

6

ACÚSTICA

6.1. ONDAS SONORAS

1. ¿Cómo medirías la velocidad del sonido en el aire?

Un procedimiento puede ser el siguiente. Imagina que estás frente a un pozo y conoces la distancia, b , que existe entre la boca del pozo y la superficie del agua que contiene. Con un cronómetro puedas medir el tiempo, t , que tarda en llegar a tus oídos el sonido del choque de una piedra que cae desde la boca del pozo. Ese tiempo t será la suma del tiempo que tarda la piedra en llegar a la superficie del agua, t_1 , que podemos obtener utilizando las ecuaciones cinemáticas de la caída libre, y del tiempo t_2 , que es el que tarda el sonido en llegar desde la superficie del agua hasta nuestro oído:

$$t = t_1 + t_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot b}{g}} + t_2 \rightarrow t_2 = t - \sqrt{\frac{2 \cdot b}{g}}$$

Por tanto, la velocidad de propagación del sonido en el aire será:

$$v_{\text{sonido}}(\text{aire}) = \frac{b}{t_2} = \frac{b}{t - \sqrt{\frac{2 \cdot b}{g}}}$$

2. Calcula la velocidad de propagación del sonido en el aire a -20 °C , 0 °C , 20 °C , 40 °C , 60 °C y 80 °C .

La velocidad de propagación del sonido en el aire se calcula a partir de la expresión:

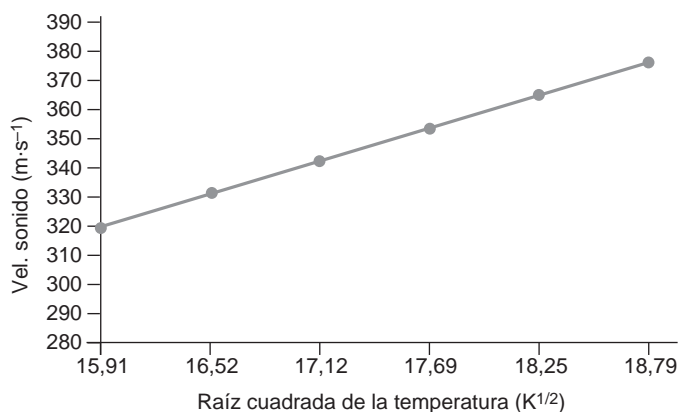
$$v = 20,1 \cdot \sqrt{T}$$

siendo T la temperatura absoluta a que se encuentra la muestra de aire. Para las temperaturas propuestas, los valores que corresponden a la velocidad de propagación del sonido resultan:

Temperatura (K)	Velocidad de prop. sonido ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
253	319,7
273	332,1
293	334,1
313	355,6
333	366,8
353	377,6

3. Dibuja los resultados que obtienes en el ejercicio anterior en una gráfica. Representa en el eje de ordenadas la velocidad del sonido en el aire, y en el de abscisas, la raíz cuadrada de la temperatura. Justifica el resultado que obtienes.

Al representar los datos gráficamente, obtenemos el siguiente resultado:



Como se aprecia en la gráfica, al aumentar la temperatura del aire, aumenta la velocidad de propagación del sonido. En dicha gráfica se comprueba que existe una relación lineal entre la velocidad de propagación del sonido en el aire y la raíz cuadrada de la temperatura absoluta a que este se encuentra.

4. Tomando para la velocidad del sonido en el aire el valor $344 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, calcula las longitudes de onda que corresponden a las frecuencias audibles extremas.

Para un oído humano sano, las frecuencias audibles extremas se encuentran entre 16 Hz y 20 000 Hz, aproximadamente. Si consideramos el valor de la velocidad del sonido que indica el enunciado, se obtiene:

$$\lambda_1 = \frac{v}{f_1} = \frac{344}{16} = 21,5 \text{ m}$$

$$\lambda_2 = \frac{v}{f_2} = \frac{344}{20\,000} = 0,0172 \text{ m}$$

5. Una onda sonora provoca una variación de presión en el aire que viene dada por la siguiente expresión:

$$P(x, t) = 0,75 \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} \cdot (x - 340 \cdot t) \right]$$

donde P se mide en pascuales, x en metros y t en segundos. Calcula:

- La amplitud de la presión.
- La longitud de onda.
- La frecuencia.
- La velocidad de la onda sonora.

- a) La amplitud de la presión es de 0,75 Pa.
 b) Teniendo en cuenta que:

$$k = \frac{\pi}{2} ; k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$$

la longitud de onda es:

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{k} = \frac{2 \cdot \pi}{\pi/2} = 4 \text{ m}$$

- c) La frecuencia angular es:

$$\omega = 340 \cdot \frac{\pi}{2} = 170 \cdot \pi \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

Por tanto, la frecuencia de vibración será:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \rightarrow f = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} = \frac{170 \cdot \pi}{2 \cdot \pi} = 85 \text{ Hz}$$

- d) La velocidad de propagación de la onda sonora es:

$$v = \lambda \cdot f = 4 \cdot 85 = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

6.2. CUALIDADES DEL SONIDO

1. **Obtén la expresión que permite calcular las frecuencias de las ondas estacionarias en un tubo de aire con los dos extremos abiertos y en otro tubo con un extremo abierto y el otro cerrado.**

- a) Teniendo en cuenta que las longitudes de onda se corresponden con la siguiente expresión:

$$\lambda_n = \frac{2 \cdot L}{n} \quad (n = 1, 2, 3\dots)$$

La frecuencia se obtiene a partir de la expresión:

$$v_n = \lambda_n \cdot f \rightarrow f_n = \frac{v_n}{\lambda_n} = \frac{v_n \cdot n}{2 \cdot L}$$

- b) Del mismo modo que en el apartado anterior:

$$\lambda_n = \frac{4 \cdot L}{2 \cdot n + 1} \quad (n = 0, 1, 2, 3\dots) \rightarrow f_n = \frac{v \cdot (2 \cdot n + 1)}{4 \cdot L} \quad (n = 0, 1, 2, 3\dots)$$

2. **El tubo más largo de un órgano mide 10,52 m y está abierto por ambos extremos.**

Calcula su frecuencia fundamental.

El órgano es un instrumento formado por tubos abiertos por ambos extremos; por tanto, la relación entre la frecuencia de la onda que emite y la longitud de cada tubo viene dada por:

$$f_n = \frac{n \cdot v}{2 \cdot l}$$

Para la frecuencia fundamental, $n = 1$. Por tanto:

$$f_1 = \frac{1 \cdot 340}{2 \cdot 10,52} = 16,16 \text{ Hz}$$

- 3. La nota más baja que podemos hacer sonar en una flauta es el *do* de la primera línea adicional por debajo del pentagrama (en clave de *sol*), cuya frecuencia es 262 Hz. Con esos datos, calcula la longitud efectiva que debe tener la flauta.**

Una flauta es un tubo abierto por uno de sus extremos. Para este tipo de tubos, la relación entre la frecuencia de la onda que emite y la longitud del tubo viene dada por:

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

La nota más grave que podemos hacer sonar en una flauta es su frecuencia fundamental, por lo que $n = 0$. Por tanto, al despejar la longitud l , resulta:

$$f_n = \frac{v}{4 \cdot l} \rightarrow l = \frac{v}{4 \cdot f} = \frac{340}{4 \cdot 262} = 0,324 \text{ m} = 32,4 \text{ cm}$$

6.3. LA AUDICIÓN

- 1. En la detección de bancos de peces se utilizan ultrasonidos. ¿A qué distancia del barco se encuentra el banco de peces, si el eco sonoro tarda 7 s en llegar?**

Dato: v_s (agua) = $1\,500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

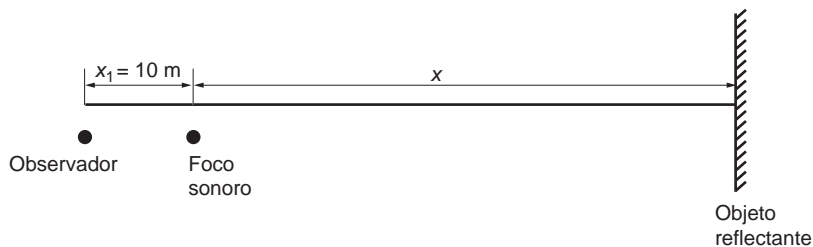
En 7 s, la onda sonora va y vuelve. Por tanto, para llegar al banco de peces necesita la mitad de tiempo: 3,5 s.

De acuerdo con ello, la distancia a la que se encuentra el banco de peces es:

$$d = v \cdot t = 1\,500 \cdot 3,5 = 5\,250 \text{ m}$$

- 2. Un observador está situado a 10 m de un foco sonoro. El eco producido por un objeto situado detrás del foco lo percibe con un desfase de 0,25 s. Calcula la distancia a que se encuentra el objeto reflectante.**

La situación que plantea el enunciado de la actividad es la siguiente:



El tiempo que tarda el sonido en llegar al observador es:

$$t_1 = \frac{x_1}{v} = \frac{10}{344} = 0,029 \text{ s}$$

Y el que tarda en percibir el eco:

$$t_2 = \frac{x_1 + 2 \cdot x}{v} = \frac{10 + 2 \cdot x}{v}$$

El desfase es, por tanto:

$$t_2 - t_1 = \frac{10 + 2 \cdot x}{v} - 0,029$$

La distancia a que se encuentra el objeto reflectante del foco sonoro es:

$$x = \frac{v \cdot [(t_2 - t_1) + 0,029] - 10}{2} = \frac{344 \cdot (0,25 + 0,029) - 10}{2} = 43 \text{ m}$$

Y la distancia a que se encuentra el objeto del foco sonoro es:

$$d = x_1 + x = 10 + 43 = 53 \text{ m}$$

6.4. INTENSIDAD Y NIVEL DE INTENSIDAD

1. Comenta la frase siguiente: “En el espacio nadie puede oír tus gritos”.

Las ondas sonoras son ondas mecánicas y necesitan, por tanto, un medio material para propagarse. En el espacio no es posible la transmisión, ya que no existe un medio material que la haga posible. Sin embargo, sí oírías tus propios gritos, al transmitirse la vibración desde las cuerdas vocales al oído a través del propio cuerpo.

