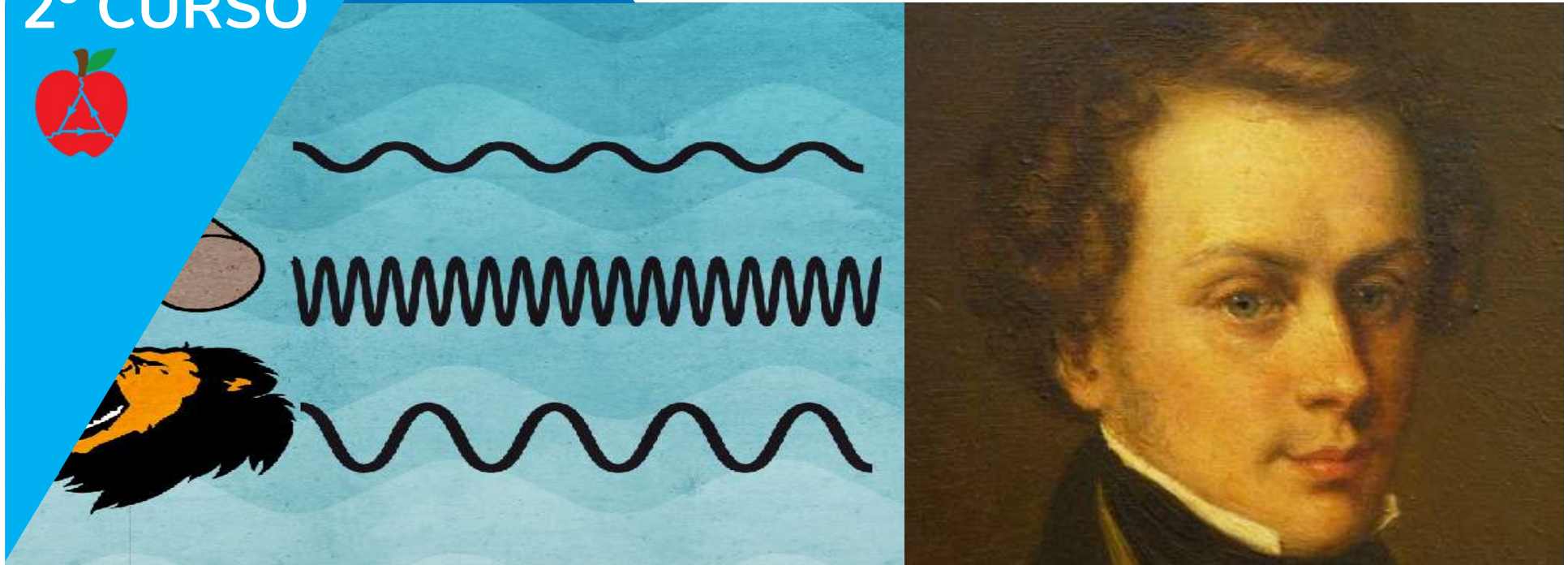


# FÍSICA

2º CURSO



## BLOQUE 3: VIBRACIONES Y ONDAS 07. ONDAS SONORAS



Ondas sonoras y sus cualidades. Intensidad sonora. Escala decibélica. Cambios en las propiedades de las ondas en función del desplazamiento del emisor y receptor: el efecto Doppler. Aplicaciones tecnológicas del sonido.

**1. Ondas sonoras**

1.1. Producción y propagación de ondas sonoras.

**2. Velocidad de propagación del sonido****3. Intensidad del sonido y sensación sonora**

3.1. Escala de nivel de intensidad sonora.

3.2. Sensación sonora.

3.3. Contaminación acústica y calidad de vida.

**4. Fenómenos ondulatorios del sonido**

4.1. La reflexión del sonido.

4.2. La refracción del sonido.

4.3. La difracción del sonido.

4.4. Interferencias sonoras.

**5. Ondas estacionarias en tubos**

5.1. Onda estacionaria en un tubo abierto por uno de los extremos.

5.2. Onda estacionaria en un tubo abierto por ambos extremos.

**6. El efecto Doppler**

6.1. Fuente sonora en movimiento y observador en reposo.

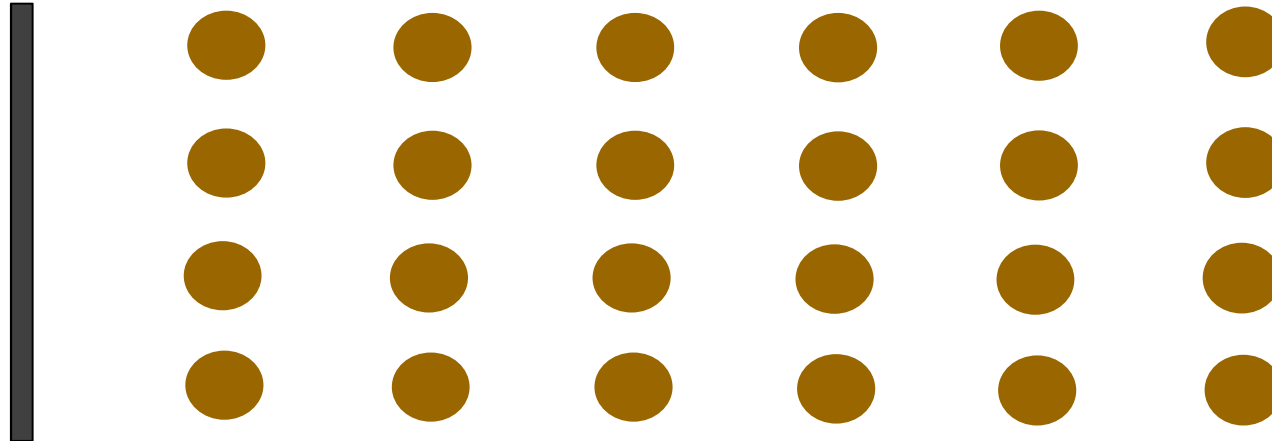
6.2. Fuente sonora en reposo y observador en movimiento.

