FÍSICA II

Notas sobre ondas de sonido

FICH – UNL

Damian Ramajo

Version v.2

2021

Tipos de ondas mecánicas

El sonido es una onda de presión longitudinal que se transmite a través de un medio material (gases, líquidos, sólidos).

Las ondas sonoras más sencillas son las senoidales, las cuales tienen la frecuencia, la amplitud y la longitud de onda completamente especificadas.

$$y(x,t) = A\cos(kx - \omega t)$$

El oído humano es sensible a las ondas en el intervalo de frecuencias de 20 a 20.000 Hz. A esto se le llama gama audible.

Pero, en este caso la amplitud A es un valor de presión dado por:

$$P_{max} = BkA$$

donde B es el Módulo de Volumen

$$B = \frac{-\,cambio\ de\ presión}{cambio\ fraccionario\ de\ volumen} = \frac{-\Delta P}{\Delta V / V}$$

Ejemplo 16.1 **Amplitud de una onda sonora en**

En una onda sonora senoidal de moderada intensidad, las variaciones máximas de presión son del orden de 3.0×10^{-2} Pa por arriba y por debajo de la presión atmosférica p_a (nominalmente 1.013×10^5 Pa al nivel del mar). Calcule el desplazamiento máximo correspondiente, si la frecuencia es de 1000 Hz. En aire a presión atmosférica y densidad normales, la rapidez del sonido es de 344 m/s y el módulo de volumen es de 1.42×10^5 Pa.

EJECUTAR: Por la ecuación (16.5), el desplazamiento máximo es $A = p_{\text{máx}}/Bk$. Por la ecuación (15.6), el número de onda es

$$k = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi f}{v} = \frac{(2\pi\ \text{rad})(1000\ \text{Hz})}{344\ \text{m/s}} = 18.3\ \text{rad/m}$$

Entonces,

$$A = \frac{p_{\text{máx}}}{Bk} = \frac{3.0 \times 10^{-2}\ \text{Pa}}{(1.42 \times 10^5\ \text{Pa})(18.3\ \text{rad/m})} = 1.2 \times 10^{-8}\ \text{m}$$

Rapidez de las ondas sonoras

Vimos que en una *cuerda* la rapidez de la onda esta dada por $v=\sqrt{\frac{F}{\mu}}$

Es decir, una relación del tipo $$v=\sqrt{\left(\frac{\text{fuerza de restitución que vuelve el sistema al equilibrio}}{\text{Inercia que resiste el retorno al equilibrio}}\right)}$$

Haciendo una analogía, una onda sonora en un volumen de fluido causa compresiones y expansiones de modo que el término de fuerza de restitución tiene que ver con lo fácil o difícil que es comprimir el fluido (módulo de volumen B).
La inercia está relacionada con la masa, es decir su densidad ρ (masa por unidad de volumen).

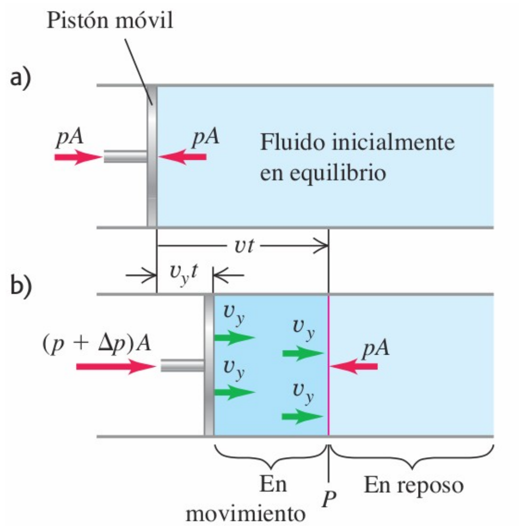
Luego, la rapidez de las ondas sonoras tiene la forma $\boxed{v=\sqrt{\frac{B}{\rho}}}$

Esta expresión puede obtenerse haciendo un balance de impulso y cantidad de movimiento $(\rho vtA)v_y$