2. ¿En qué se diferencia la música del ruido?

La forma de las ondas musicales es periódica. Aunque su forma no sea perfectamente senoidal, excepto en el caso de notas puras, una nota musical se caracteriza por tener un período (y, por tanto, frecuencia) perfectamente determinado.

El ruido es la superposición de un gran número de ondas no armónicas, de muy distintas frecuencias, y su evolución es completamente aleatoria. En un ruido no es posible definir el período de la onda.

3. ¿Qué entendemos por umbral de audición? ¿Y por umbral de dolor?

El umbral de audición es la mínima intensidad sonora que estimula el oído. Es el valor límite de la intensidad sonora que nos permite percibir un sonido.

El umbral de dolor es la intensidad sonora a partir de la cual nuestro oído sufre molestias físicas.

Estos dos umbrales no son invariables; dependen fuertemente de la frecuencia. Para cada frecuencia existe un umbral de audición y un umbral de dolor.

- 4. Una onda acústica deja de percibirse a una distancia de 30 km del foco que la emite. Suponiendo que no existe absorción por parte del medio, calcula el nivel de intensidad, en dB, a 3 km del foco.**

La intensidad sonora, en dB, podemos calcularla mediante la expresión:

$$S = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

donde d_0 es la distancia umbral, donde la sensación sonora es nula.

Con los datos del enunciado podemos calcular el nivel de intensidad a 3 km del foco:

$$S = 20 \cdot \log \frac{d_0}{d} \rightarrow S = 20 \cdot \log \frac{30}{3} = 20 \text{ dB}$$

- 5. En la actividad anterior, calcula la distancia a que debemos encontrarnos del foco, para que el nivel de intensidad alcance 60 dB.**

En este ejercicio conocemos la sensación sonora y debemos calcular la distancia, d . Despejando de la siguiente igualdad, obtenemos:

$$S = 20 \cdot \log \frac{d_0}{d} \rightarrow 10^{\frac{S}{20}} = \frac{d_0}{d} \rightarrow d = \frac{d_0}{10^{\frac{S}{20}}} = \frac{30\,000}{10^{\frac{60}{20}}} = 30 \text{ m}$$

- 6. Mediante un sonómetro se mide el nivel de ruido en una discoteca, cifrándose dicho nivel en 110 dB. Calcula la intensidad media, en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, de ruido en el local.**

La intensidad sonora podemos calcularla mediante la expresión:

$$S = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

donde I_0 es la intensidad umbral, que es de $10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Con los datos del enunciado podemos calcular la intensidad media, I , para la cual la sensación sonora es de 110 db:

$$S = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \rightarrow I = I_0 \cdot 10^{\frac{S}{10}} = 10^{-12} \cdot 10^{\frac{110}{10}} = 0,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

- 7. En una gran ciudad existen estaciones de medida y control del ruido ambiental. En una de estas estaciones, situada en una céntrica plaza, se puede leer que el nivel de ruido es 77,8 dB. Calcula la intensidad media, expresada en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, de ruido que hay en la plaza.**

A partir de la siguiente expresión:

$$S = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

donde I_0 es la intensidad umbral, que es de $10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, calculamos la intensidad media, I , para la que la sensación sonora es de 77,8 db:

$$S = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \rightarrow I = I_0 \cdot 10^{\frac{S}{10}} = 10^{-12} \cdot 10^{\frac{77,8}{10}} = 6,03 \cdot 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

- 8. Calcula la intensidad de un sonido de 7000 Hz que produce la misma sensación sonora (en fon) que otro sonido de 200 Hz cuyo nivel de intensidad es 40 dB.**

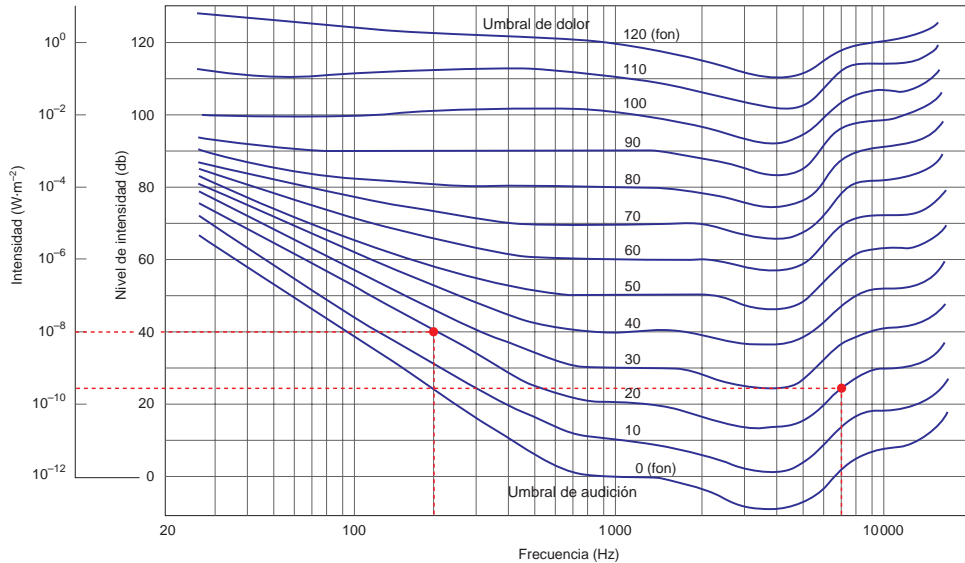
Según se aprecia en la gráfica de la página 146 del libro del alumno, la sensación sonora, en fon, de un sonido de 200 Hz y 40 dB de nivel de intensidad es, aproximadamente:

$$S_{200 \text{ Hz}} = 20 \text{ fon}$$

Para averiguar la intensidad de un sonido de 7000 Hz que produce esa misma sensación sonora, 20 fon, debemos buscar, en la gráfica mencionada, el valor de la intensidad (la ordenada) correspondiente al punto de corte de la curva que corresponde a la sensación sonora de 20 fon con la abscisa $f = 7000 \text{ Hz}$. Haciendo esto obtenemos:

$$I = 5 \cdot 10^{-9} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Curvas de igual sonoridad para distintas frecuencias



6.5. LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA

- 1. ¿Qué utilidad tiene el doble acristalamiento que se pone en las ventanas de las viviendas de nueva construcción?**

El doble acristalamiento que se coloca en las ventanas de algunas viviendas de nueva construcción cumple una doble función: sirve para mitigar los efectos de la contaminación acústica y, por otro lado, actúa como un excelente aislante térmico.

2. El aire que encierran entre sí los dos cristales que forman el doble acristalamiento es aire seco. ¿Qué pasaría si fuese aire húmedo?

La conductividad térmica del aire seco es mucho menor que la del aire húmedo. El aire seco, al estar encerrado dentro del doble acristalamiento, convierte la ventana en una cámara estanca que evita, en su mayor parte, que la energía escape de la vivienda por conducción. Además, de ese modo, la insonorización acústica es mejor.

3. Propón algunas soluciones que sirvan para mitigar la contaminación acústica que produce la circulación en una autopista.

El ruido producido por los coches que circulan por una autopista es una sensación bastante molesta, especialmente cuando esta pasa cerca de núcleos urbanos de población. Para disminuir sus efectos se han ideado varias soluciones. En primer lugar, las autopistas se construyen sobre depresiones en el suelo. De ese modo, el ruido producido por la circulación de los automóviles rebota contra los taludes y se amortigua.

Además, se coloca masa vegetal a su alrededor, lo que ayuda a minimizar el impacto acústico. Esta solución se complementa, especialmente en los casos en que la anterior no es posible, como ocurre cuando el núcleo urbano está muy cerca de la autopista, con la instalación de barreras físicas, como muros de hormigón o acristalamientos. De este modo, el sonido se refleja y vuelve a la autopista amortiguado, sin propagarse apenas fuera de ella.

4. Calcula el espesor de semiabsorción de un material, sabiendo que, con un espesor de 10 cm, reduce a la décima parte la intensidad de una onda sonora.

