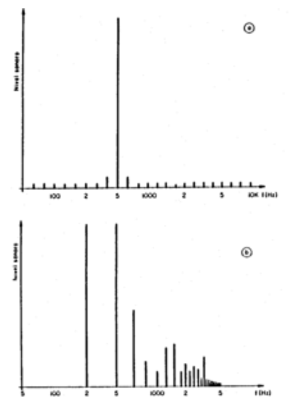

Fig. 1.3 — Espectros discontinuos. (a) Espectro del sonido de 400 Hz de órgano; (b) Espectro del sonido de 216 Hz de violonchelo.

$$x = 0, \frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, ..., \ n\frac{\lambda}{2}$$

la amplitud varía w/2π veces por segundo entre + (P + P_2) y - (P_1 + P_2) pasando por cero.

En los puntos intermedios (valores de x distintos a los ya enunciados) las amplitudes varían, como siempre, con la misma frecuencia, siendo sus valores máximos comprendidos entre 0 y 2A.

Todo sucede como si la onda estuviera detenida en el espacio. Los puntos en los que p es siempre igual a cero, se denominan nodos, y reciben el nombre de vientres los puntos donde la presión adquiere su máximo valor.

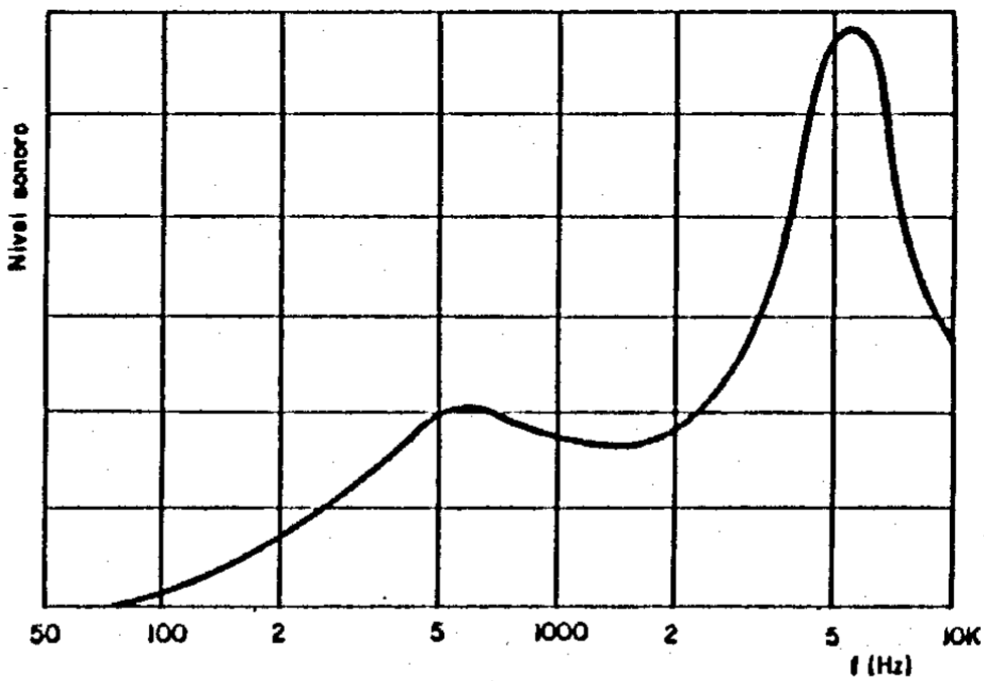

Fig. 1.4 - Espectro continuo del sonido de una campanilla telefónica.

La Fig. 6.1.C es la representación espacial de una onda estacionada. Se observan claramente los nodos y los vientres espaciados en π/2 unos de otros.

Las ondas estacionarias adquieren especial importancia en la acústica de los recintos, ya que ésta es una de las causas por la cual se observan áreas en el interior de las salas, en las que la audición resulta deficiente. El nivel de algunos sonidos resulta más elevado del que tendría que ser en ausencia de una onda reflejada importante.

