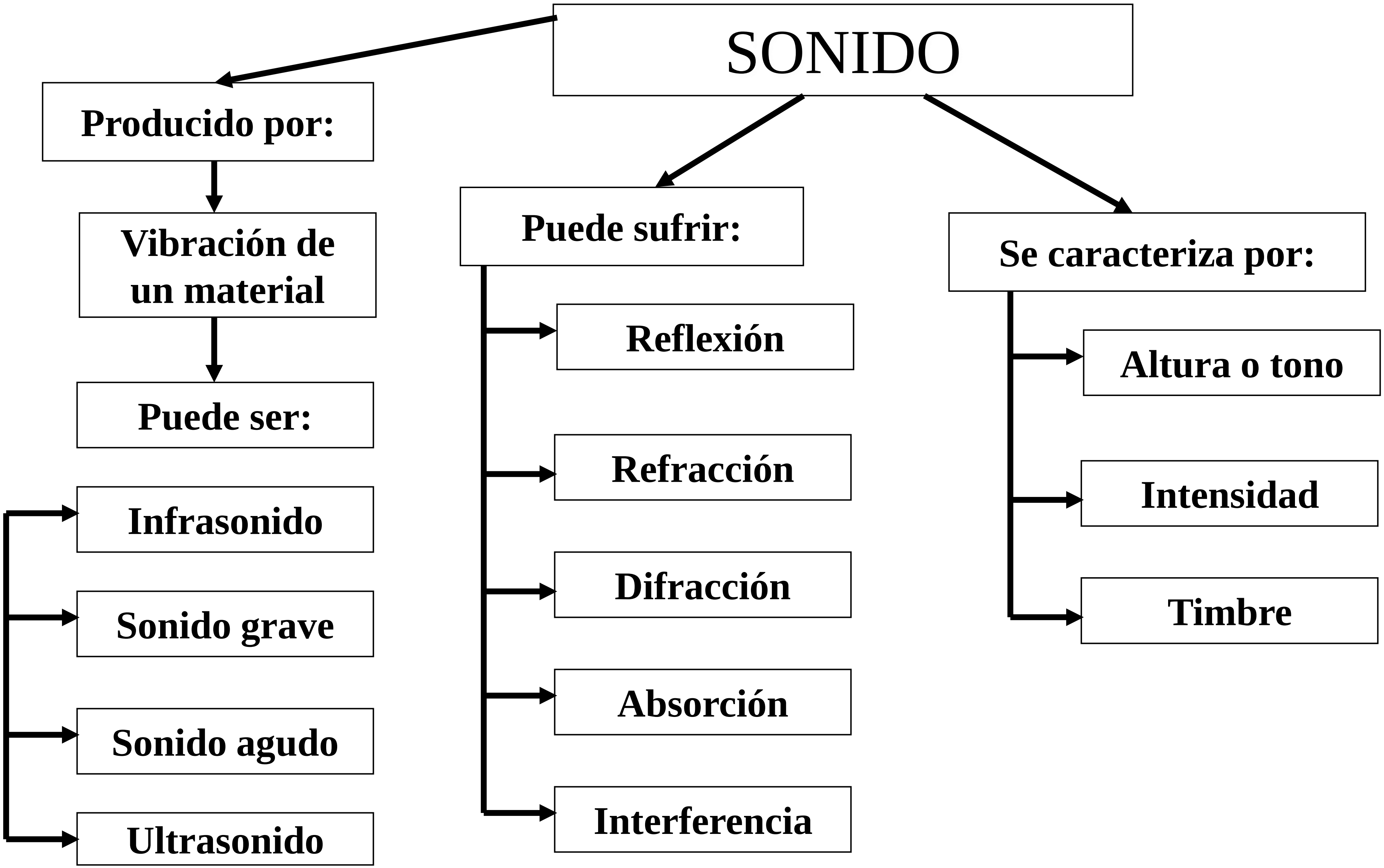
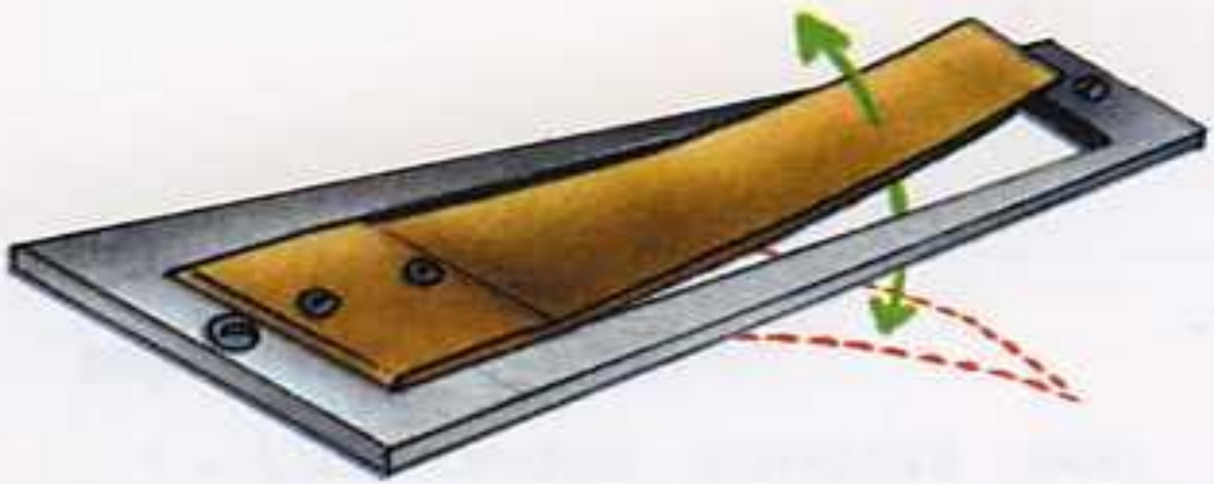
SÍNTESIS DE LA CLASE



EL SONIDO

El sonido se produce por la **vibración** de un medio elástico, que puede ser gaseoso, líquido o sólido.



▲ Lengüeta de vibración de una armónica. La vibración de una pequeña placa produce sonidos agradables.

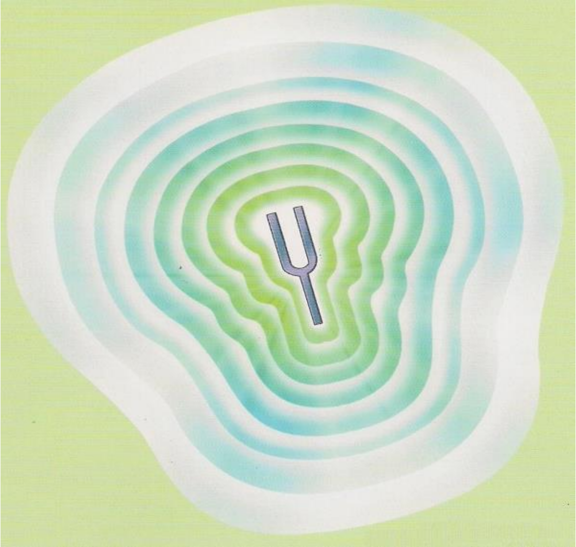
Definición

Desde un punto de vista ***SUBJETIVO***

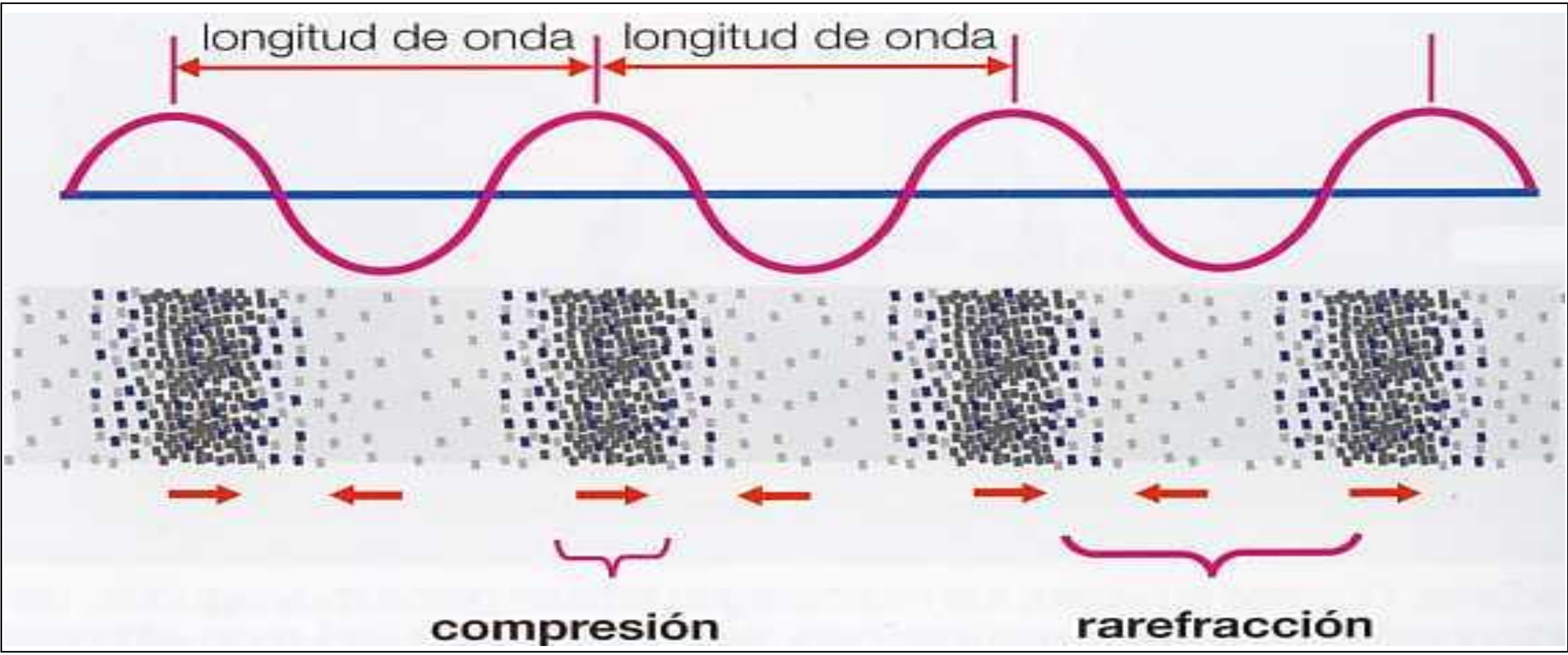
- Es la sensación producida en el cerebro de un observador en estado consiente al ser estimuladas las terminaciones de su nervio auditivo.

Desde el punto de vista ***OBJETIVO***

- Son las *ondas* producidas por compresión del aire capaces de producir una sensación auditiva.

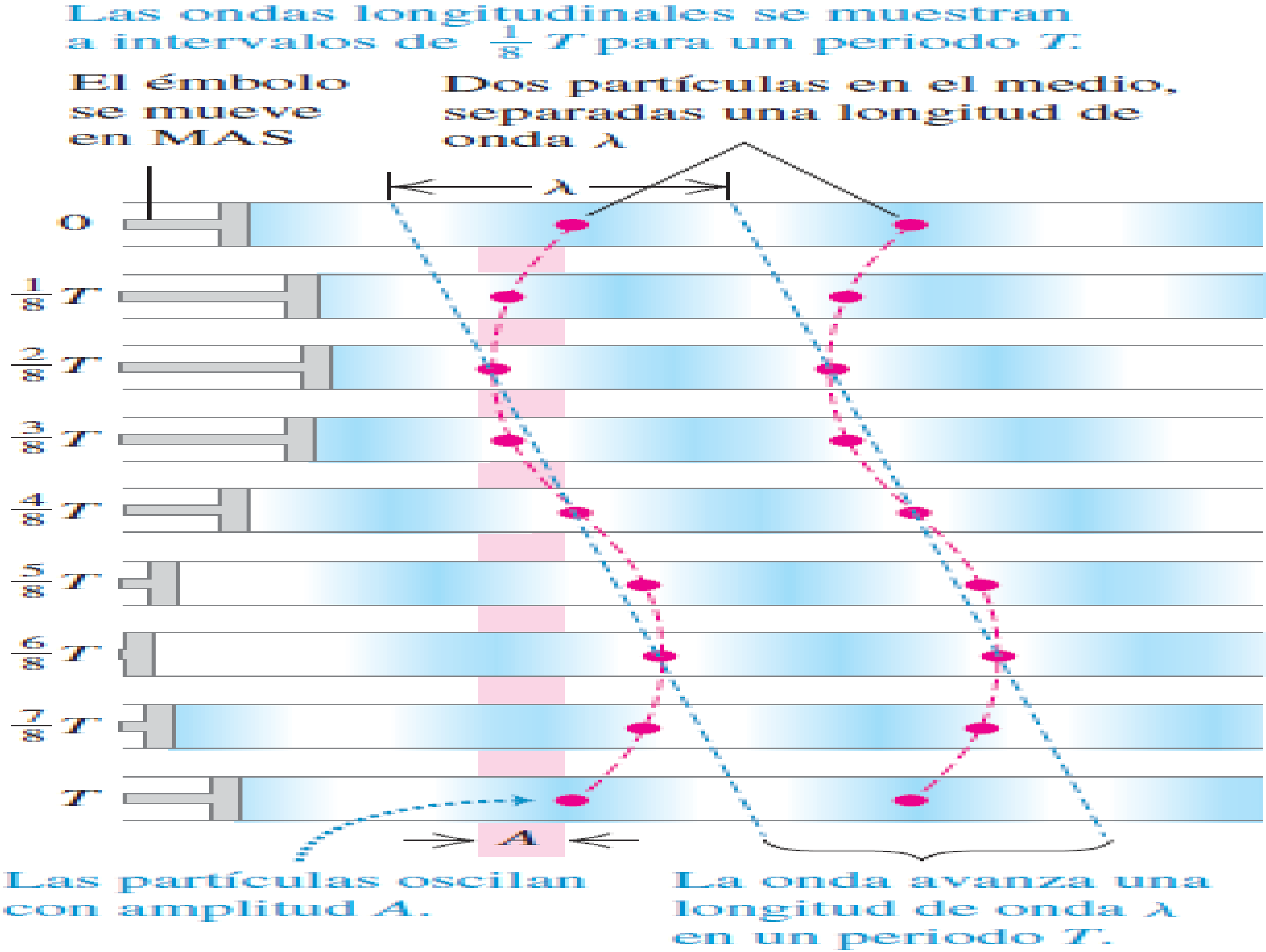


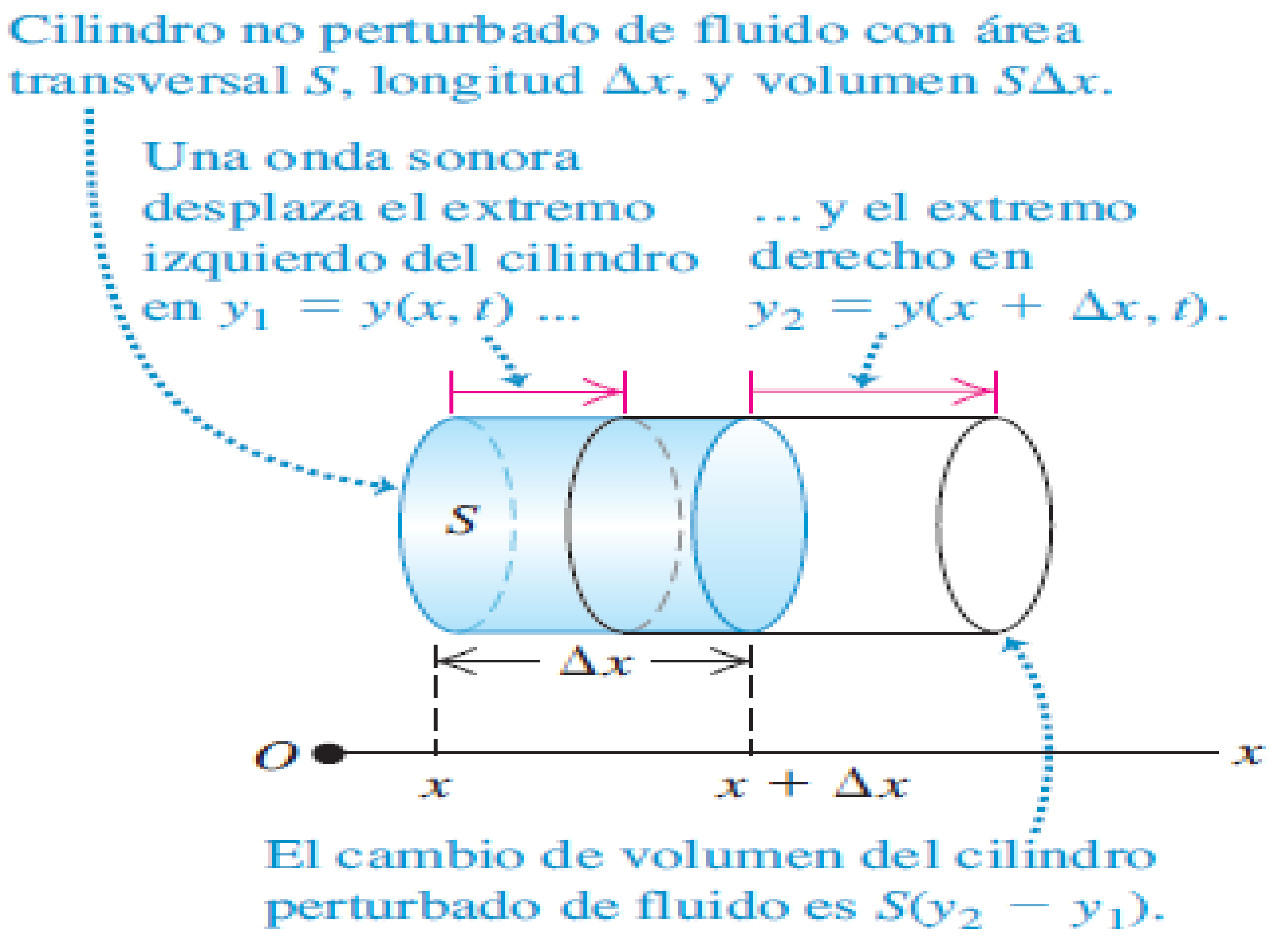
CARACTERÍSTICA DEL SONIDO



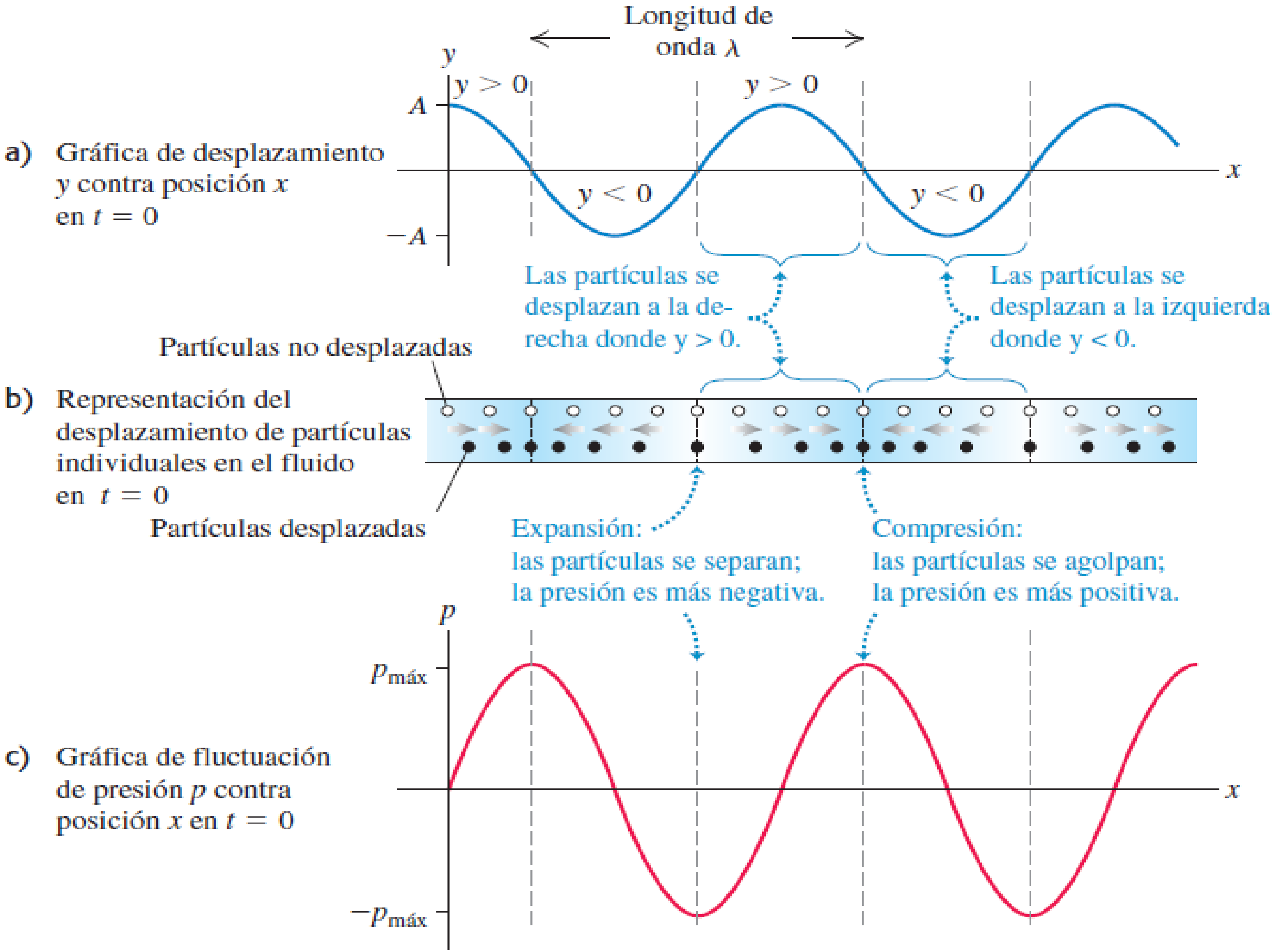
Cualquiera sea la frecuencia que tenga un sonido, se **caracteriza por ser una onda de tipo:**

1) **Mecánica.**
2) **Longitudinal.**
3) El medio que vibra lo hace por **Variaciones de Presión**.


Las ondas longitudinales se muestran a intervalos de $\frac{1}{8}T$ para un periodo T.
El émbolo se mueve en MAS
Dos partículas en el medio, separadas una longitud de onda λ
λ
0
$\frac{1}{8}T$
$\frac{2}{8}T$
$\frac{3}{8}T$
$\frac{4}{8}T$
$\frac{5}{8}T$
$\frac{6}{8}T$
$\frac{7}{8}T$
T
A
Las partículas oscilan con amplitud A.
La onda avanza una longitud de onda λ en un periodo T.



Cilindro no perturbado de fluido con área transversal S, longitud Δx, y volumen $S\Delta x$.
Una onda sonora desplaza el extremo izquierdo del cilindro en $y_1 = y(x, t)$ ...
... y el extremo derecho en $y_2 = y(x + \Delta x, t)$.
S
Δx
O
x
$x + \Delta x$
x
El cambio de volumen del cilindro perturbado de fluido es $S(y_2 - y_1)$.