A partir del módulo de volumen $$B=\frac{-\text{cambio de presión}}{\text{Cambio fraccionario de volumen}}=\frac{-\Delta p}{-Av_y t/Avt}$$

$$\Delta p=B\frac{v_y}{v}$$

Luego, la fuerza neta ejercida sobre el fluido es $\Delta p\, A$



Rapidez de las ondas sonoras

y el impulso es $\Delta p\, A t = B \frac{v_y}{v} A t$

Aplicando el teorema del impulso: $B \frac{v_y}{v} A t = \rho\, v t A v_y$

Y despejando $v = \sqrt{B/\rho}$

Rapidez del sonido en un sólido *es función del módulo de rigidez, conocido como módulo de Young (Y), que relaciona las tensiones y las deformaciones en un sólido (igual a lo que ocurre con la constante k de un resorte).*

$$v = \sqrt{Y/\rho}$$

Rapidez del sonido en un gas *se calcula mediante el módulo de volumen B, que puede calcularse como*

$$B = \gamma\, p_0$$

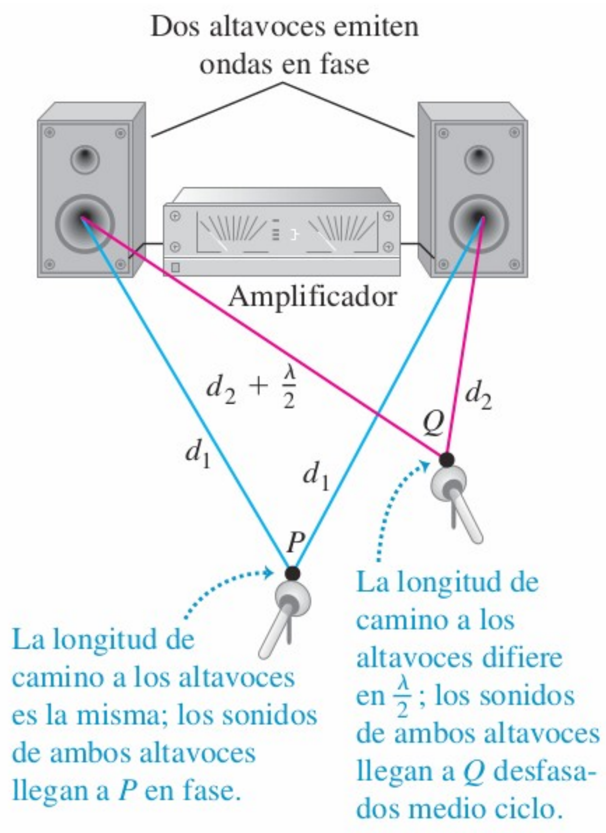
(donde γ es 1.4)