6.3. Fuente sonora y observador en movimiento.

6.4. Romper la barrera del sonido.



► El sonido son ondas **mecánicas longitudinales**



► El **sonido** requiere:

- ✍ **Una fuente:** altavoces, instrumentos musicales, la voz, etc.
- ✍ **Un medio mecánico** por el que se propague la onda sonora que debe presentar propiedades elásticas.
- ✍ **Un receptor o detector de sonidos** que transforme la energía transmitida en otro tipo de energía que permita su análisis y su interpretación.

El **sonido** es la propagación de la vibración de un cuerpo elástico a través de un medio material.



### 1.1. Producción y propagación de ondas sonoras

- ✗ Las ondas mecánicas longitudinales son **sonoras** cuando se perciben por nuestros oídos, esto es cuando la frecuencia de oscilación se encuentra **entre 20 Hz y 20.000 Hz**.



27 Hz



100 Hz



200 Hz



400 Hz



1000 Hz



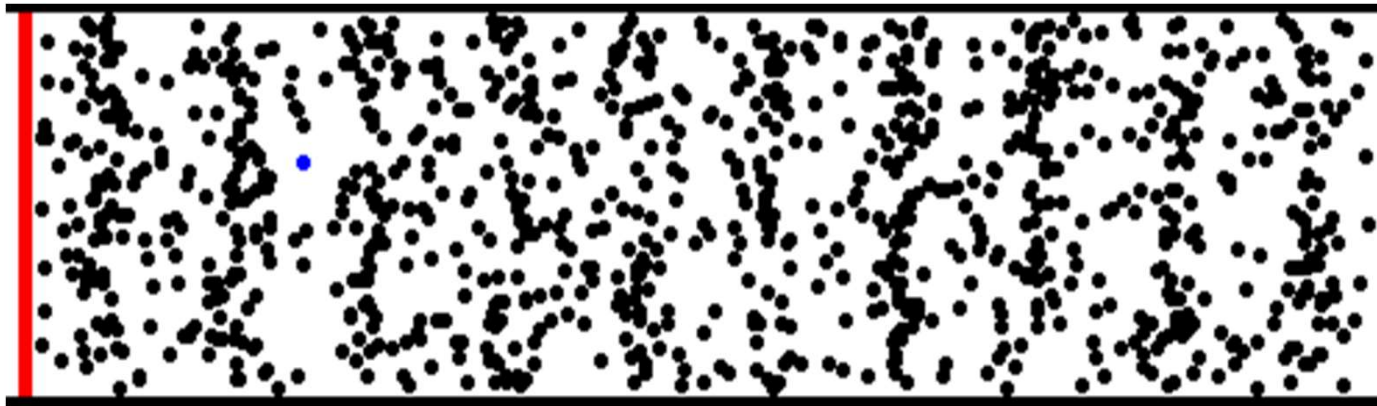
3000 Hz

- ✗ Los sonidos de una frecuencia **inferior a 20 Hz** se denominan **infrasonidos**.
- ✗ Los sonidos de una frecuencia **superior a 20.000 Hz** se denominan **ultrasonidos**

Todo cuerpo que oscile con una frecuencia comprendida entre 20 Hz y 20.000 Hz crea una onda sonora en el medio circundante, ya sea sólido, líquido o gaseoso.



### 1.1. Producción y propagación de ondas sonoras



Las ondas sonoras se propagan por un medio gaseoso mediante una secuencia alternada de **compresiones** y **enrarecimientos**.



- La velocidad de propagación del sonido **depende del medio** a través del cual se propaga.

En general la velocidad de propagación del sonido es mayor en los **sólidos** que en los **líquidos** y en los líquidos mayor que en los **gases**.

- ☞ Velocidad de propagación en los **sólidos**:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$E \rightarrow$  Módulo de Young  
 $\rho \rightarrow$  Densidad

- ☞ Velocidad de propagación en los **líquidos**:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

$B \rightarrow$  Módulo de compresibilidad  
 $\rho \rightarrow$  Densidad

- ☞ Velocidad de propagación en los **gases**:

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

$\gamma \rightarrow$  Coeficiente adiabático  
 $R \rightarrow$  Constante universal de los gases  
 $T \rightarrow$  Temperatura kelvin  
 $M \rightarrow$  Masa molar del gas



| MEDIO    | TEMPERATURA (°C) | VELOCIDAD (m/s) |
|----------|------------------|-----------------|
| Aire     | 0                | 331.7           |
| Aire     | 15               | 340             |
| Oxígeno  | 0                | 317             |
| Etanol   | 20               | 1200            |
| Benceno  | 20               | 1300            |
| Agua     | 15               | 1450            |
| Aluminio | 20               | 5000            |
| Acero    | 20               | 5130            |
| Cobre    | 20               | 3750            |
| Vidrio   | 20               | 5170            |



## ACTIVIDADES

1. 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.

**Sol:** a)  $\lambda = 0,68 \text{ m}$ ; b)  $T = 0,002 \text{ s}$ ; c)  $\lambda = 3,6 \text{ m}$



- ➡ La intensidad de una onda viene dada por:

$$I = \frac{E}{St}$$

- ➡ Si el medio es isótropo, el frente de onda es esférico y por tanto, como obtuvimos en el tema anterior:

$$I = \frac{\rho \omega^2 A^2}{2t}$$

- ➡ La intensidad es proporcional al cuadrado de la amplitud y al cuadrado de la frecuencia.
- ➡ La intensidad disminuye al alejarse del foco conforme  $1/r^2$ , debido a que la amplitud es inversamente proporcional a la distancia al foco.