Longitud de onda λ
y
y > 0
A
−A
x
y < 0
a) Gráfica de desplazamiento y contra posición x en t = 0
Las partículas se desplazan a la derecha donde y > 0.
Las partículas se desplazan a la izquierda donde y < 0.
Partículas no desplazadas
b) Representación del desplazamiento de partículas individuales en el fluido en t = 0
Partículas desplazadas
Expansión: las partículas se separan; la presión es más negativa.
Compresión: las partículas se agolpan; la presión es más positiva.
p
pmáx
−pmáx
c) Gráfica de fluctuación de presión p contra posición x en t = 0

$$\Delta V = S(y_2 - y_1) = S[y(x+\Delta x, t) - y(x,t)]$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \lim_{\Delta x \to 0}\left\{\frac{S\,[y(x+\Delta x, t) - y(x,t)]}{S\,\Delta x}\right\} = \frac{\partial y(x,t)}{\partial x}$$

Pero:

$$B = -\frac{p(x,t)}{dV/V}$$

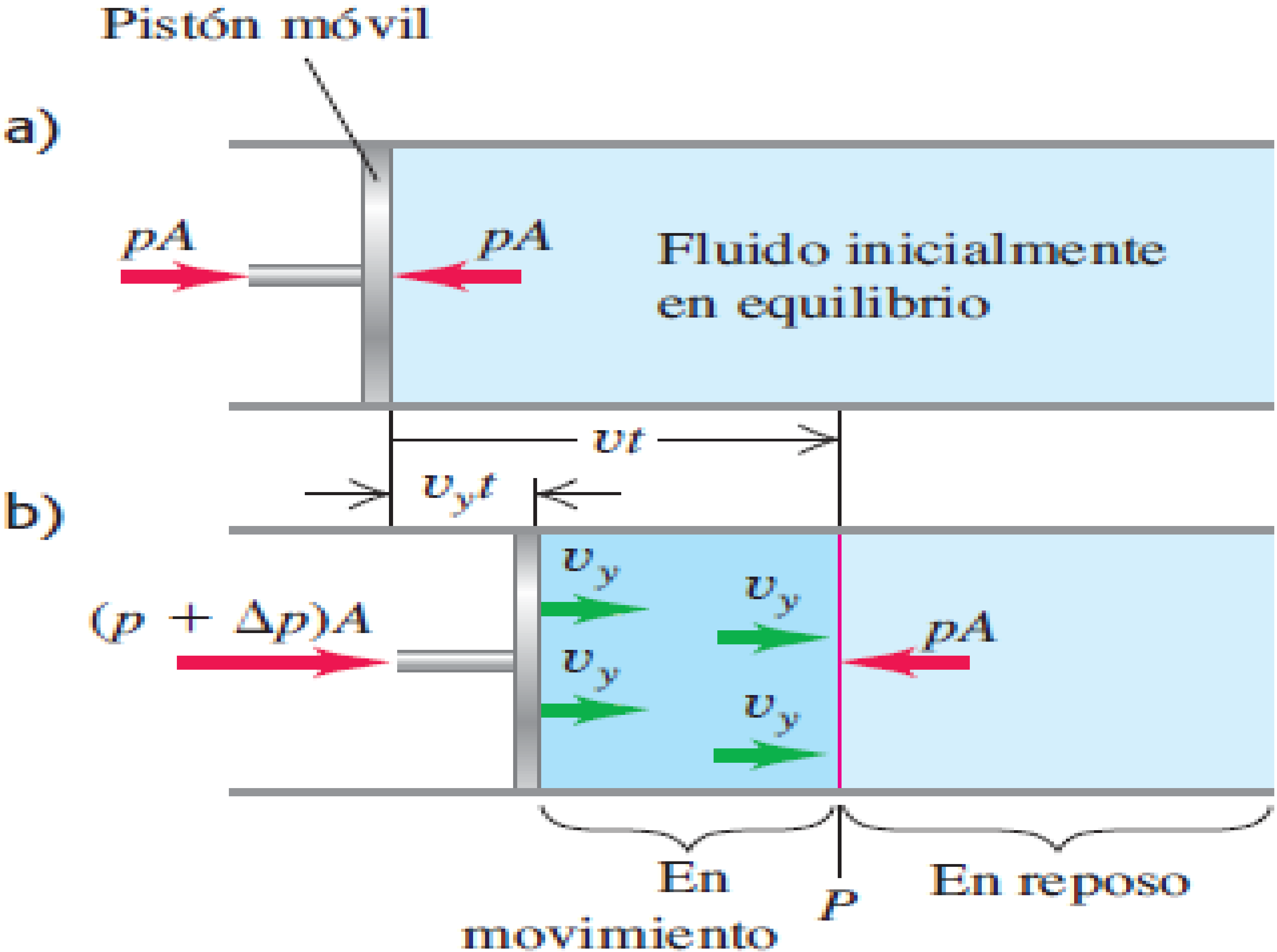
Despejando:

$$p(x,t) = -B\,\frac{\partial y(x,t)}{\partial x}$$

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

Entonces:

$$p(x,t) = B\,k\,A\,sen(kx - \omega t) \rightarrow P_{max} = B\,k\,A$$


Pistón móvil
a)
pA
pA
Fluido inicialmente en equilibrio
vt
$v_y t$
b)
v_y
v_y
v_y
v_y
$(p + \Delta p)A$
pA
En movimiento
P
En reposo

Rapidez del sonido en un FLUIDO

$$v = \sqrt{\frac{\text{Fuerza de restitución que vuelve el sistema al equilibrio}}{\text{Inercia que se opone al retorno al equilibrio}}}$$

$$momento\ lineal\ longitudinal = (\rho v t A) v_y$$

$$B = -\frac{variación\ de\ presión}{variación\ de\ volumen} = -\frac{-\Delta p}{Atv_y / Avt} \rightarrow \Delta p = B\,\frac{v_y}{v}$$

$$impulso\ lineal\ longitudinal = \Delta p\ tA = B\,\frac{v_y}{v}\,tA$$

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

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

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

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

Rapidez del sonido en diferentes medios

Medio	v (m/s)	Medio	v (m/s)	Medio	v (m/s)
Gases		**Líquidos a 25°C**		**Sólidos**[a]	
Hidrógeno (0°C)	1 286	Glicerol	1 904	Vidrio Pyrex	5 640
Helio (0°C)	972	Agua de mar	1 533	Hierro	5 950
Aire (20°C)	343	Agua	1 493	Aluminio	6 420
Aire (0°C)	331	Mercurio	1 450	Latón	4 700
Oxígeno (0°C)	317	Queroseno	1 324	Cobre	5 010
		Alcohol metílico	1 143	Oro	3 240
		Tetracloruro de carbono	926	Lucita	2 680
				Plomo	1 960
				Caucho	1 600

[a] Los valores conocidos son para propagación de ondas longitudinales en medios volumétricos. Las magnitudes de velocidad para ondas longitudinales en barras delgadas son menores, y las magnitudes de velocidad de ondas transversales en volumen son aún más pequeñas.

Rapidez del sonido en GASES

Donde: p_0 Presión de equilibrio del gas.
γ Razón de capacidad calorífica.

$$B = \gamma p_0$$

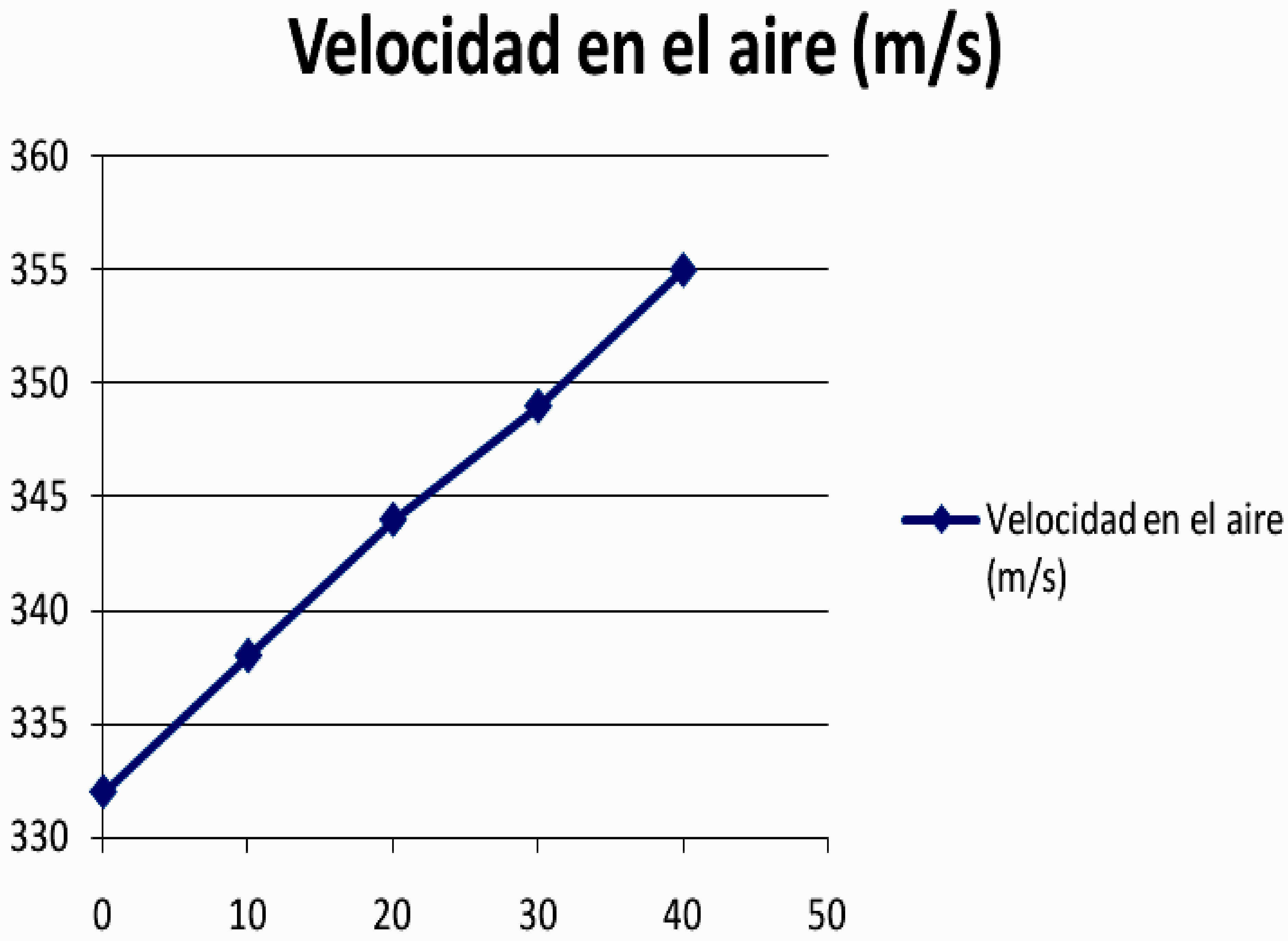
$p_0 = 1{,}01\ 10^5$ Pa. Presión atmosférica normal.
$\gamma = 1.4$

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

El sonido viaja en el **aire** a: $v = 331{,}3 + 0{,}608\ t$

Donde: *t*: temperatura del aire en [°C].
v: velocidad de la onda de sonido en [m/s].

En particular, a 20 ºC y 101 KPa, resulta: $c = 344\ m/seg$.

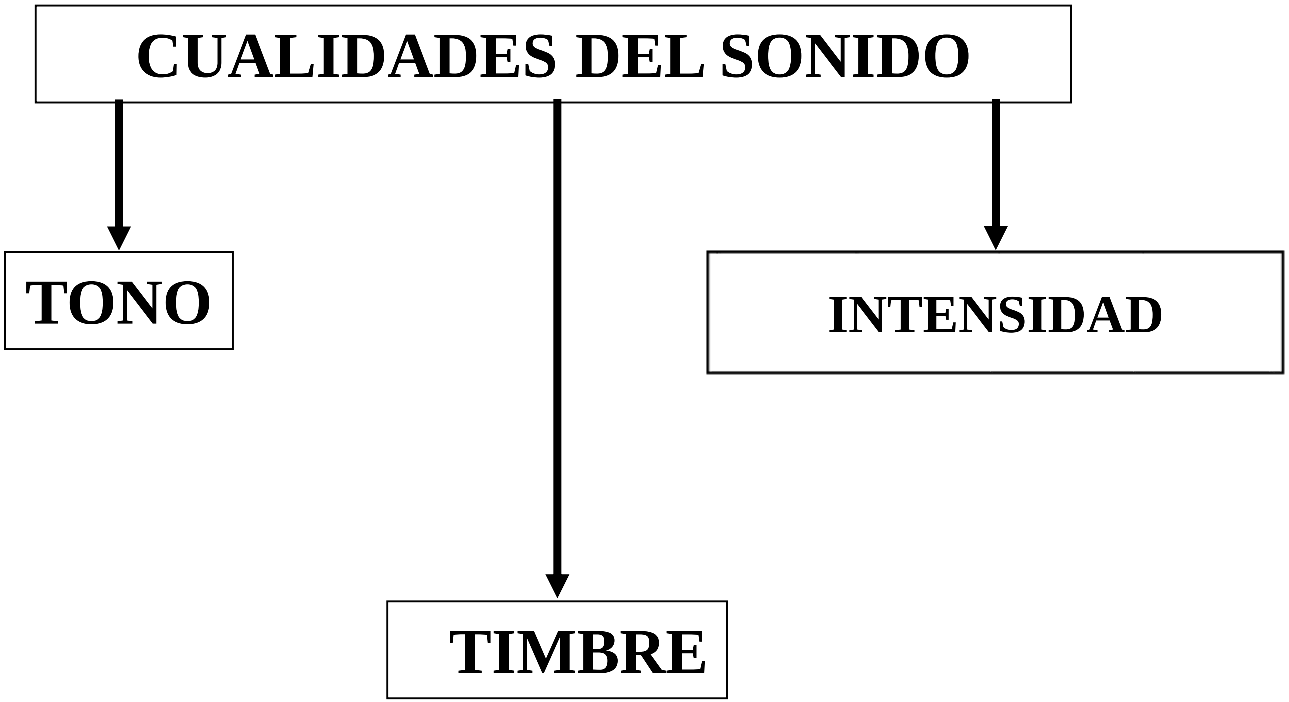

Velocidad en el aire (m/s)
360
355
350
345
340
335
330
0
10
20
30
40
50
Velocidad en el aire (m/s)

TRANSMISIÓN DEL SONIDO

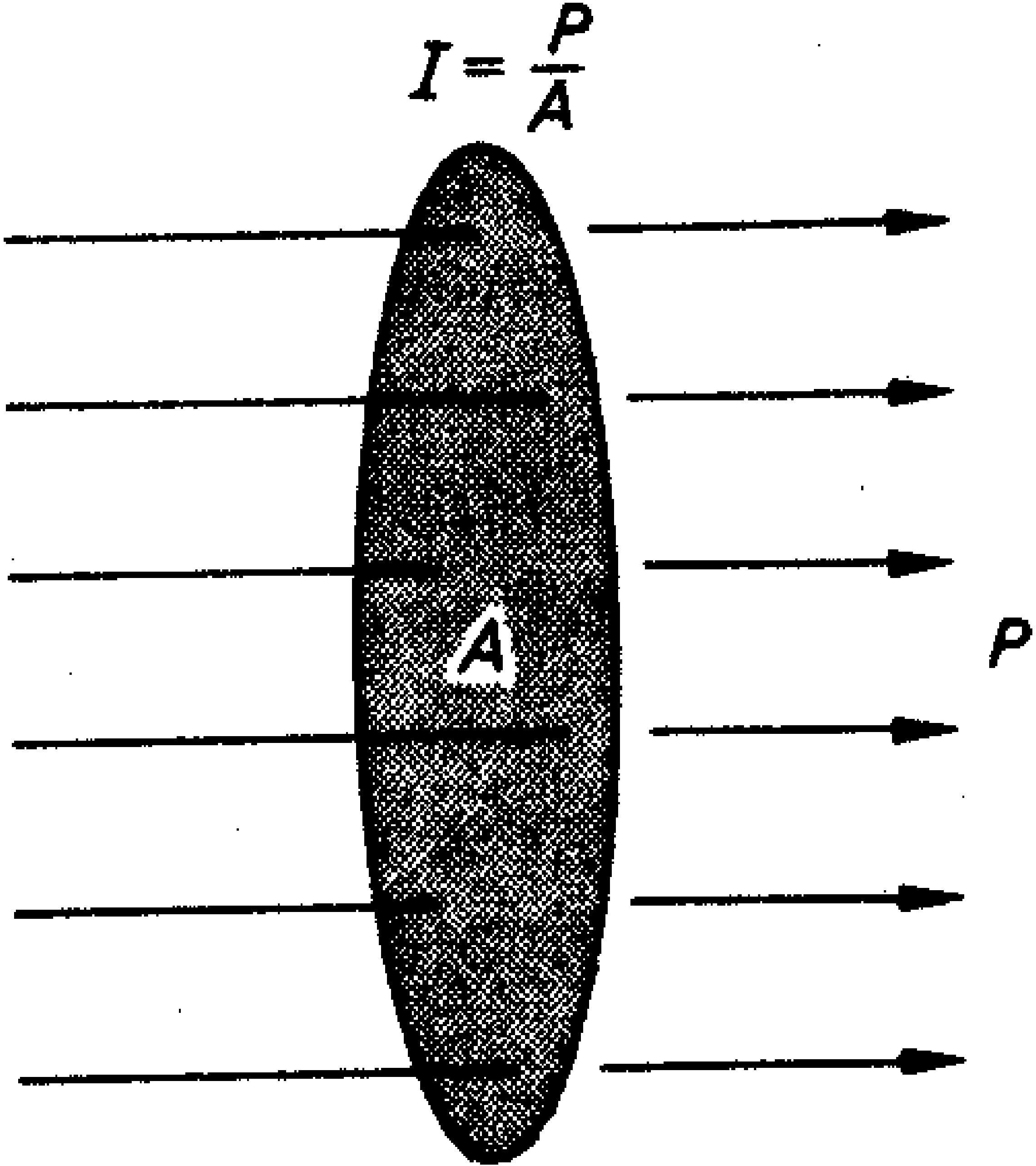
- **La velocidad con que se transmite el sonido depende**, principalmente, de la **elasticidad del medio**, es decir, de su capacidad para recuperar su forma inicial.

  Otros factores que influyen son la **temperatura** y la **densidad**.

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


CUALIDADES DEL SONIDO
TONO
INTENSIDAD
TIMBRE

Intensidad



Desde el punto de vista de la Física lo que se propaga en una onda es **ENERGÍA.**

La ***INTENSIDAD*** de una onda que se propaga se define como la cantidad media de energía transportada por unidad de superficie y por unidad de tiempo.

Intensidad del sonido

Intensidad y amplitud de desplazamiento

$$v_y(x,t) = \frac{\partial y(x,t)}{\partial x} = \omega\, A\, sen(kx - \omega t)$$

$$p(x,t)v_y(x,t) = [B\; k\; A\, sen(kx - \omega t)][\,A\; \omega\; sen(kx - \omega t)]$$
$$= B\omega\; k\; A^2\; sen^2(kx - \omega t)$$

La intensidad es, por definición, el valor promedio del producto $p(x,t)\, v_y(x,t)$

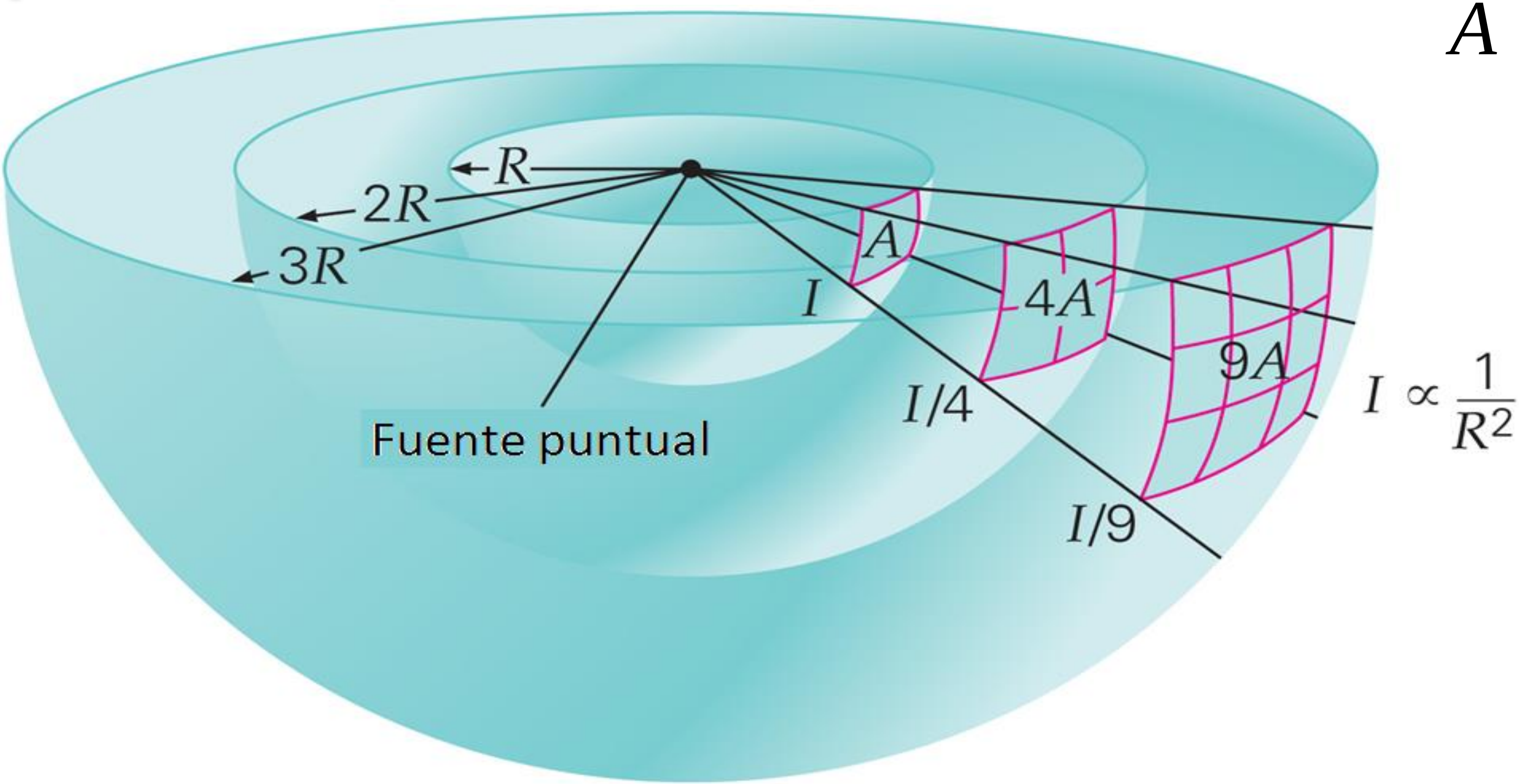
$$I = \frac{1}{2} B\omega k A^2 = \frac{1}{2}\sqrt{\rho B}\,\omega^2 A^2$$

Intensidad y amplitud de presión

$$I = \frac{\omega(Pmax)^2}{2Bk} = \frac{v(Pmax)^2}{2B} = \frac{(Pmax)^2}{2\rho v} = \frac{(Pmax)^2}{2\sqrt{\rho B}}$$

Se define como la potencia por unidad de área que es recibida por el observador (es medida en $W.m^{-2}$).

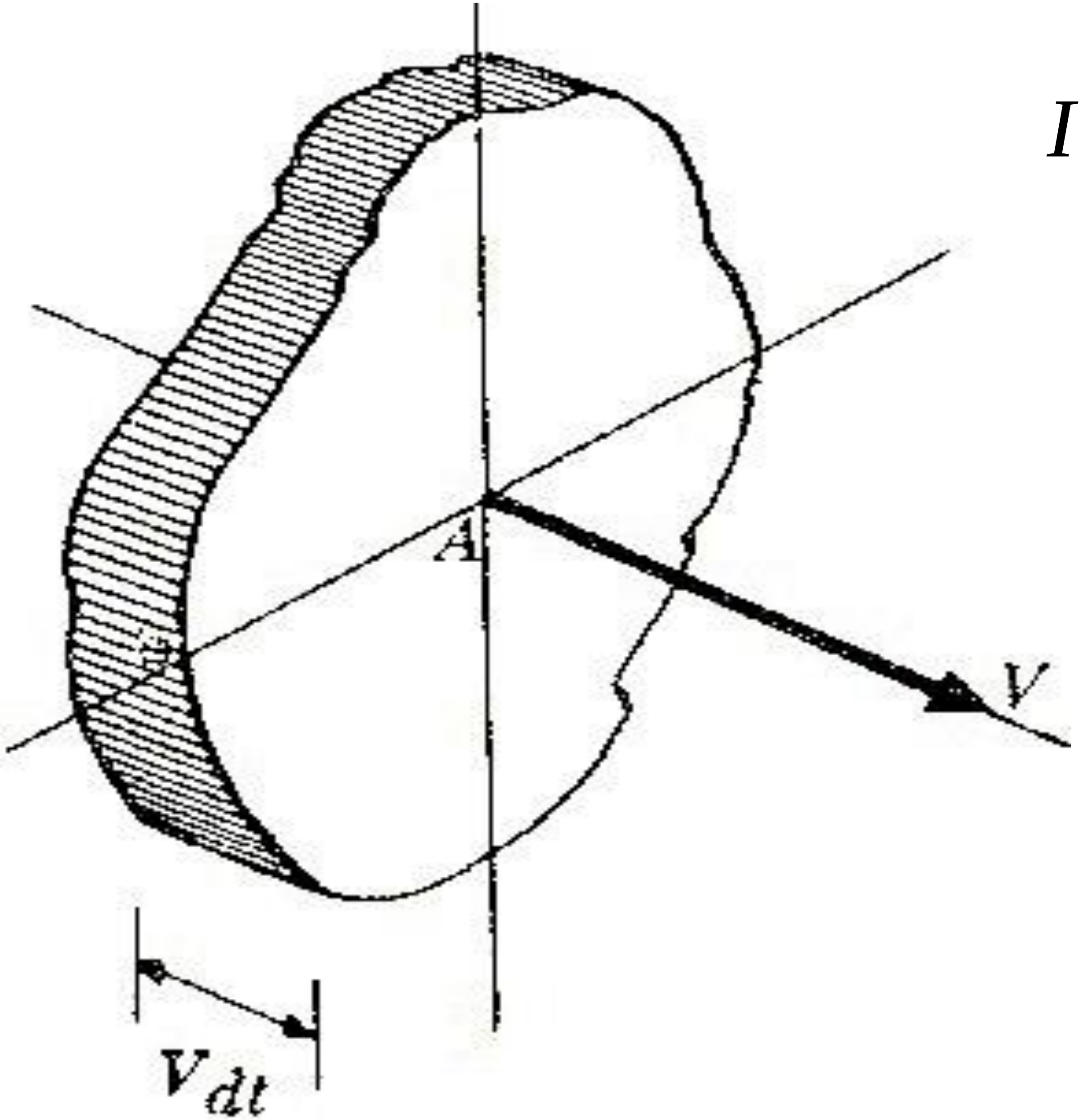
$$I = \frac{P}{A}$$



La intensidad de una onda es proporcional al cuadrado de su amplitud del cuadrado de la frecuencia.

$$I \propto A^2 f^2$$

Intensidad



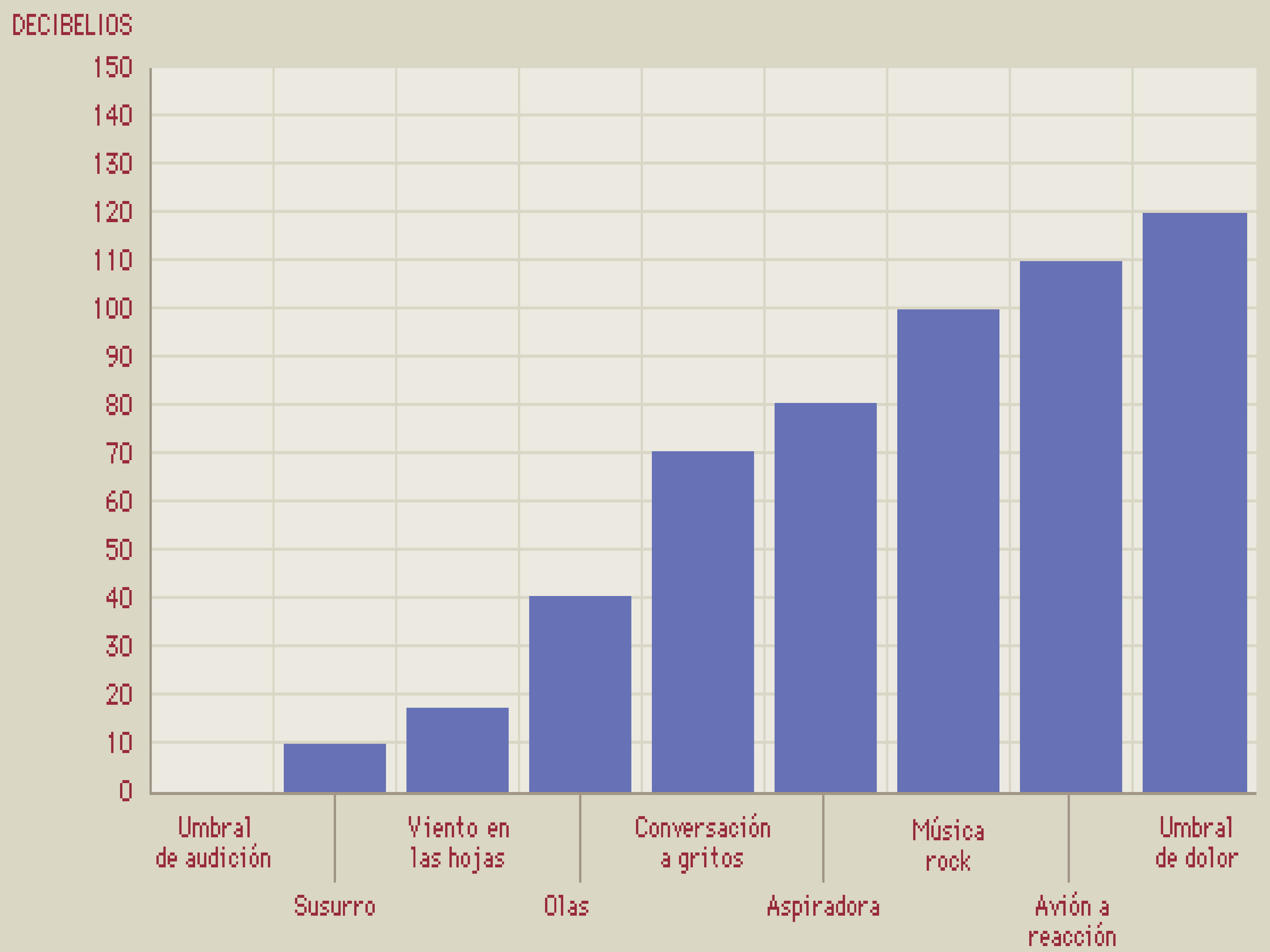
$$I = \frac{p^2{}_{\max}}{2\rho v} = \frac{p^2{}_{\max}}{2\sqrt{\rho B}}$$

La intensidad de una onda sonora cuya amplitud corresponde al sonido más fuerte que puede tolerarse es de aproximadamente **1 W/m²**.