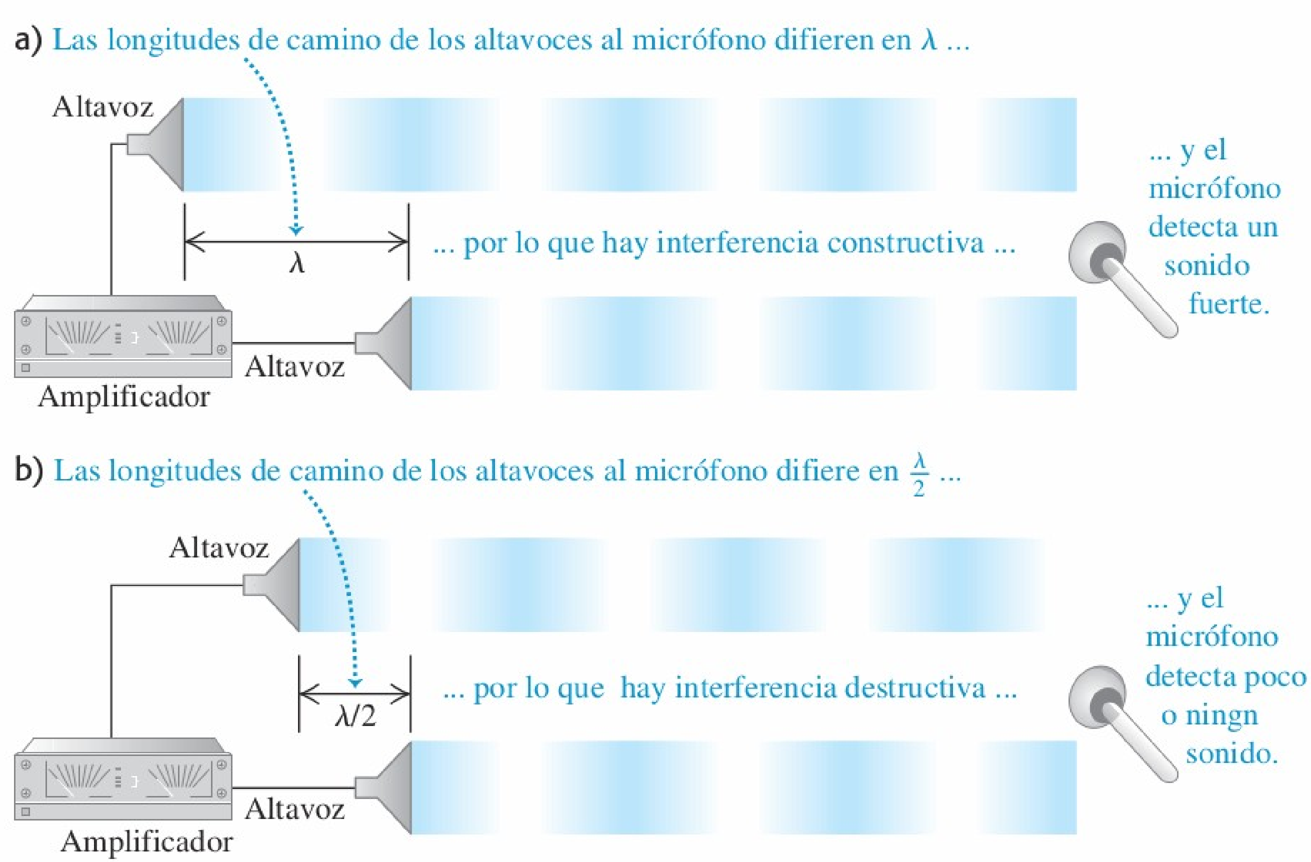
$$v = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}}$$

con R = 8.314 J/ mol K y M el peso molecular [kg/mol]

Material	Rapidez del sonido (m/s)
Gases	
Aire (20 °C)	344
Helio (20 °C)	999
Hidrógeno (20 °C)	1330
Líquidos	
Helio líquido (4 K)	211
Mercurio (20 °C)	1451
Agua (0 °C)	1402
Agua (20 °C)	1482
Agua (100 °C)	1543
Sólidos	
Aluminio	6420
Plomo	1960
Acero	5941