La intensidad que resulta cuando una onda atraviesa cierto espesor, x , de un material absorbente se puede calcular utilizando la expresión:

$$I = I_0 \cdot e^{-\beta \cdot x}$$

En este caso:

$$I = \frac{I_0}{10} ; x = 0,1 \text{ m}$$

Por tanto:

$$\begin{aligned} \frac{I_0}{10} &= I_0 \cdot e^{-\beta \cdot 0,1} \rightarrow \ln\left(\frac{1}{10}\right) = -\beta \cdot 0,1 \rightarrow -\ln 10 = -\beta \cdot 0,1 \\ \beta &= \frac{-\ln 10}{-0,1} = 23 \text{ m}^{-1} \end{aligned}$$

Si tenemos en cuenta ahora la relación entre el espesor de semiabsorción, $D_{1/2}$ y el coeficiente de absorción de un material, β , obtenemos el primero:

$$D_{1/2} = \frac{\ln 2}{\beta} = \frac{0,693}{23} = 0,030 \text{ m} = 30 \text{ cm}$$

6.6. EFECTO DOPPLER

1. La frecuencia con que emite la bocina de un coche estacionado es 400 Hz. Calcula la frecuencia que percibe un receptor que se mueve hacia el coche con una velocidad de 100 km · h⁻¹.

En este caso, el receptor se mueve radialmente respecto al foco, acercándose a este. Por tanto:

$$f' = f \cdot \left(1 + \frac{v_0}{v}\right) = 400 \cdot \left(1 + \frac{100 \cdot \frac{1000}{3600}}{340}\right) = 432,68 \text{ Hz}$$

Al acercarse el receptor al foco emisor, la frecuencia aparente aumenta.

- 2. Un tren que se mueve a una velocidad de $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ se acerca a una estación y hace sonar su silbato, que tiene una frecuencia de 650 Hz . Calcula la longitud de onda de las ondas sonoras que se propagan delante del tren.**

Calcula también la frecuencia que percibe un observador situado en la estación. Dato: La velocidad del sonido en el aire es $344 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

En este caso el foco se desplaza radialmente respecto al observador, acercándose a este. Por tanto, la frecuencia que percibe un observador situado en la estación es:

$$f' = f \cdot \frac{v}{v - v_F} = 650 \cdot \frac{344}{344 - 90 \cdot \frac{1000}{3600}} = 700,94 \text{ Hz}$$

Por tanto, la frecuencia que percibe el observador aumenta.

La longitud de onda aparente de las ondas debida al movimiento del foco es:

$$\lambda' = \lambda - \frac{v_F}{f}$$

Teniendo en cuenta que:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{344}{650} = 0,53 \text{ m}^{-1}$$

Obtenemos:

$$\lambda' = 0,53 - \frac{90 \cdot \frac{1000}{3600}}{650} = 0,49 \text{ m}^{-1}$$

- 3. Calcula la velocidad, en $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$, a la que viaja un reactor cuya velocidad es Mach 1,8.**

El número de Mach es la relación que existe entre la velocidad con que se desplaza un foco sonoro y la velocidad con que se propaga el sonido en el medio por el que se desplaza:

$$N.^\circ \text{ Mach} = \frac{v_f}{v_{\text{sonido}}}$$

Para un avión que se desplaza en el aire a una velocidad de 1,8 Mach:

$$\begin{aligned} \text{Mach} &= \frac{v_{\text{avión}}}{v_{\text{sonido_aire}}} \rightarrow v_{\text{avión}} = v_{\text{sonido_aire}} \cdot \text{Mach} = \\ &= 340 \cdot 1,8 = 612 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 2203 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \end{aligned}$$

4. **Expresa, en $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$, la velocidad a la que debe moverse un objeto para “romper” la barrera del sonido en el aire, es decir, para desplazarse más rápido que el sonido.**

Suponiendo que la velocidad de propagación del sonido en el aire es de $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, para romper la barrera del sonido el objeto se moverá a una velocidad, en $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$, superior a:

$$340 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = 340 \cdot 3,6 = 1224 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \rightarrow v > 1224 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

ACTIVIDADES DE LA UNIDAD

CUESTIONES

1. **Indica si podemos aplicar las afirmaciones que siguen a las ondas sonoras que emite un gong cuando es golpeado.**

- a) **Emite ondas transversales.**
- b) **Emite ondas estacionarias.**
- c) **El aire se desplaza desde el gong hasta el oído.**
- d) **Existe un transporte neto de materia.**
- e) **La onda se amortigua al propagarse.**

- a) **Falso.** Las ondas sonoras son longitudinales; las partículas vibran en la dirección en que se propagan las ondas.
- b) **Falso.** En este caso no existe ningún tubo o cuerda donde podamos asegurar que la onda, en los extremos, tiene determinado estado de vibración.
- c) **Falso.** El aire no se desplaza, sino que vibra, transmitiendo una onda de presión.
- d) **Falso.** Existe un transporte de energía, pero no de materia.
- e) **Verdadero.** La onda se amortigua al propagarse, tanto por efecto de la atenuación (debida a la distancia) como de la absorción (fruto del rozamiento con el aire).

2. **Indica si podemos aplicar las afirmaciones que siguen a las ondas sonoras que emite una flauta cuando suena.**

- a) **Emite ondas longitudinales.**
- b) **Emite ondas estacionarias.**
- c) **El aire se desplaza desde la flauta al oído.**
- d) **La energía se transmite desde la flauta hasta el oído.**

- a) **Verdadero.** Las ondas emitidas por una flauta son ondas sonoras y, como tales, son ondas longitudinales.

- b) **Verdadero.** La flauta aprovecha las ondas estacionarias que se producen en un tubo hueco, que es la estructura básica de un instrumento de viento. Las ondas se reflejan en los extremos del tubo, formando un nodo o un vientre, dependiendo del lado del tubo que consideremos.
- c) **Falso.** El aire no se desplaza, sino que vibra, transmitiendo una onda de presión.
- d) **Verdadero.** Efectivamente, la onda sonora transmite la energía desde la flauta hasta nuestro oído.

3. Explica si son verdaderas o falsas las siguientes afirmaciones.

- a) **La velocidad del sonido en el aire, a 20 °C es doble que a 10 °C.**
 - b) **Dos sonidos de la misma intensidad y la misma frecuencia son indistinguibles sea cual sea la fuente sonora.**
 - c) **Si la intensidad de una onda sonora se duplica, también se duplica la sensación sonora que produce dicho sonido.**
 - d) **Una onda de choque se produce cuando un foco sonoro se desplaza a mayor velocidad que el sonido.**
- a) **Falso.** Si consideramos el aire como un gas ideal, de composición constante, formado por partículas diatómicas, la velocidad de propagación de las ondas sonoras, expresada en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, resulta proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura absoluta:

$$v = 20,1 \cdot \sqrt{T}$$

Por tanto, a una temperatura $T_1 = 10 \text{ °C} = 283 \text{ K}$:

$$v_1 = 20,1 \cdot \sqrt{283} = 338,13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Y a otra $T_2 = 20 \text{ °C} = 293 \text{ K}$:

$$v_2 = 20,1 \cdot \sqrt{293} = 344,06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

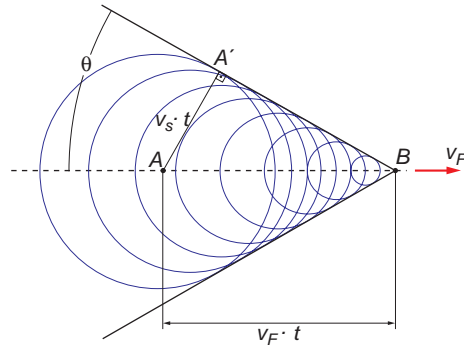
Como se observa, la velocidad del sonido no se duplica al hacerlo la temperatura del aire.

- b) **Falso.** Además de la intensidad y la frecuencia (tono), un sonido difiere de otros en el timbre.
- c) **Falso,** ya que la relación entre la sensación sonora y la intensidad de la onda sonora no es directa, sino logarítmica:

$$S = \log \frac{I}{I_0}$$

- d) **Verdadero.** Cuando un foco sonoro se mueve con $v > v_{\text{sonido}}$, la situación que se produce es la del gráfico de la página siguiente:

En él se observa que el foco no tiene ondas delante, mientras que detrás las ondas se apilan unas encima de otras formando lo que se conoce como onda de choque u onda de Mach. Cuando la onda de choque llega al receptor se oye un fuerte estampido sónico. Se dice entonces que la fuente sonora “ha roto la barrera del sonido”.



4. ¿Qué característica, acerca de la forma de la onda, distingue las notas musicales del ruido?

La forma de las ondas musicales es periódica. Aunque su forma no sea perfectamente senoidal (excepto si se trata de notas puras), una nota musical se caracteriza por ser periódica: la forma de la onda se repite cada cierto intervalo de tiempo.

En cambio, las ondas de ruido son completamente irregulares. No puede definirse en ellas un período, porque su evolución es totalmente aleatoria. Su forma cambia continuamente.

5. ¿Por qué deben afinarse los instrumentos musicales? ¿Influye la temperatura en la frecuencia que emite un instrumento de viento?

Las frecuencias a las que puede emitir un instrumento musical con nodo en un extremo y vientre en otro y las de un instrumento con vientres o nodos en ambos extremos son, respectivamente:

$$f_n = \frac{(2 \cdot n + 1) \cdot v}{4 \cdot l} \quad ; \quad f_n = \frac{n \cdot v}{2 \cdot l}$$

Observa que, en ambas expresiones, aparece un término que corresponde a la velocidad de propagación del sonido en el aire. Dicha velocidad depende de la temperatura, de acuerdo con la relación:

$$v = 20,1 \cdot \sqrt{T}$$

Por tanto, al hacer sonar una misma nota, si aumenta la temperatura del instrumento musical, aumenta la frecuencia a la que emite, y suena más agudo. Del mismo modo, al descender la temperatura, el instrumento disminuye la frecuencia a la que emite la nota, y suena más grave. Para contrarrestar este fenómeno, podemos variar la longitud, l , del tubo que suena. Es lo que hace un clarinetista cuando introduce o saca ligeramente la campana del clarinete.