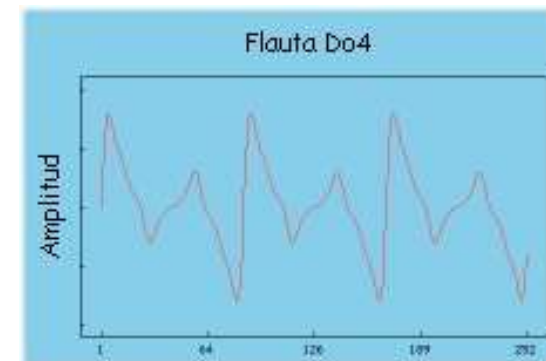
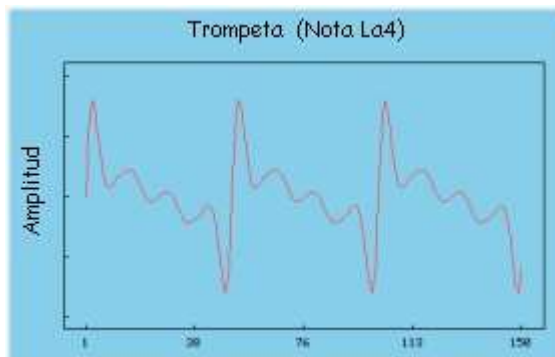
El sonido se puede interpretar también como variación de la presión. Se puede demostrar que:

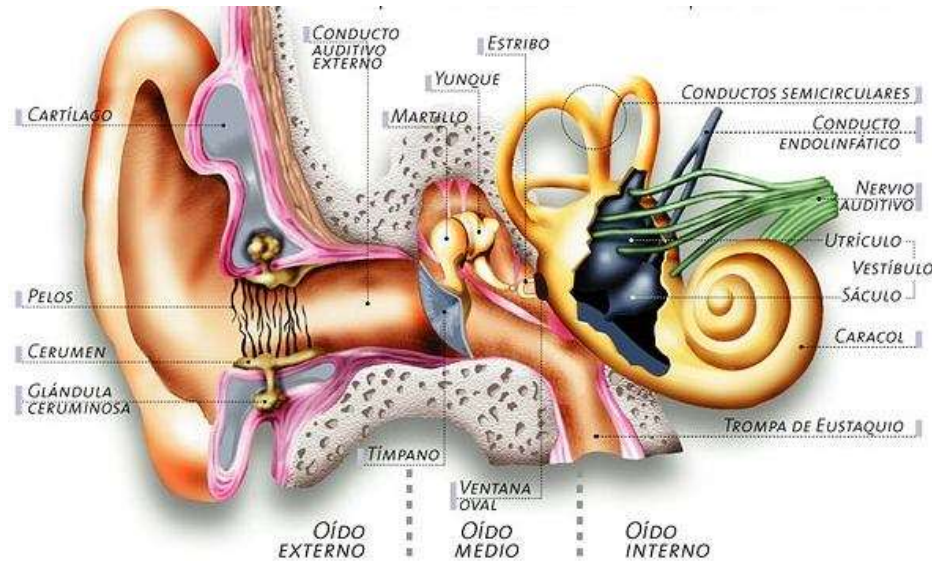
$$I = \frac{\Delta p}{2\rho v}$$



### ► Cualidades del sonido

- ☞ **Intensidad.** Es la energía que se propaga por unidad de área perpendicular a la dirección de propagación: fuertes y débiles.
- ☞ **Tono.** Relacionado con la frecuencia: graves (**bajas frecuencias**) y agudos (**altas frecuencias**)
- ☞ **Timbre.** Relacionado con la forma de la onda, que hace posible distinguir entre los sonidos producidos por los diferentes instrumentos.





➡ Espectro de intensidades que abarca el oído humano:

$$I_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2} \quad \Rightarrow \quad I = 1 \frac{W}{m^2}$$

umbral de audición

sensación auditiva dolorosa



### 3.1. Escala de nivel de intensidad sonora

☞ Se define el **nivel de intensidad sonora**:

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

$I$  : Intensidad de la onda sonora

$I_0$ : Intensidad de la onda sonora de referencia  $10^{-12} \text{ W/m}^2$

El nivel de intensidad sonora se mide en decibelios (dB)

□ El umbral de audición en decibelios:

$$\beta = 10 \log \frac{10^{-1}}{10^{-12}} = 10 \log 1 = 0 \text{ dB}$$

□ La sensación auditiva dolorosa en decibelios:

$$\beta = 10 \log \frac{1}{10^{-1}} = 10 \log 10^{12} = 120 \text{ dB}$$



### 3.1. Escala de nivel de intensidad sonora

| Nivel de intensidad de algunos sonidos comunes |    |                       |                       |
|------------------------------------------------|----|-----------------------|-----------------------|
|                                                | dB |                       | dB                    |
| Umbral de audición                             | 0  | Tráfico pesado        | 70                    |
| Respiración normal                             | 10 | Fábrica               | 80                    |
| Rumor de hojas                                 | 20 | Camión pesado         | 90                    |
| Murmullo a 5 m                                 | 30 | Tren suburbano        | 100                   |
| Biblioteca                                     | 40 | Ruido de construcción | 110                   |
| Oficina tranquila                              | 50 | Concierto de rock     | 120 (umbral de dolor) |
| Conversación normal                            | 60 | Martillo neumático    | 130                   |



## ACTIVIDADES

2. 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

**Sol:** a)  $I_{100} = 10^{-8} \text{ W m}^{-2}$ ,  $I_{1000} = 10^{-10} \text{ W m}^{-2}$ ; b)  $\beta_{100} = 40 \text{ dB}$ ,  $\beta_{1000} = 20 \text{ dB}$ ;

c)  $x = 10^5 \text{ m}$

3. 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:

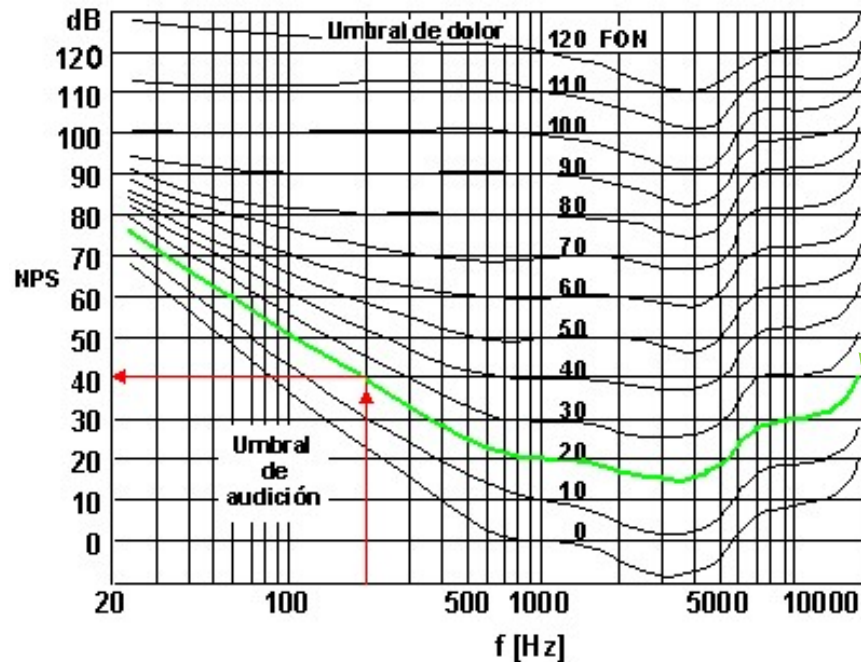
- a) Las distancias al foco desde donde se hacen las mediciones.
- b) La potencia sonora del foco emisor.

**Sol:** a)  $x = 11,11 \text{ m}$ ;  $x + 100 = 111,11 \text{ m}$ ; b)  $P = 1,55 \cdot 10^{11} \text{ W}$



### 3.2. Sensación sonora

- La sensación sonora es un **factor subjetivo** que involucra procesos fisiológicos y psicológicos que tienen lugar en el oído y en el cerebro.
- Los ruidos se pueden clasificar en **débiles, fuertes, desagradables**, etc.
- La sensación no solo depende de la intensidad, sino también de la frecuencia.



A lo largo de la curva, sonidos de diferente frecuencia son percibidos de igual manera

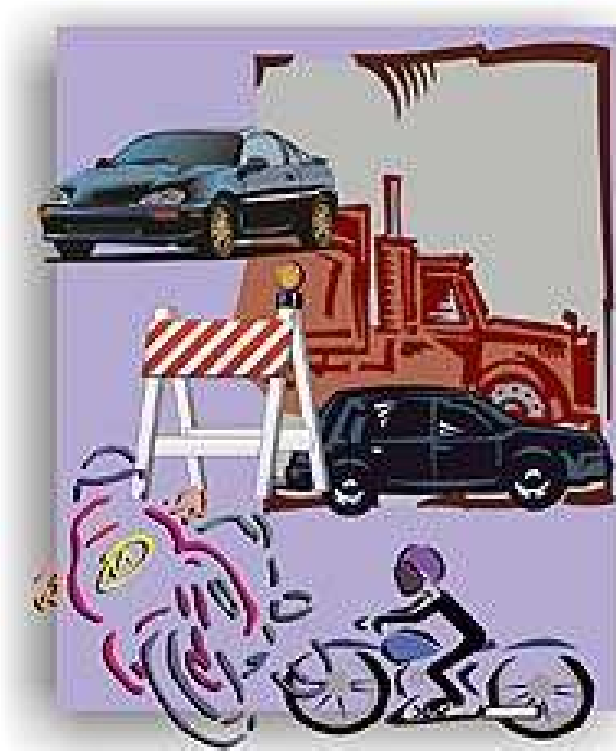
- El oído es mucho más sensible a medias y altas frecuencias que a bajas frecuencias.
- A niveles bajos de intensidad, el oído es más sensible a bajas frecuencias.
- A niveles altos de intensidad, el oído tiende a responder de una manera más homogénea en todo el rango de frecuencias.



### 3.3. Contaminación acústica y calidad de vida

Definimos la **contaminación acústica** como sonidos y vibraciones nocivos o no deseados, generados por la actividad humana.

#### ► Fuentes de contaminación acústica:



- Automóviles
- Motocicletas
- La cultura del ocio
- Aviones
- Ferrocarril
- Obras en la vía pública
- Otras fuentes



### 3.3. Contaminación acústica y calidad de vida

☞ Fuentes de contaminación acústica:

|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| ➤ Vehículos a motor                               | 80% |
| ➤ Industrias:                                     | 10% |
| ➤ Ferrocarriles                                   | 6%  |
| ➤ Vecindad ( pubs, bares, locales públicos, etc.) | 4%  |

☞ Efectos del ruido sobre la salud:

- ❖ Trastornos del sueño
- ❖ Malestar y estrés
- ❖ Pérdida de atención
- ❖ Dificultad de comunicación
- ❖ Trastornos psicofísicos
- ❖ Pérdida de oído



### 3.3. Contaminación acústica y calidad de vida

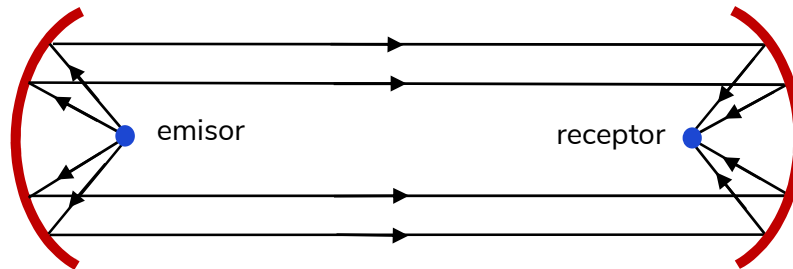
#### ► Medidas contra la contaminación acústica



| Fuente                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Transmisión                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Receptor                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Reducir o eliminar la intensidad del sonido</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Sistemas amortiguadores del ruido</li> <li>☞ Disminuir la rugosidad en tuberías</li> <li>☞ Disminuir tiempo de funcionamiento al mínimo</li> </ul> </li> <li>• <b>Reducir la frecuencia para minimizar efectos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>☞ En ventiladores, menos aspas y menor frecuencia de giro</li> </ul> </li> <li>• <b>Directividad de la fuente</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Dirigir la fuente en otra dirección</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Separar la fuente del receptor</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>☞ La intensidad <math>1/r</math></li> <li>☞ Se produce amortiguación del ruido debido a la disipación</li> </ul> </li> <li>• <b>Aislamiento sonoro de la fuente</b></li> <li>• <b>Barreras de ruido</b></li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Sistemas de protección individual</b></li> <li>• <b>Disminución del tiempo de exposición</b></li> </ul> |