Interferencia de ondas

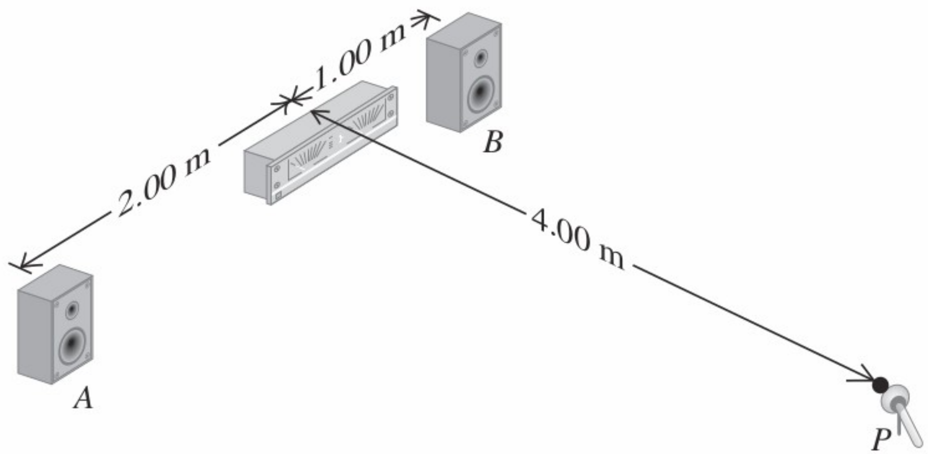




Interferencia de ondas

Ejemplo 16.14 Interferencia de altavoces

Dos altavoces pequeños, A y B (figura 16.23), son alimentados por el mismo amplificador y emiten ondas senoidales puras en fase. Si la rapidez del sonido es de 350 m/s, *a*) ¿para qué frecuencias se presenta interferencia constructiva en el punto P? b) ¿E interferencia destructiva?



EJECUTAR: La distancia del altavoz A a P es $[(2.00\text{ m})^2 + (4.00\text{ m})^2]^{1/2} = 4.47$ m; la distancia de B a P es $[(1.00\text{ m})^2 + (4.00\text{ m})^2]^{1/2} = 4.12$ m. La diferencia entre los caminos es $d = 4.47\text{ m} - 4.12\text{ m} = 0.35$ m.

a) Hay interferencia constructiva cuando la diferencia de trayecto d es $d = 0, \lambda, 2\lambda, \ldots$ es decir, $d = 0, v/f, 2v/f, \ldots = nv/f$. Por lo tanto, las posibles frecuencias son

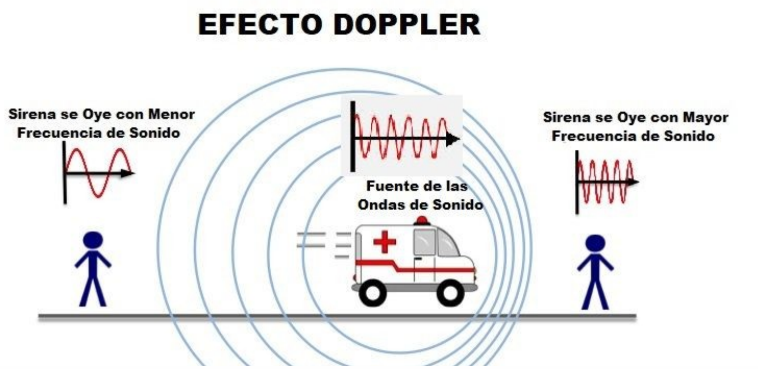
$$f_n = \frac{nv}{d} = n\frac{350\text{ m/s}}{0.35\text{ m}} \qquad (n = 1, 2, 3, \ldots)$$
$$= 1000\text{ Hz}, 2000\text{ Hz}, 3000\text{ Hz}, \ldots$$

b) Hay interferencia destructiva cuando la diferencia de camino es $d = \lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \ldots$ es decir, $d = v/2f, 3v/2f, 5v/2f, \ldots$ Las posibles frecuencias son

$$f_n = \frac{nv}{2d} = n\frac{350\text{ m/s}}{2(0.35\text{ m})} \qquad (n = 1, 2, 3, \ldots)$$
$$= 500\text{ Hz}, 1500\text{ Hz}, 2500\text{ Hz}, \ldots$$

El efecto Doppler

El efecto Doppler es el cambio de frecuencia aparente de una onda producido por el movimiento relativo de la fuente respecto a su observador. Se da en el sonido y es fácilmente percibido cuando escuchamos una sirena acercarse y luego alejarse de nosotros. Se da también con la luz, y a muy altas velocidades el observador debería ver cambiar de color los objetos.



