9 Ondas sonoras

E S Q U E M A   D E   L A   U N I D A D

Cuestiones previas (página 234)

1. ¿De qué tipo son las ondas sonoras?

Las ondas sonoras son ondas mecánicas longitudinales.

Son mecánicas porque necesitan un medio material para propagarse y son longitudinales porque las partículas del medio oscilan en la misma dirección de propagación de la onda.

2. ¿En qué medios pueden propagarse las ondas sonoras? ¿En cuál de ellos lo hacen con mayor velocidad?

Las ondas sonoras se pueden propagar a través de medios materiales sólidos, líquidos o gaseosos.

Las ondas sonoras se propagan a mayor velocidad en líquidos y sólidos que en gases.

3. ¿Cómo se propaga el sonido? ¿Conoces algún hecho que permita demostrar su naturaleza ondulatoria?

Se propagan mediante variaciones alternadas de las densidades del medio, aunque en los gases estas variaciones de densidad equivalen a una secuencia alternada de compresiones y enrarecimientos.

Mediante un sencillo experimento que consiste en fijar una regla por uno de sus extremos a un tornillo de mordaza. Al separar la regla, el vaivén genera compresiones y enrarecimientos del aire generándose una onda mecánica.

4. ¿Por qué percibimos los sonidos de forma tan distinta en una misma habitación cuando está amueblada y cuando está sin amueblar?

Debido a fenómenos como la reflexión y difracción del sonido que hace que tengan distintos comportamientos el sonido en una habitación con mayor objetos que en otra que no tenga ningún objeto.

5. ¿Por qué suena distinto el claxon de un coche según se acerque o aleje de nosotros?

Por el efecto Doppler que debido al movimiento relativo entre la fuente sonora y el observador hace que cambie la frecuencia con que se percibe el sonido.

Actividades (páginas 237/248)

1 Determina la velocidad de propagación del sonido en el aire a la temperatura de 0 °C y de 25 °C. Datos: R = 8,31 J/mol K, γ = 1,4, y M = 29

Usando la expresión **9.2**, cabe concluir que, para $T = 273$ K:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = 331 \text{ m/s}$$

donde $M = 29$ g/mol = 0,029 kg/mol.

Así mismo, para $T = 298$ K:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = 345{,}7 \text{ m/s}$$

2 Una persona da un golpe en un extremo de una viga de gran longitud. Otra persona que se encuentra en el otro extremo con el oído pegado a la viga percibe dos golpes. ¿Por qué motivo?

La persona en cuestión percibe en primer lugar el sonido que se transmite a través de la viga sólida, que, al propagarse a mayor velocidad, llega antes a sus oídos.

El segundo golpe corresponde al sonido que se transmite por el aire.

3 A partir del dato del coeficiente de dilatación adiabática del hexafluoruro de azufre, determina la velocidad de propagación del sonido en dicho medio a 20 °C.

Dato: masas atómicas en kg/mol: F = 0,019; S = 0,032

La velocidad de propagación del sonido en el SF_6 viene dada, como en cualquier gas, por la expresión:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

Sustituyendo los valores propios de este gas (γ = 1,08 y M = 0,146 kg/mol) se obtiene:

$$v = 129 \text{ m/s}$$

4 El sonido de la sirena de una fábrica llega a un trabajador 7 s después de que aquella haya empezado a funcionar. Calcula la frecuencia de la sirena, sabiendo que la distancia entre el trabajador y la fábrica es $49 \cdot 10^3$ veces la longitud de onda del sonido emitido.

La distancia que separa al trabajador de la fábrica es:

$$d = vt = 2\,317 \text{ m (suponiendo } T = 0\text{ °C)}$$

Por tanto, según se desprende de los datos, la longitud de onda es:

$$\lambda = \frac{d}{49\,000} = 4{,}73 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

Así pues, la frecuencia será:

$$f = \frac{v}{\lambda} = 6\,998 \text{ Hz}$$

5 ¿Cuál es el intervalo de longitudes de onda del sonido audible que se propaga en el aire?

Considerando la velocidad correspondiente a 0 °C, el intervalo de λ estaría comprendido entre:

$$\lambda_{min} = \frac{v}{f_{min}} = \frac{331 \text{ m/s}}{20 \text{ Hz}} = 16{,}5 \text{ m}$$

y

$$\lambda_{máx} = \frac{v}{f_{máx}} = \frac{331 \text{ m/s}}{20\,000 \text{ Hz}} = 1{,}65 \text{ cm}$$

6 PAU Considera una fuente sonora que emite a 500 Hz en el aire. Si este sonido se transmite después a un líquido con una velocidad de propagación de 1 800 m/s, determina:

***a)* La longitud de onda del sonido en el aire.**

***b)* El período del sonido en el aire.**

***c)* La longitud de onda del sonido en el líquido.**

Consideraremos que $T = 0$ °C (en el aire).

a) La longitud de onda del sonido en el aire será:

$$\lambda = \frac{331 \text{ m/s}}{500 \text{ Hz}} = 0{,}662 \text{ m}$$

b) El período del sonido en el aire será:

$$T = \frac{1}{500 \text{ Hz}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

c) La longitud de onda del sonido en el líquido es:

$$\lambda = \frac{1\,800 \text{ m/s}}{500 \text{ Hz}} = 3{,}6 \text{ m}$$

7 Halla las amplitudes en los cambios de presión que corresponden a los límites de intensidad del oído humano y compáralos con la presión atmosférica estándar.

A partir de la expresión **9.3**, se obtiene:

$$\Delta p = 2\rho v I$$

Por tanto, para el límite bajo de intensidad:

$$\Delta p = 2 \cdot 1{,}22\ \text{kg/m}^3 \cdot 331\ \text{m/s} \cdot 10^{-12}\ \text{W/m}^2 = $$
$$= 8{,}07 \cdot 10^{-10}\ \text{Pa}$$

Y para el límite alto de intensidad:

$$\Delta p' = 2 \cdot 1{,}22\ \text{kg/m}^3 \cdot 331\ \text{m/s} \cdot 1\ \text{W/m}^2 = 807{,}64\ \text{Pa}$$

Como la presión atmosférica es de 101 300 Pa, hay que admitir que el oído humano es muy sensible a pequeñas variaciones de presión.