### 4.1. La reflexión del sonido

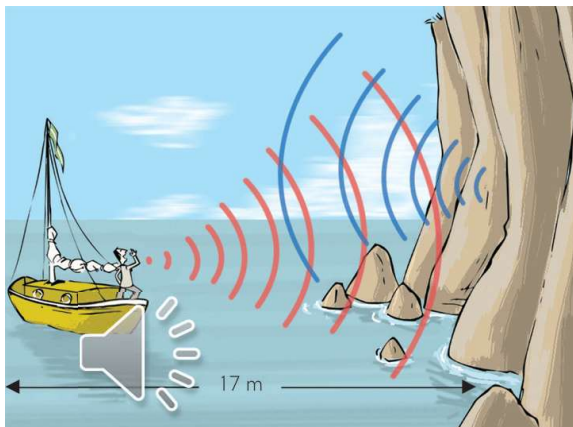


Con las antenas parabólicas el sonido se dirige en una misma dirección, evitando la amortiguación con la distancia

#### ■ Eco

El oído humano distingue entre dos sonidos que lleguen con 0,1 s de diferencia.

$$d = 340 \text{ m/s} \cdot 0,1 \text{ s} = 34 \text{ m}$$



#### ■ Reverberación

Si el tiempo es menor de 0,1 s no se produce eco, sino reverberación





## ACTIVIDADES

4. Una persona situada entre dos montañas oye ecos al cabo de 3,2 s y 5 s.

a) ¿A qué distancia se encuentran ambas montañas?

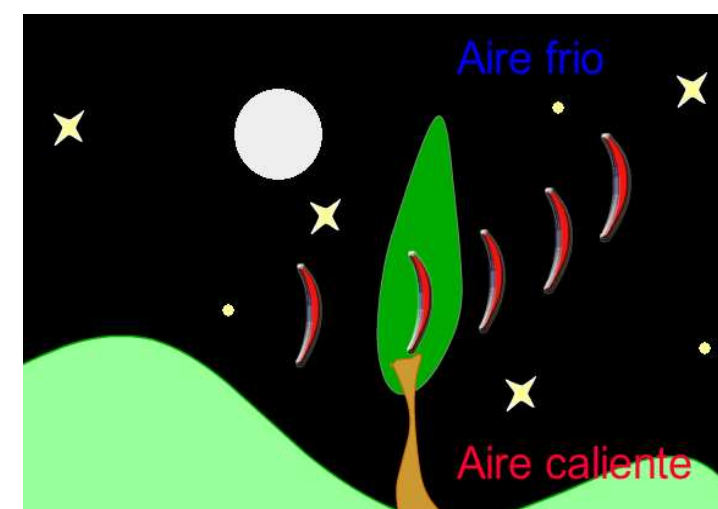
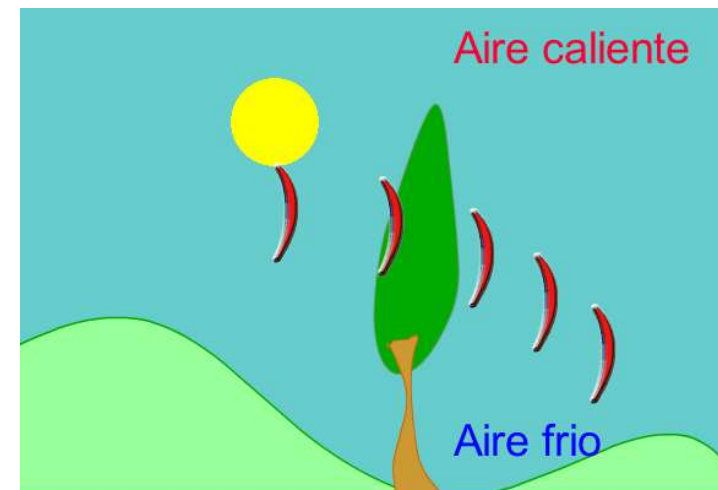
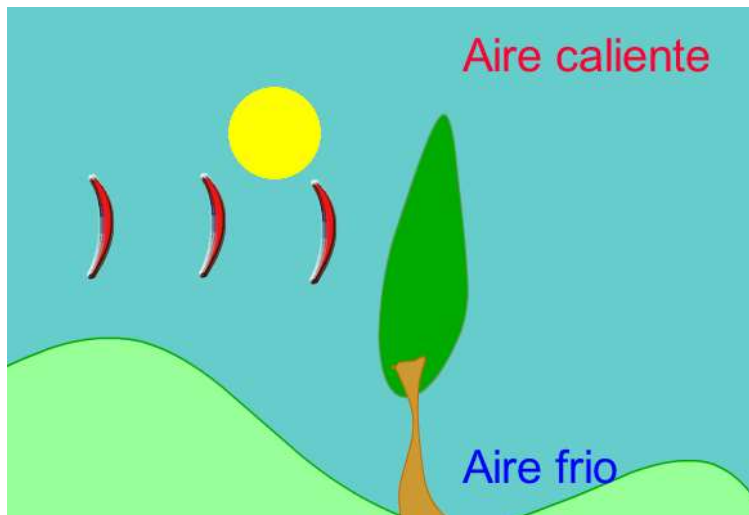
b) ¿Cuándo se oirá el tercer eco? ¿Y en cuarto? ¿Y el quinto?