Ejemplo 16.15 Efecto Doppler I: Longitudes de onda

Una sirena policiaca emite una onda senoidal con frecuencia $f_S = 300$ Hz. La rapidez del sonido es de 340 m/s. *a*) Calcule la longitud de onda del sonido si la sirena está en reposo en el aire. *b*) Si la sirena se mueve a 30 m/s (108 km/h, o bien, 67 mi/h), calcule las longitudes de onda para las ondas adelante y atrás de la fuente.

SOLUCIÓN

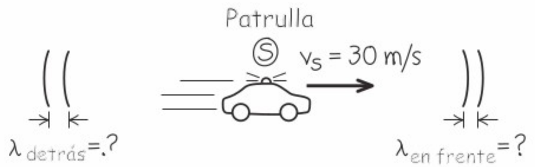
IDENTIFICAR: El efecto Doppler no interviene en el inciso *a*), ya que ni la fuente ni el receptor están en movimiento. En el inciso *b*), la fuente está en movimiento, así que deberemos considerar el efecto Doppler.

PLANTEAR: La figura 16.29 muestra la situación. Usamos la relación $v = \lambda f$ para determinar la longitud de onda cuando la sirena está en reposo. Cuando está en movimiento, obtenemos la longitud de onda a cada lado de la sirena usando las ecuaciones (16.27) y (16.28).

EJECUTAR: *a*) Cuando la fuente está en reposo,

$$\lambda = \frac{v}{f_S} = \frac{340\ \text{m/s}}{300\ \text{Hz}} = 1.13\ \text{m}$$

16.29 Nuestro esquema de este problema.



b) La situación se muestra en la figura 16.29. Por la ecuación (16.27), delante de la sirena,

$$\lambda_{\text{al frente}} = \frac{v - v_S}{f_S} = \frac{340\ \text{m/s} - 30\ \text{m/s}}{300\ \text{Hz}} = 1.03\ \text{m}$$

Por la ecuación (16.28), detrás de la sirena,

$$\lambda_{\text{detrás}} = \frac{v + v_S}{f_S} = \frac{340\ \text{m/s} + 30\ \text{m/s}}{300\ \text{Hz}} = 1.23\ \text{m}$$

EVALUAR: La longitud de onda es menor delante de la sirena y mayor detrás de ella, como debe ser.

Ondas de choque

Denotemos con v_s la rapidez del avión relativa al aire, que siempre es positiva. El movimiento del avión en el aire produce sonido; si v_s es menor que la rapidez del sonido v, las ondas delante del avión se apretarán con una longitud de onda dada por

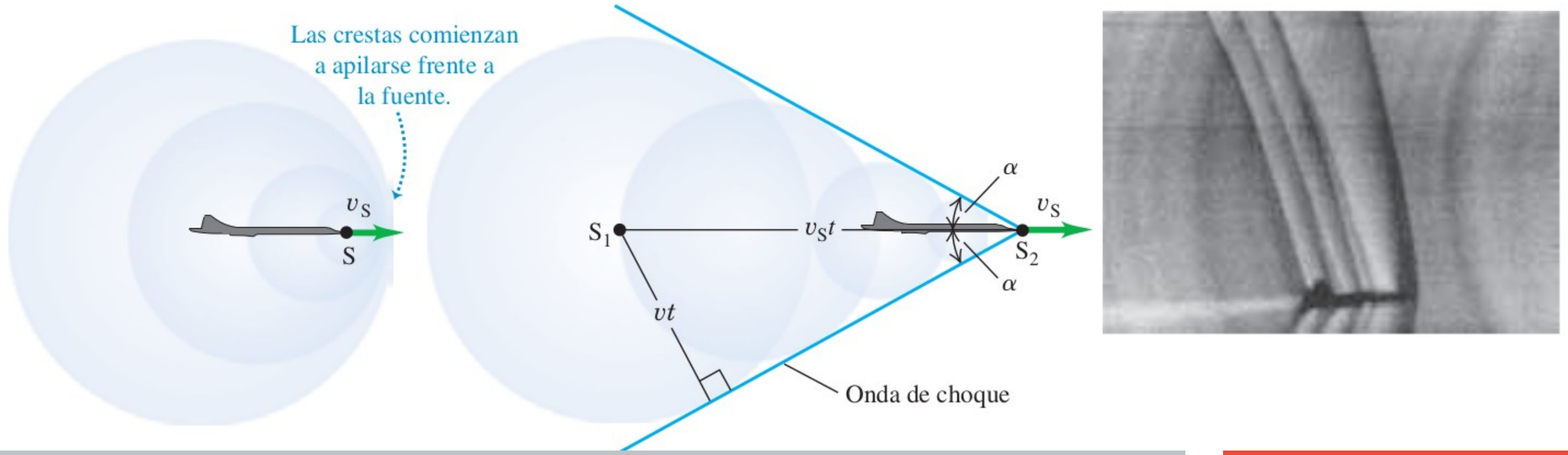
$$\lambda_{frente} = \frac{V_s - v}{f_s}$$