Sonido puro y compuesto

Denominamos sonido puro a la señal acústica de forma senoidal que responde a una excitación de una sola frecuencia, y sonido compuesto a la que responde a la suma de varios sonidos puros.

Se demuestra que toda función periódica que cumple con determinadas condiciones, puede ser descompuesta en una serie de frecuencias denominadas componentes armónicas. El procedimiento matemático más frecuente para este fin es el análisis de Fourier.

En la práctica se recurre al uso de los denominados analizadores, o filtros. Su descripción detallada, así como su uso, son tratados en forma extensa más adelante (parr. 2.3). Estos equipos permiten conocer tanto las amplitudes, como las frecuencias de los componentes del sonido compuesto.

Magnitudes acústicas

a) Presión sonora (P)

Debemos diferenciar entre la, presión estática, que es la debida a la presencia del aire que nos rodea, y la sonora, que es la producida por el sonido, y resulta ser la diferencia entre la estática y la existente. La unidad más comúnmente utilizada en acústica, es el Pascal:

1 Pascal = 1 Newton/m2 = IOμB = 10 dina/cm2

Tratándose de un fenómeno periódico, tendremos los valores instantáneos, máximos y eficaces, relacionados entre sí en la forma ya conocida para estos fenómenos.

b) Densidad de energía (L)

Es la energía sonora comprendida dentro de la unidad de volumen. Se mide en erg/cm3.

La energía sonora consta de dos partes. Por una las partículas en movimiento contienen energía cinética, y por otra el aire comprimido tiene energía potencial. La energía cinética por unidad de volumen es:

$$Lc = 1/2\,\rho \iiint \left(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2\right) dV \qquad \textbf{(1.11)}$$

donde ux, uy y uz, son las componentes ortogonales de la velocidad y V el volumen considerado.

La energía potencial es en cambio, en el caso de una compresión adiabática:

$$Lp = \frac{1}{2}\frac{1}{\rho C} \iiint \mathbf{p}^2 \, dV \qquad \textbf{(1.12)}$$

Siendo iguales ambas energías, la energía total, en el caso de la onda plana, toma la expresión:

$$L = \rho \iiint u^2 \, dV = \frac{1}{C^2} \iiint p^2 dV \qquad \textbf{(1.13)}$$

o sea, resulta proporcional al cuadrado, tanto de la velocidad de las partículas (u) como a la presión (P).

c) Intensidad sonora (Z).

Es el valor medio de la potencia acústica instantánea que atraviesa la unidad

de aérea y se nade en:

erg / seg. cm^2

Para el caso de una onda plana senoidal, resulta:

$$I = u^2 \rho\, C = \frac{\rho^2}{pC} \qquad \textbf{(1.14)}$$

ya que siendo el sonido un fenómeno periódico, la intensidad es el producto de la densidad por la velocidad de propagación.

d) Impedancia acústica (Z)

Es la relación compleja entre la presión sonora en un punto y la velocidad de las partículas en el mismo punto de una onda plana. Su valor es:

$$Z = \frac{P}{u} = C\rho \qquad \textbf{(1.15)}$$

Se mide en g cm-2 seg. o en ohms acústicos. Su valor para el aire es de 41 ohms acústicos. Si la onda se propaga en forma libre, sin reflexiones ni interferencias, la presión y la velocidad están en fase, por lo cual la impedancia es un número real En caso contrario, por ejemplo dentro de un material poroso, aparecen desfasados, por lo que la impedancia resulta compleja. Su expresión entonces contiene dos componentes: la real y la imaginaria.

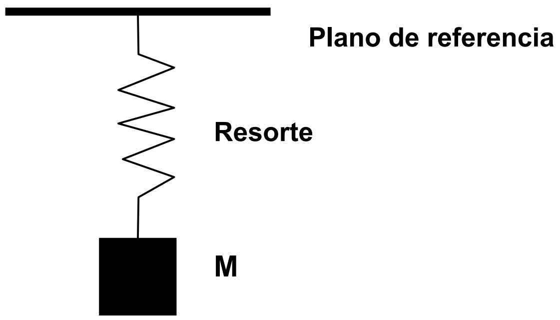

Fig. 1.6 — Sistema resonante mecánico.