6. Al emitir un sonido agudo se puede llegar a romper una copa de vidrio fino. ¿Por qué?

Este hecho es un ejemplo de resonancia de las ondas materiales; en este caso, de resonancia de las ondas sonoras (ondas de presión).

Las ondas sonoras actúan sobre el vidrio, que, al entrar en resonancia, sobrepasa su límite elástico, rompiéndose.

7 ¿Se puede considerar el decibel como unidad de intensidad?

No. El bel es la unidad de sensación sonora, y su décima parte es el decibel. La unidad de intensidad sonora es el $W \cdot m^{-2}$.

8. Un sonido de 60 dB, ¿tiene doble intensidad que otro de 30 dB?

El nivel de intensidad sonora, expresado en decibel, se puede calcular de acuerdo con la siguiente expresión:

$$S = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \text{ dB}$$

Por tanto, para cada caso podemos escribir:

$$S_1 = 10 \cdot \log \frac{I_1}{I_0} \rightarrow I_1 = I_0 \cdot 10^{\frac{S_1}{10}} = I_0 \cdot 10^{\frac{60}{10}} = I_0 \cdot 10^6$$

$$S_2 = 10 \cdot \log \frac{I_2}{I_0} \rightarrow I_2 = I_0 \cdot 10^{\frac{S_2}{10}} = I_0 \cdot 10^{\frac{30}{10}} = I_0 \cdot 10^3$$

Por tanto, la relación entre las intensidades es:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{I_0 \cdot 10^6}{I_0 \cdot 10^3} = 10^3 = 1000$$

Un sonido de 60 dB tiene 1000 veces más intensidad que otro de 30 dB.

9. Se puede oír lo que se dice al otro lado de una esquina, pero no se puede ver sin asomarse. ¿Cómo explicas ese fenómeno?

Se debe a sus diferentes longitudes de onda. Las ondas sonoras de longitud de onda más corta son las que corresponden a una frecuencia de 20000 Hz:

$$\lambda_{\text{son mín}} = \frac{v}{f} = \frac{340}{20000} = 0,017 \text{ m}$$

Las ondas luminosas de longitud de onda más larga corresponden a las de menor frecuencia (rojo):

$$\lambda_{\text{lum máx}} = \frac{c}{f_{\text{rojo}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 10^{14}} = 7,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

Observa que:

$$\lambda_{\text{son mín}} \gg \lambda_{\text{lum máx}}$$

Esto implica que los “obstáculos” o “rendijas” que producen difracción en las ondas sonoras son de dimensiones mucho mayores que las que la provocan en la luz (caso de las esquinas).

10. Dos altavoces están emitiendo una nota proporcionada por un generador de señales puras. Si nos situamos en medio de los dos altavoces, observamos que el sonido es más fuerte que si nos desplazamos a cualquiera de los dos lados. ¿Responde alguna de las siguientes afirmaciones a por qué se produce este fenómeno?

a) Se produce una refracción del sonido entre los dos altavoces.

b) Se produce una interferencia destructiva entre los dos altavoces.

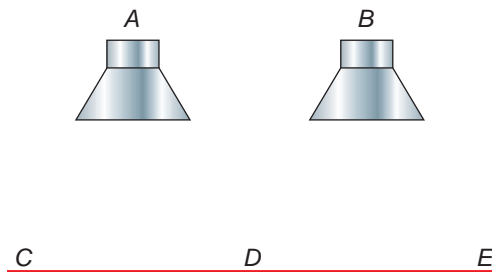
c) Es consecuencia del efecto Doppler.

d) Se produce una interferencia constructiva entre los dos altavoces.

La respuesta correcta es la **d**).

Se produce una interferencia constructiva. Debido a ello, las amplitudes sonoras se suman y la intensidad sonora aumenta.

11. Se sitúan como se indica en la figura dos altavoces, *A* y *B*, que producen la misma nota (mismo tono y timbre) con la misma intensidad. Un micrófono recorre la línea *CE* y se observa que hay posiciones en las que el sonido es más intenso que en otras.



a) ¿Por qué existen esas regiones? ¿Dónde puedes situar una de ellas?

b) ¿Qué puede deducirse acerca de las dos fuentes, si las distancias *AD* y *BD* son iguales?

- a) Lo que recoge el micrófono pone de manifiesto el fenómeno de interferencia. En aquellos puntos en los que la interferencia es constructiva, la amplitud de la onda será mayor, y, en consecuencia, aumentará la intensidad sonora, mientras que en los puntos con interferencia destructiva, la intensidad sonora se reducirá.

En el punto *D* habrá, probablemente, una zona de interferencia constructiva.

b) Para una interferencia constructiva:

$$x_{AD} - x_{BD} = \lambda \cdot n$$

y, para una interferencia destructiva:

$$x_{AD} - x_{BD} = \frac{\lambda}{2} \cdot (2 \cdot n + 1)$$

Si las distancias *AD* y *BD* son iguales, debe existir un máximo de intensidad (interferencia constructiva) en el punto *D*.

12. Un reproductor de cinta tiene un rango de frecuencias [200 - 6 000] Hz, mientras que otro comprende el rango de frecuencias [60 - 20 000] Hz.

a) ¿En qué se diferencian?

b) Si te ofreciesen un reproductor con un rango de frecuencias [600-30 000] Hz, ¿valdría la pena pagar más por él que por el segundo de los otros dos reproductores? ¿Por qué?

- a) El segundo reproductor abarca un mayor campo de frecuencias sonoras; de hecho, abarca casi todo el campo de frecuencias audible para un oído humano. En el primero de ellos, los sonidos agudos no se pueden reproducir, lo que sí es posible en el segundo.

En el primer reproductor, el sonido pierde parte de su timbre (además de no producirse los sonidos agudos, no se reproducen los armónicos de aquellos sonidos de menor frecuencia que están por encima de 6 000 Hz). Ello hace que el sonido que emite el aparato no sea tan agradable.

- b) No valdría la pena. El límite audible de un oído humano sano está comprendido entre 20 Hz y 20 000 Hz. Por tanto, es absurdo pagar un precio extra por un aparato que emite sonido en un rango de frecuencias [20 000 - 30 000] Hz, que nuestro oído es incapaz de detectar.

EJERCICIOS

- 13. La nota *do* natural de la escala musical tiene una frecuencia de 262 Hz. Calcula la longitud de onda que le corresponde en el aire y en el agua. (Velocidad del sonido en el agua: $v_a = 1\,500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).**

La expresión que relaciona la frecuencia, la longitud de onda y la velocidad de propagación de las ondas sonoras es:

$$v = \lambda \cdot f \rightarrow \lambda = \frac{v}{f}$$

Por tanto, la longitud de onda de la nota *do* natural en el aire es:

$$\lambda (\text{aire}) = \frac{v_{\text{sonido}} (\text{aire})}{f} = \frac{340}{262} = 1,30 \text{ m}$$

Y en el agua:

$$\lambda (\text{agua}) = \frac{v_{\text{sonido}} (\text{agua})}{f} = \frac{1\,500}{262} = 5,73 \text{ m}$$

Recuerda que la frecuencia es una magnitud propia del movimiento ondulatorio.

- 14. La frecuencia de la nota *do* una octava por encima del *do* natural es doble que la de este. Explica a qué es debido y calcula la longitud de onda que le corresponde en el aire y en el agua.**

Lo que se enuncia en el ejercicio es la relación entre la frecuencia de una misma nota en dos octavas consecutivas. Básicamente, la frecuencia de cada tecla de la octava que sigue a otra es el doble de la que corresponde a la misma tecla de la octava anterior. Del mismo modo, la frecuencia de la misma tecla que le precede en la octava anterior es la mitad. Por ejemplo, para el caso de la nota *la*:

$$f (\text{la natural}) = 440 \text{ Hz}$$

$$f (\text{la anterior}) = \frac{440}{2} = 220 \text{ Hz}$$

$$f (\text{la siguiente}) = 440 \cdot 2 = 880 \text{ Hz}$$

Por tanto, si tenemos en cuenta los datos del ejercicio anterior:

$$v_{\text{sonido}}(\text{agua}) = 1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} ; f(\text{do natural}) = 262 \text{ Hz}$$

la frecuencia de la nota *do* de la siguiente octava será:

$$f(\text{do siguiente}) = 2 \cdot f(\text{do natural}) = 2 \cdot 262 = 524 \text{ Hz}$$

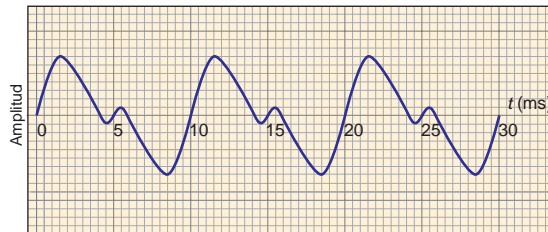
Por tanto:

$$\lambda(\text{aire}) = \frac{v_{\text{sonido}}(\text{aire})}{f} = \frac{340}{524} = 0,65 \text{ m}$$

$$\lambda(\text{agua}) = \frac{v_{\text{sonido}}(\text{agua})}{f} = \frac{1500}{524} = 2,86 \text{ m}$$

Observa que, en cada caso, la longitud de onda es la mitad de la calculada en el apartado anterior, lo cual es lógico, dado que las velocidades de propagación en el aire y en el agua no varían y que la frecuencia es una magnitud propia de la onda sonora.