8 **Si el nivel de intensidad en una fábrica debe permanecer por debajo de 85 dB, ¿cuál es la máxima intensidad de sonido permitida en dicha fábrica?**

Despejando de la expresión **9.4**:

$$\log I = \frac{\beta + 10 \log I_0}{10}$$

La máxima intensidad es:

$$I = 3{,}16 \cdot 10^{-4}\ \text{W/m}^2$$

9 **PAU** **El nivel de intensidad sonora de una bocina es de 60 dB a 10 m de distancia. Considerando la sirena un foco emisor puntual, determina:**

a) **La intensidad sonora a 100 m y a 1 km de distancia.**

b) **El nivel de intensidad sonora a 100 m y a 1 km de distancia.**

c) **La distancia a la que la sirena deja de ser audible.**

A partir de la expresión **9.4.** podemos determinar la intensidad a ese nivel:

$$60\ \text{dB} = 10 \log \frac{I}{10^{-12}} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow I = 10^{-6}\ \text{W/m}^2$$

a) Teniendo en cuenta que el sonido se propaga como una onda esférica, se cumple la ley del inverso del cuadrado de la distancia, de modo que:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \Rightarrow I r_1^2 = I_2 r_2^2$$

donde $I_1 = 10^{-6}\ \text{W/m}^2$ y $r_1 = 10$ m

Aplicando la expresión a las dos distancias consideradas, se obtiene:

$$I_2\ (100\ \text{m}) = 10^{-8}\ \text{W/m}^2$$
$$I_3\ (1\ \text{km}) = 10^{-10}\ \text{W/m}^2$$

b) Los valores de nivel de intensidad sonora correspondientes a I_2 y I_3 son respectivamente:

$$10 \log \frac{10^{-8}}{10^{-12}} = 40\ \text{dB}$$

$$10 \log \frac{10^{-10}}{10^{-12}} = 20\ \text{dB}$$

c) La sirena deja de ser audible en el punto en que $I' = 10^{-12}$ W/m².

Por tanto:

$$r' = r_1 \sqrt{\frac{I_1}{I'}} = 10\,000\ \text{m} = 10\ \text{km}$$

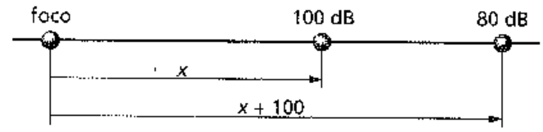
10 **PAU** **Se realizan dos mediciones del nivel de intensidad sonora en las proximidades de un foco sonoro puntual. La primera, a una distancia *x* del foco, da como resultado 100 dB, y la segunda, realizada 100 m más lejos de *x* en la misma dirección, da como resultado 80 dB.**

Determina:

a) **Las distancias al foco desde donde se hacen las mediciones.**

b) **La potencia sonora del foco emisor.**

El dibujo representativo de esta situación es el siguiente:



a) Las intensidades correspondientes a 100 dB y 80 dB son, respectivamente, 10^{-2} W/m² y 10^{-4} W/m². Aplicando la ley del inverso del cuadrado de la distancia se obtiene:

$$10^{-2} \cdot x^2 = 10^{-4}\ (x + 100)^2$$

Resolviendo *x*, obtenemos:

$$x = 11{,}1\ \text{m}$$

b) La potencia se relaciona con la intensidad de una onda esférica según la expresión:

$$P = I \cdot 4\pi x^2 = 10^{-2} \cdot 4\pi\ (11{,}1)^2 = 15{,}5\ \text{W}$$

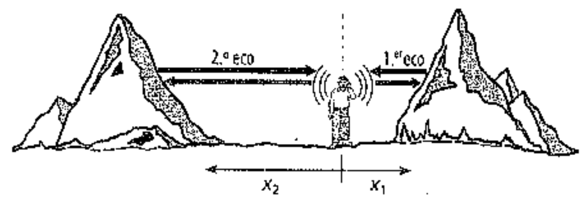
11 **Una persona situada entre dos montañas oye ecos al cabo de 3,2 y 5 segundos.**

a) **¿A qué distancia se encuentran ambas montañas?**

b) **¿Cuándo oirá el tercer eco? ¿Y el cuarto? ¿Y el quinto?**

Dato: velocidad del sonido = 340 m/s

a) La siguiente figura ilustra la situación que plantea el enunciado:



Como puede comprobarse, el primer eco se percibe después de que el sonido haya recorrido una distancia $2x_1$, mientras que el segundo se percibe cuando la distancia recorrida es $2x_2$. Por tanto:

$$x_1 = \frac{vt_1}{2} = 544\ \text{m}$$

$$x_2 = \frac{vt_2}{2} = 850\ \text{m}$$

Así, la distancia a la que se encuentran las montañas es 1394 m (544 m + 850 m).

b) El tercer eco es el que corresponde a la segunda reflexión de los sonidos. En este caso, el eco procedente de ambas montañas llegará a la vez a oídos de la persona al cabo de 8,2 s (3,2 s + 5 s).

El cuarto eco corresponde a la tercera reflexión proveniente de la montaña más cercana y se percibirá a los 11,4 s (8,2 s + 3,2 s).

El quinto eco, por último, corresponde a la tercera reflexión en la montaña más lejana y será escuchado a los 13,2 s (8,2 s + 5 s).

12 **¿Por qué se produce esa sensación tan peculiar de silencio cuando ha caído una copiosa nevada que ha cuajado?**

Entre los copos de la nieve recién caída existen muchos espacios huecos, de modo que aquella se convierte en un material muy absorbente del sonido. De esa manera, desaparece cualquier efecto derivado de la reflexión del sonido.