La escala de decibeles

$$\beta = (10\ dB)\log\left(\frac{I}{I_0}\right) \rightarrow I_0 = 10^{-12}\left[\frac{W}{m^2}\right]$$

Fuente o descripción del sonido	Nivel de intensidad del sonido, β (dB)	Intensidad, I ($\mathrm{W/m^2}$)
Avión militar a reacción a 30 m	140	10^2
Umbral del dolor	120	1
Remachador	95	3.2×10^{-3}
Tren elevado	90	10^{-3}
Tráfico urbano intenso	70	10^{-5}
Conversación ordinaria	65	3.2×10^{-6}
Automóvil silencioso	50	10^{-7}
Radio con volumen bajo en el hogar	40	10^{-8}
Murmullo normal	20	10^{-10}
Susurro de hojas	10	10^{-11}
Umbral del oído a 1000 Hz	0	10^{-12}


DECIBELIOS
150
140
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
Umbral de audición
Susurro
Viento en las hojas
Olas
Conversación a gritos
Aspiradora
Música rock
Avión a reacción
Umbral de dolor

TIPOS DE SONIDO

Los sonidos que son audibles para el ser humano son aquellos cuya frecuencia está entre **20 Hz** y **20 KHz**.

TRANSMISIÓN DEL SONIDO EN UNA CUERDA VIBRANTE

La velocidad del sonido en una cuerda vibrante depende de la tensión de la cuerda (T) y de la masa por unidad de longitud o densidad lineal (μ).

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \ [{}^{m}/{}_{s}]$$

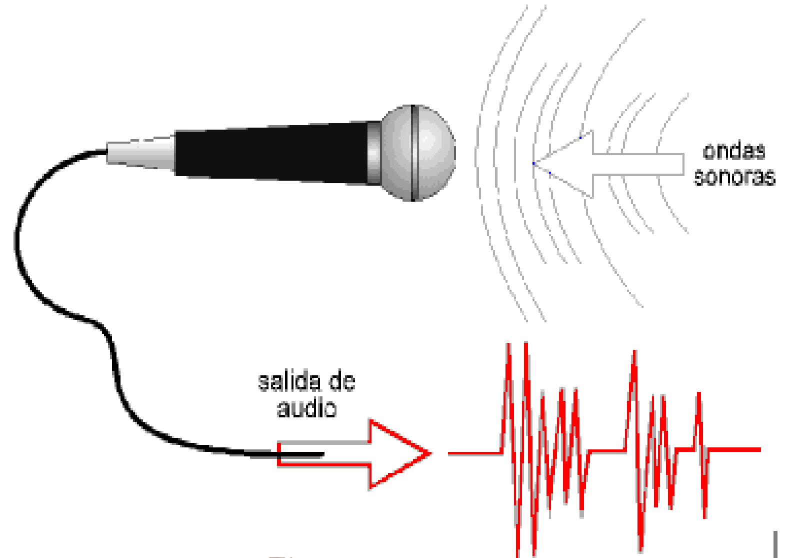
Por ejemplo, el sonido que produce una cuerda de guitarra.

INTENSIDAD (VOLUMEN)

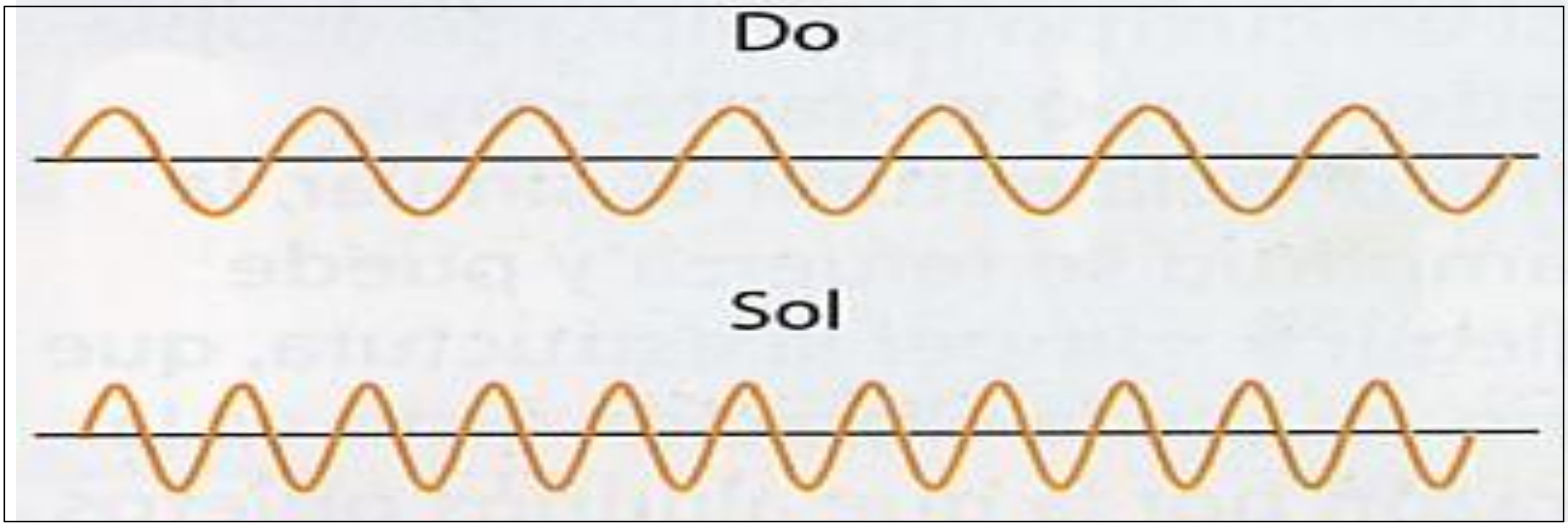
La intensidad de la onda sonora es una cantidad física que se define como la **energía sonora que transporta una onda** por unidad de tiempo a través de una unidad de área.

La intensidad es **directamente proporcional a la amplitud** de la onda e **inversamente proporcional a la distancia** entre el emisor y el receptor.

La unidad para medir la intensidad se llama **decibel (dB)**.



TONO (ALTURA)

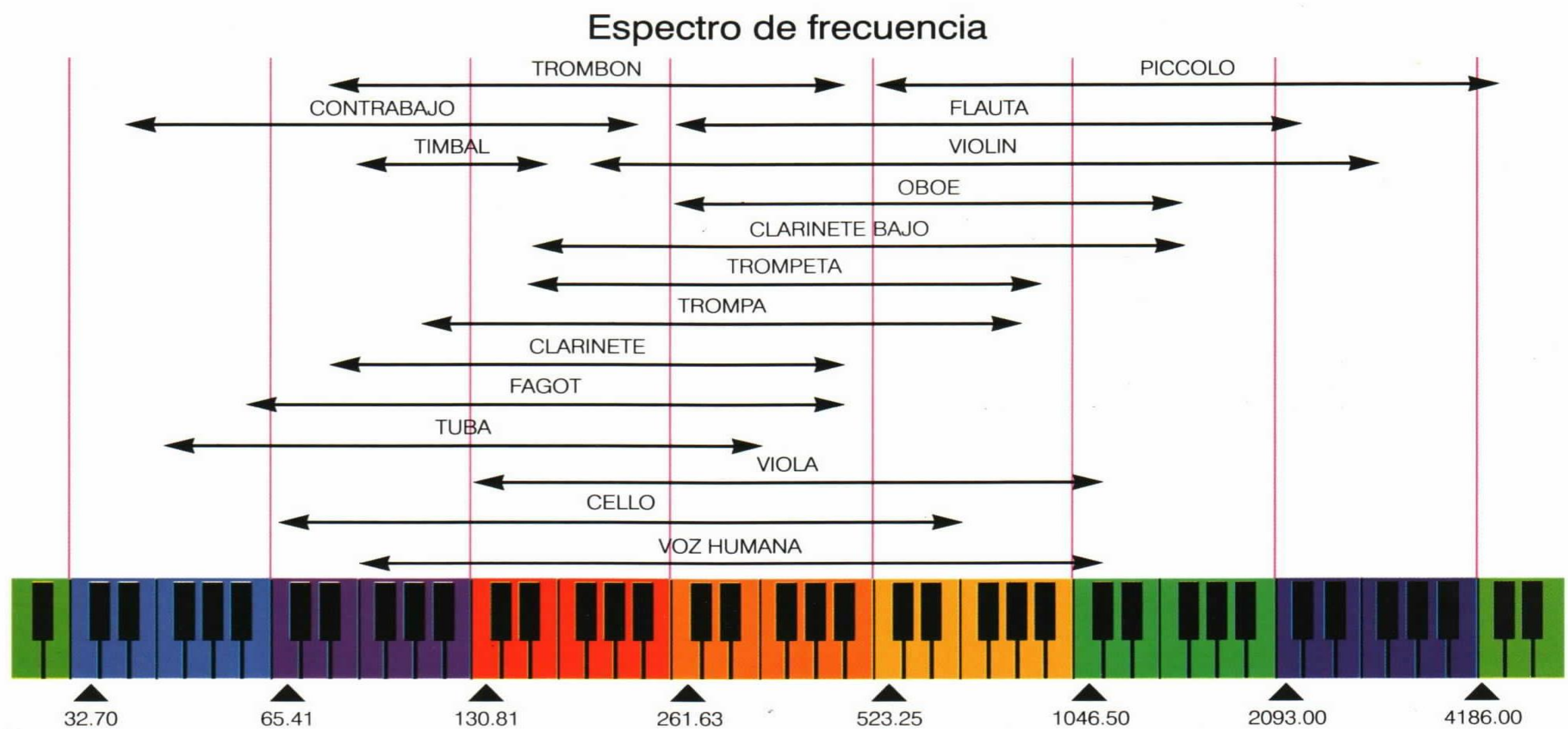


Es una **característica** del sonido **que está relacionado con la frecuencia**.

Las **frecuencias más bajas** (vibraciones lentas) producen **sonidos graves** y las **frecuencias más altas** (vibraciones rápidas) **producen sonidos agudos.**

Tono y Timbre

- La frecuencia de un sonido determina lo que el oído juzga como el **TONO** del sonido. Los músicos designan el tono por las letras que corresponden a las notas de las teclas del piano. Por ejemplo, las notas do, re y fa se refieren a tonos específicos, o frecuencias.

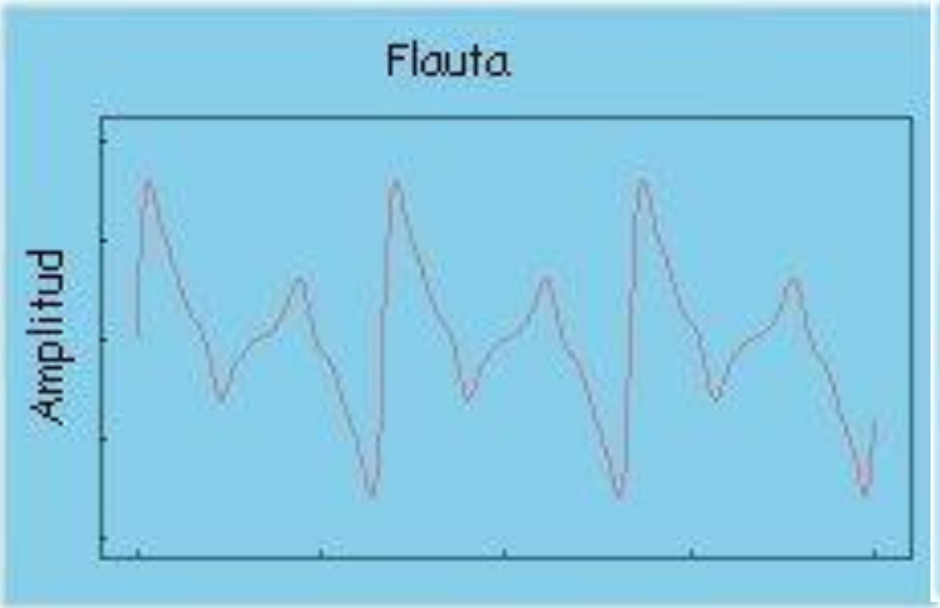


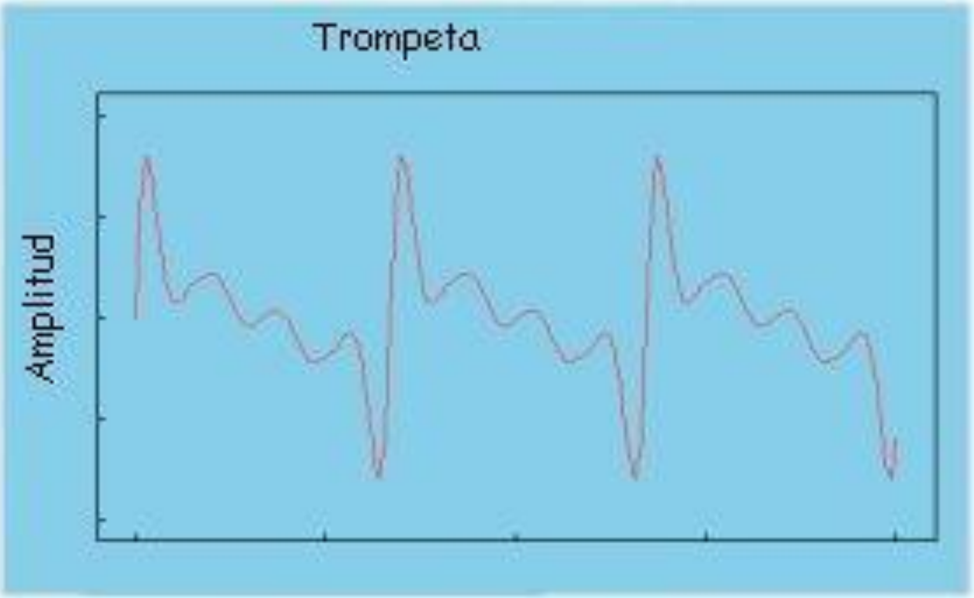
Cada instrumento reproduce un rango de frecuencias diferente, tal y como muestra el gráfico.

TIMBRE

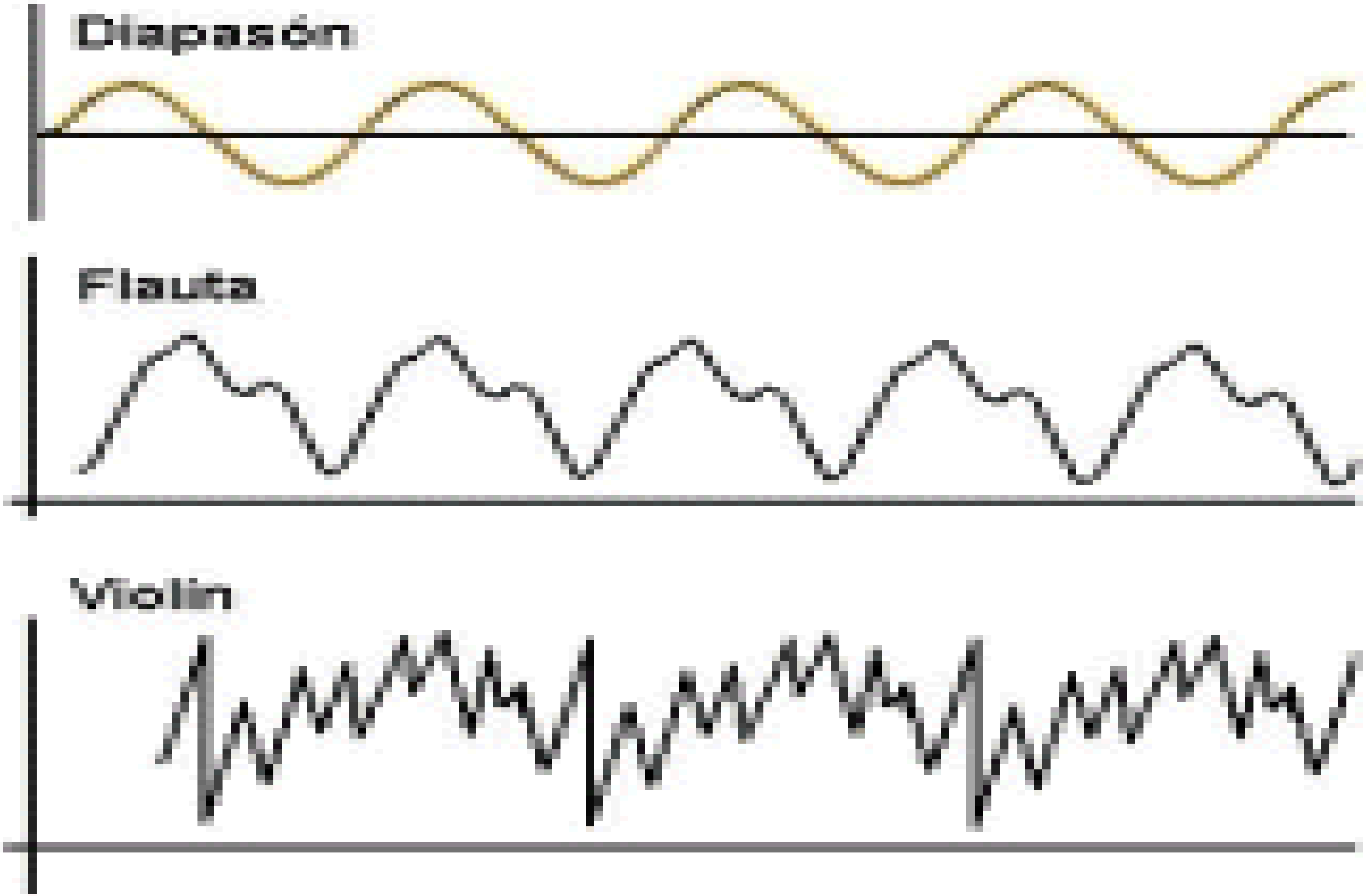
Es una **característica** del sonido **que permite diferenciar entre dos sonidos de igual tono e intensidad**, emitidos por dos fuentes sonoras diferentes. Por ejemplo, un violín y una guitarra.

Tono y Timbre



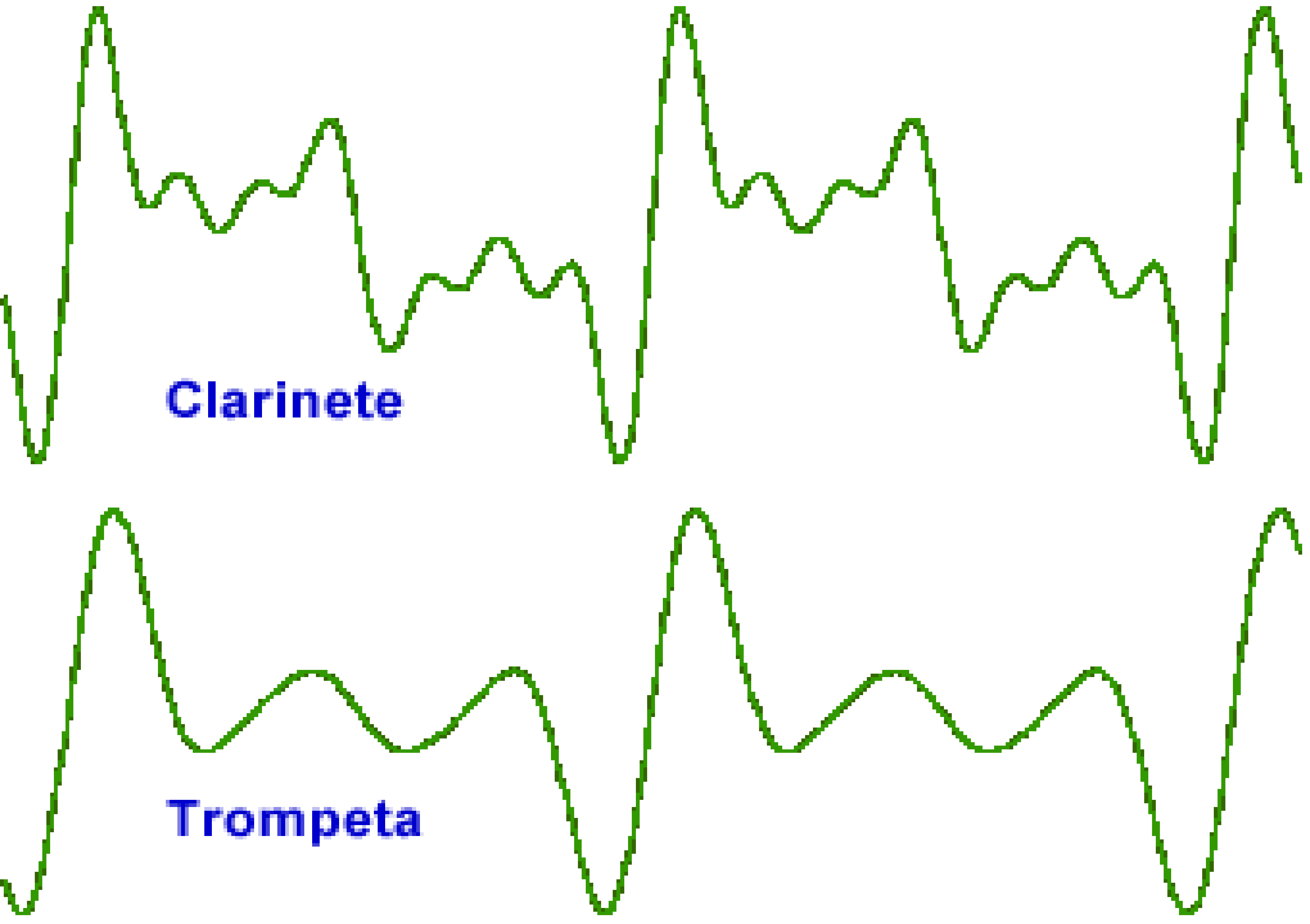


- Dos sonidos del mismo tono se pueden distinguir fácilmente. Por ejemplo, suponga que suena la nota “Do” (250 Hz) sucesivamente en una flauta y una trompeta. Aun cuando cada sonido tiene el mismo tono, hay una marcada diferencia. Se dice que esta diferencia resulta una diferencia en la calidad o ***timbre*** del sonido.



Diferentes timbres sonoros

FORMAS DE ONDA



OCTAVAS

El término octava se utiliza para designar un intervalo de frecuencias comprendido entre una frecuencia dada y otra igual al doble de la anterior.

Se llama así porque la escala musical es de siete notas y la siguiente, es decir la octava, tiene la frecuencia igual al doble de la primera.

Ej.: La frecuencia de la nota LA es de 440 Hz.

Las frecuencias de 880 Hz y 1.760 Hz también corresponden a la nota LA pero en octavas superiores.

RUIDO

Se considera ruido al sonido sin definición, con vibraciones cortas que molestan y alteran el nervio auditivo. Carecen de un patrón acústico definido.

Se pueden señalar como ejemplos:

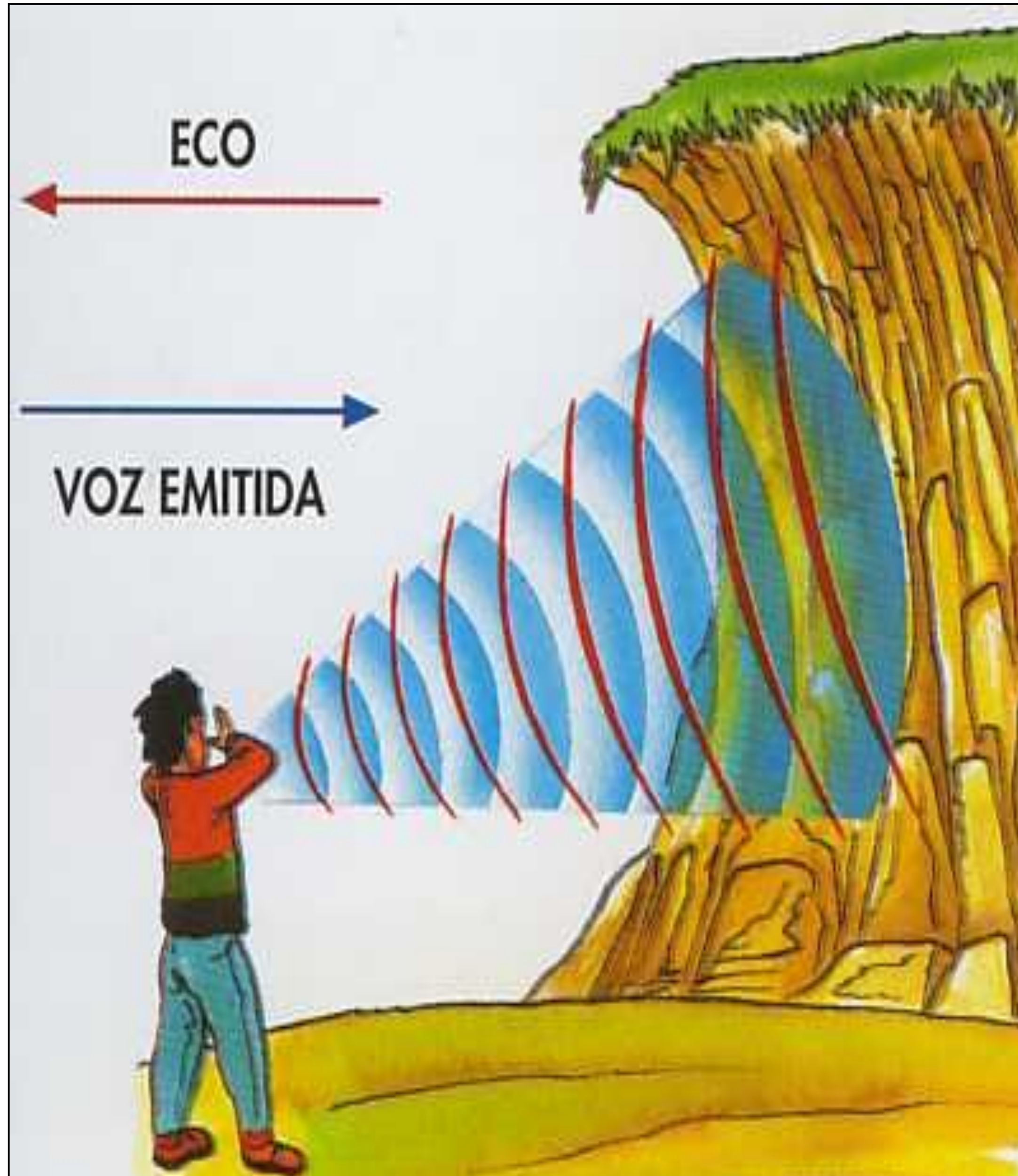
El sonido que se produce al romper un cristal.