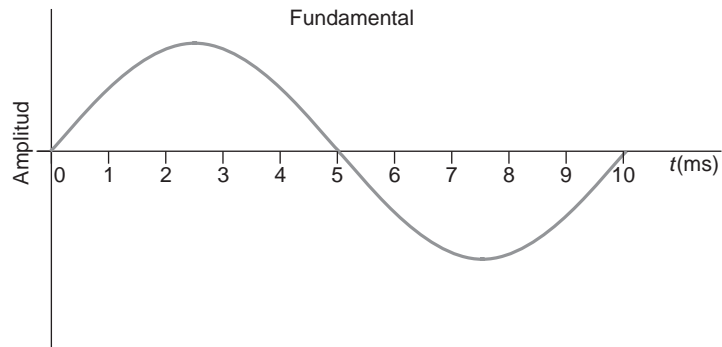
15. La figura muestra la onda que produce una fuente sonora. En el gráfico se representa la amplitud de la onda en función del tiempo.



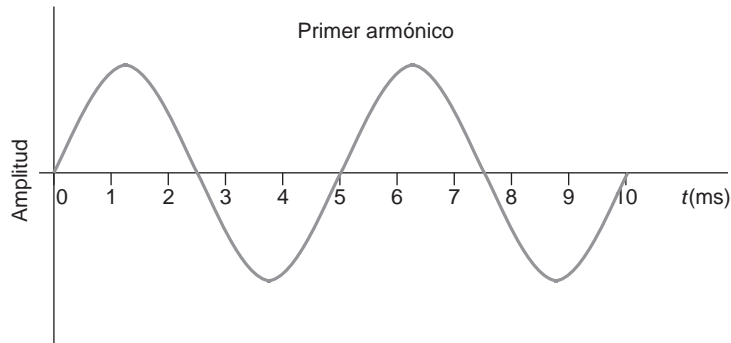
- a) ¿Qué podemos decir acerca de la nota emitida? ¿Es una nota pura?
- b) ¿Cuál es la frecuencia fundamental con que se emite este sonido?
- c) ¿Qué frecuencia tiene el armónico que acompaña a la nota fundamental?

- a) La nota emitida no es una nota pura, porque la forma de onda no es completamente senoidal.
- b) El período de una nota con armónicos no difiere respecto al de la nota fundamental pura. Esto se debe a que los armónicos son notas cuya frecuencia es múltiplo de la que corresponde a la nota fundamental. En este caso, la nota fundamental tiene un período de 10 ms, lo que supone una frecuencia:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{10 \cdot 10^{-3}} = 100 \text{ Hz}$$



- c) Cuando la amplitud de la nota fundamental pasa por 0, también lo hace el armónico. Este hecho es el que nos da la clave para calcular su período. Si nos fijamos en la forma de la onda resultante, deducimos que el período del armónico es 5 ms.

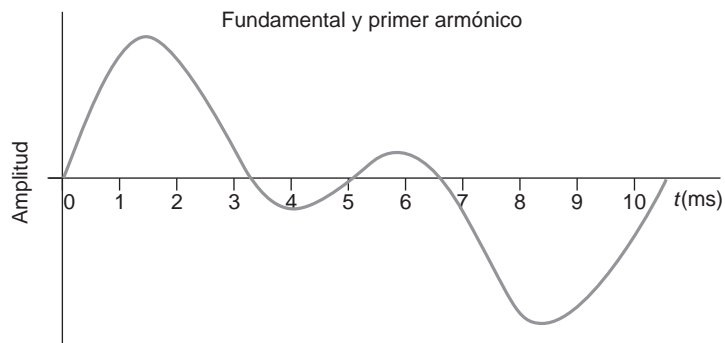


Por tanto, su frecuencia resulta:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{5 \cdot 10^{-3}} = 200 \text{ Hz}$$

que es un múltiplo de la fundamental, 100 Hz.

La suma de ambas nos da como resultado la que nos proponen en el enunciado:



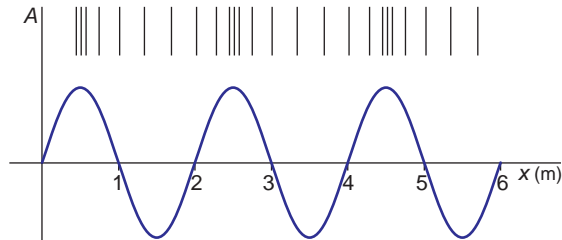
16. El sónar ha sido utilizado en muchas aplicaciones, principalmente en navegación. Un barco pesquero utiliza esta forma de localización por ecos para buscar bancos de peces. El barco lanza un primer sonido, que es recibido 60 milisegundos después. Si la velocidad del sonido en el agua es 1 500 m/s, calcula a qué distancia están nadando los peces.

En 60 milisegundos, la onda sonora va y vuelve. Por tanto, para llegar hasta los peces solo necesita la mitad del tiempo: 30 milisegundos.

De acuerdo con ello, la distancia a la que se encuentran es:

$$d = v \cdot t = 1\,500 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 45 \text{ m}$$

17. Un diapasón está generando ondas de 165 Hz. La longitud de onda se puede ver en el gráfico. Calcula la velocidad de propagación del sonido en el aire en esas condiciones.



Como se aprecia en la ilustración, la longitud de onda es 2 m. Por tanto, la velocidad de propagación del sonido en el aire debe ser:

$$\lambda = \frac{v}{f} \rightarrow v = \lambda \cdot f = 165 \cdot 2 = 330 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

18. En la figura se muestran varias cuerdas, que son iguales en todo menos en grosor. ¿A cuál de ellas le corresponde la frecuencia fundamental más alta?



Si suponemos un modelo ideal, como el que venimos estudiando, la frecuencia fundamental de la cuerda la podemos calcular a partir de la expresión:

$$f_n = \frac{n \cdot v}{2 \cdot l} \rightarrow f_1 = \frac{v}{2 \cdot l}$$

Como vemos, solo depende de la longitud. Ello nos permite afirmar que la frecuencia fundamental de todas ellas es la misma.

Sin embargo, lo cierto es que las cuerdas más finas tienen una frecuencia fundamental superior (suenan más agudo). Este hecho debe atribuirse a la facilidad que tiene una cuerda de menor masa para vibrar, como consecuencia de un menor rozamiento con el aire. De hecho, en los instrumentos de cuerda, las cuerdas de mayor grosor producen notas más graves, y las más finas, notas más agudas. La respuesta correcta es **A**.

19. En la figura se muestran varias cuerdas, que son iguales en todo menos en longitud. ¿A cuál de ellas le corresponde la frecuencia fundamental más alta?



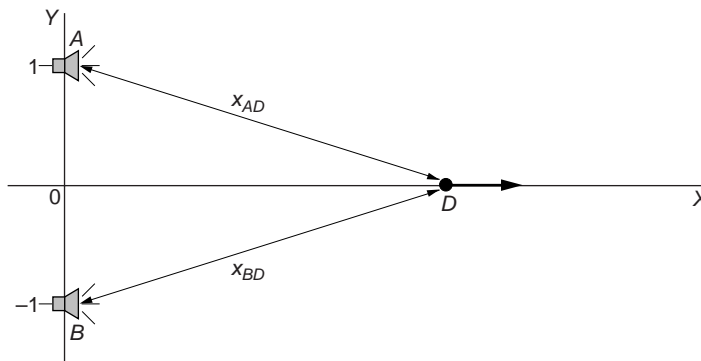
La frecuencia fundamental de una cuerda que vibra la podemos calcular a partir de la expresión:

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

Por tanto, cuanto menor sea la longitud de la cuerda, mayor será la frecuencia fundamental (más aguda sonará). La respuesta correcta es **A**.

20. Dos altavoces están accionados en fase por un amplificador y emiten con una frecuencia de 600 Hz. Los altavoces están situados sobre el eje OY, uno en (0, 1) m y el otro en (0, -1) m. Un observador situado en el origen comienza a moverse por el eje de abscisas, hacia valores positivos de este. Calcula el ángulo para el que se recibirá el primer máximo y el primer mínimo de interferencia (excluye el origen como solución del problema).

La representación del problema es:



Los puntos que registran un máximo han de cumplir la siguiente relación:

$$x_{AD} - x_{BD} = \lambda \cdot n$$

y los que registran un mínimo:

$$x_{AD} - x_{BD} = \frac{\lambda}{2} \cdot (2 \cdot n + 1)$$

En la línea por la que se mueve el observador, todos los puntos equidistan respecto de ambos altavoces: $x_{AD} = x_{BD}$ ($n = 0$). Por tanto, la condición de máximo se dará en todos los puntos y, en consecuencia, la interferencia será constructiva en todos ellos.

21. Calcula el nivel de intensidad sonora de una onda cuya intensidad es de $10^{-10} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. (Intensidad umbral: $I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$).