13 **¿Se te ocurre algún modo de amplificar un sonido producido bajo el agua, mediante el principio de la lente acústica?**

El sonido puede amplificarse, por ejemplo, intercalando entre la fuente y el receptor un globo lleno de aire. Como la velocidad de propagación en el aire es menor, se produce el efecto de refracción.

14 **Determina las tres frecuencias más bajas de un tubo de 2 m que está abierto por un extremo si la velocidad del sonido es de 340 m/s.**

A partir de la expresión:

$$f = (2n + 1)\frac{v}{4l}$$

Las tres frecuencias más bajas corresponden a los valores de $n = 0$, 1 y 2. Así pues:

$$f_1 = \frac{v}{4l} = 42{,}5 \text{ Hz}$$

$$f_3 = 3\frac{v}{4l} = 127{,}5 \text{ Hz}$$

$$f_5 = 5\frac{v}{4l} = 212{,}5 \text{ Hz}$$

15 **Halla las tres frecuencias más bajas de un tubo de 2,5 m que está abierto por ambos extremos si la velocidad del sonido es de 340 m/s.**

Las frecuencias más bajas corresponden a los valores 1, 2 y 3 de n en la siguiente expresión:

$$f = n\frac{v}{2l}$$

Así pues:

$$f_1 = \frac{v}{2l} = 68 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 2\frac{v}{2l} = 136 \text{ Hz}$$

$$f_3 = 3\frac{v}{2l} = 204 \text{ Hz}$$

16 **El tren AVE, que se desplaza a 220 km/h, hace sonar su silbato con una frecuencia de 520 Hz. Halla la frecuencia que percibe un observador en reposo cuando el tren se aproxime y se aleje.**

La frecuencia que percibe el observador en reposo cuando el tren se aproxima viene dada por:

$$f' = f\left(\frac{v}{v - v_F}\right)$$

donde $v_F = 220$ km/h $= 61{,}11$ m/s. Por tanto:

$$f' = 520 \text{ Hz} \cdot \left(\frac{340 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} - 61{,}11 \text{ m/s}}\right) = 634 \text{ Hz}$$

Por el contrario, cuando el tren se aleja:

$$f' = f\left(\frac{v}{v + v_F}\right)$$

$$f' = 520 \text{ Hz} \cdot \left(\frac{340 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} + 61{,}11 \text{ m/s}}\right) = 440{,}77 \text{ Hz}$$

17 **PAU** **Una ambulancia se mueve con una velocidad de 80 km/h mientras suena su sirena de 450 Hz. En sentido contrario, viaja otro coche a 90 km/h. Determina la frecuencia que percibe el conductor del coche cuando:**

a) **Los dos vehículos se aproximan.**

b) **Los dos vehículos se alejan.**

En este caso, la fuente sonora y el observador están en movimiento con una velocidad de:

$$v_F = 80 \text{ km/h} = 22{,}22 \text{ m/s}$$

$$v_o = 90 \text{ km/h} = 25 \text{ m/s}$$

a) Cuando los dos vehículos se aproximan:

$$f' = f\left(\frac{v + v_o}{v - v_F}\right) = 516{,}86 \text{ Hz}$$

b) Cuando los dos vehículos se alejan:

$$f' = f\left(\frac{v - v_o}{v + v_F}\right) = 391{,}33 \text{ Hz}$$

18 **El sonido de una campana que emite a 450 Hz se percibe a 485 Hz cuando nos acercamos a ella a cierta velocidad. ¿Qué frecuencia percibiremos cuando nos alejemos de ella a la misma velocidad?**

La frecuencia que percibimos a medida que nos acercamos a la campana, viene dada por la siguiente expresión:

$$f' = f\left(\frac{v + v_o}{v}\right)$$

Sustituyendo los datos:

$$485 \text{ Hz} = 450 \text{ Hz} \cdot \left(\frac{340 \text{ m/s} + v_o}{340 \text{ m/s}}\right)$$

Resolviendo, obtenemos que: $v_o = 26{,}4$ m/s.

Así pues, cuando nos alejemos de la campana con dicha velocidad, la frecuencia que percibiremos será:

$$f' = f\left(\frac{v - v_o}{v}\right)$$

Sustituyendo los datos:

$$f' = 450 \text{ Hz} \cdot \left(\frac{340 \text{ m/s} - 26{,}4 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s}}\right) = 415 \text{ Hz}$$

Cuestiones y problemas (páginas 252/253)

Guía de repaso

1 **¿Cómo se produce una onda sonora?**

Se produce cuando las compresiones y los enrarecimientos del aire se suceden de forma alternada y se propaga por el aire. Además para que estas ondas mecánicas longitudinales sean sonoras sus frecuencias deben estar comprendidas entre 20 y 20 000 Hz.

2 **¿Cómo se propagan las ondas sonoras?**

Se propagan mediante variaciones alternadas de densidad.

3 **¿Puede transmitirse el sonido en el vacío?**

El sonido no puede transmitirse por el vacío, porque es una onda mecánica y como tal necesita un medio material para su propagación.

4 **¿En qué medios pueden propagarse las ondas sonoras? ¿En cuál lo hace con mayor velocidad?**

Se propaga en cualquier medio ya sea líquido, gaseoso o sólido. Pero, lo hace con mayor velocidad en un medio sólido.

5 **¿Entre qué frecuencias se considera sonora una onda mecánica longitudinal?**

Entre 20 y 20 000 Hz.

6 **¿Cómo varía con la temperatura la velocidad de propagación del sonido en un gas?**

La velocidad de propagación del sonido en un gas aumenta con la temperatura.

7 **¿Cómo varía con la distancia la intensidad del sonido si lo consideramos como una onda esférica?**

Disminuye conforme al inverso del cuadrado de la distancia.

8 **¿Cómo se define el nivel de intensidad de una onda sonora? ¿En qué unidades se expresa?**

El nivel de intensidad sonora es la relación entre la intensidad de una onda sonora y la intensidad umbral (umbral de la audición). Su unidad se expresa en decibelios (dB).