Cuando un auto frena súbitamente en un choque.

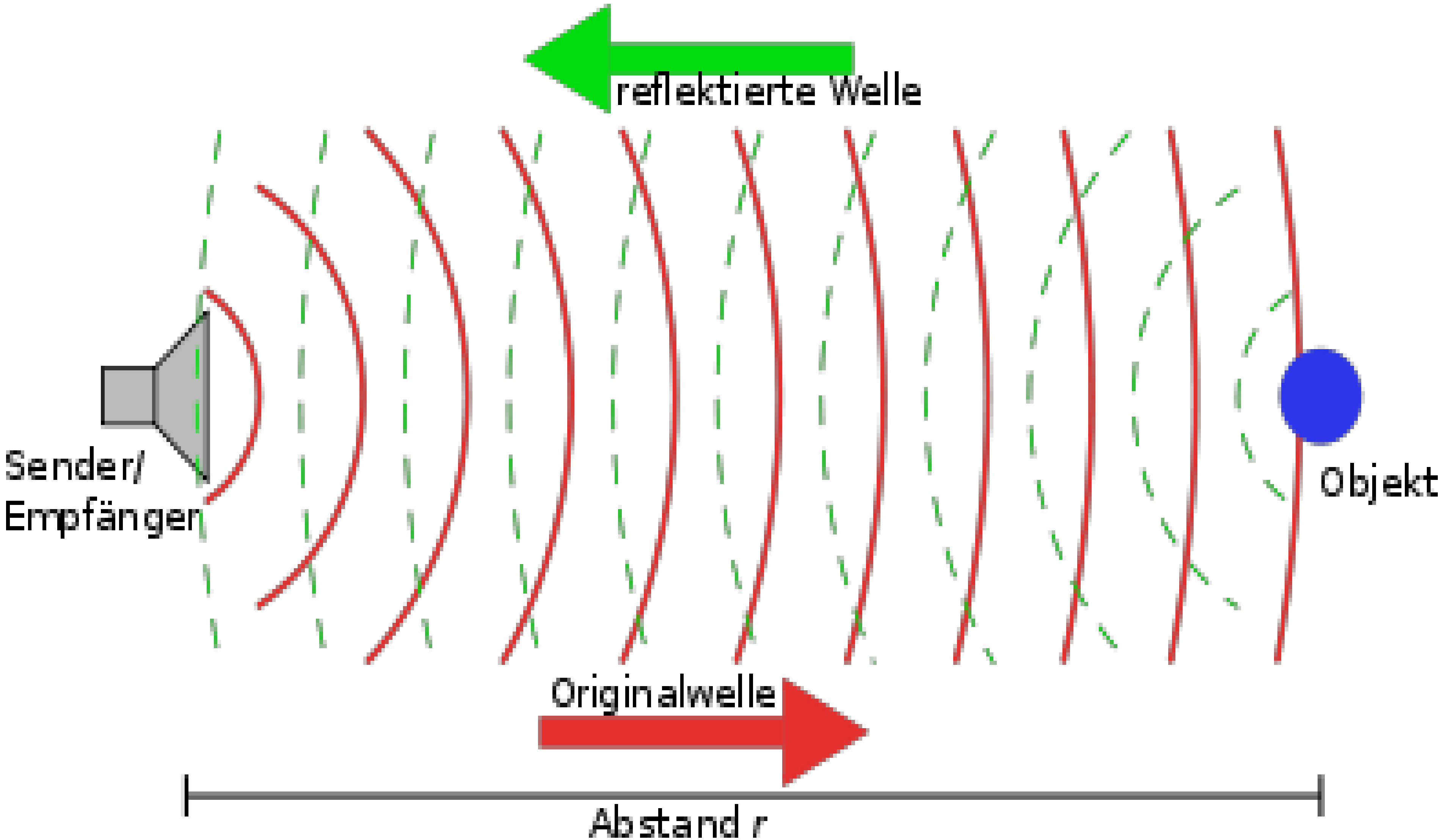
REFLEXIÓN DEL SONIDO

Es una propiedad característica del sonido, que algunas veces llamamos eco.

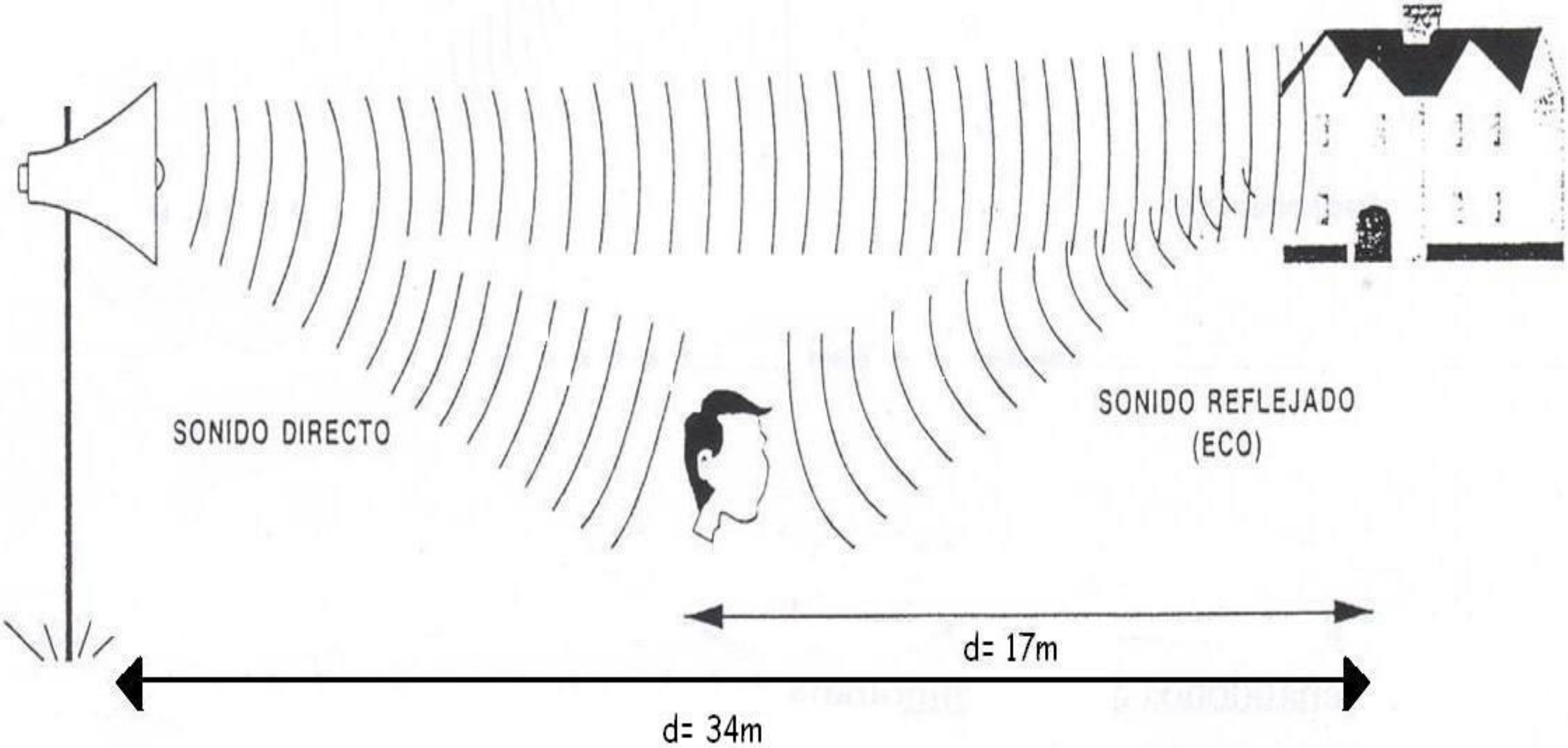
El **eco** se produce cuando un sonido **se refleja** en un medio más denso y llega al oído de una persona con una diferencia de tiempo igual o superior a 0,1 segundos, respecto del sonido que recibe directamente de la fuente sonora.



- Cuando se encuentran con un obstáculo, las ondas sonoras se pueden reflejar.



- **ECO**: Se produce cuando el sonido se refleja sobre una superficie que se encuentra, como mínimo, a 17 m de distancia del emisor.
- **REVERBERACIÓN**: Se produce cuando el sonido se refleja sobre una superficie que se encuentra, como máximo, a 17 m de distancia del emisor.
- La reflexión del sonido es el fundamento físico del sonar.


SONIDO DIRECTO
SONIDO REFLEJADO
(ECO)
d= 17m
d= 34m

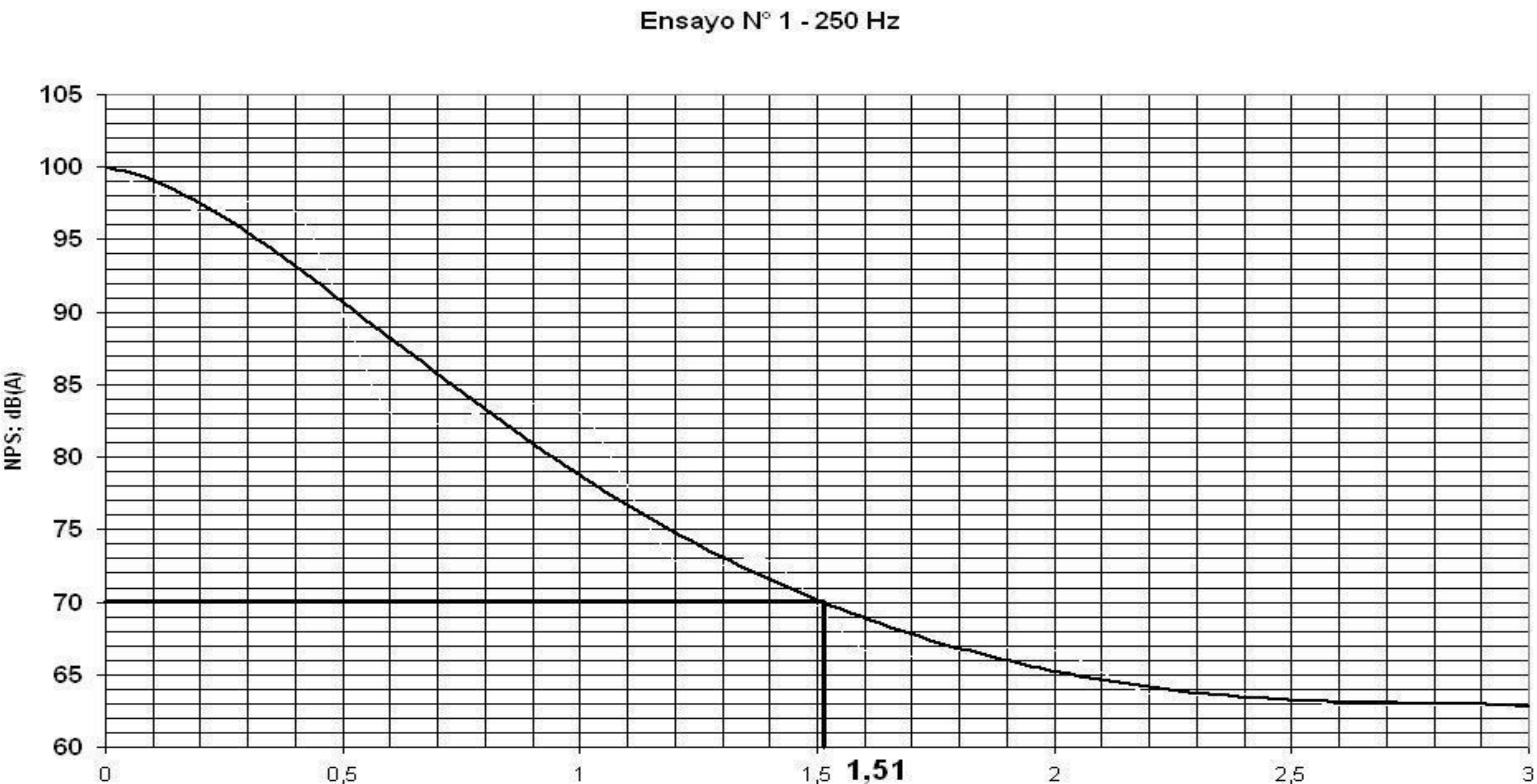

dB
Sonido
Directo
Sonido
Reflejado (Eco)
t
t > 0.1 s

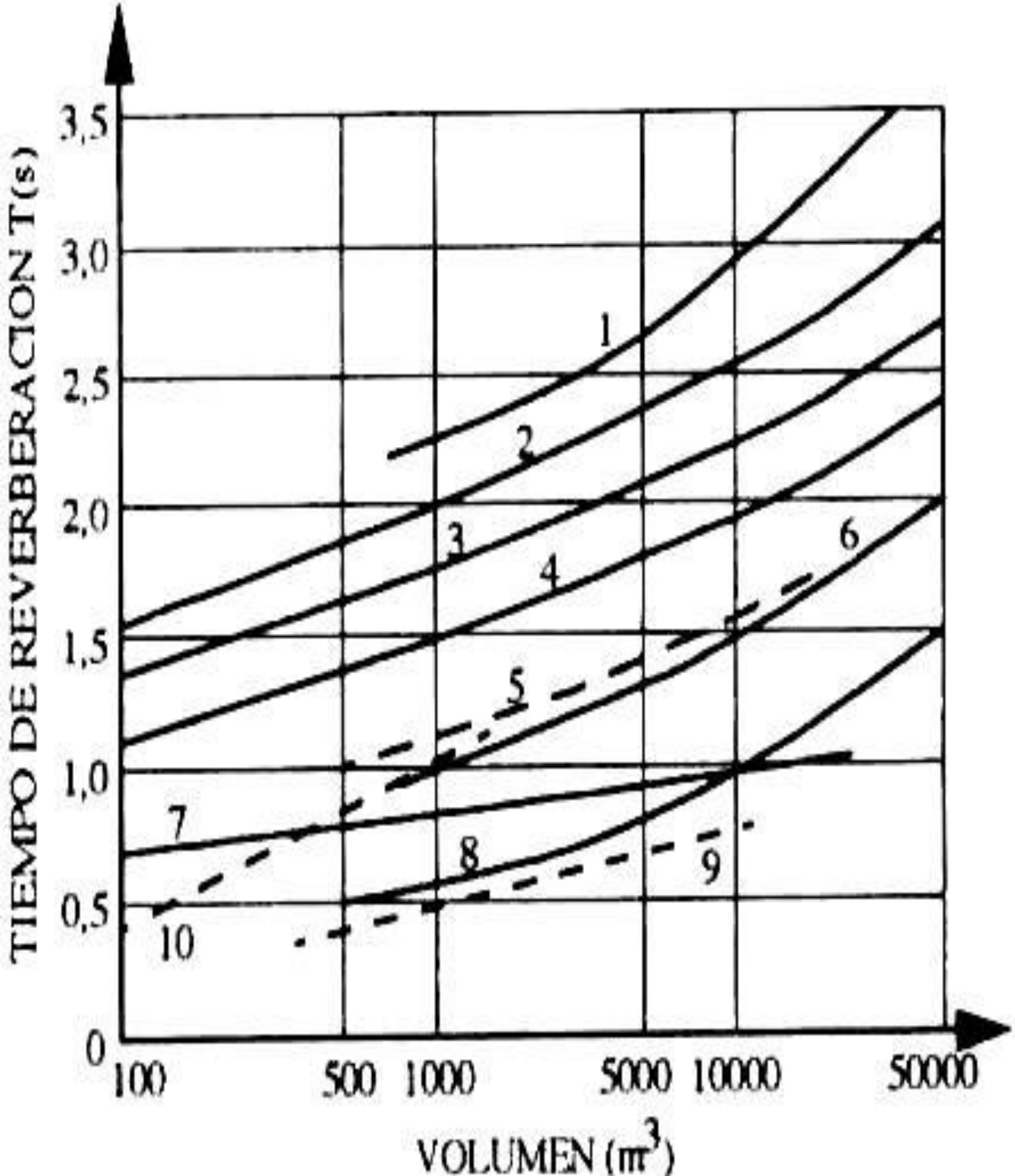
ECO

Fenómenos relacionados con la reflexión

Tiempo de Reverberación: TR60

- Se define como el tiempo **T** necesario a partir de la interrupción de una fuente sonora para que la densidad de energía se reduzca en **60 dB**, es decir que se reduzca a una millonésima parte de la densidad de energía original.

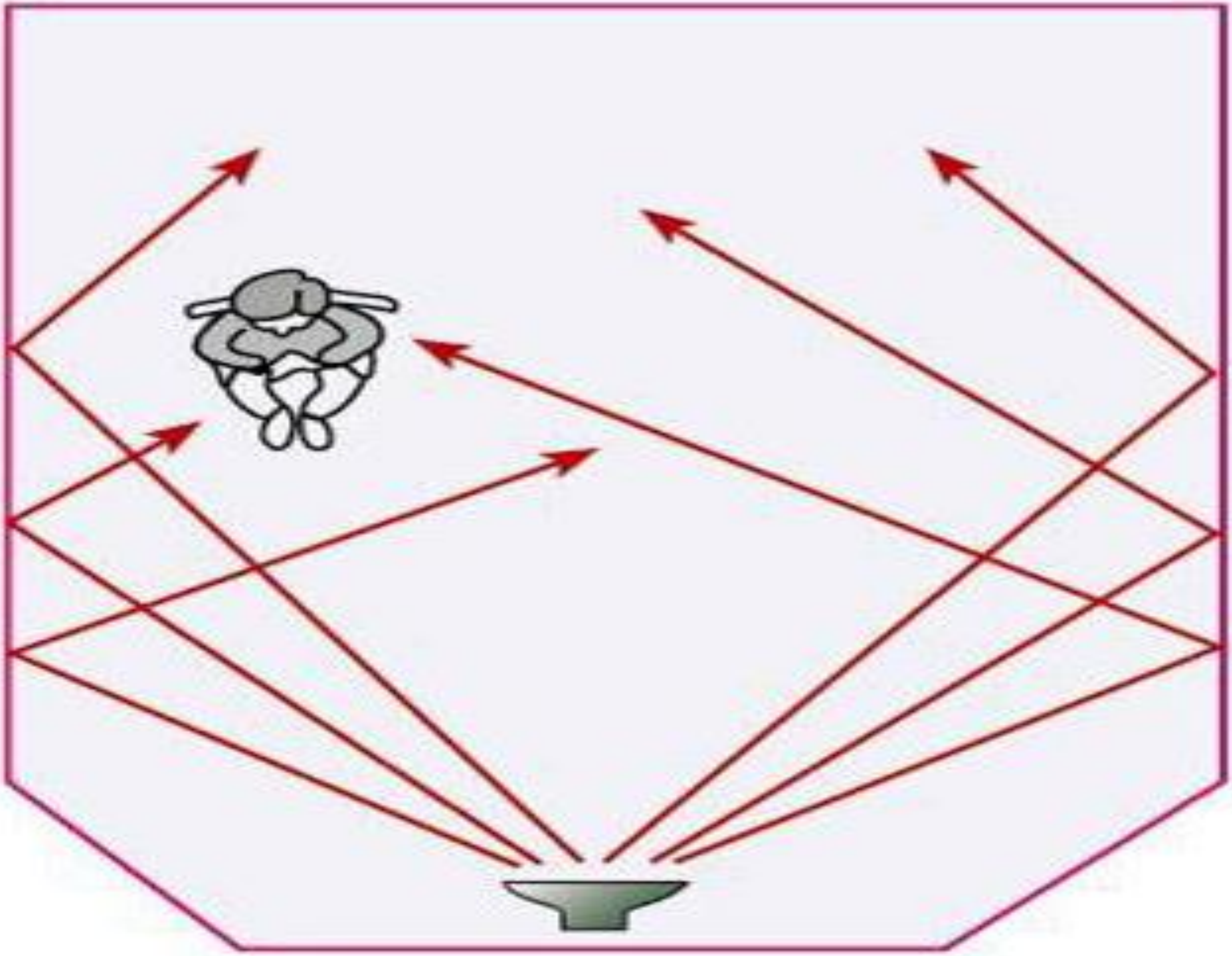




Tiempo de Reverberación TR60.

Referencias:

1. **Salas para música religiosa**
2. **Salas de concierto para música orquestal**
3. **Salas de concierto para música ligera**
4. **Estudios de concierto**
5. **Salas de baile**
6. **Teatros de ópera**
7. **Auditorios para palabra**
8. **Cines y salas de conferencias**
9. **Estudios de T.V.**
10. **Estudios de Radio**

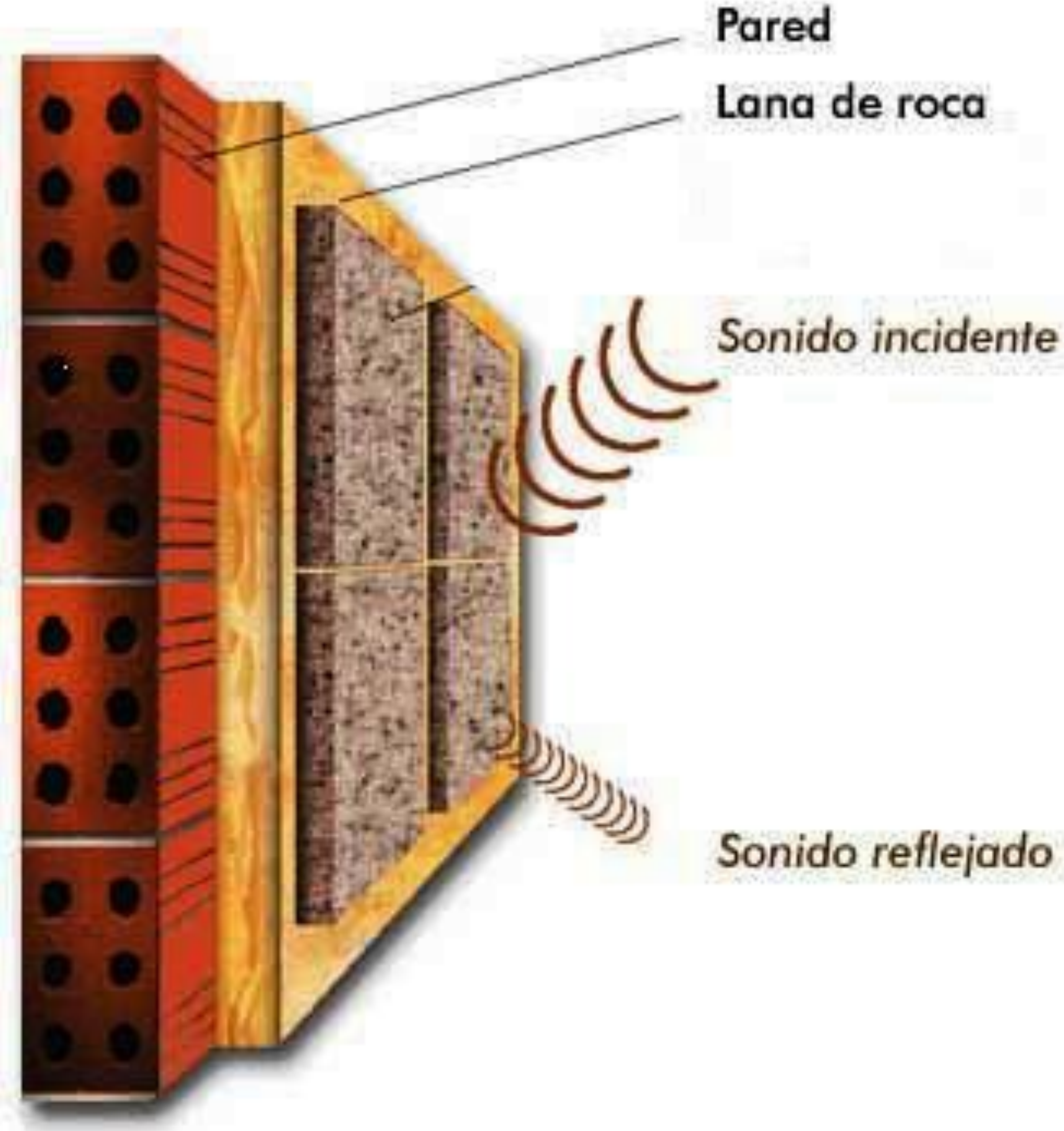


REFRACCIÓN DEL SONIDO

Cuando un sonido pasa de un medio a otro, se produce refracción. La desviación de la onda se relaciona con la rapidez de propagación en el medio.

Por ejemplo, el sonido se propaga más rápidamente en el aire caliente que en el aire frío.

ABSORCIÓN DEL SONIDO



Coeficiente de absorción
Se define como la relación entre la energía absorbida por el material y la energía reflejada por el mismo.

Es un valor que varía entre 0 (toda la energía se refleja) y 1 (toda la energía es absorbida). Normalmente, se expresa en Sabines. Este valor variará para cada frecuencia.

El coeficiente de absorción hay que tenerlo en cuenta a la hora de acondicionar acústicamente una sala.