Conforme la rapidez del avión v_s se acerca a la rapidez del sonido v, la longitud de onda se acerca a cero y las crestas de la onda se apilan. El avión debe ejercer una fuerza grande para comprimir el aire frente a él; por la tercera ley de Newton, el aire ejerce una fuerza igualmente grande sobre el avión; por lo tanto, hay un aumento considerable en el arrastre aerodinámico (resistencia del aire) conforme el avión se acerca a la rapidez del sonido; se trata de un fenómeno llamado "barrera del sonido".

a) La fuente de sonido S (el avión) se acerca a la rapidez del sonido

b) La fuente de sonido se mueve con mayor rapidez que la del sonido

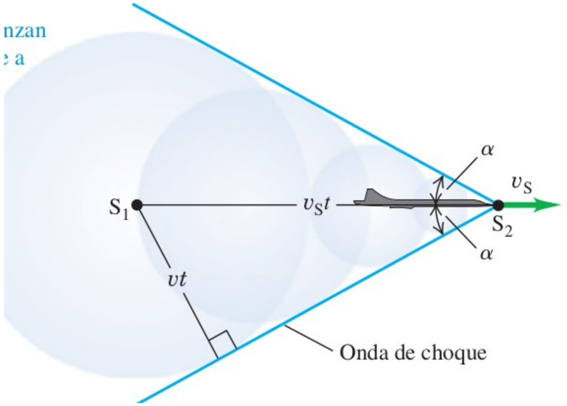
c) Ondas de choque alrededor de un avión supersónico



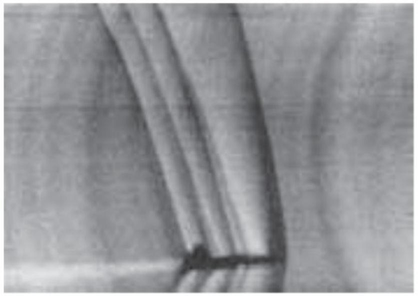
Ondas de choque

La punta del avión emite una serie de crestas de onda; cada una se expande en un círculo centrado en la posición del avión cuando emitió esa cresta. Después de un tiempo t, la cresta emitida de un punto S_1 se extendió a un círculo de radio vt, y el avión se ha movido una distancia mayor v_S t, a la posición S_2. Podemos ver que las crestas circulares se interfieren constructivamente en puntos a lo largo de la línea azul que forma un ángulo a con la dirección de la velocidad del avión, dando lugar a una cresta de onda de amplitud muy grande sobre la línea. Esta cresta se llama onda de choque.

b) La fuente de sonido se mueve con mayor rapidez que la del sonido



c) Ondas de choque alrededor de un avión supersónico



$$sen\,\alpha = \frac{v}{v_s}$$

16.37 Oímos un estampido sónico cuando la onda de choque nos alcanza en L (*no sólo* cuando el avión rompe la barrera del sonido). Un receptor a la derecha de L todavía no oye el estampido pero pronto lo oirá; un receptor a la izquierda de L ya lo oyó.