Para calcular el nivel de intensidad sonora, en dB, hacemos uso de la expresión:

$$S = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

Por tanto:

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

22. Calcula la intensidad de una onda sonora que produce una sensación sonora de 30 dB.

La intensidad de la onda sonora, expresada en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, se calcula como sigue:

$$S = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \rightarrow I = I_0 \cdot 10^{\frac{S}{10}} = 10^{-12} \cdot 10^{\frac{30}{10}} = 10^{-9} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

23. Demuestra que si se duplica la intensidad de una onda sonora, el nivel de intensidad aumenta en 3 dB.

La expresión que relaciona la intensidad de una onda sonora con el nivel de intensidad es:

$$S = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \rightarrow I = I_0 \cdot 10^{\frac{S}{10}}$$

Al imponer la condición de que la intensidad de una onda sea el doble de la que corresponde a la otra, se obtiene:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= I_0 \cdot 10^{\frac{S_1}{10}} \\ I_2 &= 2 \cdot I_1 = I_0 \cdot 10^{\frac{S_2}{10}} \end{aligned} \right\} \rightarrow \frac{I_2}{I_1} = \frac{2 \cdot I_1}{I_1} = \frac{I_0 \cdot 10^{\frac{S_2}{10}}}{I_0 \cdot 10^{\frac{S_1}{10}}} \rightarrow$$

$$\rightarrow 2 = 10^{\frac{S_2 - S_1}{10}} \rightarrow \log 2 = \frac{S_2 - S_1}{10} \rightarrow 10 \cdot \log 2 = S_2 - S_1$$

$$S_2 \approx 3 + S_1$$

Efectivamente, el nivel de intensidad aumenta en 3 dB.

24. Un reactor se mueve a una velocidad Mach 2,5 a una altura de 5 000 m. Calcula el ángulo que la onda de choque forma con la trayectoria del reactor.

El ángulo de la onda de choque se puede calcular teniendo en cuenta la relación deducida en la página 151 del libro del alumnado:

$$\text{sen } \theta = \frac{v_s}{v_F}$$

En ella, v_s es la velocidad de la onda, en este caso el sonido, y v_F la velocidad del foco. El número de Mach, dato que proporciona el enunciado, es la relación inversa:

$$\text{Número de Mach} = \frac{v_F}{v_s} \rightarrow v_F = \text{Número de Mach} \cdot v_s$$

$$v_F = 2,5 \cdot 340 = 850 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

El ángulo de la onda de choque es:

$$\text{sen } \theta = \frac{v_s}{v_F} \rightarrow \theta = \text{arcsen} \frac{v_s}{v_F} = \text{arcsen} \frac{340}{850} = 23,58^\circ$$

PROBLEMAS

25. Una onda sonora, que se propaga por el aire, produce una variación de presión que viene dada por la expresión:

$$P(x, t) = \text{sen} \left[\pi \cdot \left(\frac{x}{2} + 170 \cdot t \right) \right]$$

en la que P se mide en pascal, x en metros y t en segundos. Calcula:

- La amplitud de la presión.
- La longitud de onda.
- La frecuencia.
- La velocidad de la onda sonora.

Para obtener las magnitudes que solicita el enunciado, identificamos la ecuación que nos proporciona este con la ecuación general de un movimiento ondulatorio:

$$P(x, t) = A \cdot \text{sen} (k \cdot x - \omega \cdot t)$$

- La amplitud de la presión es de 1 Pa.
- Teniendo en cuenta que:

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} ; k = \frac{\pi}{2}$$

la longitud de onda es:

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{k} = \frac{2 \cdot \pi}{\pi/2} = 4 \text{ m}$$

- La frecuencia angular es:

$$\omega = 170 \cdot \pi \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

Por tanto, la frecuencia de vibración será:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \rightarrow f = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} = \frac{170 \cdot \pi}{2 \cdot \pi} = 85 \text{ Hz}$$

d) La velocidad de propagación de la onda sonora es:

$$v = \lambda \cdot f = 4 \cdot 85 = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

que corresponde a la velocidad de las ondas sonoras.

26. Una persona deja caer verticalmente una piedra desde lo alto de un puente elevado y oye el choque contra el agua cuatro segundos después. Calcula la altura a que se encuentra del agua.

Los cuatro segundos que tarda la persona en oír el choque serán la suma del tiempo que tarda la piedra en chocar contra el agua (t_1) más el tiempo que tarda la onda sonora procedente del choque en alcanzar nuestros oídos. Teniendo en cuenta que la piedra efectúa una caída libre, podemos escribir:

$$t = t_1 + t_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot h}{g}} + t_2 \rightarrow 4 = \sqrt{\frac{2 \cdot h}{9,8}} + t_2 \quad [1]$$

Por otro lado, la altura a que se encuentra el agua y el tiempo t_2 están relacionadas entre sí de acuerdo con la siguiente expresión:

$$v_s = \frac{h}{t_2} \rightarrow h = v_s \cdot t_2 \rightarrow h = 340 \cdot t_2 \quad [2]$$

Las expresiones [1] y [2] forma un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas, que resolvemos a continuación:

$$4 = \sqrt{\frac{2 \cdot h}{9,8}} + t_2 \rightarrow 4 = \sqrt{\frac{2 \cdot 340 \cdot t_2}{9,8}} + t_2 \rightarrow 4 - t_2 = \sqrt{69,39 \cdot t_2}$$
$$16 - 8 \cdot t_2 + t_2^2 = 69,39 \cdot t_2 \rightarrow t_2^2 - 77,39 \cdot t_2 + 16 = 0$$

Al resolver la ecuación de segundo grado se obtiene:

$$t_2 = 0,21 \text{ s}$$

$$t_2 = 77,18 \text{ s}$$

Obviamente, el segundo resultado que ofrece la resolución es físicamente absurdo, porque es menor que 4 s; por tanto, $t_2 = 0,21 \text{ s}$.

Si sustituimos el resultado en [2], obtenemos:

$$h = 340 \cdot t_2 = 340 \cdot 0,21 = 71,4 \text{ m}$$

27 Un altavoz emite con una potencia de 20 W.

a) Calcula la intensidad de la onda sonora a una distancia de 5 m del altavoz.

b) ¿Cuál será el nivel de intensidad de la onda sonora correspondiente, expresado en dB?

a) La intensidad sonora en función de la distancia a la que se encuentra la fuente se calcula con ayuda de la expresión:

$$I = \frac{P}{S} \rightarrow I = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{20}{4 \cdot \pi \cdot 5^2} = 6,37 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

b) Para expresar el valor en dB:

$$S = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

siendo I_0 la intensidad umbral, que es de $10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Por tanto, sustituyendo el dato obtenido en el apartado anterior, resulta:

$$S = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} = 10 \cdot \log \frac{6,37 \cdot 10^{-2}}{10^{-12}} = 108 \text{ dB}$$

28. Una fuente sonora emite con una potencia de 15 W. Determina:

- La intensidad de esta fuente a 6 y 12 metros de distancia, respectivamente.**
- El nivel de intensidad de la onda sonora, en dB, para ambas situaciones.**
- ¿Cuál es la relación entre las amplitudes a 6 y 12 metros?**
- Despreciando la absorción del medio, ¿a qué distancia dejaría de escucharse el sonido?**

a) La intensidad, en función de la distancia, se calcula con la expresión:

$$I = \frac{P}{S} \rightarrow \begin{cases} I_6 = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{15}{4 \cdot \pi \cdot 6^2} = 3,316 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \\ I_{12} = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{15}{4 \cdot \pi \cdot 12^2} = 8,29 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \end{cases}$$

b) Para calcular el nivel de intensidad de la onda sonora, expresado en dB, hacemos uso de la expresión:

$$S = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

donde I_0 es la intensidad umbral, que es $10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Por tanto:

$$S_6 = 10 \cdot \log \frac{3,316 \cdot 10^{-2}}{10^{-12}} = 105,2 \text{ dB}$$

$$S_{12} = 10 \cdot \log \frac{8,29 \cdot 10^{-3}}{10^{-12}} = 99,2 \text{ dB}$$

c) La intensidad es proporcional al cuadrado de la amplitud. De ese modo, resulta:

$$\frac{I_6}{I_{12}} = \frac{A_6^2}{A_{12}^2} \rightarrow \frac{A_6}{A_{12}} = \sqrt{\frac{I_6}{I_{12}}} = \sqrt{\frac{3,316 \cdot 10^{-2}}{8,29 \cdot 10^{-3}}} = 2$$

La amplitud de la onda a 6 m es doble que a 12 m.

d) La intensidad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{d_0^2}{d^2}$$

A la distancia a la que el sonido dejaría de percibirse, suponiendo despreciable la absorción del medio, la intensidad del sonido debería ser, precisamente, la intensidad umbral. Por tanto:

$$\frac{I_6}{I_0} = \frac{d_0^2}{d_6^2} \rightarrow d_0 = d_6 \cdot \sqrt{\frac{I_6}{I_0}} \rightarrow d_0 = 6 \cdot \sqrt{\frac{3,316 \cdot 10^{-2}}{10^{-12}}} \approx 1093000 \text{ m} = 1093 \text{ km}$$

El resultado que obtenemos es absurdo, porque no tiene en cuenta la absorción de la onda por el medio, un fenómeno que tiene gran importancia.

NOTA: la resolución de este problema se ofrece también en el CD-ROM para el alumnado.