Capacidad de absorción del sonido de un material

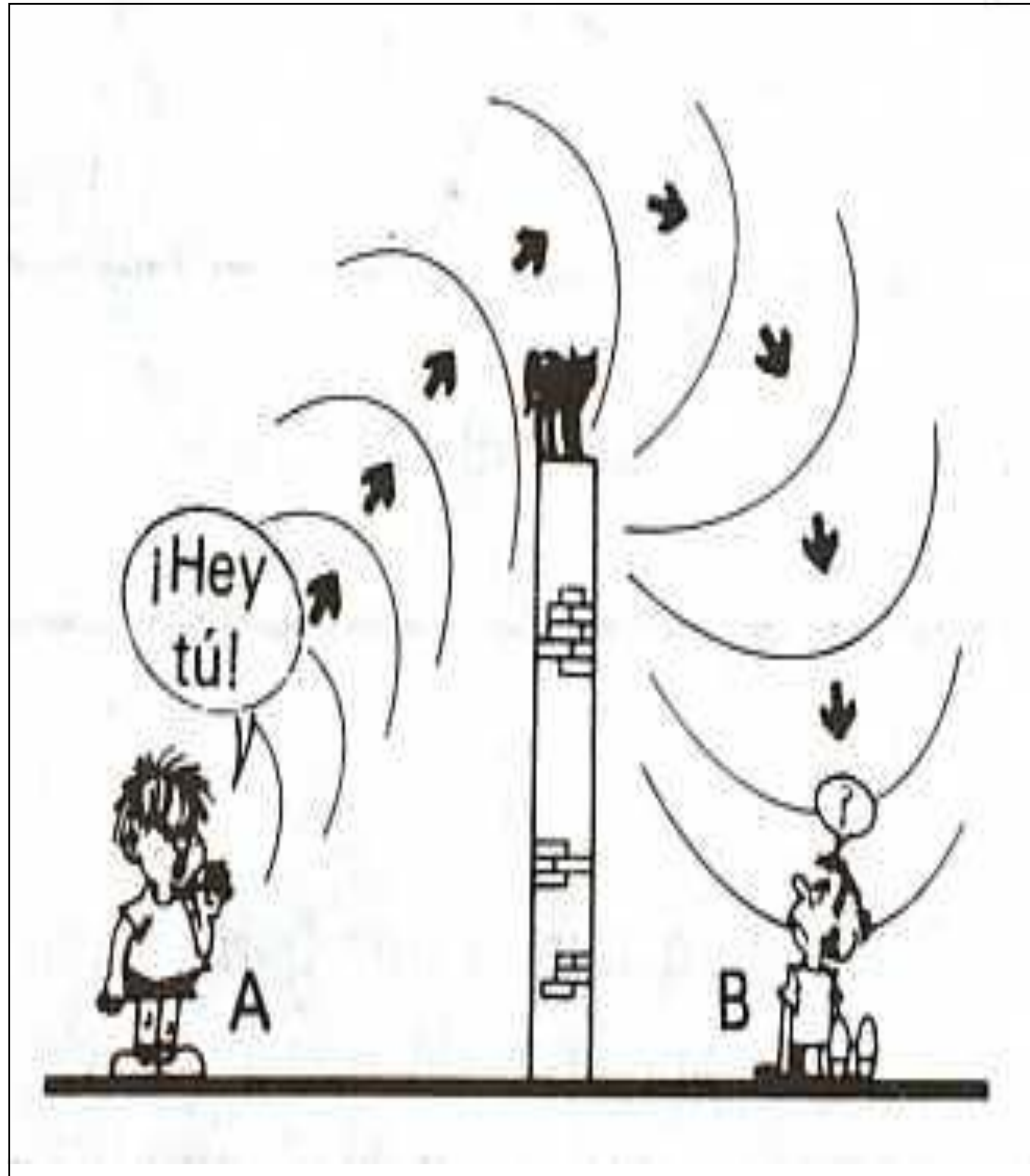
Relación entre la energía absorbida por el material y la energía reflejada por el mismo.

Es un valor que varía entre 0 (toda la energía se refleja) y 1 (toda la energía es absorbida).

Material	Coeficiente de absorción
Ladrillo sin pintar	0,03
Ladrillo pintado	0,017
Madera terciada	0,3
Piso de madera	0,11
Cortinas de tela delgada	0,11
Cortinas gruesas	0,5
Alfombra gruesa	0,06
Vidrio	0,2
Butaca sin ocupar	0,4
Butaca ocupada	0,2
Silla de madera	0,03
Yeso	0,025

DIFRACCIÓN DEL SONIDO

Si el sonido encuentra un obstáculo en su dirección de propagación, es capaz de rodearlo y seguir propagándose.



La persona B puede escuchar a la persona A, en virtud de que las ondas sonoras emitidas por A rodean el muro y llegan al oído de B.

Se puede producir por dos motivos:

Una onda encuentra a su paso un pequeño obstáculo y lo rodea. Las bajas frecuencias son más capaces de rodear los obstáculos que las altas. Esto es posible porque las longitudes de onda en el espectro audible están entre 1,7cm y 17m, por lo que son lo suficientemente grandes para superar la mayor parte de los obstáculos.

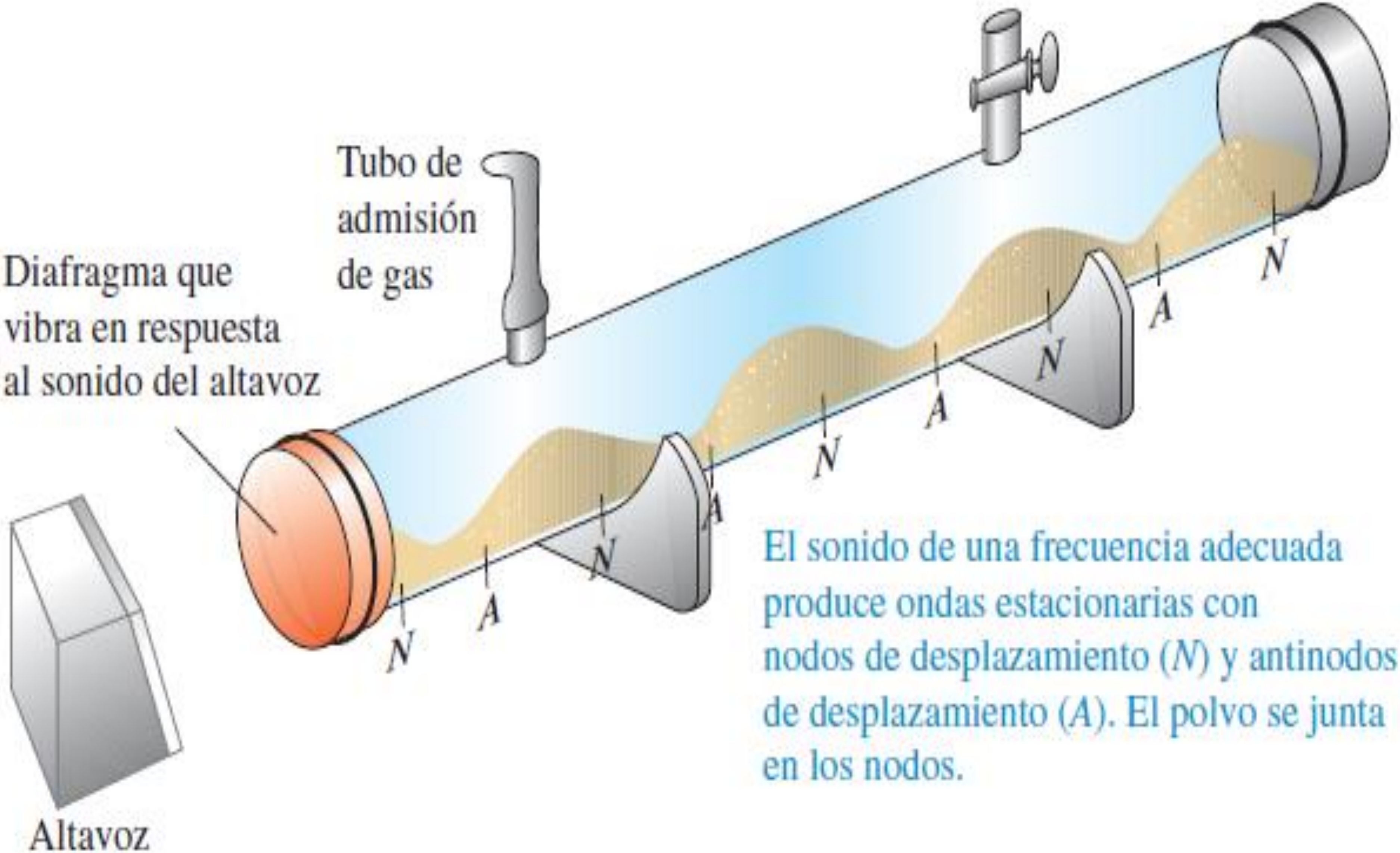
Una onda topa con un pequeño agujero y lo atraviesa. La cantidad de difracción estará dada en función del tamaño de la propia abertura y de la longitud de onda.

INTERFERENCIA DEL SONIDO

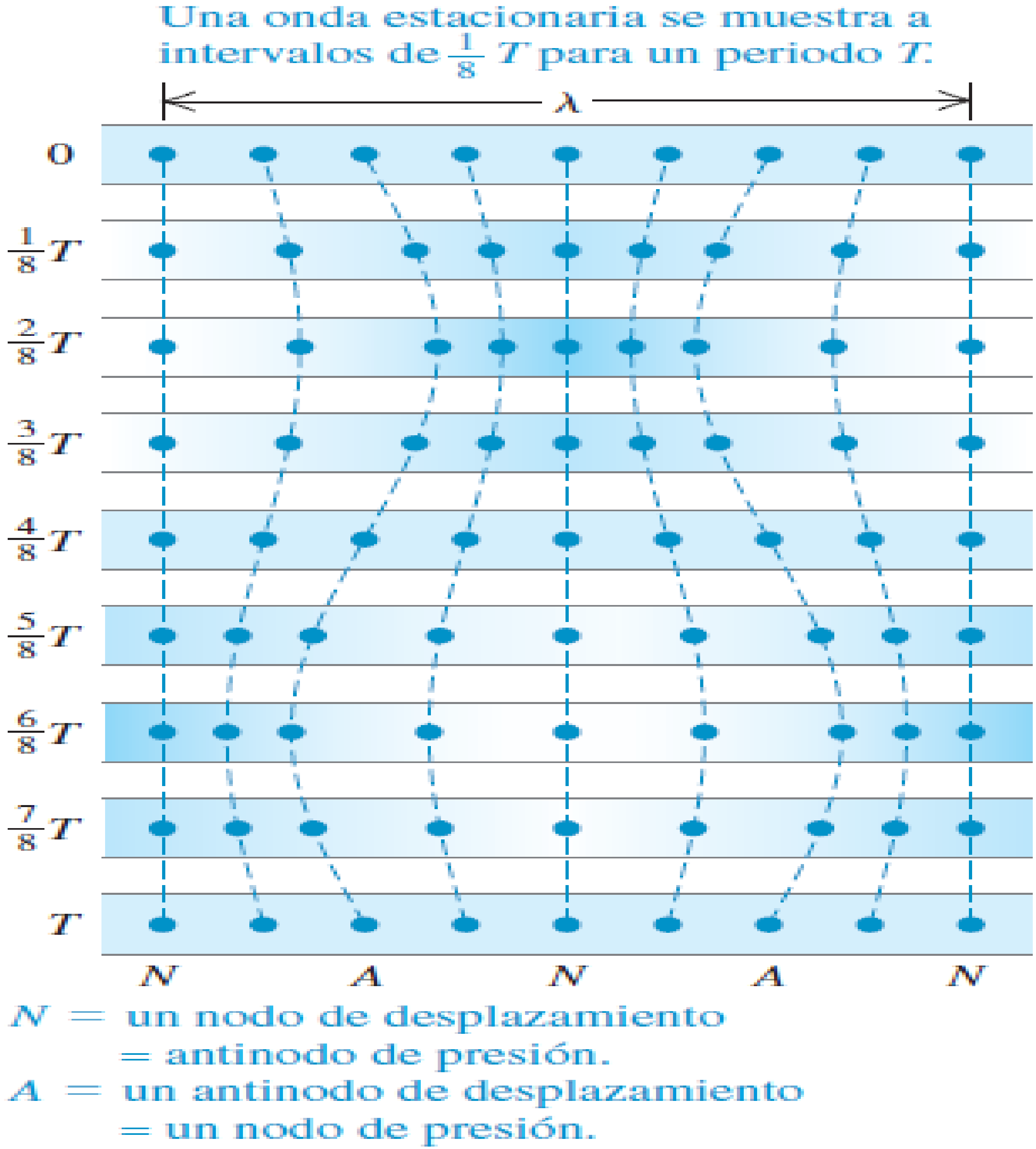
En la figura, F_1 y F_2 son dos altoparlantes que emiten ondas sonoras de la misma amplitud en fase, las cuales, al propagarse, generan interferencias destructivas e interferencias constructivas.

Si una persona caminara a través de esta configuración de interferencia sonora, no percibiría sonido al cruzar las regiones nodales C, B, A, A', etc. y escucharía un sonido que es más fuerte en los puntos medios.

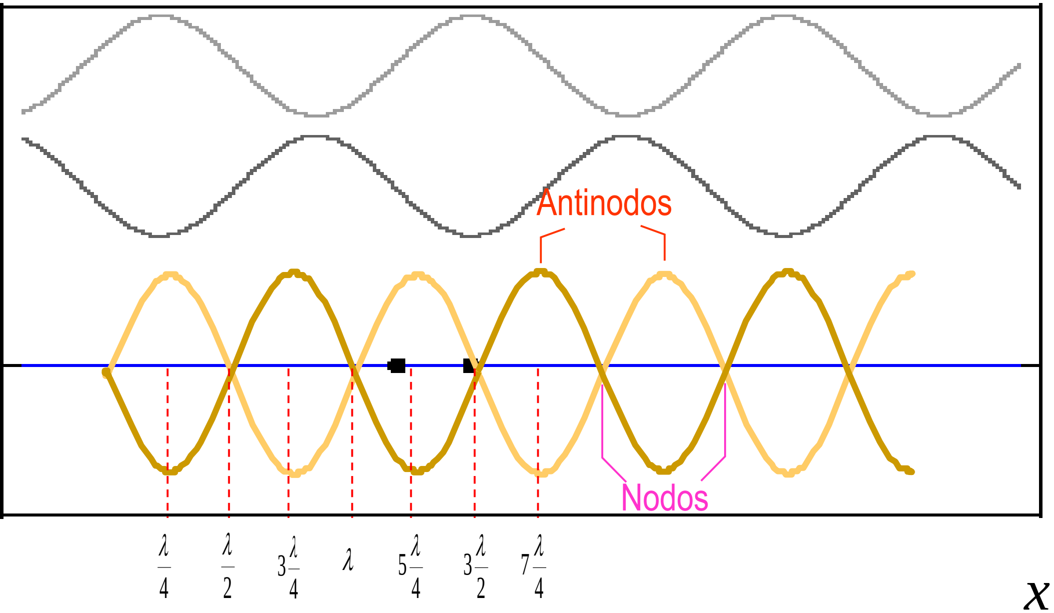
Ondas sonoras estacionarias y modos normales



Un nodo de presión siempre es un antinodo de desplazamiento, y un antinodo de presión siempre es un nodo de desplazamiento.



Ondas estacionarias en una cuerda



En los antinodos:

sen $kx = \pm 1$, $kx = \pi/2, 3\pi/2, 5\pi/2, \ldots.$

$$x = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \ldots.. = \frac{n\lambda}{4} \quad n = 1, 3, 5, \ldots$$

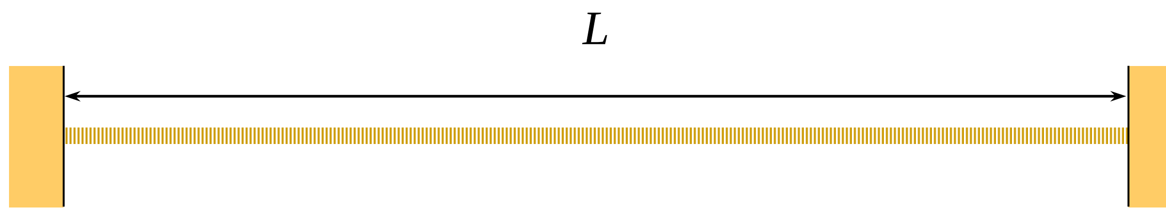
Como en los nodos el máximo desplazamiento vertical es cero:

sen $kx = 0$ para $kx = 0, \pi, 2\pi, 3\pi, \ldots.$

$$x = 0, \frac{\lambda}{2}, \frac{2\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \ldots.. = \frac{n\lambda}{2}; \quad n = 0,\ 1,\ 2,\ 3,\ ..$$

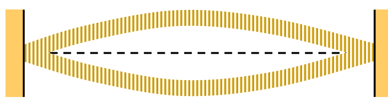
Modos normales de una cuerda

Si ambos extremos de una cuerda con longitud L están fijos, solo puede haber ondas estacionarias si L es múltiplo entero de $\lambda/2$.



Frecuencia fundamental o
1º armónico: f_1

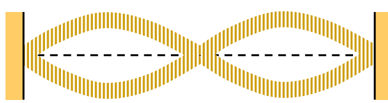
$$f_1 = \frac{v}{2L} = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{F}{\mu}}$$



$$L = \frac{\lambda_1}{2}$$

Segundo armónico: f_2

$$f_2 = 2f_1 = \frac{v}{L}$$



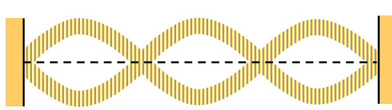
$$L = 2\frac{\lambda_2}{2}$$

$$f_n = n\frac{v}{2L} = nf_1; \quad n = 1,2,3.....$$

$$L = n\frac{\lambda_n}{2}; \quad n = 1,2,3.....$$

Tercer armónico: f_3

$$f_3 = 3f_1 = 3\frac{v}{2L}$$



$$L = 3\frac{\lambda_3}{2}$$

Entonces:

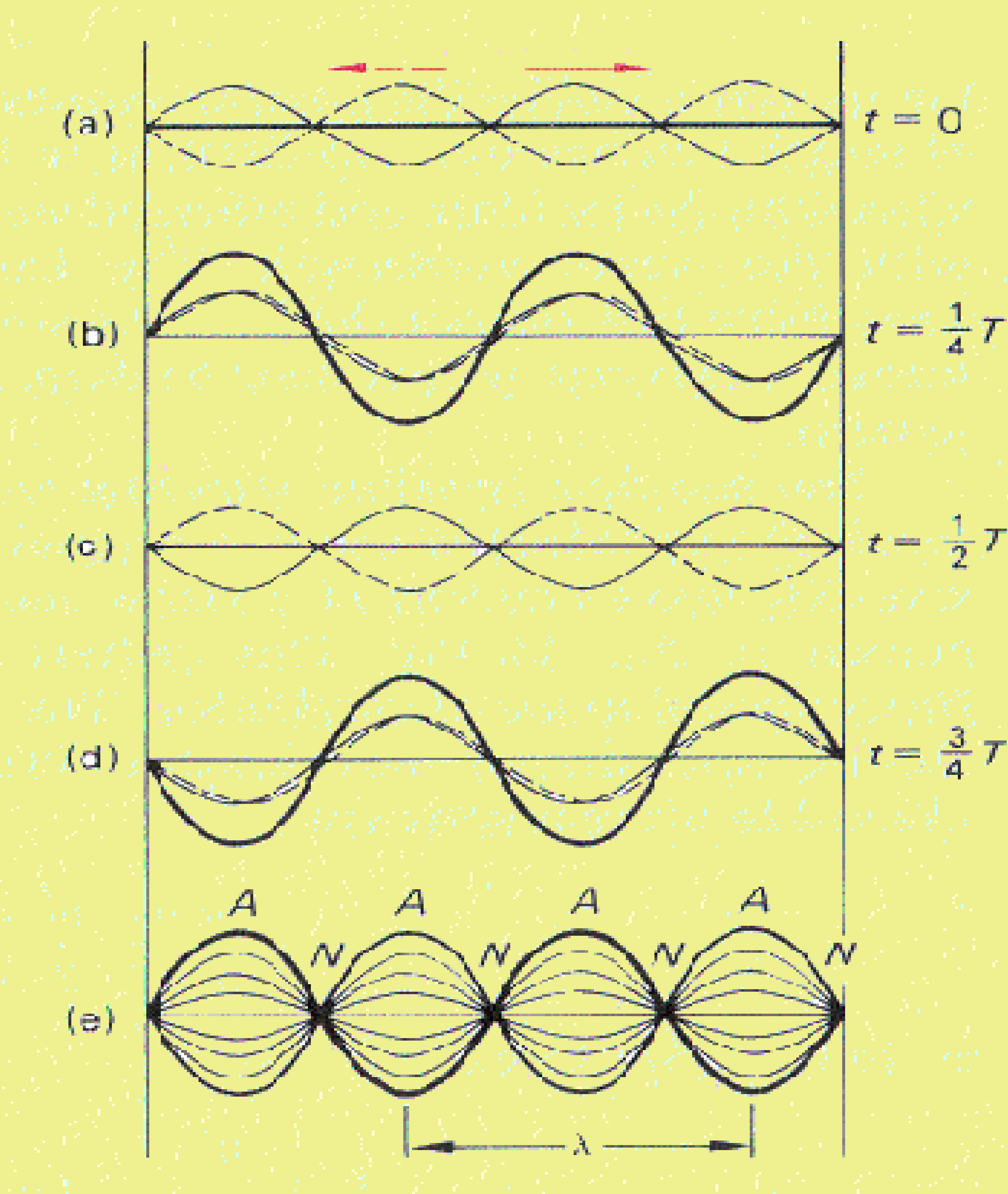
$$f_n = n\frac{v}{2L} = nf_1; \quad n = 1,2,3.....$$

$$L = n\frac{\lambda_n}{2}; \quad n = 1,2,3.....$$

Formación de una onda estacionaria

Las ondas incidente y reflejada que viajan en direcciones opuestas producen nodos N y antinodos A.

La distancia entre nodos o antinodos alternos es una longitud de onda.