También se define la impedancia acústica de un material como la relación compleja entre la presión y la velocidad de las partículas sobre la superficie del mismo.

Resonancia

Toda vez que se trata de vibraciones u oscilaciones aparece el concepto de la resonancia. Un modo de visualizar el fenómeno, dentro del campo de la mecánica podría ser el siguiente: imaginemos un elemento inercial (una masa) y un elemento elástico (un resorte), que vincule al primero con un plano de referencia (Fig. 1.6).

Si estando el sistema en equilibrio estiramos el resorte dejándolo luego en libertad, la masa comenzará a oscilar alrededor de su punto de equilibrio. La frecuencia de dicha oscilación será independiente de la elongación inicial ocasionada y dependerá únicamente de las constantes de la masa y del resorte. Dicho de otro modo, la frecuencia es algo propio del sistema, por lo que se la denomina "propia" o "de resonancia". Si en vez de la excitación brusca (al estirar el resorte), le aplicamos una fuerza variable con el tiempo y de una frecuencia igual a la de resonancia, las oscilaciones adquieren una amplitud máxima. A su vez a esta frecuencia el sistema necesita un mínimo de energía para ponerse a oscilar. En rigor necesita solamente la energía que disipa por fricciones internas del resorte, roce con el aire, etc.

Por otra parte si excitamos el sistema mediante una fuerza de otra frecuencia, los desplazamientos que se obtendrán serán de mucho menor amplitud. Vale decir, que en última instancia, el fenómeno de resonancia se puede explicar como un comportamiento selectivo con la frecuencia de un sistema mecánico. Exactamente lo mismo aparece en un sistema eléctrico que contenga un elemento inercial (una inductancia) y otro elástico (un capacitor).

Todo cuerpo físico lleva en sí los elementos de masa y elasticidad mencionados. Al ser excitado vibra con mayor o menor frecuencia, dependiendo ello de la magnitud de sus componentes. La amplitud de dicha vibración y su frecuencia pueden ocasionar presiones acústicas no detestables por el oído humano.

Por otra parte los cuerpos físicos no son por lo general uniformes ni homogéneos, de modo que pueden vibrar a la vez a más de una frecuencia y con distintas amplitudes en cada caso.

La excitación puede realizarse también con un impacto. Ejemplo típico son los instrumentos a cuerda punteados (guitarra, arpa) o golpeados (piano). En estos casos, la cuerda vibra a su frecuencia propia. Otro ejemplo común es la vibración del vaso ocasionada al ser percutido con un cuchillo o aún con la uña del dedo de la mano.

Se puede excitar la vibración del vaso por otros medios como por ejemplo haciendo que un parlante emita sonidos de la misma frecuencia que la propia del vaso. Se puede dar el caso de llegar, incluso, a la destrucción del mismo, si la excitación es suficientemente elevada. (El anecdotario de los grandes cantantes incluye varios episodios de destrucción de copas de cristal, simplemente con la emisión de un sonido de amplitud y frecuencia determinadas.)

He aquí otro ejemplo típico es la frecuencia de resonancia de un recinto. Es bien conocida la natural tendencia a cantar en el baño, y ello se debe a que las paredes de los baños son poco absorbentes y hacen que la potencia de la voz aparezca multiplicada. A la vez, si uno imita el sonido de la sirena, observa que hay frecuencias para las cuales todo el recinto vibra, son las frecuencias de resonancia del mismo.

En este caso, que es similar a los recintos acústicos (denominados cajas de altoparlantes o "bafles"), el aire cumple la doble función de elemento inercial y elástico.

El fenómeno de la resonancia mecánica adquiere especial importancia desde el punto de vista de la seguridad de estructuras como edificios, puentes, líneas de alta tensión, etc. Tanto es así que una falla en la apreciación de las fuerzas actuantes (y sus frecuencias) puede llevar a la destrucción de las estructuras citadas.