29. Se realizan medidas del nivel de ruido en el interior de una discoteca, siendo este de 96 dB. Si la pared tiene un espesor de 12 cm y su coeficiente de absorción es $\beta = 0,08 \text{ cm}^{-1}$, calcula:

a) La intensidad de la onda sonora en el exterior.

b) El nivel de intensidad de la onda sonora o sensación sonora, en el exterior, expresado en dB.

a) En primer lugar, calculamos la intensidad sonora, expresándola en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$:

$$S = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \rightarrow I = I_0 \cdot 10^{\frac{S}{10}} = 10^{-12} \cdot 10^{\frac{96}{10}} = 3,98 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Teniendo en cuenta la absorción de la pared, la intensidad en el exterior resulta:

$$I' = I \cdot e^{-\beta \cdot x} = 3,98 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-0,08 \cdot 12} = 1,52 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

b) Expresada en decibelios, esta intensidad sonora equivale a:

$$S = 10 \cdot \log \frac{I'}{I_0} = 10 \cdot \log \frac{1,52 \cdot 10^{-3}}{10^{-12}} = 91,8 \text{ dB}$$

30. A una altura de 2 m, el ruido del tráfico, en una calle de tráfico intenso, produce una sensación sonora de 80 dB. ¿Qué sensación sonora produce a una altura de 25 m?

La intensidad de la onda sonora, a una altura de 2 m, teniendo en cuenta el valor de la intensidad umbral, $10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, se calcula como sigue:

$$S_1 = 10 \cdot \log \frac{I_{2\text{m}}}{I_0} \rightarrow I_{2\text{m}} = I_0 \cdot 10^{\frac{S_1}{10}} = 10^{-12} \cdot 10^{\frac{80}{10}} = 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Por tanto, la potencia de la onda sonora es:

$$I_{2\text{m}} = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r_1^2} \rightarrow P = I_{2\text{m}} \cdot 4 \cdot \pi \cdot r_1^2 = 10^{-4} \cdot 4 \cdot \pi \cdot 2^2 = 16 \cdot 10^{-4} \cdot \pi \text{ W}$$

Y el valor de la intensidad sonora a 25 m de altura:

$$I_{25\text{ m}} = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r_2^2} \rightarrow P = \frac{16 \cdot 10^{-4} \cdot \pi}{4 \cdot \pi \cdot 25^2} = 6,4 \cdot 10^{-7} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Finalmente, obtenemos el valor de la sensación sonora a una altura de 25 m:

$$S_2 = 10 \cdot \log \frac{I_{25\text{ m}}}{I_0} = 10 \cdot \log \frac{6,4 \cdot 10^{-7}}{10^{-12}} = 58 \text{ dB}$$

- 31** Una cuerda se fija entre dos soportes que se encuentran a 1,36 m de distancia. La frecuencia de la nota fundamental que se obtiene al hacer vibrar la cuerda es 150 Hz. Si la cuerda se sujeta por un punto situado a 0,34 m de uno de los extremos y se hace vibrar ligeramente, ¿qué frecuencia escucharemos?

Conocida la frecuencia fundamental ($n = 1$), podemos obtener la velocidad del sonido en el medio:

$$f = \frac{v}{2 \cdot l} \rightarrow v = f \cdot 2 \cdot l = 150 \cdot 2 \cdot 1,36 = 408 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

El enunciado nos dice que la cuerda vibra ligeramente, lo que nos hace suponer que la cuerda, una vez acortada, emitirá también en su frecuencia fundamental, que será:

$$f = \frac{v}{2 \cdot l} = \frac{408}{2 \cdot 0,34} = 600 \text{ Hz}$$

- 32.** La nota más baja que podemos hacer sonar en un clarinete tiene una frecuencia de 147 Hz. Conocido ese dato, calcula la longitud efectiva que debe tener el clarinete, si puede asimilarse a una columna de aire con uno de los extremos abierto y el otro cerrado.

Para un tubo abierto por un solo extremo, la relación entre frecuencia y longitud viene dada por:

$$f = \frac{(2 \cdot n + 1) \cdot v}{4 \cdot l} \quad \forall n = 0, 1, 2 \dots$$

Cuando hablamos de la frecuencia de la nota más baja, $n = 0$, y la longitud del tubo resulta:

$$f = \frac{v}{4 \cdot l} \rightarrow l = \frac{v}{4 \cdot f} = \frac{340}{4 \cdot 147} = 0,578 \text{ m} = 57,8 \text{ cm}$$

- 33.** Calcula los armónicos que presenta una flauta por debajo de 1350 Hz si su longitud efectiva es de 62 cm.

A partir de la longitud efectiva de la flauta, hemos de calcular, para una frecuencia igual a 1350 Hz, el número, n , que corresponde al armónico. A partir de ahí bajaremos dicho número, n , de unidad en unidad, a fin de obtener los armónicos restantes.

Teniendo en cuenta que una flauta puede considerarse un tubo con sus dos extremos abiertos, el armónico correspondiente a esta frecuencia resulta:

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{v \cdot n}{2 \cdot L} \rightarrow n = \frac{2 \cdot f_n \cdot L}{v} = \frac{2 \cdot 1350 \cdot 0,62}{340} = 4,92$$

Aproximamos a $n = 5$, ya que el valor de la velocidad del sonido en el aire puede variar fácilmente en función de la temperatura y n debe ser un número entero.

Los armónicos que quedan por debajo de $n = 5$ se recogen en la tabla que sigue. Hemos tomado para la velocidad del sonido en el aire: $v = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Número de armónico, n	4	3	2	1
Frecuencia (Hz)	1 097	822	548	274

NOTA: la resolución de este problema se ofrece también en el CD-ROM para el alumnado.

34. Un órgano con tubos abiertos por ambos extremos es capaz de reproducir sonidos comprendidos entre 65 Hz y 2090 Hz. Calcula la longitud que corresponde al tubo más largo y al tubo más corto de ese órgano.

En ambos casos, el enunciado se refiere a las frecuencias fundamentales de los tubos ($n = 1$). Por tanto, las longitudes asociadas a dichas frecuencias resultan:

$$f_1 = \frac{n \cdot v}{2 \cdot l} \rightarrow l_1 = \frac{n \cdot v}{2 \cdot f_1} = \frac{1 \cdot 340}{2 \cdot 65} = 2,62 \text{ m}$$

$$f_2 = \frac{n \cdot v}{2 \cdot l} \rightarrow l_2 = \frac{n \cdot v}{2 \cdot f_2} = \frac{1 \cdot 340}{2 \cdot 2090} = 8,13 \cdot 10^{-2} = 8,13 \text{ cm}$$

35. ¿Cuál es la relación entre las intensidades de dos sonidos de 60 y 70 dB?

Las intensidades de dichos sonidos serán:

$$S_1 = 10 \cdot \log \frac{I_1}{I_0} \rightarrow I_1 = I_0 \cdot 10^{\frac{70}{10}} = 10^{-12} \cdot 10^{\frac{70}{10}} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$S_2 = 10 \cdot \log \frac{I_2}{I_0} \rightarrow I_2 = I_0 \cdot 10^{\frac{60}{10}} = 10^{-12} \cdot 10^{\frac{60}{10}} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

siendo la relación entre ambas: $I_1/I_2 = 10$.

NOTA: la resolución de este problema se ofrece también en el CD-ROM para el alumnado.

36. ¿Qué relación existe entre las intensidades de dos sonidos de 83 y 93 dB?

Las intensidades de dichos sonidos serán:

$$S_1 = 10 \cdot \log \frac{I_1}{I_0} \rightarrow I_1 = I_0 \cdot 10^{\frac{93}{10}} = 10^{-12} \cdot 10^{\frac{93}{10}} = 1,99 \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$S_2 = 10 \cdot \log \frac{I_2}{I_0} \rightarrow I_2 = I_0 \cdot 10^{\frac{83}{10}} = 10^{-12} \cdot 10^{\frac{83}{10}} = 1,99 \cdot 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

siendo la relación entre ambas: $I_1/I_2 = 10$.

37. ¿Qué conclusiones podemos extraer de las dos actividades anteriores?

Debido a la escala logarítmica empleada para la sonoridad, si dos sensaciones sonoras tienen una diferencia de diez unidades (esto es, 10 dB), una intensidad es diez veces superior a la otra.

38. El tímpano tiene un área de unos 85 mm². Calcula la intensidad sonora que recibe si es alcanzado por una onda sonora de 100 dB que no se refleja, sino que se transmite por completo.

La intensidad sonora que llega al tímpano la obtenemos a partir de la definición de la sensación sonora:

$$S_1 = 10 \cdot \log \frac{I_1}{I_0} \rightarrow I_1 = I_0 \cdot 10^{\frac{100}{10}} = 10^{-12} \cdot 10^{\frac{100}{10}} = 0,01 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

39. En el problema anterior, calcula la potencia, medida en watt, que recibe el tímpano al ser alcanzado por el sonido.

Si tenemos en cuenta el área del tímpano, la potencia que este recibe es:

$$I = \frac{P}{S} \rightarrow P = I \cdot S = 0,01 \cdot (85 \cdot 10^{-6}) = 85 \cdot 10^{-8} \text{ W}$$

40 Se quiere construir el cerramiento de un local de ocio. Se calcula que dentro de él la intensidad sonora será 100 dB. Sin embargo, por imposición de las ordenanzas de ruido de la ciudad, el nivel que puede llegar al exterior no debe sobrepasar los 60 dB. Si la pared del local ha de medir 15 cm, calcula el coeficiente de absorción mínimo del cerramiento, para que el local cumpla la normativa.