9 **¿Qué fenómenos se relacionan con la reflexión del sonido?**

El eco y la reverberación.

10 **¿Qué fenómenos se relacionan con la refracción del sonido?**

Por ejemplo, las lentes acústicas y la audición de sonidos lejanos.

11 **¿Cuándo se produce eco?**

Cuando la distancia a la superficie reflectante es mayor de 17 m.

12 **¿En qué consiste el fenómeno de la reverberación?**

Es cuando la reflexión del sonido no produce eco.

Se produce cuando el tiempo que tarda en llegarnos el sonido reflejado tarda menos de de 0,1 s.

13 **¿Cuál es el requisito para que se establezcan ondas estacionarias en un tubo con un extremo abierto? ¿Cuál es la expresión de las frecuencias posibles?**

Se establecen ondas cuando:

$$l = (2n + 1)\frac{\lambda}{4}$$

Y las posibles frecuencias son:

$$f = (2n + 1)\frac{v}{4l}$$

14 **¿Cuál es el requisito para que se produzcan ondas estacionarias en un tubo con sus dos extremos abiertos? ¿Qué expresión nos da las frecuencias posibles?**

Se establecen ondas cuando:

$$l = \frac{n\lambda}{2}$$

Y las posibles frecuencias son:

$$f = \frac{nv}{2l}$$

15 **¿En qué consiste el efecto Doppler? ¿Qué magnitud de onda varía cuando se mueve el foco? ¿Y cuando es el observador el que se mueve?**

El efecto Doppler es el fenómeno relativo de la fuente sonora y el observador por el que cambia la frecuencia que se percibe de un sonido.

Cuando se mueve el foco varía la longitud de onda y cuando es el observador el que se mueve será la velocidad.

16 **¿Cuándo se producen las ondas de choque?**

Se produce cuando la fuente supera la velocidad del sonido.

Ondas sonoras y velocidad de propagación

17 **La frecuencia de una onda sonora en el aire a 0 °C es de 520 Hz. ¿Cuál es su longitud de onda?**

Puesto que la velocidad de propagación del sonido en el aire a 0 °C es de 331 m/s, tendremos que:

$$\lambda = \frac{v}{f} = 0{,}636 \text{ m}$$

18 **El oído humano puede percibir sonidos de frecuencias comprendidas entre 20 Hz y 20 000 Hz, aproximadamente; ¿cuáles son las longitudes de onda en el aire que corresponden a estas frecuencias?**

Las longitudes de onda para 20 Hz y 20 000 serán, respectivamente:

$$\lambda_{\text{umbral}} = \frac{v}{f_{\text{umbral}}} = 17 \text{ m}$$

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{v}{f_{\text{máx}}} = 0{,}017 \text{ m}$$

19 **PAU** **Se da un golpe en un extremo de una viga de hierro. Una persona que está situada en el otro extremo percibe dos golpes separados por un intervalo de 1,2 s. ¿Cuál es la longitud de la viga de hierro?**

La velocidad de propagación del sonido en el hierro es 5 130 m/s. La diferencia de tiempo se debe a la distinta velocidad de propagación en el hierro y en el aire. En ambos casos, la distancia recorrida por el sonido es la misma, por lo que tendremos:

$$l = v_{\text{aire}}t \Rightarrow t = \frac{l}{v_{\text{aire}}}$$

$$l = v_{\text{Fe}}t' \Rightarrow t' = \frac{l}{v_{\text{Fe}}}$$

$$t - t' = 1{,}2 \text{ s}$$

Es decir:

$$l\left(\frac{1}{v_{\text{aire}}} - \frac{1}{v_{\text{Fe}}}\right) = 1{,}2$$

de donde:

$$l = 437 \text{ m}$$

Intensidad y nivel de intensidad sonora

20 **Razona la veracidad o falsedad del enunciado: «un sonido de 60 dB tiene el doble de intensidad que uno de 30 dB».**

La afirmación es falsa: la intensidad del sonido es 1000 veces mayor. Dado que $I_o = 10^{-12}$ W/m^2, al desarrollar la expresión **9.4** para un sonido de 60 dB, se obtiene:

$$60 \text{ dB} = 10 \log I + 120$$

Es decir:

$$I = 10^{-6} \text{ W/m}^2$$

y para el sonido de 30 dB:

$$30 \text{ dB} = 10 \log I' + 120$$

Es decir:

$$I' = 10^{-9} \text{ W/m}^2$$

Por tanto:

$$I = 10^3 \cdot I'$$

21 **Dos ondas sonoras, una en el aire y otra en el agua, tienen la misma intensidad. ¿Qué relación existe entre sus amplitudes de presión? Y si tuvieran la misma amplitud de presión, ¿qué relación guardarían sus intensidades?**

A partir de la expresión **9.3**, podemos concluir que las amplitudes de presión se relacionan con la intensidad según la siguiente igualdad:

$$\Delta p = 2\rho v I$$

Como la velocidad en el agua es de 1 493 m/s y en el aire (a 25 °C) es de 340 m/s, y teniendo en cuenta los valores de densidad del agua y el aire (1 000 kg/m^3 para la primera y 1,29 kg/m^3 para el segundo), se obtiene que la amplitud de presión en el agua es 3 404 veces la del aire.

Por el contrario, si la amplitud de presión es la misma, la intensidad de la onda en el aire será 3 404 veces la intensidad en el agua.