Dato: velocidad del sonido = 340 m/s

**Sol:** a)  $d = 1\,394\text{ m}$ ; b)  $t_3 = 8,2\text{ s}$ ;  $t_4 = 8,2\text{ s}$ ;  $t_5 = 11,4\text{ s}$ .



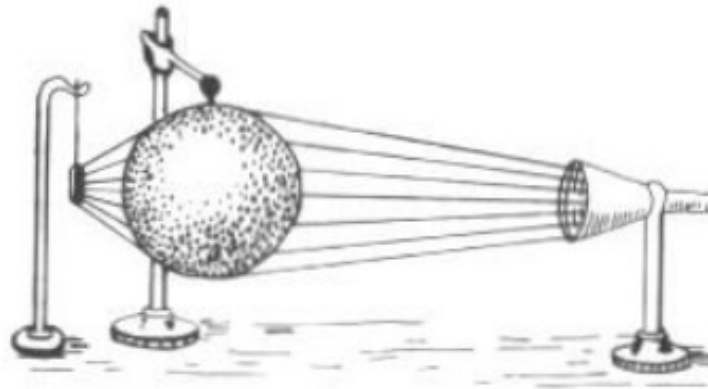
## 4.2. La refracción del sonido



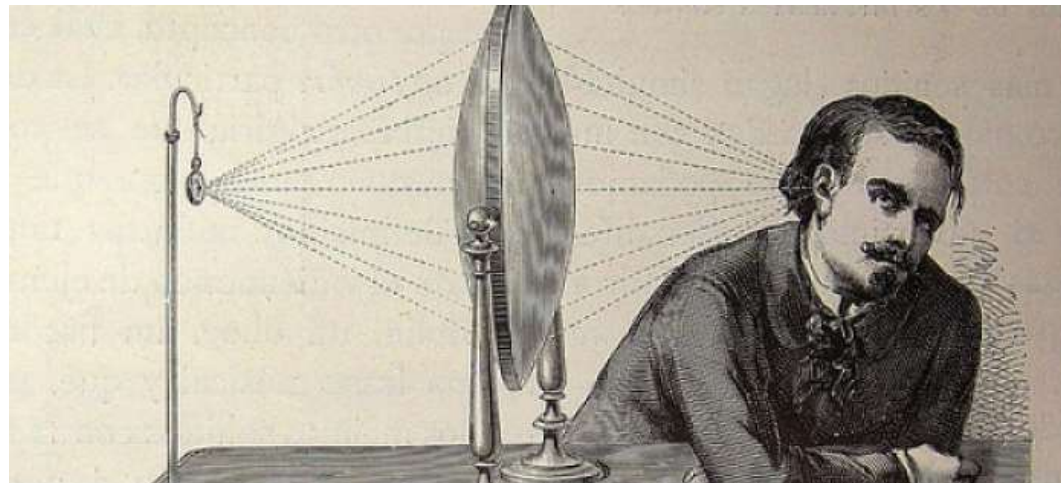


## 4.2. La refracción del sonido

### ► Lentes acústicas



Lente «acústica» ideada por J. Tyndall





### 4.3. La difracción del sonido

- ➡ Para que exista difracción debe ocurrir que el tamaño del obstáculo sea del orden de la longitud de onda.
- ➡ El espectro audible se encuentra entre 20 y 20.000 Hz y la velocidad del sonido es de unos 340 m/s.
- ➡ El tamaño del obstáculo debe ser del orden:

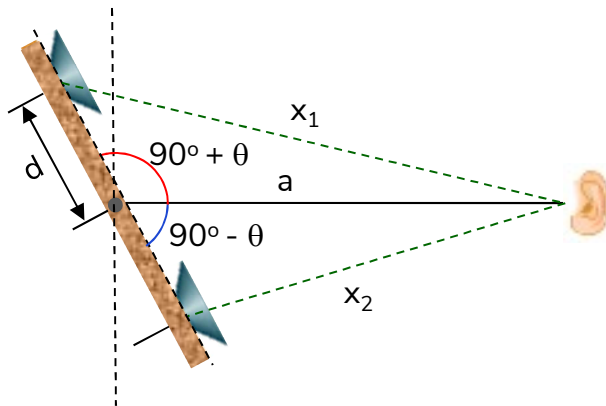
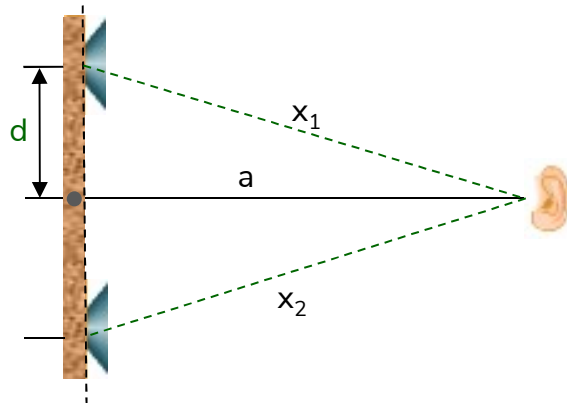
$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340 \text{ m/s}}{20 \text{ Hz}} = 17 \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340 \text{ m/s}}{20\,000 \text{ Hz}} = 0,017 \text{ m}$$





## 4.4. Interferencias sonoras



- ➡ Dos altavoces conectados a un mismo generador por lo que **vibran en fase** y envían ondas al aire ondas idénticas.
- ➡ Pueden girar en torno a un eje vertical que pasa por su centro.
- ➡ La distancia entre los altavoces es lo suficientemente pequeña para considerar que las amplitudes de las dos ondas sean iguales en un punto alejado.
- ➡ Al hacerlos girar se irán obteniendo interferencias **constructivas** y **destructivas** determinadas por la diferencia de caminos.
- ➡ La condición de máximo viene dada por:

$$x_1 - x_2 = n\lambda \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

El primer máximo es para  $n=1$ :  $x_1 - x_2 = \lambda$

$$x_1^2 = d^2 + a^2 - 2da \cos(90^\circ + \theta)$$

$$x_2^2 = d^2 + a^2 - 2da \cos(90^\circ - \theta)$$



## ACTIVIDADES

5. Dos altavoces que emiten la misma frecuencia están separados 1,4 m entre sí. A 3 m de la perpendicular trazada desde el punto medio entre los altavoces, se encuentra un micrófono. Se hace girar el conjunto y se percibe el primer máximo cuando el ángulo girado es de  $15^\circ$ . ¿A qué frecuencia emiten los altavoces?