λ para ondas estacionarias

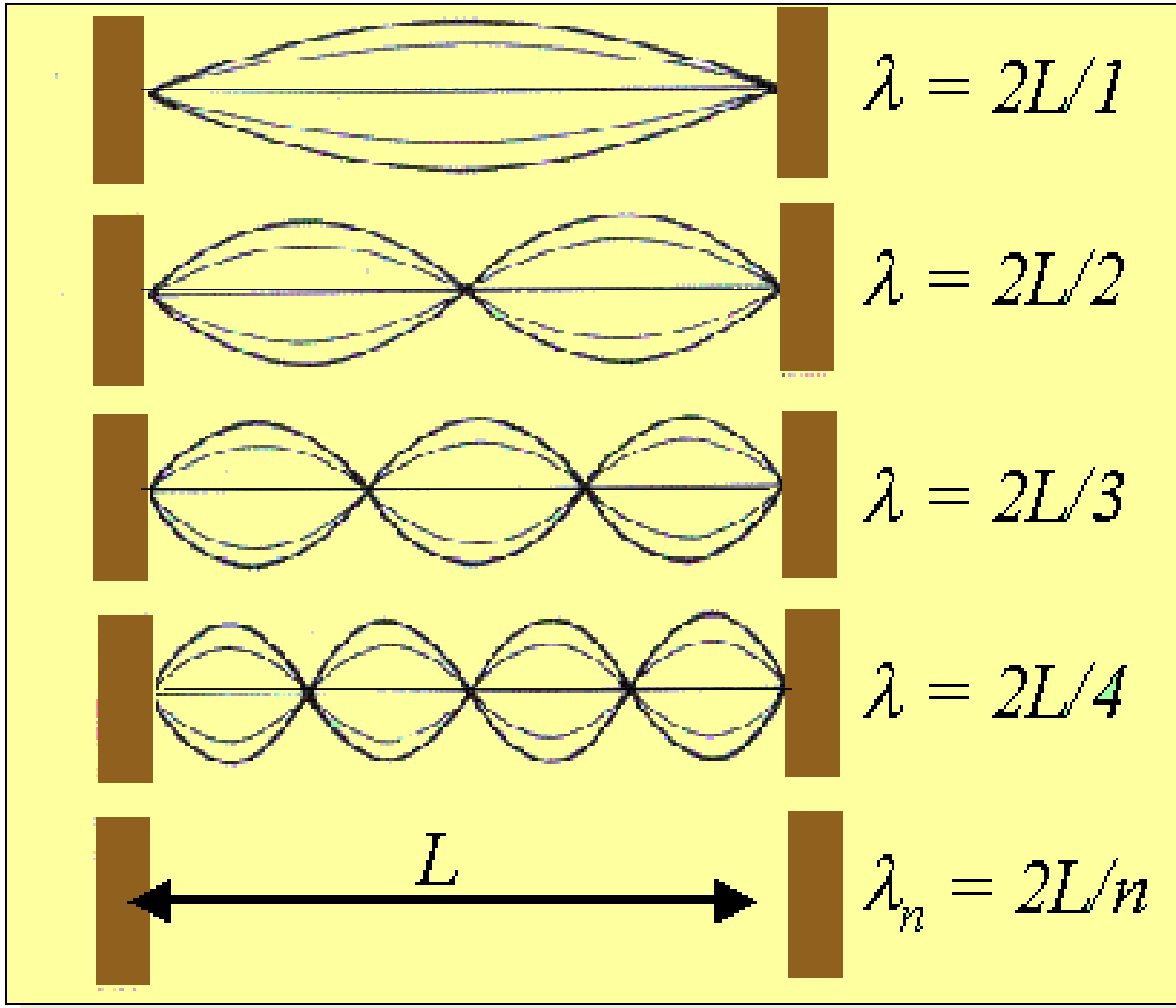
Fundamental: *n = 1*

1er sobretono: *n = 2*

2do sobretono: *n = 3*

3er sobretono: *n = 4*

n: orden del armónico



$$\lambda_n = \frac{2\,L}{n}; n = 1,2,3\ \ldots.$$

f para ondas estacionarias

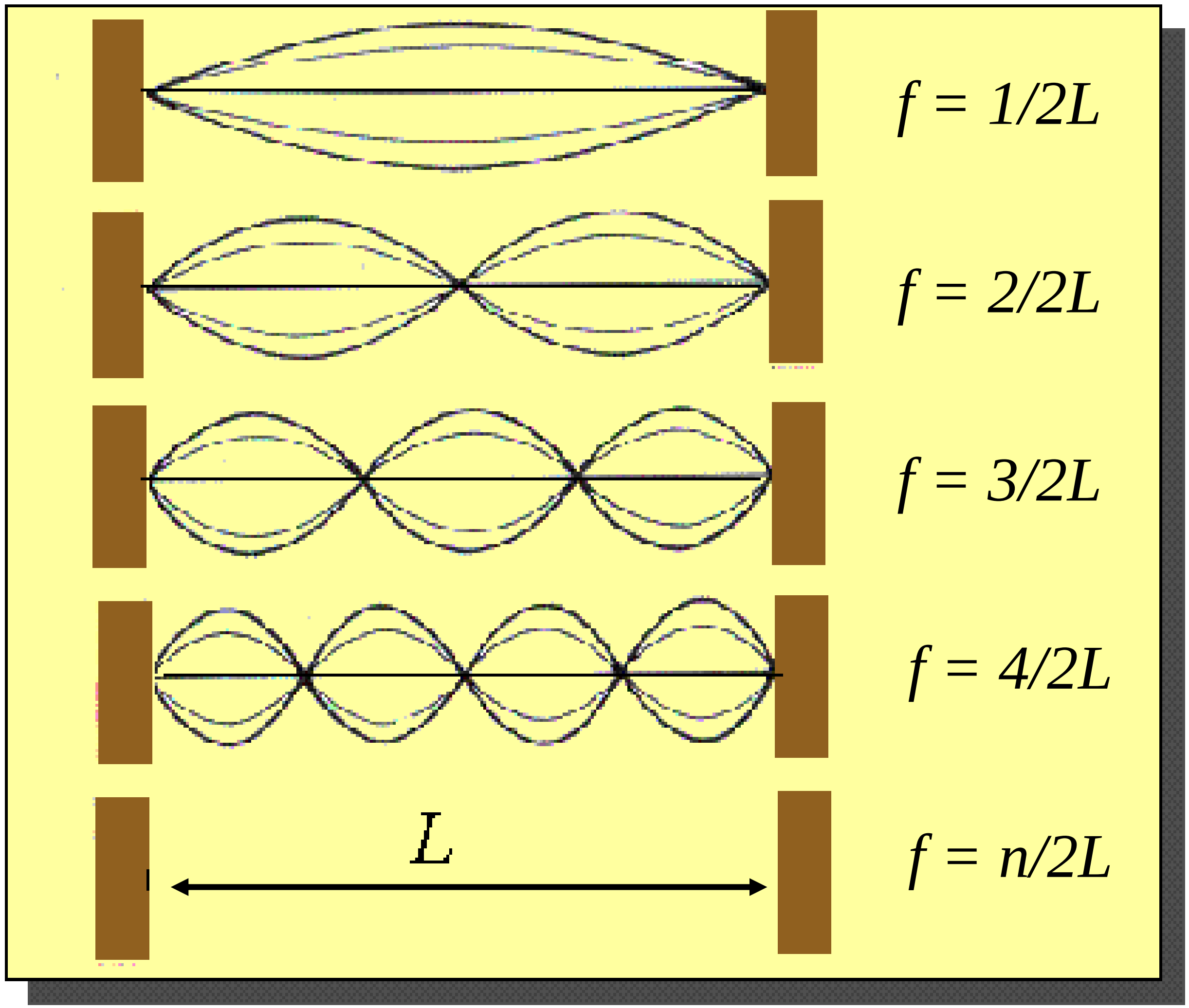
Fundamental, $n = 1$

1[er] sobretono, $n = 2$

2[do] sobretono, $n = 3$

3[er] sobretono, $n = 4$

n: orden del armónico



$$f = \frac{v}{\lambda} \Rightarrow f_n = n\frac{v}{2\,L}\,; n = 1,2,3 \ldots.$$

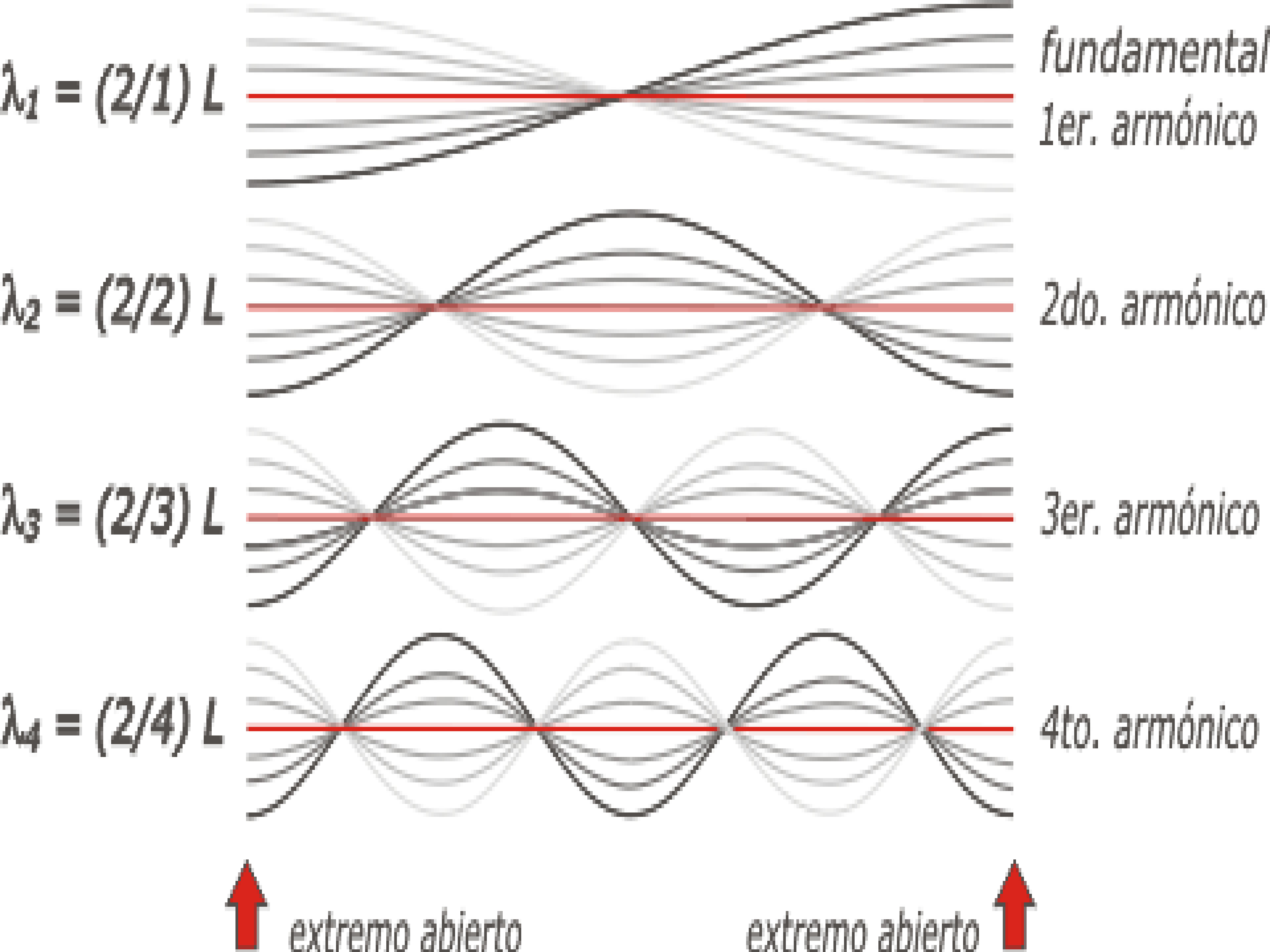
Ondas estacionarias en tubos

Tubo abierto en ambos extremos

Una onda estacionaria puede producirse en una columna de aire dentro de un instrumento en forma de tubo (órgano de iglesia). Aquí las oscilaciones son longitudinales paralelas al tubo, pero además pueden ilustrarse con un gráfico que muestra el desplazamiento de las moléculas de aire de su posición de equilibrio como una función del lugar en el tubo.

Se demuestra, igual que en el caso de las cuerdas que:

$$f_n = n\frac{v}{2L} = nf_1; \quad n = 1,2,3,\ldots.$$


λ1 = (2/1) L
fundamental
1er. armónico
λ2 = (2/2) L
2do. armónico
λ3 = (2/3) L
3er. armónico
λ4 = (2/4) L
4to. armónico
extremo abierto
extremo abierto

$$f_1 = \frac{v}{2L} \qquad \text{(tubo abierto)}$$

$$L = n\frac{\lambda_n}{2} \qquad \text{o bien,} \qquad \lambda_n = \frac{2L}{n} \qquad (n = 1, 2, 3, \ldots) \qquad \text{(tubo abierto)}$$

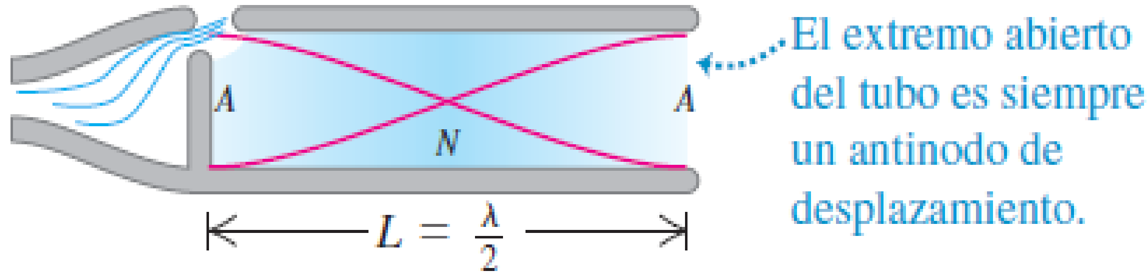
Las frecuencias correspondientes f_n están dadas por $f_n = v/\lambda_n$, así que todas las frecuencias de modo normal para un tubo abierto por ambos extremos están dadas por

$$f_n = \frac{nv}{2L} \qquad (n = 1, 2, 3, \ldots) \qquad \text{(tubo abierto)}$$

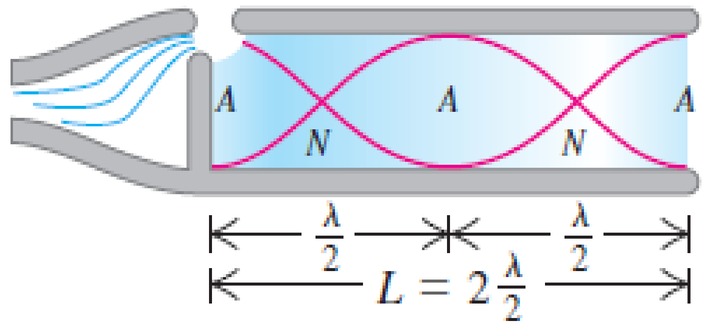
El valor $n = 1$ corresponde a la frecuencia fundamental, $n = 2$ al segundo armónico (o primer sobretono), etcétera. O bien, podemos decir

$$f_n = nf_1 \qquad (n = 1, 2, 3, \ldots) \qquad \text{(tubo abierto)}$$

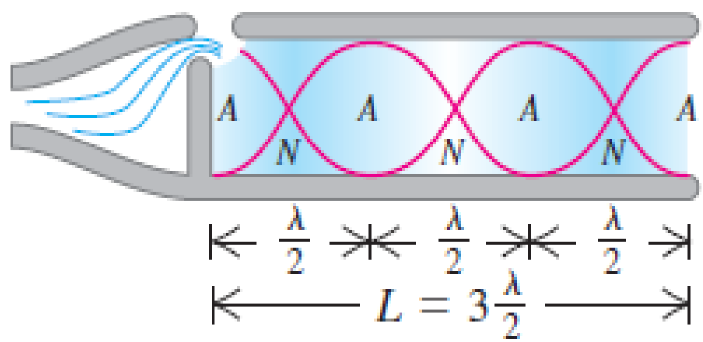
a)
Fundamental: $f_1 = \dfrac{v}{2L}$



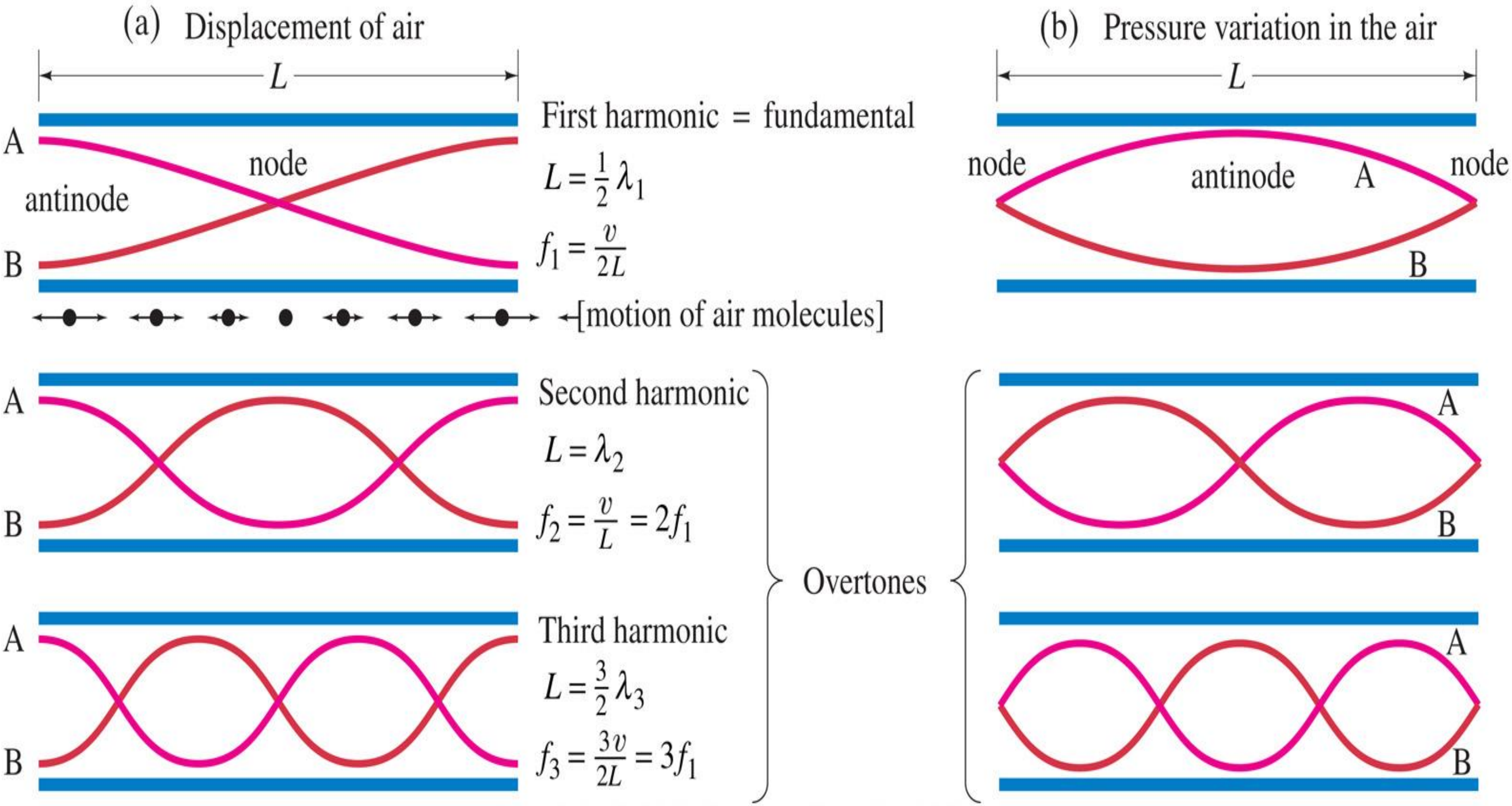
b)
Segundo armónico: $f_2 = 2\dfrac{v}{2L} = 2f_1$



c)
Tercer armónico: $f_3 = 3\dfrac{v}{2L} = 3f_1$



TUBE OPEN AT BOTH ENDS

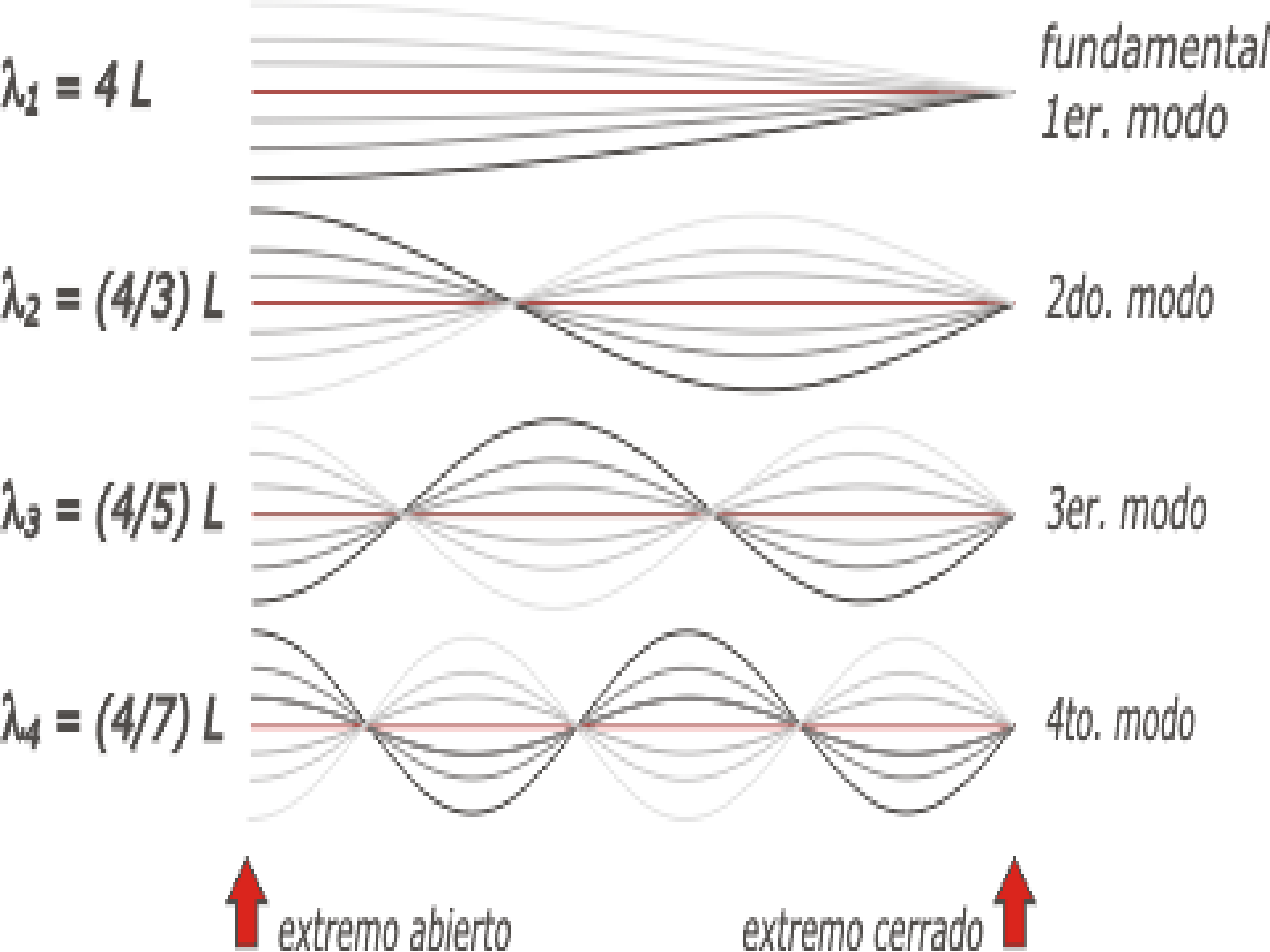


TUBOS ABIERTO EN UN EXTREMO Y CERRADO EN EL OTRO

Ahora la situación será diferente.

Se demuestra que:

$$f_n = n\frac{v}{4\,L} = n\,f_1; n = 1,2,3\ \ldots.$$



λ1 = 4 L
fundamental
1er. modo
λ2 = (4/3) L
2do. modo
λ3 = (4/5) L
3er. modo
λ4 = (4/7) L
4to. modo
extremo abierto
extremo cerrado

$$f_1 = \frac{v}{4L} \qquad \text{(tubo cerrado)}$$

$$L = n\frac{\lambda_n}{4} \qquad \text{o} \qquad \lambda_n = \frac{4L}{n} \qquad (n = 1, 3, 5, \ldots) \qquad \text{(tubo cerrado)}$$

Las frecuencias de modo normal están dadas por $f_n = v/\lambda_n$, es decir,

$$f_n = \frac{nv}{4L} \qquad (n = 1, 3, 5, \ldots) \qquad \text{(tubo cerrado)}$$