22 **PAU** **Un foco puntual emite ondas sonoras esféricas de 165 Hz de frecuencia que se propagan a 330 m/s. Si la intensidad de la onda a 1 m del foco es de 1 000 W/m^2, determina:**

a) **La intensidad de la onda a 10 m del foco.**

b) **La diferencia de fase de la onda sonora entre ambos puntos.**

c) **La variación del nivel de intensidad sonora entre ambos puntos.**

a) Aplicando la ley del inverso del cuadrado de la distancia, se obtiene:

$$I_1 r_1^2 = I_2 r_2^2 \Rightarrow I_2 = 10\ \text{W/m}^2$$

b) La diferencia de fase $\Delta\Phi = kr_2 - kr_1 = k\Delta r$

siendo $k = 2\pi/\lambda = 2\pi f/v = \pi\ \text{m}^{-1}$ y $\Delta r = 9$ m

Por tanto:

$$\Delta\Phi = 9\pi$$

c) Los niveles de intensidad correspondientes a 1 000 W/m^2 y 10 W/m^2 son, respectivamente, 150 dB y 130 dB. Así pues, la variación del nivel de intensidad entre ambos puntos es de 20 dB.

23 **PAU** **El tubo de escape de una moto produce un nivel de intensidad sonora de 70 dB a 5 m de ella. Suponiendo que las ondas sonoras se propagan en frentes de onda esféricos, determina:**

a) **La velocidad constante a la que debe alejarse la moto para que deje de escucharse por completo su ruido al cabo de 7 minutos.**

b) **¿Cuántas motos iguales a la anterior se necesitarían para aumentar el nivel de intensidad sonora a 5 m de ellas hasta 80 dB?**

a) La intensidad correspondiente a 70 dB es $10^{-5}\ \text{W/m}^2$. El ruido dejará de percibirse cuando la intensidad adquiera su valor umbral $10^{-12}\ \text{W/m}^2$, cosa que sucede a la distancia d deducida de la ley del inverso del cuadrado de la distancia:

$$d = d_1\sqrt{\frac{I_1}{I_0}} = 15\,811\ \text{m}$$

Por tanto, el desplazamiento de la moto en esos 7 minutos (420 s) ha sido Δd = 15 806 m. Así pues, su velocidad es:

$$v = \frac{\Delta d}{t} = 37{,}6\ \text{m/s} = 135\ \text{km/h}$$

b) La intensidad correspondiente a 80 dB es $10^{-4}\ \text{W/m}^2$. Dado que la intensidad emitida por cada moto es de $10^{-5}\ \text{W/m}^2$, se necesitan 10 motos identicas.

24 **Una ventana de 2 m^2 de superficie está abierta a una calle cuyo tráfico produce un nivel de intensidad, a la distancia a la que se encuentra la ventana, de 70 dB. ¿Cuál es la potencia acústica de las ondas sonoras que atraviesan la ventana?**

Los 70 dB medidos corresponden a una intensidad de $10^{-5}\ \text{W/m}^2$. Por tanto, la potencia acústica de las ondas que atraviesan la ventana es de:

$$P = I \cdot S = 10^{-5}\ \text{W/m}^2 \cdot 2\ \text{m}^2 = 2 \cdot 10^{-5}\ \text{W}$$

25 **PAU** **Una fuente sonora puntual emite con una potencia de salida de 70 W. Determina:**

a) **La intensidad sonora a 5 m y a 50 m.**

b) **El nivel de intensidad sonora a esas distancias.**

c) **La distancia a la que el nivel de intensidad se reduce a 20 dB.**

d) **La distancia a la que deja de percibirse el sonido.**

a) Puesto que las ondas son esféricas, la intensidad en función de la distancia viene dada por la expresión:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

Sustituyendo para r = 5 m, se obtiene $I = 2{,}2 \cdot 10^{-1}\ \text{W/m}^2$

Sustituyendo para r = 5 m, se obtiene $I' = 2{,}2 \cdot 10^{-3}\ \text{W/m}^2$

b) Los niveles de intensidad correspondientes a esos valores son, por aplicación de la expresión 9.4:

113,5 dB para $I = 2{,}2 \cdot 10^{-1}\ \text{W/m}^2$

93,5 db para $I' = 2{,}2 \cdot 10^{-3}\ \text{W/m}^2$

c) La intensidad correspondiente a 20 dB es $10^{-10}\ \text{W/m}^2$, por lo que:

$$r = \sqrt{\frac{P}{4\pi I^2}} = 236\,077\ \text{m} = 236\ \text{km}$$

Obviamente no se trata de un resultad muy realista, pues no se considera más amortiguación que la inherente a su propagación en frentes de ondas esféricas.

d) Corresponde a $I = 10^{-12}\ \text{W/m}^2$. Aplicando la expresión anterior, eso sucede a:

$$r = 2\,360\ \text{km}$$

Puede utilizarse el resultado poco realista de este problema para discutir qué procesos de amortiguación por pérdida de energía pueden tener lugar en una propagación sonora en el ambiente.

26 **Determina el nivel de intensidad, en dB, correspondiente a una onda sonora de intensidad:**

a) **$10-^{8}$ W/m²** ***b)*** **10^{-3} W/m²**

a) Para $I = 10^{-8}\ \text{W/m}^2$:

$$\beta = 10\log\frac{I}{I_0} = 40\ \text{dB}$$

b) Para $I = 10^{-3}\ \text{W/m}^2$:

$$\beta = 10\log\frac{I}{I_0} = 90\ \text{dB}$$

27 **Una fuente sonora emite un sonido de cierta intensidad. ¿Se duplica el nivel de intensidad al hacer sonar a la vez otra fuente sonora de la misma intensidad? Si no es así, ¿en qué factor aumenta?**

No se duplica el nivel de intensidad. Lo que realmente se duplica es la intensidad, de modo que ahora $I' = 2 \cdot I$.

Para una sola fuente:

$$\beta = 10\log\frac{I}{I_0} = 10\,(\log I - \log I_0)$$

Para las dos fuentes:

$$\beta' = 10\log\frac{2I}{I_0} = 10\,[(\log 2 + \log I) - \log I_0]$$

Como puede observarse en la expresión anterior, el nivel de intensidad $\beta' = \beta + 10\log 2$. Por tanto, no se duplica sino que aumenta en 3 dB, pues $10\log 2 = 3$.