Dato: velocidad de propagación del sonido = 340 m/s

**Sol:**  $f = 938,45 \text{ Hz}$

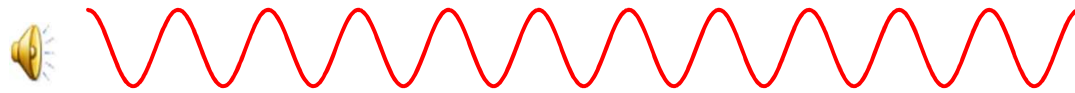


## 4.4. Interferencias sonoras

## ▶ Batidos o pulsaciones



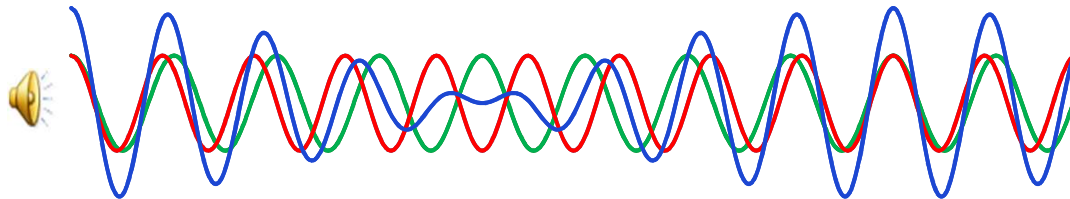
$$p_1 = p_m \text{sen} 2\pi f t$$



$$p_2 = p_m \text{sen} 2\pi f' t$$

$$p = \left( 2p_m \cos 2\pi \frac{f - f'}{2} t \right) \text{sen} 2\pi \frac{f + f'}{2} t$$

El sonido será máximo cuando:



$$\cos 2\pi \frac{\Delta f}{2} t = \pm 1$$

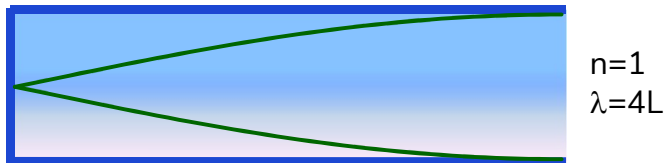
$\Delta f$  es la **frecuencia de pulsación**



### 5.1. Ondas sonoras estacionarias en un tubo abierto por uno de los extremos

- En la **parte cerrada** las moléculas de aire no oscilar por lo que se produce un **nodo de desplazamiento** pero la presión es máxima.
- En la **parte abierta** las moléculas de aire pueden oscilar por lo que se produce un **vientre de desplazamiento** pero la presión es mínima.

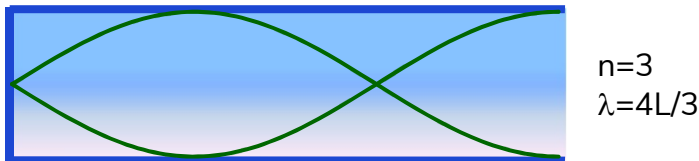
- La distancia entre un vientre y un nodo es  $\lambda/4$ , la longitud  $L$  del tubo debe ser:



$$L = \frac{\lambda}{4}, 3\frac{\lambda}{4}, 5\frac{\lambda}{4} \dots$$

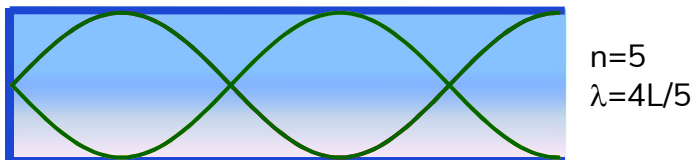
En general:

$$L = (2n + 1) \frac{\lambda}{4} \quad n = 0, 1, 2, \dots$$



Las longitudes de onda estacionarias que pueden formarse:

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



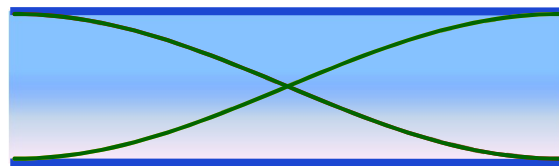
Y las frecuencias ( $v=\lambda f$ ) o **armónicos permitidos**:

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

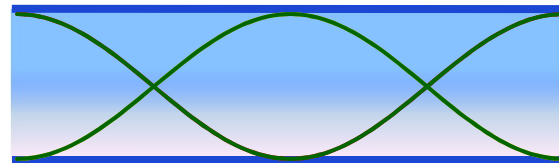


### 5.2. Ondas sonoras estacionarias en un tubo abierto por ambos extremos

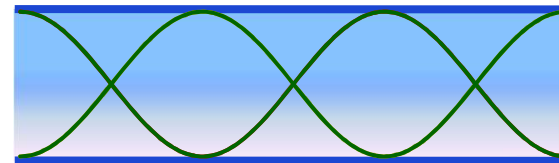
☞ En ambos extremos las moléculas de aire pueden oscilar por lo que se produce un **vientre de desplazamiento** pero la presión es mínima.



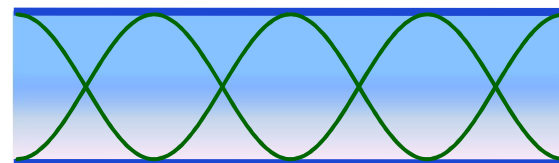
$n=1$   
 $\lambda=2L$



$n=2$   
 $\lambda=2L/2=L$



$n=3$   
 $\lambda=2L/3$



$n=4$   
 $\lambda=2L/4=L/2$

- La distancia entre dos vientres es  $\lambda/2$ , la longitud  $L$  del tubo debe ser:

$$L = \frac{\lambda}{2}, \lambda, 3\frac{\lambda}{2} \dots$$

En general:

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Las longitudes de onda estacionarias que pueden formarse:

$$\lambda = \frac{2L}{n} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Y las frecuencias ( $v=\lambda f$ ) o **armónicos permitidos**:

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



## ACTIVIDADES

6. 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.