La intensidad sonora en el interior y en el exterior del local es, respectivamente, de 100 dB y 60 dB. Expresado en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, resulta:

$$S_{int} = 10 \cdot \log \frac{I_{int}}{I_0} \rightarrow I_{int} = I_0 \cdot 10^{\frac{100}{10}} = 10^{-12} \cdot 10^{\frac{100}{10}} = 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$S_{ext} = 10 \cdot \log \frac{I_{ext}}{I_0} \rightarrow I_{ext} = I_0 \cdot 10^{\frac{60}{10}} = 10^{-12} \cdot 10^{\frac{60}{10}} = 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Sustituyendo en la expresión que permite calcular la absorción, despejamos el valor que corresponde al coeficiente de absorción del material:

$$I_{ext} = I_{int} \cdot e^{-\beta \cdot x} \rightarrow \beta = \frac{\ln \left(\frac{I_{ext}}{I_{int}} \right)}{-x} = \frac{\ln \left(\frac{10^{-6}}{10^{-2}} \right)}{-0,15} = 61,40 \text{ m}^{-1}$$

41. Calcula la fracción de potencia acústica que habrá de eliminarse para disminuir el nivel de intensidad de un ruido de 90 a 60 dB.

La potencia de una onda está relacionada con su intensidad por medio de la expresión:

$$I = \frac{P}{S} \rightarrow P = I \cdot S$$

Por tanto, calcular la fracción de potencia es equivalente a calcular la relación entre la intensidad inicial de la onda y su intensidad después de haber reducido el nivel de intensidad hasta el valor deseado.

Las intensidades de la onda correspondientes a los niveles de intensidad de 90 dB y 60 dB se calculan a partir de la expresión:

$$S = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

donde S es el nivel de intensidad, e I_0 , la intensidad umbral, de valor $10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Por tanto:

$$90 = 10 \cdot \log \frac{I_{90}}{I_0} \rightarrow I_{90} = I_0 \cdot 10^{\frac{90}{10}} = 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$60 = 10 \cdot \log \frac{I_{60}}{I_0} \rightarrow I_{60} = I_0 \cdot 10^{\frac{60}{10}} = 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

La fracción de intensidad que hay que eliminar es:

$$\chi_{eliminar} = 1 - \frac{I_{60}}{I_{90}} = 0,999$$

Por tanto, la potencia de la onda debe rebajarse en un 99,9%.

NOTA: la resolución de este problema se ofrece también en el CD-ROM para el alumnado.

42. Un observador en reposo pretende medir la velocidad de un coche basándose en el efecto Doppler. Para ello, mide la frecuencia del motor del coche cuando se acerca y cuando se aleja, obteniendo como resultado 500 Hz y 450 Hz, respectivamente. Con esos datos, calcula la velocidad con que se mueve el vehículo.

La lectura que realiza el observador es la frecuencia aparente, f' . Por otra parte, el observador se mantiene en reposo ($v_0 = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Si planteamos las ecuaciones que corresponden a las situaciones en que el foco se acerca y se aleja, obtenemos el siguiente resultado:

$$f'_1 = f \cdot \frac{v}{v - v_F} = f \cdot \frac{340}{340 - v_F} = 500 \text{ Hz}$$

$$f'_2 = f \cdot \frac{v}{v + v_F} = f \cdot \frac{340}{340 + v_F} = 450 \text{ Hz}$$

En estas expresiones, la incógnita que nos interesa es v_F . Para despejarla, dividimos entre sí ambas expresiones:

$$\frac{500}{450} = \frac{\frac{340}{340 - v_F}}{\frac{340}{340 + v_F}} = \frac{340 + v_F}{340 - v_F} \rightarrow 340 \cdot (500 - 450) = v_F \cdot (450 + 500) \rightarrow$$

$$\rightarrow v_F = \frac{340 \cdot 50}{950} = 17,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

43 Maite se encuentra en el portal de su casa, mientras oye cómo se acerca una moto emitiendo un ruido que, a efectos del problema, asimilaremos a un sonido de frecuencia 1 500 Hz. La moto se acerca con una velocidad de 54 km/h. Con esos datos, calcula:

- La frecuencia que percibe mientras la moto se acerca hacia ella. La dirección en que se mueve la moto es la recta que une la moto con Maite.
- La frecuencia que percibe si, tras pasar la moto por delante de ella, se aleja con la misma velocidad. Al igual que en el caso anterior, la moto se mueve en una dirección definida, en todo momento, por la recta que une a Maite con la moto.
- La frecuencia del ruido percibido si Maite monta en su moto y persigue al conductor de la otra moto con una velocidad de 10 m/s.

- El problema es una aplicación del efecto Doppler. Consideraremos en todos los apartados que la velocidad del sonido en el aire es $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

En este caso, el foco se acerca al observador. Por tanto, la frecuencia aparente que este percibe es:

$$f' = f \cdot \frac{v}{v - v_F} = 1\,500 \cdot \frac{340}{340 - 54 \cdot \left(\frac{1\,000}{3\,600}\right)} = 1\,569,2 \text{ Hz}$$

- Ahora, la moto (el foco) se aleja del observador, que sigue permaneciendo en reposo. La velocidad del foco cambia de signo, y, por tanto:

$$f' = f \cdot \frac{v}{v + v_F} = 1\,500 \cdot \frac{340}{340 + 54 \cdot \left(\frac{1\,000}{3\,600}\right)} = 1\,436,6 \text{ Hz}$$

- En esta ocasión, tanto el foco como el observador se mueven. El observador se acerca hacia el foco y el foco se aleja del observador. Por tanto:

$$f' = f \cdot \frac{v + v_0}{v + v_F} = 1\,500 \cdot \frac{340 + 10}{340 + 54 \cdot \left(\frac{1\,000}{3\,600}\right)} = 1\,478,9 \text{ Hz}$$

44. Un tren se acerca por una vía recta, haciendo sonar su silbato. La frecuencia con que emite el silbato es 1 000 Hz. Si el tren se mueve con una velocidad de 144 km/h, calcula:

- a) La frecuencia que percibe un observador que se encuentra parado en el andén de la estación mientras se acerca el tren.
- b) La frecuencia que percibe el observador si pasea por el andén de la estación, en dirección al tren, con una velocidad de 3,6 km/h.
- c) La velocidad con que debería moverse ese observador, una vez ha pasado el tren, para percibir el sonido del silbato con una frecuencia de 975 Hz.
- d) ¿En qué sentido debe hacerlo, si se mueve en la misma dirección que el tren?

a) El problema es una aplicación del efecto Doppler. Consideraremos en todos los apartados que la velocidad del sonido en el aire es $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

En este caso, el foco (el tren) se acerca al observador; por tanto, la frecuencia aparente que este percibe es:

$$f' = f \cdot \frac{v}{v - v_F} = 1000 \cdot \frac{340}{340 - 144 \cdot \left(\frac{1000}{3600}\right)} = 1133,3 \text{ Hz}$$

b) Ahora, el observador también se mueve, aproximándose al foco. Por tanto:

$$f' = f \cdot \frac{v + v_0}{v - v_F} = 1000 \cdot \frac{340 + 3,6 \cdot \left(\frac{1000}{3600}\right)}{340 - 144 \cdot \left(\frac{1000}{3600}\right)} = 1136,7 \text{ Hz}$$

c) Una vez ha pasado el tren por delante del observador, su velocidad cambia de signo. Debemos despejar ahora la velocidad con que debería moverse el observador a partir de la ecuación:

$$f' = f \cdot \frac{v + v_0}{v + v_F} \rightarrow 975 = 1000 \cdot \frac{340 + v_0}{340 + 40} \rightarrow v_0 = 30,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

d) El signo de la velocidad, v_0 , es positivo, lo que indica que el observador se acerca hacia el foco. Ello quiere decir que el observador debería ir persiguiendo el tren con una velocidad igual a $30,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

NOTA: la resolución de este problema se ofrece también en el CD-ROM para el alumnado.

45. Un sonido emitido desde una fuente F alcanza un punto P tras viajar en un medio homogéneo por dos caminos. La diferencia de longitud entre ambos caminos es 1,2 m. Cuando la frecuencia del sonido aumenta, la intensidad resultante en P experimenta una serie de máximos y mínimos. Se produce un máximo cuando la frecuencia es 1000 Hz; el siguiente máximo se produce a 1200 Hz. Calcula la velocidad con que se propaga el sonido en ese medio.

Se trata de un problema donde intervienen los fenómenos de interferencias. El primer máximo se produce a una frecuencia de 1000 Hz. Por tanto:

$$x_1 - x_2 = \lambda \cdot n = \frac{v}{f} \cdot n \rightarrow 1,2 = \frac{v}{1000} \cdot n$$

El máximo siguiente $(n + 1)$ se produce a una frecuencia de 1 200 Hz:

$$x_1 - x_2 = \lambda \cdot (n + 1) = \frac{v}{f} \cdot (n + 1) \rightarrow 1,2 = \frac{v}{1200} \cdot (n + 1)$$

Ambas ecuaciones forman un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas: n y v .

Si las dividimos entre sí, podemos calcular el valor de n :

$$1 = 1,2 \cdot \frac{n}{n + 1} \rightarrow n + 1 = 1,2 \cdot n \rightarrow n = \frac{1}{0,2} = 5$$

Sustituyendo ahora en cualquiera de las ecuaciones anteriores, obtenemos la velocidad:

$$1,2 = \frac{v}{1200} \cdot (n + 1) \rightarrow v = \frac{1200 \cdot 1,2}{n + 1} = \frac{1200 \cdot 1,2}{5 + 1} = 240 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$