28 **PAU** **¿En qué fracción de intensidad debe reducirse un sonido para rebajar de 80 dB a 60 dB su nivel de intensidad?**

Llamando I_1 a la intensidad correspondiente a 80 dB, e I_2, a la correspondiente a 60 dB, tenemos, en cada caso:

$$80 = 10\log\frac{I_1}{I_0}$$

$$60 = 10\log\frac{I_2}{I_0}$$

Restando ambas expresiones se obtiene:

$$20 = 10\left(\log\frac{I_1}{I_0} - \log\frac{I_2}{I_0}\right)$$

Es decir:

$$20 = 10\log\frac{I_1}{I_2}$$

Por tanto:

$$\log\frac{I_1}{I_2} = 2 \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = 10^2$$

En consecuencia, la intensidad I_2 debe ser la centésima parte de I_1:

$$I_2 = \frac{I_1}{100} = 10^{-2} \cdot I_1$$

29 **Un secador de pelo tiene un nivel de intensidad de 85 dB. ¿Cuál es la intensidad de su sonido en W/m²?**

Despejando directamente de la expresión 9.4 de la página 239 del *Libro del alumno*:

$$85 = 10 \log \frac{I}{10^{-12}} \Rightarrow \log I = -3{,}5$$

Es decir:

$$I = 3{,}1 \cdot 10^{-4}\ \text{W/m}^2$$

Fenómenos ondulatorios del sonido

30 **¿Por qué navegando de noche cerca de la costa se oyen sonidos provenientes de ella que de día no se perciben?**

Durante la noche, el aire más próximo a la superficie del agua suele estar a menor temperatura que el aire que se encuentra a mayor altura (recuérdese el fenómeno de las brisas costeras). En consecuencia, los sonidos procedentes de la costa se refractan en las capas donde la temperatura es mayor, con lo que sufren una desviación parecida a una reflexión, de modo que los sonidos pueden llegar al barco situado a cierta distancia.

31 **¿Hasta qué ángulo límite de incidencia podría sufrir refracción y propagarse por el agua una onda sonora que se desplazara por el aire?**

El máximo valor del ángulo de refracción será 90° y marcará el límite entre refracción y reflexión total. Así pues, aplicando la ley de Snell, tendremos:

$$\frac{\operatorname{sen} \hat{i}}{\operatorname{sen} 90°} = \frac{v_{\text{aire}}}{v_{\text{agua}}}$$

Usando los datos de la tabla 9.1, obtenemos que el máximo ángulo de incidencia posible sería de 13°.

32 **Si el sonido es capaz de propagarse por la madera a mayor velocidad que por el aire, ¿por qué es tan difícil escuchar una conversación cuando la puerta está cerrada?**

Dado que la velocidad de propagación del sonido en la madera es muy elevada (3 850 m/s para la madera de encina), el ángulo máximo de incidencia del sonido que puede transmitirse a través de la puerta sería de 5°. Todas las ondas sonoras que incidan sobre la puerta con un ángulo mayor serán reflejadas.

33 **Dos altavoces emiten simultáneamente ondas sonoras de 680 Hz que se propagan por el aire a 340 m/s. Si colocamos enfrente de los altavoces un micrófono de modo que quede situado a 5 m de un altavoz y a 6,25 m del otro altavoz, ¿percibirá sonido?**

Se percibirá un máximo de sonido si la interferencia es constructiva, cosa que sucede si se cumple:

$$\Delta x = n\lambda$$

Por el contrario, no se percibirá si la interferencia es destructiva, es decir, si:

$$\Delta x = (2n + 1)\lambda$$

donde $2n + 1$ es un número impar. La longitud de onda correspondiente al sonido emitido es $\lambda = v/f = 0{,}5$ cm.

Dado que $\Delta x = 1{,}25$ m, puede comprobarse que:

$$\Delta x = 5\lambda/2$$

Por lo que el micrófono no recogerá sonido en esa posición.

34 **Fíjate en la figura de la página 253 y responde a las siguientes cuestiones:**

a) **¿A qué es debido que oigamos a través de la puerta abierta el sonido producido en la otra habitación? ¿Qué fenómenos físicos tienen lugar?**

b) **¿Qué sucedería si suprimiéramos la pared A? ¿Seguiría percibiendo el receptor el sonido emitido por el emisor?**

a) Es debido a tres fenómenos:

- El primero es la difracción del sonido a través de la abertura de la puerta.
- El segundo es la reflexión en la pared A del sonido que pasa por la puerta.
- La tercera razón es la refracción (y, en consecuencia, transmisión) del sonido al atravesar la pared que separa las dos habitaciones. Este último fenómeno no suele ser despreciable en muchas viviendas de tabiques delgados.

b) Si se suprimiese la pared A, desaparecería el mecanismo de reflexión, pero se mantendrían los otros dos mecanismos, por lo que seguiría percibiéndose el sonido.

35 **PAU** **Un sonido cuya longitud de onda en el aire es de 2 m penetra en el agua, en donde se mueve con una velocidad de 1 493 m/s. ¿Cuál es su longitud de onda en el agua?**

La frecuencia del sonido en el aire es:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{340\ \text{m/s}}{2\ \text{m}} = 170\ \text{Hz}$$

Puesto que la frecuencia no varía al pasar de un medio a otro, su longitud de onda en el agua es:

$$\lambda' = \frac{v}{f} = \frac{1\,493\ \text{m/s}}{170\ \text{Hz}} = 8{,}78\ \text{m}$$

36 **PAU** **Un barco emite ondas sonoras con su sonar. El eco procedente de la reflexión del sonido en el fondo del mar se escucha a los 4 s de ser emitido aquel. Calcula a qué profundidad está el fondo del mar.**

Dato: velocidad del sonido en el agua de mar = 1 533 m/s

El sonido reflejado recorre una distancia $2d$ (ida y vuelta), es decir:

$$2d = vt$$

de donde:

$$d = \frac{1\,533\ \text{m/s} \cdot 4\ \text{s}}{2} = 3\,066\ \text{m}$$

37 **PAU** **Calcula la desviación que experimenta un «rayo» sonoro al pasar del aire al agua si forma con la normal a la superficie de separación un ángulo de 20°. ¿Y si pasa del agua al aire con el mismo ángulo de incidencia?**

Datos: velocidad de propagación en el aire = 340 m/s; velocidad de propagación en el agua 1 493 m/s

Como se desprende de la ley de Snell, no se produce refracción si el sonido pasa del aire al agua.