**Sol:**  $f_1 = 42,5 \text{ Hz}$ ,  $f_2 = 127,5 \text{ Hz}$ ;  $f_3 = 212,5 \text{ Hz}$

7. Determina 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.

**Sol:**  $f_1 = 68 \text{ Hz}$ ,  $f_2 = 136 \text{ Hz}$ ;  $f_3 = 204 \text{ Hz}$



Se conoce como **efecto Doppler** al fenómeno debido al movimiento relativo de la fuente sonora y el observador por el que cambia la frecuencia que se percibe de un sonido.

### 6.1. Fuente sonora en movimiento y observador en reposo



Fuente sonora y observador en reposo  
relativo



Fuente sonora se acerca/aleja de  
observadores que se encuentran en  
reposo relativo



### 6.1. Fuente sonora en movimiento y observador en reposo

- ☞ Si  $\mathbf{v}_F$  es la velocidad del foco y  $\mathbf{v}$  es la velocidad del sonido, la velocidad aparente de propagación de las ondas será  $\mathbf{v} - \mathbf{v}_F$ , la longitud de onda y la frecuencia para el observador O serán:

$$\lambda' = (v - v_F)T = \frac{v - v_F}{f} \quad f' = \frac{v}{\lambda'} = f \left( \frac{v}{v - v_F} \right) \quad f' > f$$

- ☞ Para el observador O' la velocidad aparente de propagación de las ondas será  $\mathbf{v} + \mathbf{v}_F$ , la longitud de onda y la frecuencia serán:

$$\lambda' = (v + v_F)T = \frac{v + v_F}{f} \quad f' = \frac{v}{\lambda'} = f \left( \frac{v}{v + v_F} \right) \quad f' < f$$



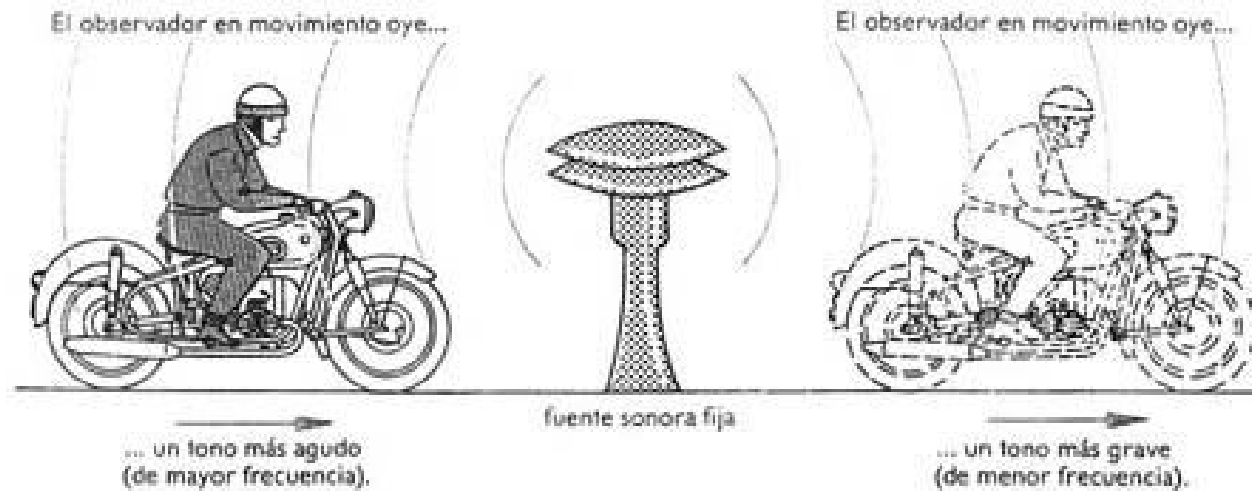
## ACTIVIDADES

8. 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.

**Sol:**  $f_{aproxima} = 634,4 \text{ Hz}$ ;  $f_{aleja} = 441,5 \text{ Hz}$



## 6.2. Fuente sonora en reposo y observador en movimiento



👉 Se acerca:

$$f' = \frac{v'}{\lambda} = \frac{v + v_0}{v/f} = f \left( \frac{v + v_0}{v} \right)$$

$$f' > f$$

👉 Se aleja:

$$f' = \frac{v'}{\lambda} = \frac{v - v_0}{v/f} = f \left( \frac{v - v_0}{v} \right)$$

$$f' < f$$



### 6.3. Fuente sonora y observador en movimiento

Combinando los casos anteriores:

☞ Se acercan:

$$f' = f \left( \frac{v + v_0}{v - v_F} \right)$$

☞ Se alejan:

$$f' = f \left( \frac{v - v_0}{v + v_F} \right)$$

#### ► Aplicaciones efecto Doppler

☞ **Sistemas de radar** aplicados al tráfico.

Midiendo las pulsaciones que se producen al interferir las ondas emitidas y reflejada.

☞ **Efecto Doppler cosmológico**

Midiendo el “corrimiento hacia el rojo” si el objeto se aleja o el “corrimiento hacia el azul” si el objeto se acerca.



## ACTIVIDADES

9. Una sirena emite un sonido a 500 Hz. Calcula la frecuencia que percibe un observador en los siguientes casos:
- a) El observador está en reposo y la sirena se aproxima a él a 30 m/s.
  - b) El observador se aleja a 10 m/s de la sirena, que está en reposo.
  - c) El observador y la sirena se aproximan uno hacia el otro a 10 m/s y 20 m/s respectivamente.

**Sol:** a)  $f = 548,39 \text{ Hz}$ ; b)  $f = 485,29 \text{ Hz}$ ; c)  $f = 546,88 \text{ Hz}$



### 6.4. Romper la barrera del sonido

Si  $v_F$  es igual a la velocidad de propagación  $v$  del sonido, los frentes de onda constituyen una barrera que opone una gran resistencia a ser atravesada.

•



Si  $v_F$  es superior a la velocidad de propagación  $v$  del sonido, los frentes de onda aparecerán superpuestos y formarán un frente de onda cónico conocido como **onda de choque** u **onda de Mach**. La relación entre la velocidad de la fuente y la del sonido se conoce como **número de Mach** ( $v_F/v$ )



# Información de Contacto

 Rafael Artacho Cañadas

 Granada

 artacho1955@gmail.com