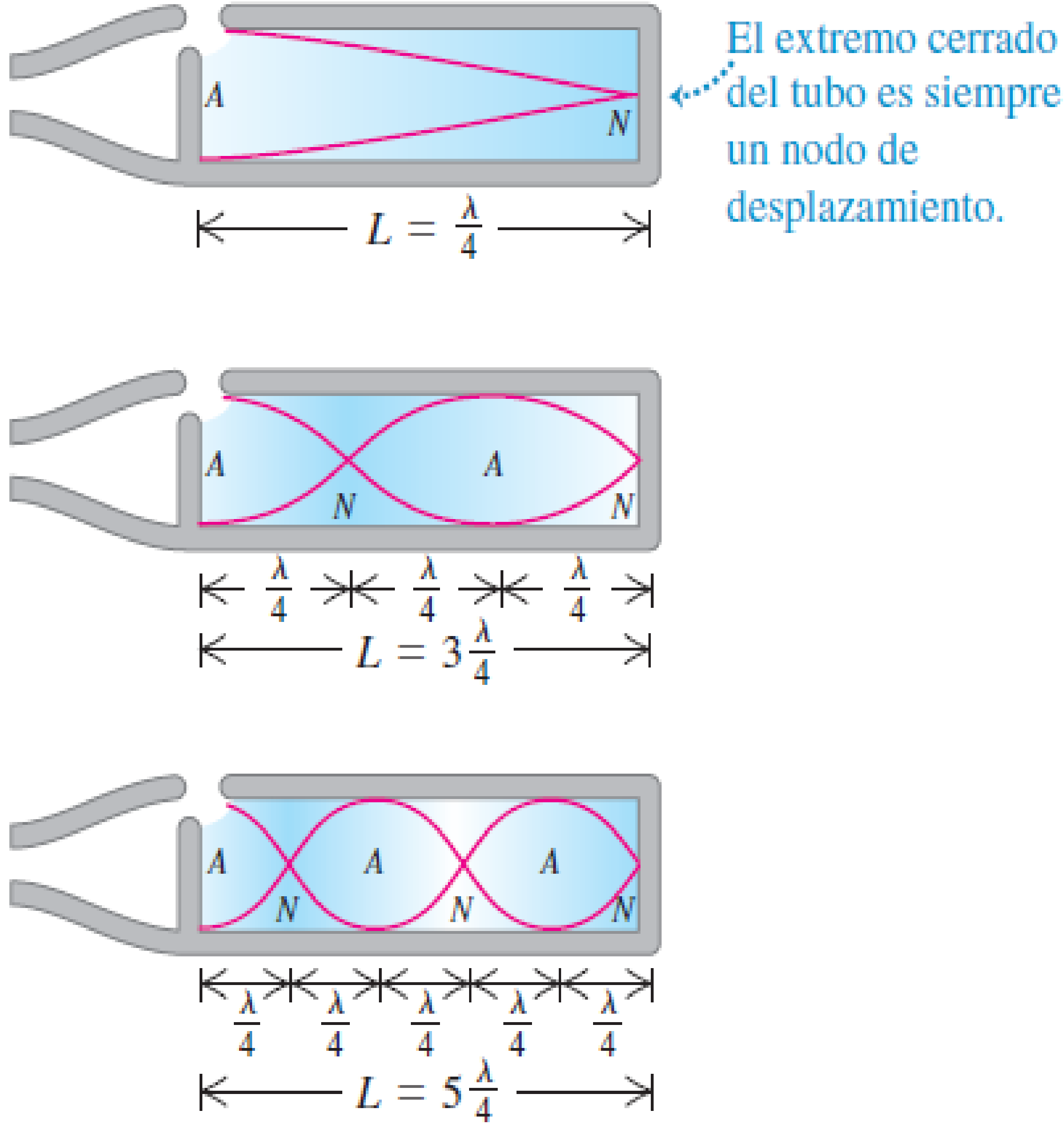
o bien,

$$f_n = nf_1 \qquad (n = 1, 3, 5, \ldots) \qquad \text{(tubo cerrado)}$$

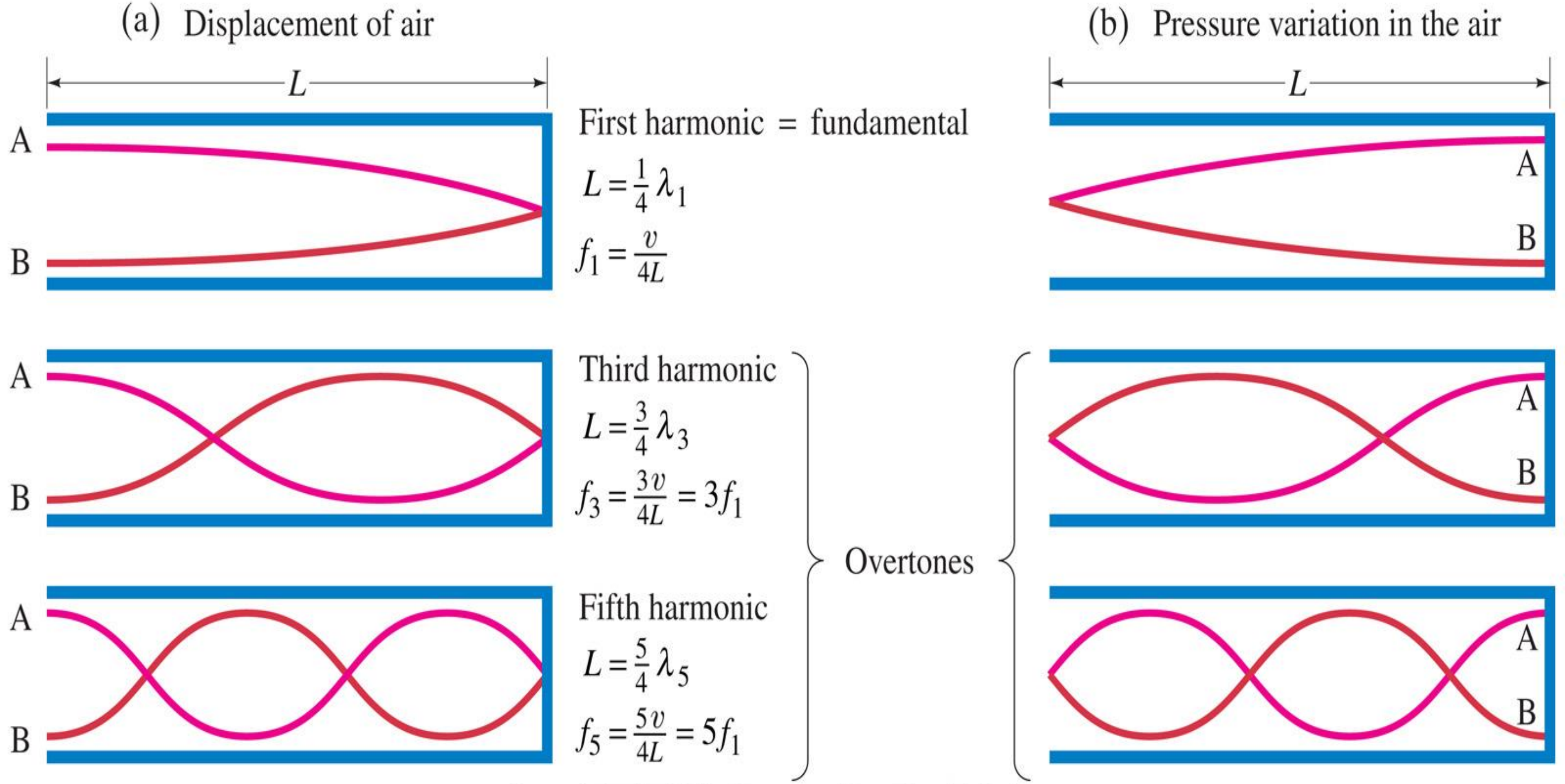
a)
Fundamental: $f_1 = \dfrac{v}{4L}$

b)
Tercer armónico: $f_3 = 3\dfrac{v}{4L} = 3f_1$

c)
Quinto armónico: $f_5 = 5\dfrac{v}{4L} = 5f_1$



TUBE CLOSED AT ONE END

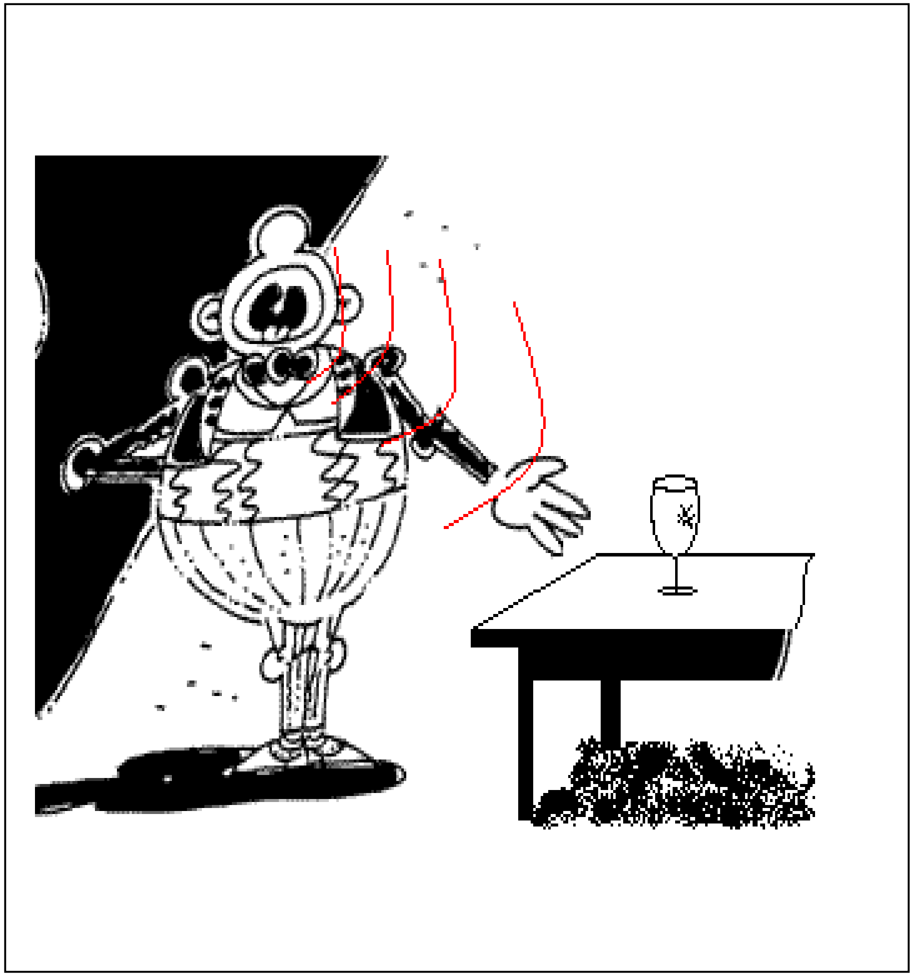


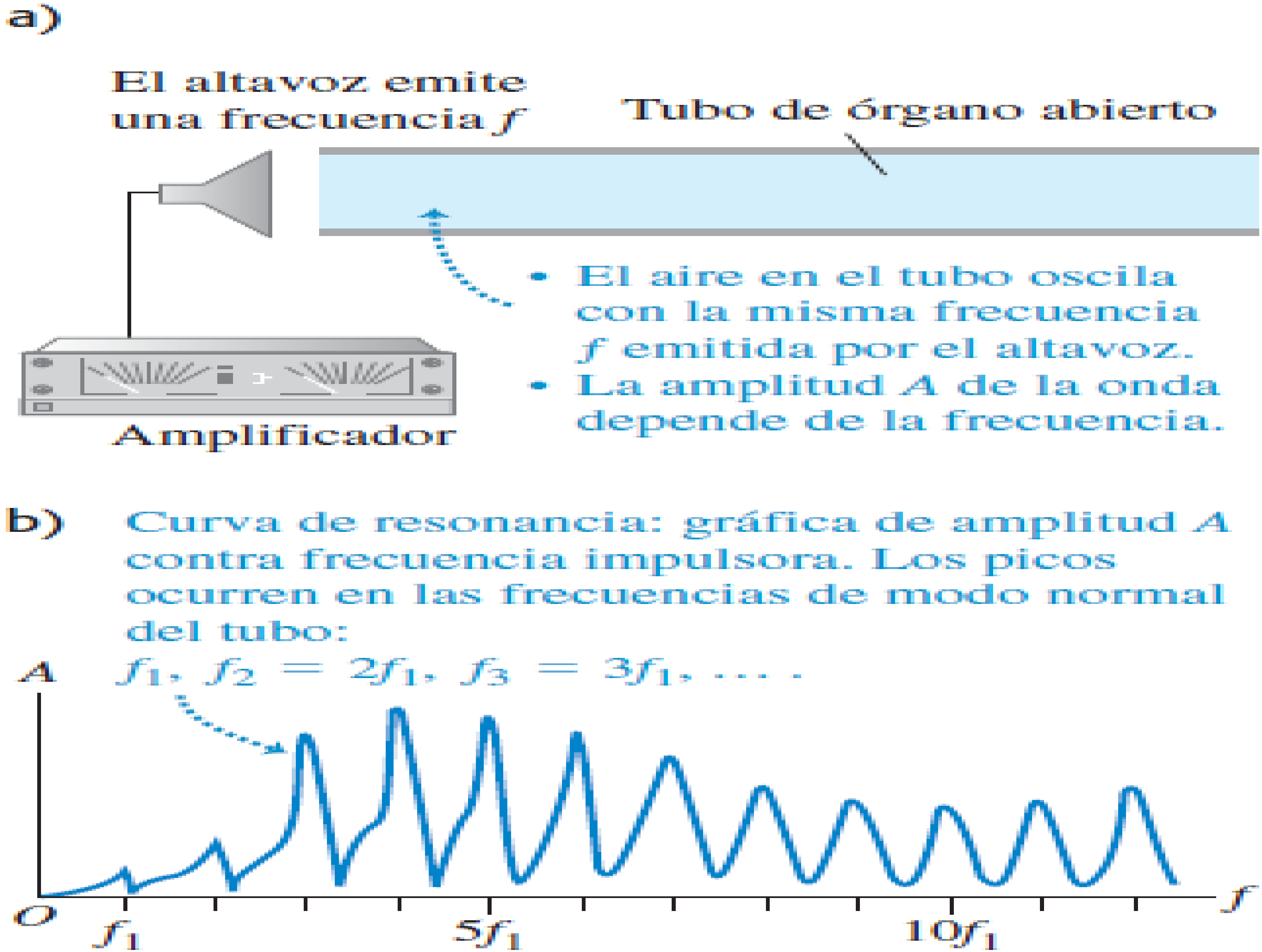
RESONANCIA

Es un refuerzo de la amplitud de vibración por el acoplamiento de otra vibración de frecuencia muy similar.

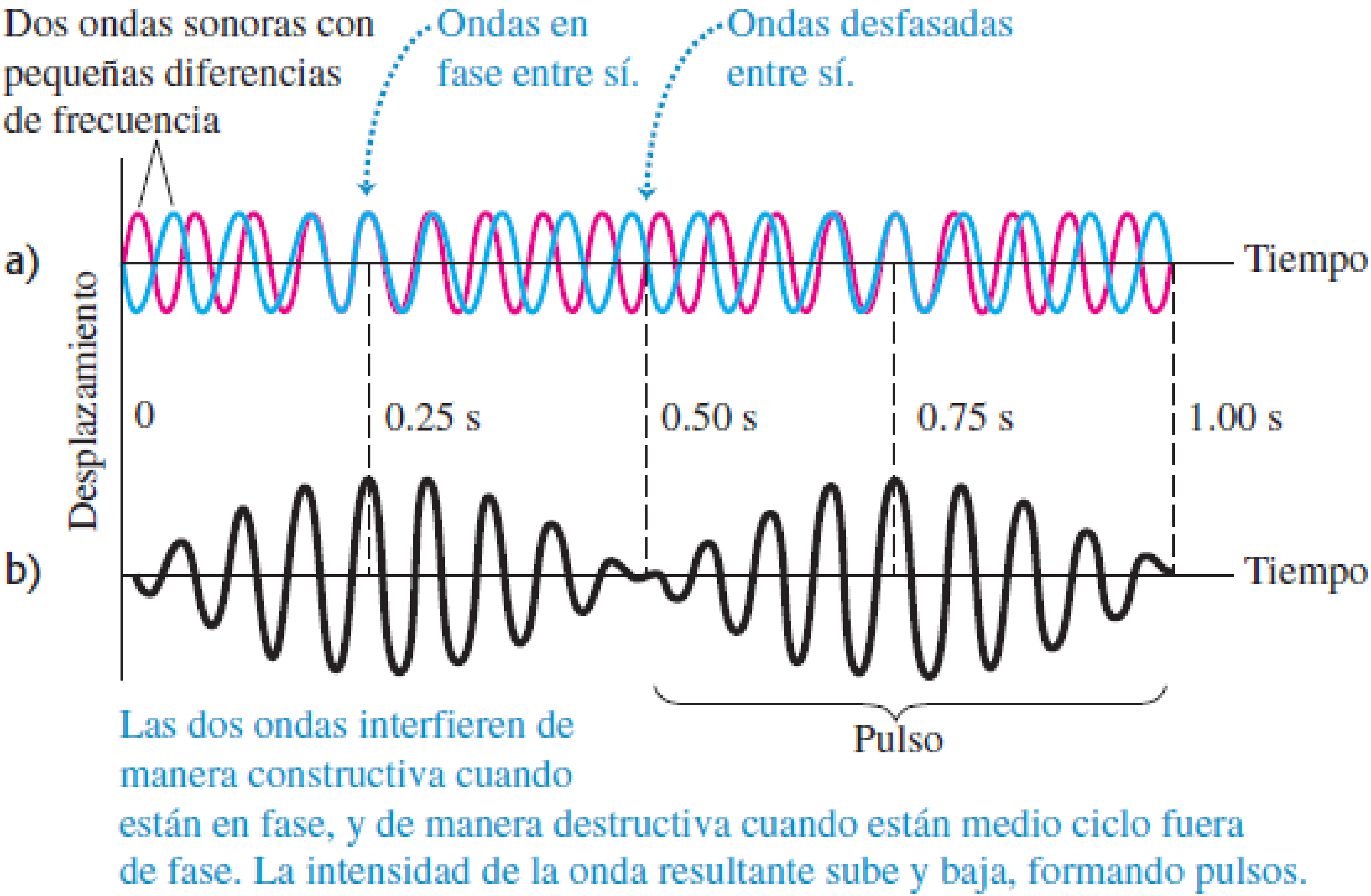
Los cuerpos poseen una frecuencia natural de vibración.

El acoplamiento puede llegar a romper la estructura del cuerpo.




a)
El altavoz emite
una frecuencia f
Tubo de órgano abierto
Amplificador
• El aire en el tubo oscila
con la misma frecuencia
f emitida por el altavoz.
• La amplitud A de la onda
depende de la frecuencia.
b)
Curva de resonancia: gráfica de amplitud A
contra frecuencia impulsora. Los picos
ocurren en las frecuencias de modo normal
del tubo:
$f_1, f_2 = 2f_1, f_3 = 3f_1, \ldots$
A
O
f_1
$5f_1$
$10f_1$
f

Pulsos


Dos ondas sonoras con pequeñas diferencias de frecuencia
Ondas en fase entre sí.
Ondas desfasadas entre sí.
a)
Tiempo
Desplazamiento
0
0.25 s
0.50 s
0.75 s
1.00 s
b)
Tiempo
Pulso
Las dos ondas interfieren de manera constructiva cuando están en fase, y de manera destructiva cuando están medio ciclo fuera de fase. La intensidad de la onda resultante sube y baja, formando pulsos.

La variación de amplitud causa variaciones de volumen llamados pulsos, y la frecuencia con que varía el volumen es la frecuencia del pulso. En este ejemplo, la frecuencia del pulso es la diferencia de las dos frecuencias. Si la frecuencia del pulso es de unos cuantos hertz, la oímos como una ondulación o un pulso del tono.

Podemos demostrar que la frecuencia del pulso siempre es la diferencia de las dos frecuencias fa y fb. Suponga que fa es mayor que fb; los periodos correspondientes son Ta y Tb, con $Ta < Tb$. Si las dos ondas inician desfasadas en $t = 0$, volverán a estar en fase cuando la primera onda haya pasado por exactamente un ciclo más que la segunda. Esto sucederá en $t = T_{pulso}$, el periodo del pulso. Sea *n* el número de ciclos de la primera onda en un tiempo T_{pulso}; el número de ciclos de la segunda onda en el mismo tiempo es (n -1), y tenemos las relaciones:

$$T_{\text{pulso}} = nT_a \qquad \text{y} \qquad T_{\text{pulso}} = (n - 1)T_b$$

Eliminando n entre estas dos ecuaciones:

$$T_{\text{pulso}} = \frac{T_a T_b}{T_b - T_a}$$

El recíproco del periodo de pulso es la *frecuencia* del pulso, $f_{\text{pulso}} = 1/T_{\text{pulso}}$; así que

$$f_{\text{pulso}} = \frac{T_b - T_a}{T_a T_b} = \frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_b}$$

y por último

$$f_{\text{pulso}} = f_a - f_b \qquad \text{(frecuencia del pulso)} \tag{16.24}$$

Como dijimos, la frecuencia del pulso es la diferencia de las dos frecuencias. Al usar la ecuación (16.24), recuerde que f_a es la frecuencia más alta.

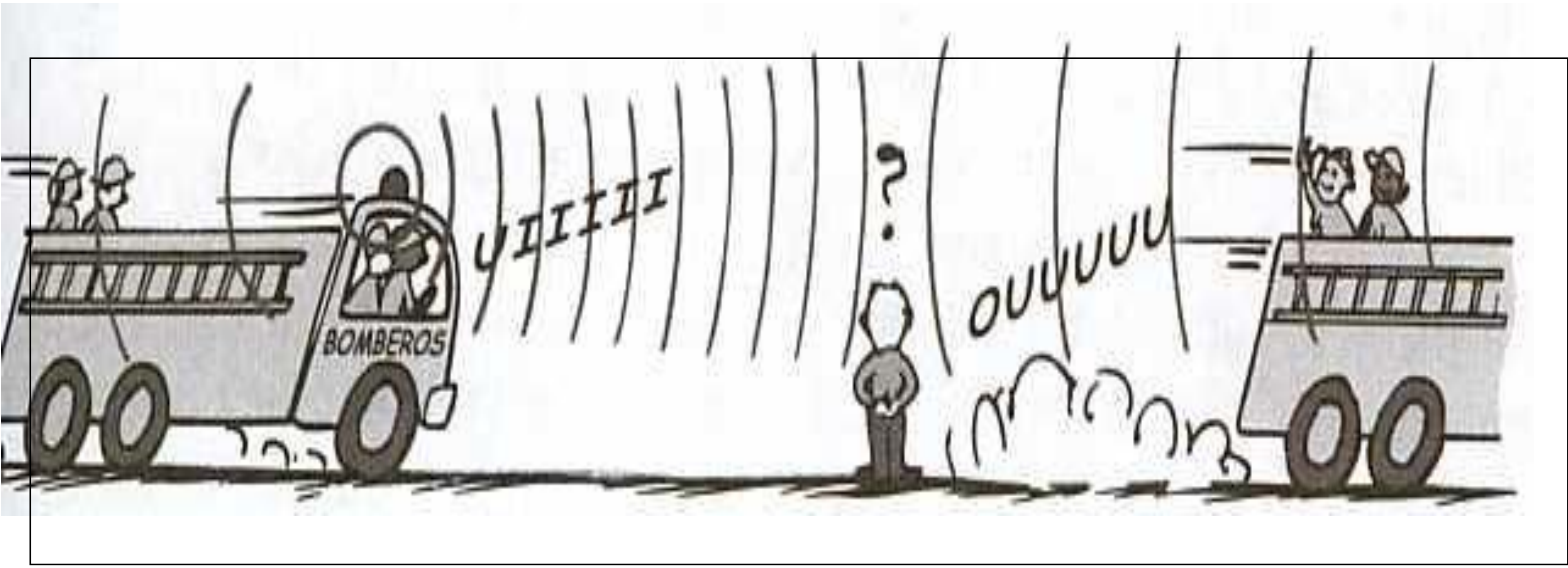
Otra forma de deducir la ecuación (16.24) es escribir funciones que describan las curvas de la figura 16.24a y luego sumarlas. Suponga que, en cierta posición, las dos ondas están dadas por $y_a(t) = A \operatorname{sen} 2\pi f_a t$ y $y_b(t) = -A \operatorname{sen} 2\pi f_b t$. Usamos la identidad trigonométrica

$$\operatorname{sen} a - \operatorname{sen} b = 2 \operatorname{sen} \frac{1}{2}(a - b) \cos \frac{1}{2}(a + b)$$

Ahora podemos expresar la onda total $y(t) = y_a(t) + y_b(t)$ como

$$y_a(t) + y_b(t) = \left[2A \operatorname{sen} \frac{1}{2}(2\pi)(f_a - f_b)t\right] \cos \frac{1}{2}(2\pi)(f_a + f_b)t$$

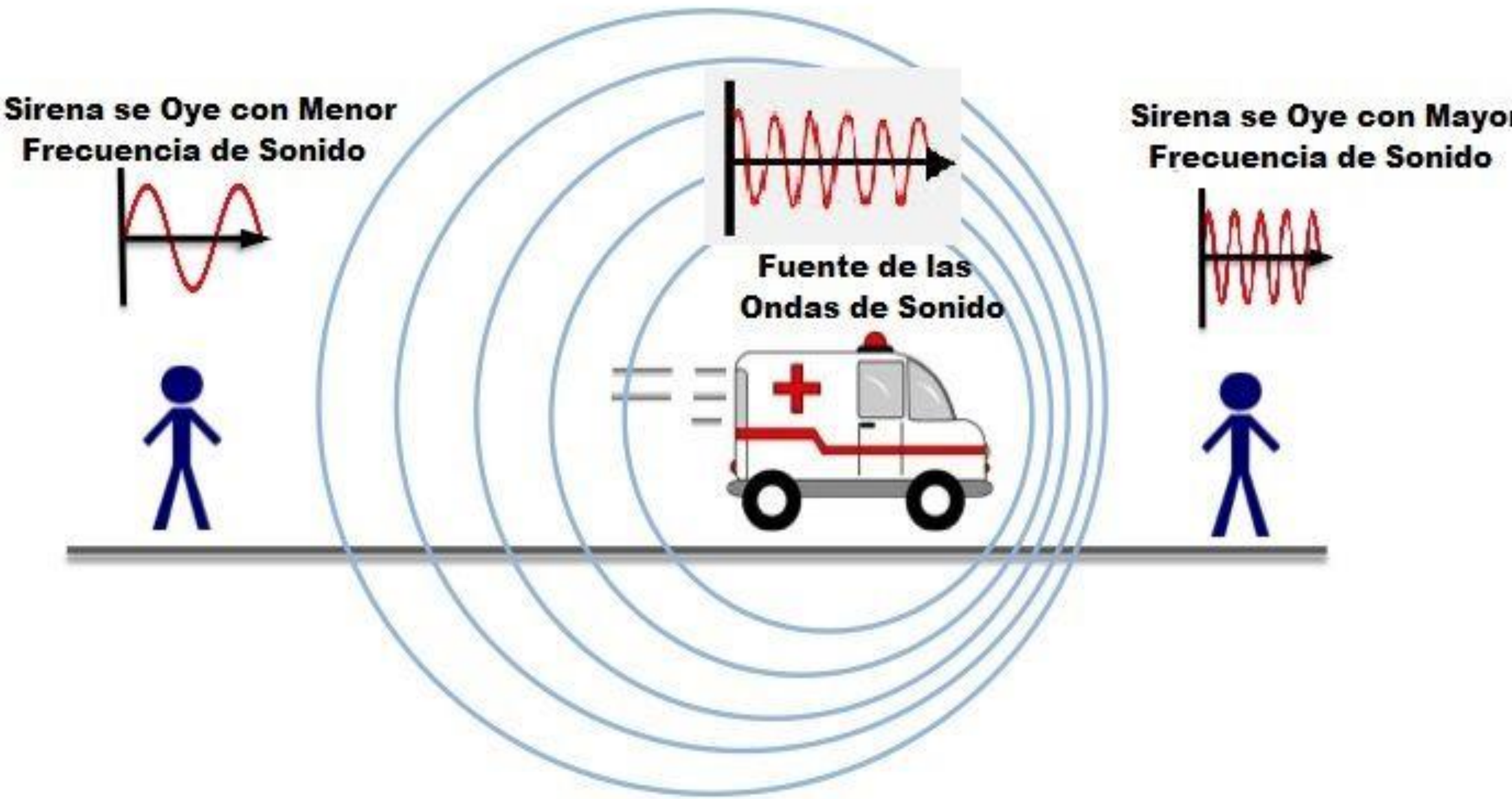
EFECTO DOPPLER



Se manifiesta al existir movimiento relativo entre la fuente emisora y el receptor.

- **Si la fuente se acerca al receptor**, la frecuencia escuchada por éste será mayor que la frecuencia emitida.
- **Si la fuente se aleja del receptor**, la frecuencia escuchada por éste será menor que la frecuencia emitida.