La razón es que de la expresión:

$$\frac{\operatorname{sen} \hat{i}}{\operatorname{sen} \hat{r}} = \frac{v_{\text{aire}}}{v_{\text{agua}}}$$

se obtiene esta otra:

$$\operatorname{sen} \hat{r} = \frac{v_{\text{agua}}}{v_{\text{aire}}} \operatorname{sen} \hat{i} > 1$$

Por tanto, no es posible la refracción. Es un hecho que habremos comprobado alguna vez al hablar desde fuera del agua a alguien que está sumergido en ella; sencillamente, nunca podrá oír lo que le decimos.

Si el sonido pasa del agua al aire, entonces:

$$\operatorname{sen} \hat{r} = \frac{v_{\text{aire}}}{v_{\text{agua}}} \operatorname{sen} \hat{i} = 0{,}0778$$

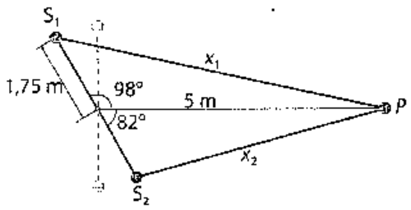
Es decir:

$$\hat{r} = 4{,}46°$$

Efectivamente, es fácil comprobar que un sonido emitido bajo el agua puede escucharse en el exterior.

D38 **PAU** **Dos altavoces que emiten en la misma frecuencia están separados 3,5 m entre sí. A 5 m del punto medio de los altavoces, en dirección perpendicular, se sitúa un micrófono. Al girar la caja de los altavoces, se registra un máximo para un ángulo de 8°. ¿Cuál es la longitud de onda y la frecuencia del sonido?**

La situación descrita en el problema se reproduce en la siguiente figura:



El primer máximo tiene lugar cuando:

$$x_1 - x_2 = \lambda$$

Aplicando el teorema de los cosenos, obtenemos, en primer lugar:

$$x_1^2 = (1{,}75\ \text{m})^2 + (5\ \text{m})^2 - 2 \cdot 1{,}75\ \text{m} \cdot 5\ \text{m} \cdot \cos 98°$$

es decir:

$$x_1 = 5{,}52\ \text{m}$$

y, en segundo lugar:

$$x_2^2 = (1{,}75\ \text{m})^2 + (5\ \text{m})^2 - 2 \cdot 1{,}75\ \text{m} \cdot 5\ \text{m} \cdot \cos 82°$$

es decir:

$$x_2 = 5{,}06\ \text{m}$$

Por tanto, la longitud de onda valdrá:

$$\lambda = x_1 - x_2 = 0{,}46\ \text{m}$$

y la frecuencia será:

$$f = \frac{v}{\lambda} = 739{,}13\ \text{Hz}$$

Ondas sonoras estacionarias

39 **¿Cómo podríamos conseguir una frecuencia más baja que la fundamental en un tubo de cierta longitud, abierto por sus dos extremos?**

Podría conseguirse tapando uno de los extremos del tubo.

De ese modo, la frecuencia más baja viene dada por $\frac{v}{4l}$ en lugar de por $\frac{v}{2l}$.

40 **Es corriente ver que, en los intermedios de un concierto, los músicos afinan los instrumentos debido al aumento de temperatura en la sala. ¿Cómo afecta este aumento de temperatura a los instrumentos de viento? ¿Y a los de cuerda?**

Con el aumento de temperatura de la sala, se incrementa ligeramente la velocidad de propagación del sonido, con lo que las frecuencias de los instrumentos de viento aumentan un poco y las notas son más altas.

En el caso de los instrumentos de cuerda, el propio uso y la dilatación debida al aumento de temperatura hacen que la cuerda se destense ligeramente; como se desprende de la expresión **8.29**, la frecuencia disminuye.

Por tanto, el efecto es el contrario en los dos tipos de instrumentos.

41 **¿Por qué cuando aplicamos el oído a una caracola escuchamos un rumor parecido al del mar?**

Porque la caracola actúa como cavidad resonante que amplifica ciertos ruidos ambientales, lo que origina ese peculiar «ruido de mar» tan característico.

42 **PAU** **En un laboratorio que se encuentra a una temperatura de 27 °C se lleva a cabo el experimento descrito en el dispositivo representado en la figura 9.20. Usando un diapasón de 512 Hz, se obtienen resonancias cuando las longitudes de la columna de aire son de 17 cm, 51 cm, 85 cm, etcétera. ¿Cuál es la velocidad de propagación del sonido a la temperatura indicada?**

La condición que debe cumplirse para que se establezcan ondas estacionarias es que:

$$l = (2n+1)\frac{\lambda}{4} \Rightarrow \lambda = \frac{4l}{2n+1}$$

Sus frecuencias permitidas estarán regidas por la siguiente expresión:

$$f = (2n+1)\frac{v}{4l}$$

De ella se desprende que:

$$v = \frac{4lf}{2n+1}$$

Las longitudes dadas corresponden al primer, tercer y quinto armónico (para n igual a 0, 1 y 2, respectivamente). Empleando cualquiera de ellas, obtenemos:

$$v = \frac{4 \cdot 0{,}17\ \text{m} \cdot 512\ \text{Hz}}{1} = 348{,}16\ \text{m/s}$$

43 **PAU** **La distancia que separa dos nodos consecutivos en un sistema de ondas sonoras estacionarias en el aire es de 80 cm. Calcula la frecuencia y el período del sonido.**

La distancia entre dos nodos consecutivos es igual a $\lambda/2$, pues, como se desprende de la ecuación **8.23** (página 226), los nodos tienen lugar cuando:

$$kx = 0, \pi, 2\pi\ldots$$

Como $k = 2\pi/\lambda$, las posiciones x serán:

$$x = 0, \lambda/2, \lambda, 3\lambda/2\ldots$$

Así pues:

$$\Delta x = \lambda/2$$

Por tanto, en nuestro caso:

$$\lambda = 160\ \text{cm} = 1{,}6\ \text{m}$$

Así pues:

$$f = \frac{v}{\lambda} = 212{,}5\ \text{Hz};\ T = \frac{1}{f} = 4{,}7 \cdot 10^{-3}\ \text{s}$$

44 **PAU** **Un tubo de órgano de 1,2 m se encuentra abierto por sus dos extremos:**

a) **¿Cuál es su frecuencia fundamental?**

b) **¿Cuál es el armónico más alto posible para este tubo, dentro del intervalo audible?**

a) Su frecuencia fundamental es:

$$f = \frac{v}{2l} = 141{,}66\ \text{Hz}$$

b) Considerando 20 000 Hz la máxima frecuencia audible, tendremos:

$$f = n\frac{v}{2l} \Rightarrow n = \frac{2lf}{v}$$

Sustituyendo los datos:

$$n = \frac{2 \cdot 1{,}2\ \text{m} \cdot 20\,000\ \text{Hz}}{340\ \text{m/s}} = 141$$

Por tanto, el armónico más alto es el 141.

Efecto Doppler

45 **Cuando el murciélago vuela emite unos gritos estridentes (f = 60 Hz). Al incidir estas ondas sonoras en un objeto sólido, por ejemplo una presa, emiten un eco que es captado por los finos oídos del murciélago. ¿Cómo sabe el murciélago si su presa está acercándose, alejándose o si permanece estacionaria? ¿Cómo calcula la distancia a la que se encuentra?**

El hecho de saber si la presa se acerca o se aleja está relacionado con el efecto Doppler: si el murciélago percibe una frecuencia mayor que la de la onda reflejada, es que él y su presa se aproximan. Por el contrario, si la frecuencia es menor, la presa se está alejando. Si la frecuencia no varía, la presa se encuentra estacionaria con respecto al murciélago. La distancia a la presa o al obstáculo la estima en función del tiempo que tarda en percibir el eco.

D46 **Un observador en reposo percibe que la frecuencia del claxon de un vehículo que se le acerca disminuye su frecuencia en un 18 % después de pasar por delante de él. Si la velocidad de propagación del sonido en esas condiciones es de 340 m/s, determina la velocidad a la que se mueve el vehículo.**

Cuando la fuente se aproxima al observador, la frecuencia f' que este percibe, viene dada por:

$$f' = f\left(\frac{v}{v - v_F}\right)$$

Cuando se aleja, después de pasar por delante del observador, la frecuencia f'' que este percibe es:

$$f'' = f\left(\frac{v}{v + v_F}\right) \text{ siendo } f'' = 0{,}82\, f'$$

Así pues, dividiendo ambas expresiones se obtiene:

$$\frac{f'}{f''} = \frac{v + v_F}{v - v_F} \Rightarrow \frac{1}{0{,}82} = \frac{340 + v_F}{340 - v_F}$$

Resolviendo, se obtiene para la velocidad del vehículo:

$$v_F = 33{,}6 \text{ m/s}$$

47 **PAU** **La sirena de una ambulancia que viaja a 110 km/h emite un sonido intermitente de 400 Hz de frecuencia. Calcula la frecuencia que percibe el pasajero de un autocar que viaja en sentido contrario a 100 km/h cuando:**

a) **Se aproxima hacia la ambulancia.**

b) **Se aleja de la ambulancia después de cruzarse.**

a) La frecuencia que percibe el observador a medida que se aproxima mutuamente es:

$$f' = f\left(\frac{v + v_O}{v - v_F}\right)$$

Siendo v_F = 110 km/h = 30,5 m/s y v_O = 100 km/h = 27,7 m/s. Sustituyendo los valores ofrecidos, se obtiene:

$$f' = 475 \text{ Hz}$$

b) Por el contrario, a medida que se alejan, la expresión de la frecuencia percibida viene dada por:

$$f'' = f\left(\frac{v - v_O}{v + v_F}\right)$$

Sustituyendo los valores se obtiene:

$$f'' = 337 \text{ Hz}$$

48 **Un coche que circula a 120 km/h adelanta a otro que va a 90 km/h, haciendo sonar su claxon. Si la frecuencia de la bocina es de 480 Hz, halla la que percibe el conductor adelantado antes y después de ser adelantado.**

a) Es posible considerar al conductor adelantado como si estuviese en reposo y el contrario (la fuente sonora) se aproximara a una velocidad relativa de 30 km/h (120 km/h − 90 km/h) o 8,33 m/s. En ese caso, la frecuencia que percibe el conductor adelantado antes de serlo es:

$$f' = f\left(\frac{v}{v - v_F}\right)$$

Sustituyendo los datos:

$$f' = 480 \text{ Hz} \cdot \left(\frac{340 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} - 8{,}33 \text{ m/s}}\right) = 492 \text{ Hz}$$

b) Después de que se haya efectuado el adelantamiento, el resultado es equivalente a suponer que la fuente se mueve con una velocidad relativa igual a 8,33 m/s, pero alejándose.

Por tanto:

$$f' = f\left(\frac{v}{v + v_F}\right)$$

Sustituyendo los datos:

$$f' = 480 \text{ Hz} \cdot \left(\frac{340 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} + 8{,}33 \text{ m/s}}\right) = 468{,}5 \text{ Hz}$$

Nota: obsérvese que en este ejercicio no se han aplicado las expresiones **9.9** y **9.10**, pues estas implican el supuesto de que fuente y observador se mueven en sentidos opuestos.