EFECTO DOPPLER

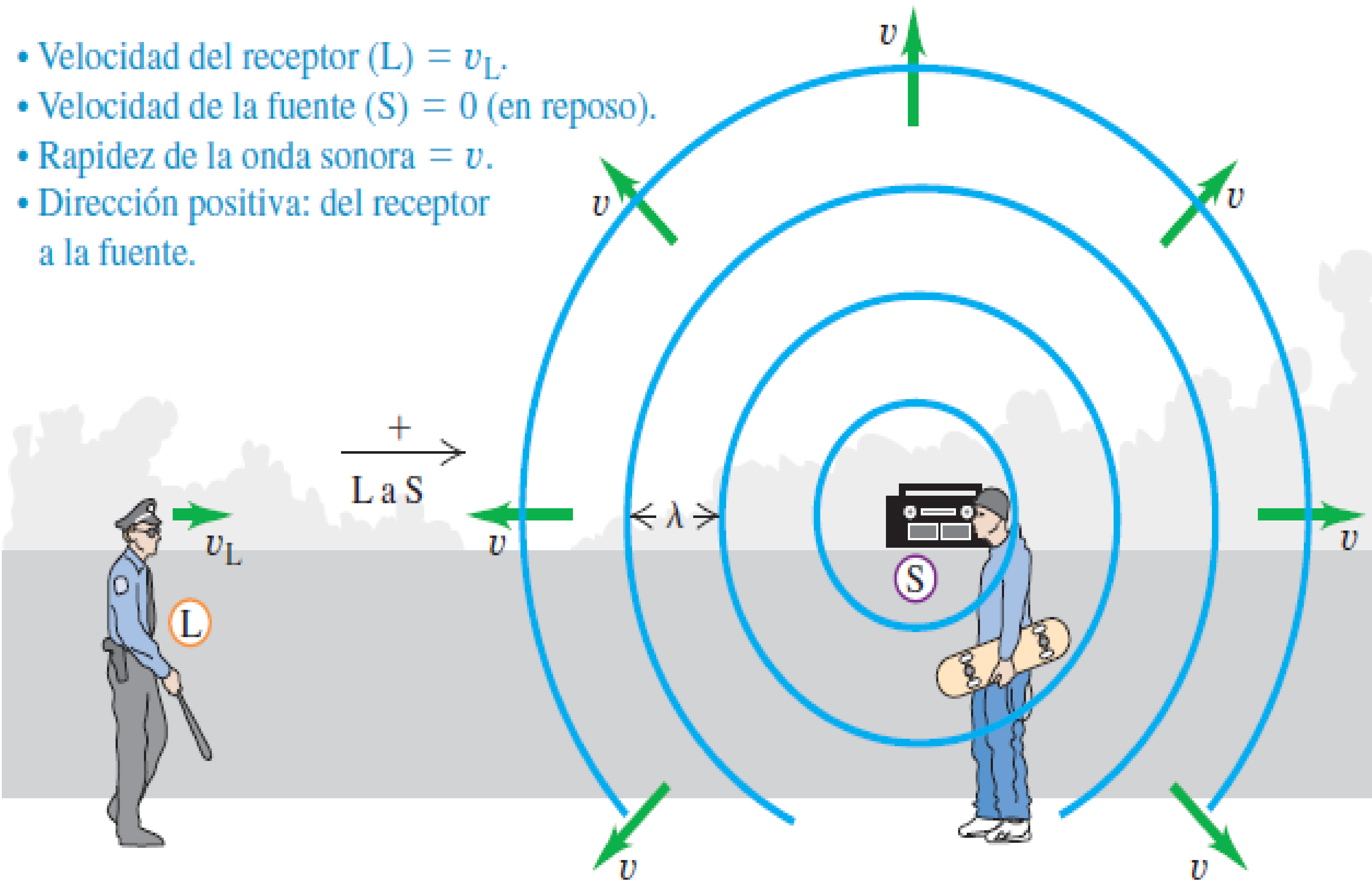


- El efecto Doppler, llamado así por Christian Andreas Doppler, consiste en la variación de la VELOCIDAD de cualquier tipo de ONDA emitida o recibida por un objeto en movimiento. Doppler propuso este efecto en 1842 en una monografía titulada "Sobre el color de la luz en estrellas binarias y otros astros“

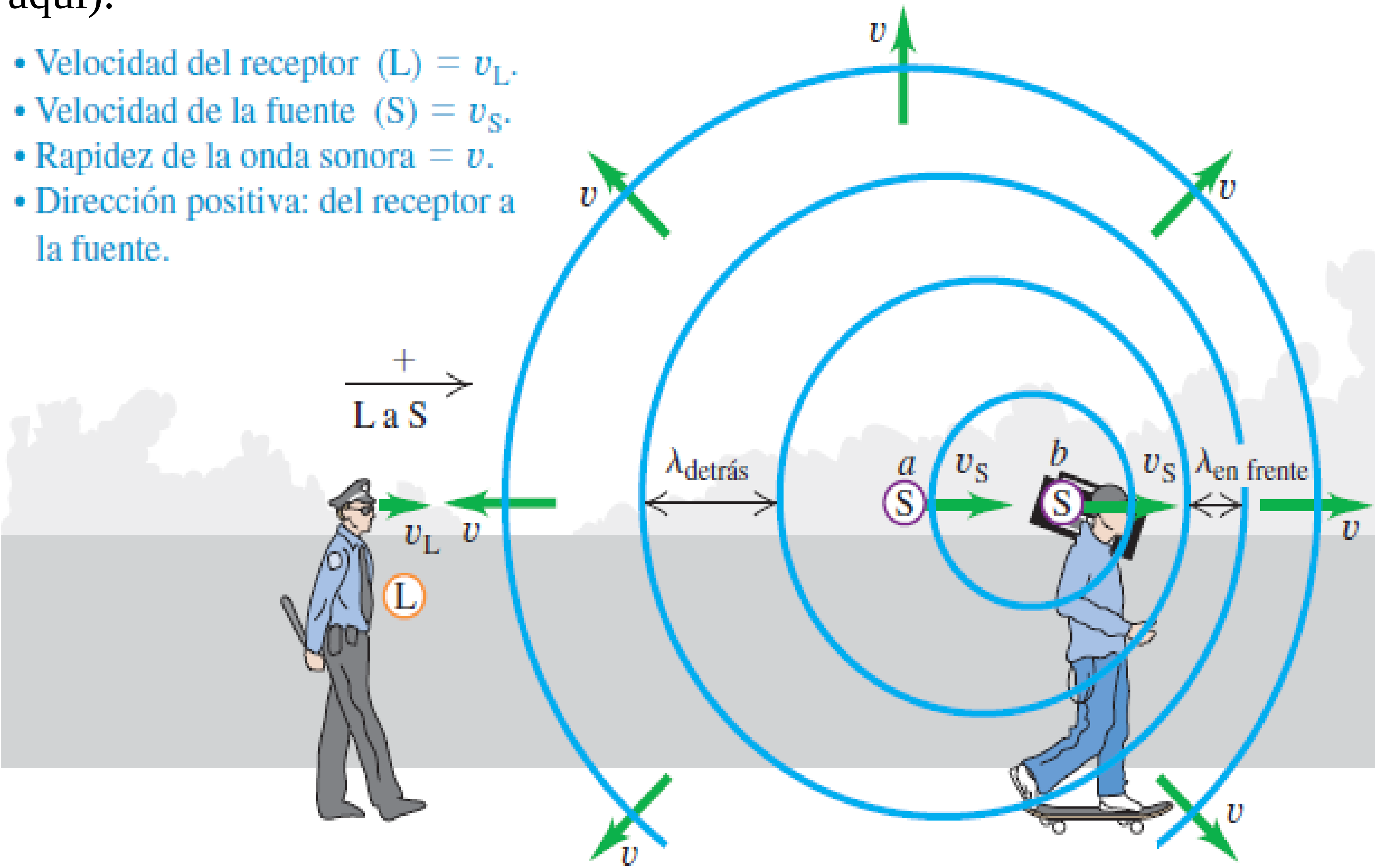
- Su hipótesis fue investigada en 1845 para el caso de ONDAS SONORAS por el científico holandés Christoph Hendrik Diederik Buys Ballot, confirmando que el TONO de un sonido emitido por una fuente que se aproxima al observador es más agudo que si la fuente se aleja.

- Hoppolyte Fizeau descubrió independientemente el mismo fenómeno en el caso de ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS en 1848. Por lo que en Francia este efecto se conoce como "Efecto Doppler-Fizeau".

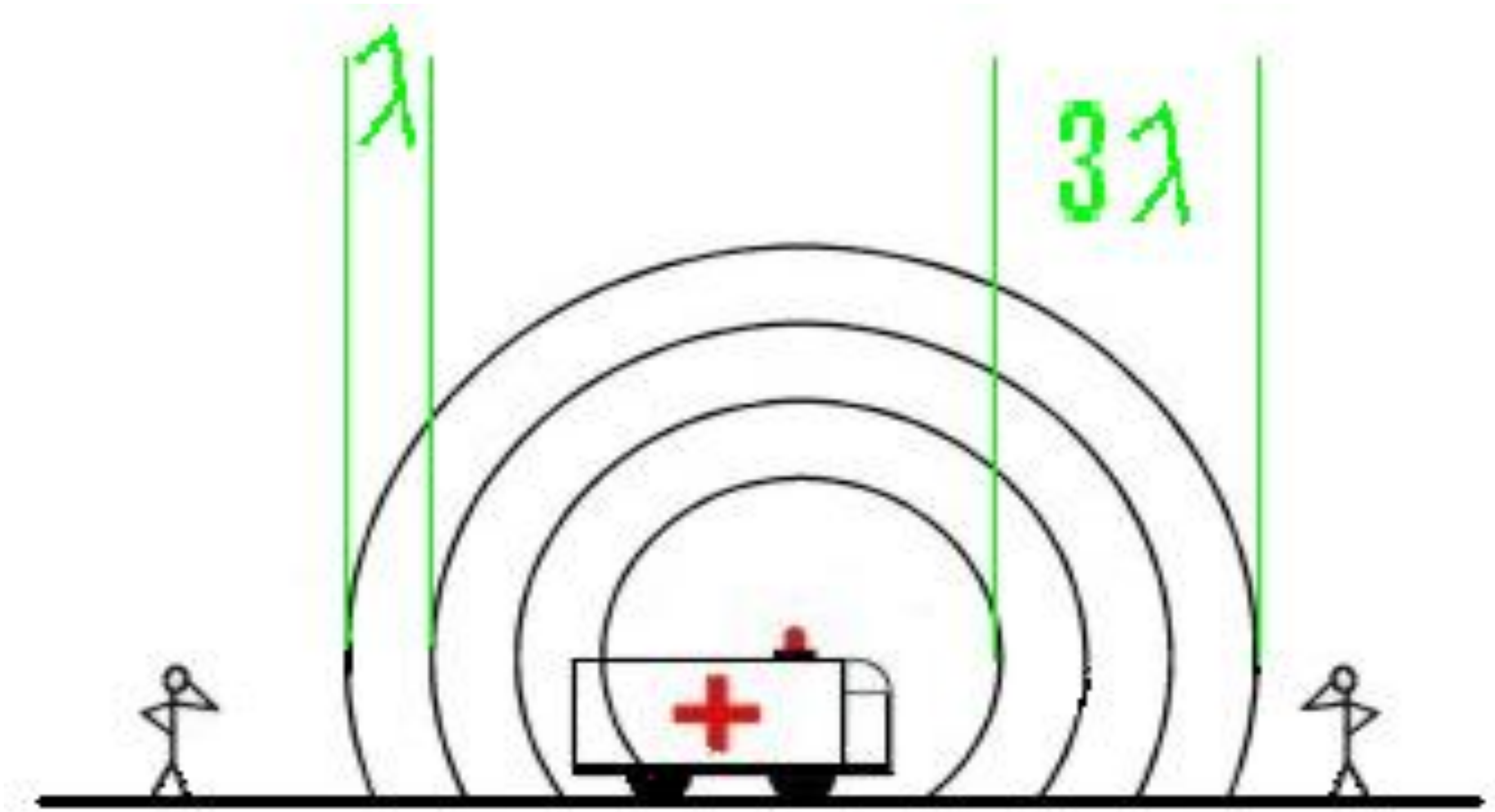
Un receptor que se mueve hacia una fuente estacionaria oye una frecuencia más alta que la frecuencia con que está emitiendo la fuente.



Las crestas de ondas emitidas por una fuente móvil se juntan al frente de la fuente (a la derecha en este caso) y se separan detrás (a la izquierda aquí).



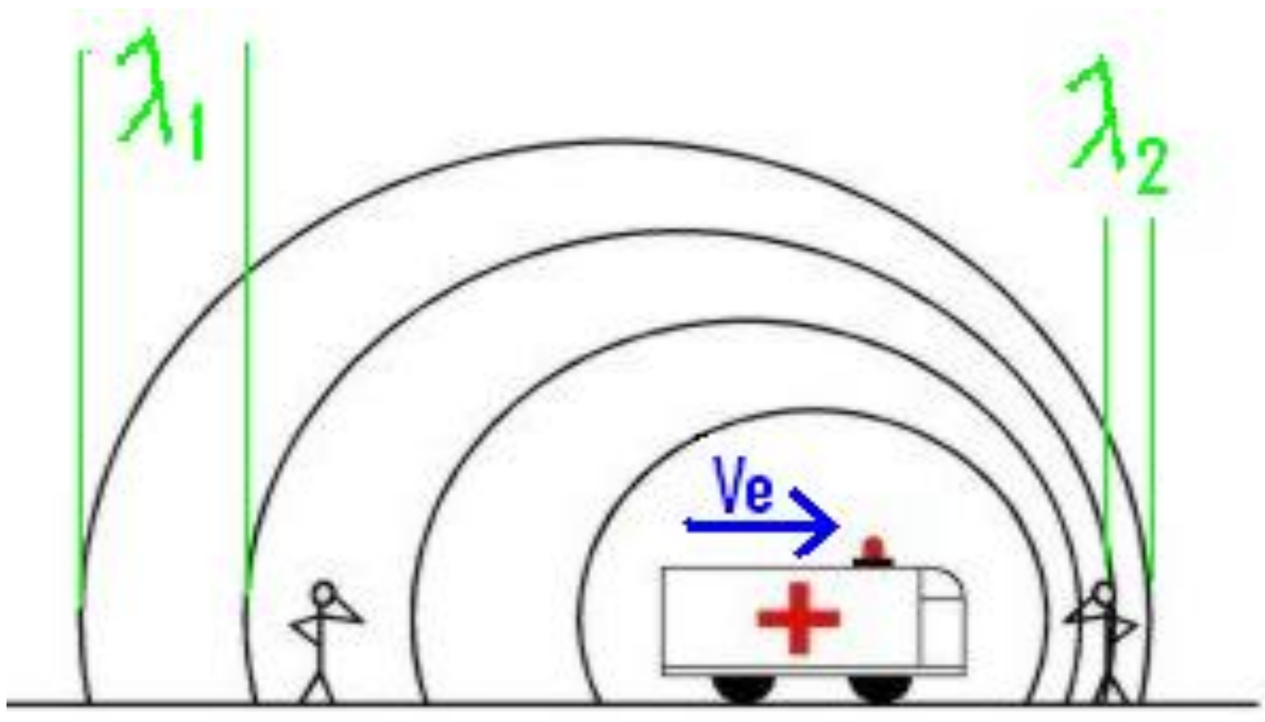
- Una fuente o emisor, inmóvil, emite un sonido, y el receptor también inmóvil escucha este sonido. La velocidad con que viaja este sonido es $v = \lambda f$. Un observador o receptor escucha este sonido con esa velocidad, con esa longitud de onda y con esa frecuencia.



- Ambos observadores recibirán el mismo sonido puesto que ambos escucharan dicho sonido con las mismas características (v, λ, f).

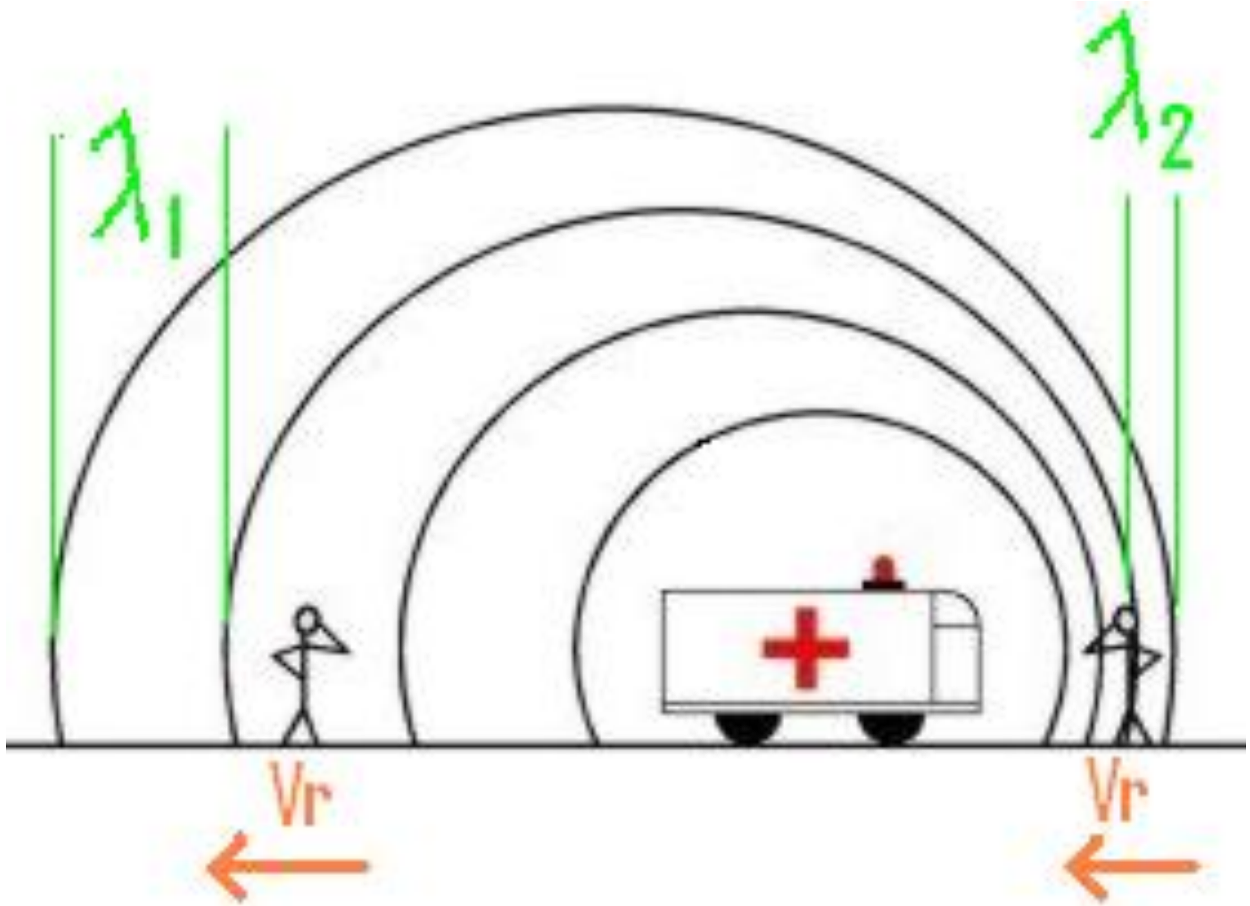
Si el emisor se encuentra en movimiento, y el receptor inmóvil escucha este sonido. La rapidez con que viaja este sonido es $v = \lambda f$, pero además el emisor se encuentra viajando con velocidad *Ve*, la rapidez del sonido, será entonces **la suma de estas velocidades**.

El observador o receptor escucha este sonido con esa nueva velocidad.



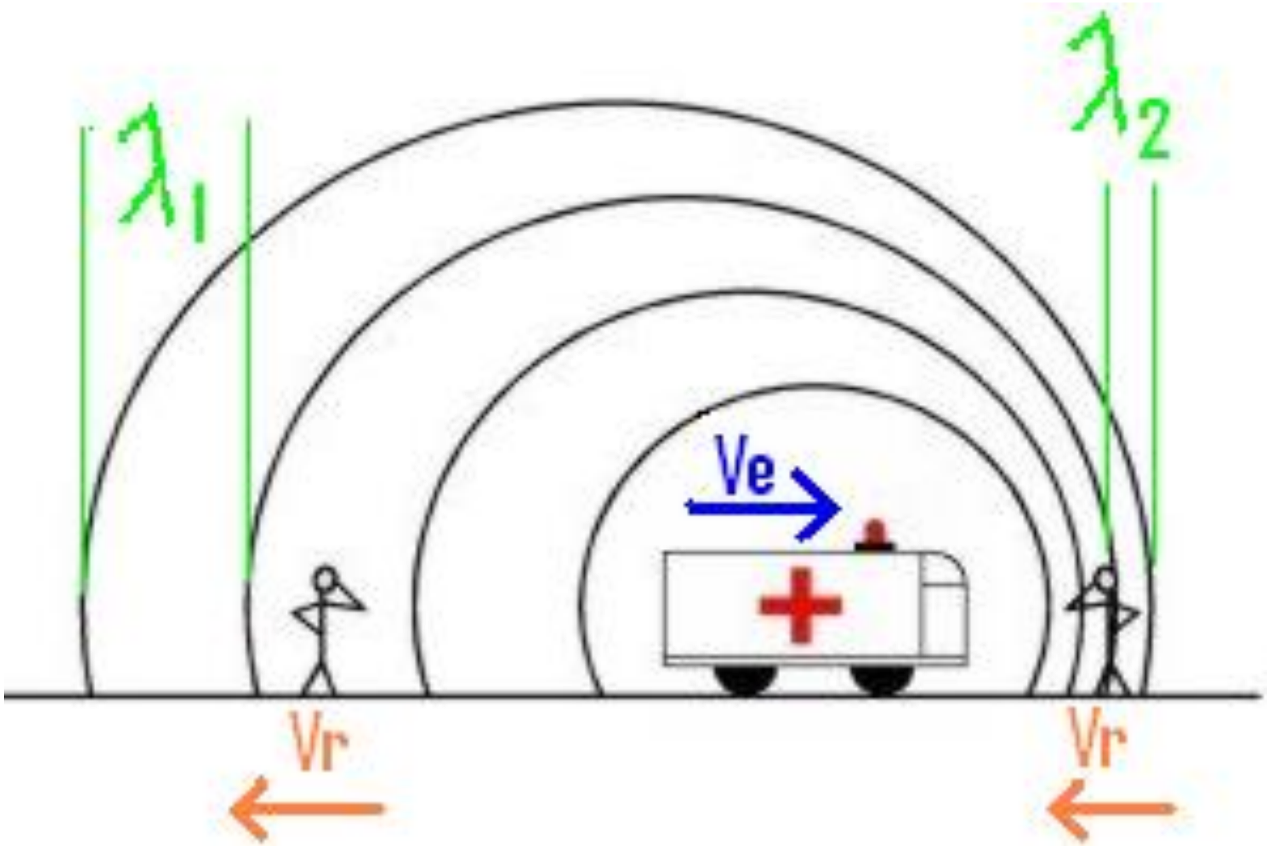
Note del esquema que el sonido llegará a ambos observadores con distintas características (v, λ, f), por lo que **escucharán sonidos distintos.**

Si el emisor se encuentra inmóvil, y el receptor se mueve al escuchar este sonido. La rapidez de este sonido es $Vv = \lambda f$, pero además el receptor se encuentra viajando con velocidad *Vr*, la rapidez del sonido, será entonces la suma de estas velocidades. El observador o receptor escucha este sonido con esa nueva velocidad.



Por lo que ocurre el mismo efecto anterior. El sonido llegará a ambos observadores con distintas características (v, λ, f)

Si el emisor se encuentra en movimiento, y el receptor también, la rapidez de este sonido es $v = \lambda \cdot f$, pero además el receptor se encuentra viajando con velocidad *Vr* y el emisor con velocidad *Ve*, la rapidez del sonido, será entonces la suma de estas velocidades.



Note que a un observador le llega el sonido primero que al otro, por lo que nuevamente ambos escuchan un sonido distinto, con características distintas (v, λ, f).

Nótese que si cambia la velocidad del sonido recibido, producto del movimiento del emisor, del receptor, o de ambos, lo que cambiará en el sonido son sus características como λ o f **al ser escuchado.**

NO ASÍ EL SONIDO EMITIDO POR LA FUENTE, QUE ES SIEMPRE EL MISMO.

Álgebra del efecto Doppler en ondas sonoras

Imaginemos primero que un receptor L se mueve con una velocidad v_L hacia a fuente, S, en reposo, $v_S=0$.

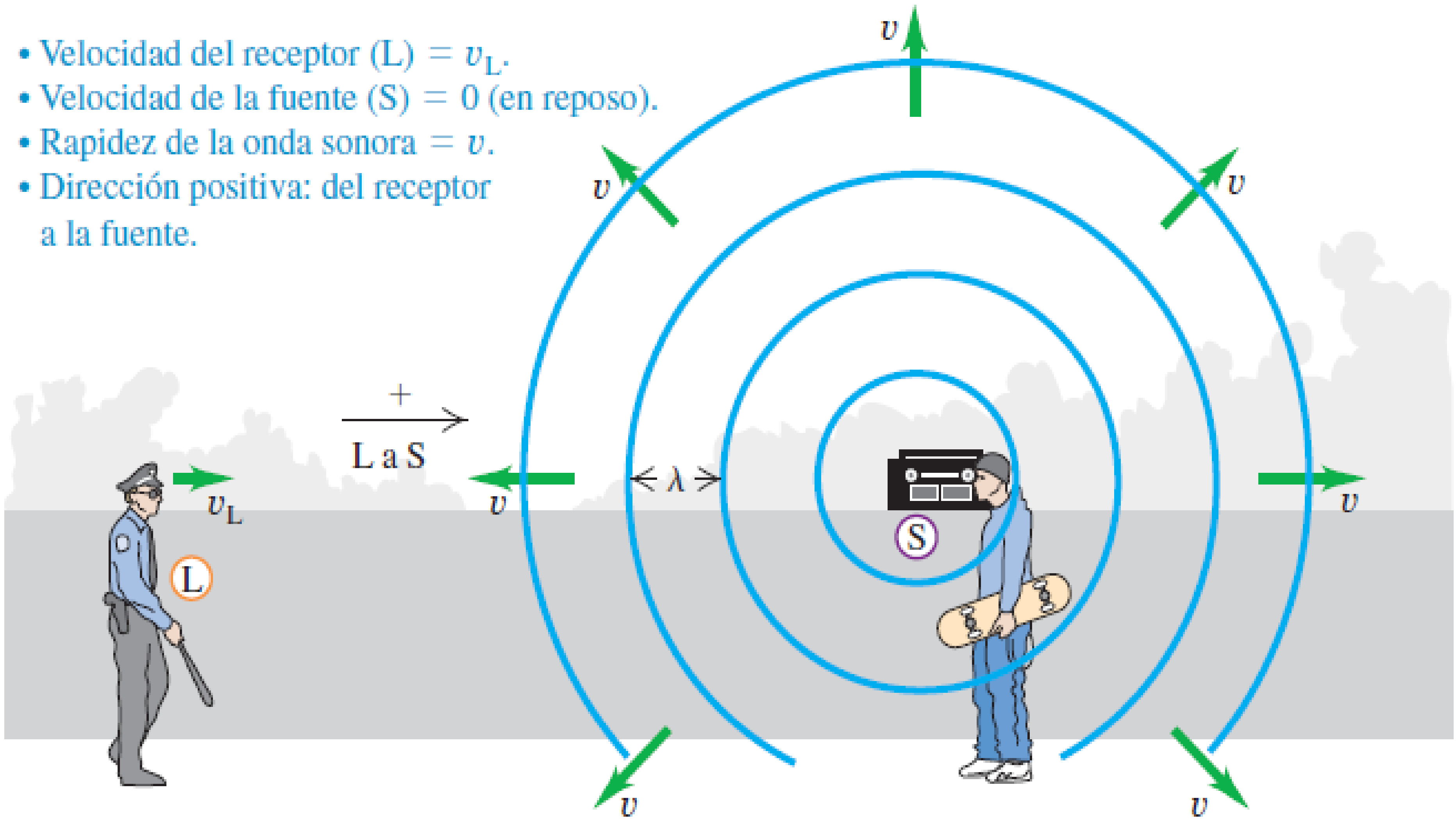
La fuente emite una onda sonora con frecuencia f_S y longitud de onda $\lambda = v/f_S$.

Las crestas se acercan al receptor en movimiento tienen una rapidez de propagación relativa al receptor de $(v + v_L)$, de manera que la frecuencia f_L con que las ondas llegan a la posición del receptor, esto es, la frecuencia que el receptor oye es:

O bien:

$$f_L = \frac{v + v_L}{\lambda} = \frac{v + v_L}{v/f_S}$$

$$f_L = \left(\frac{v + v_L}{v}\right) f_S = \left(1 + \frac{v_L}{v}\right) f_S \quad \text{(receptor móvil, fuente estacionaria)}$$



Así, un receptor que se mueve hacia una fuente ($v_L > 0$), como en la figura , oye una frecuencia más alta (tono más agudo) que un receptor estacionario. Un receptor que se aleja de la fuente ($v_L < 0$) oye una frecuencia más baja (tono más grave).

Supongamos ahora que la fuente también se mueve, con velocidad v_S
La rapidez de la onda respecto del aire sigue siendo v, está determinada por las propiedades del medio y no cambia por el movimiento de la fuente.

Sin embargo a longitud de onda no es igual.

El tiempo que tarda en emitir un ciclo es el período:

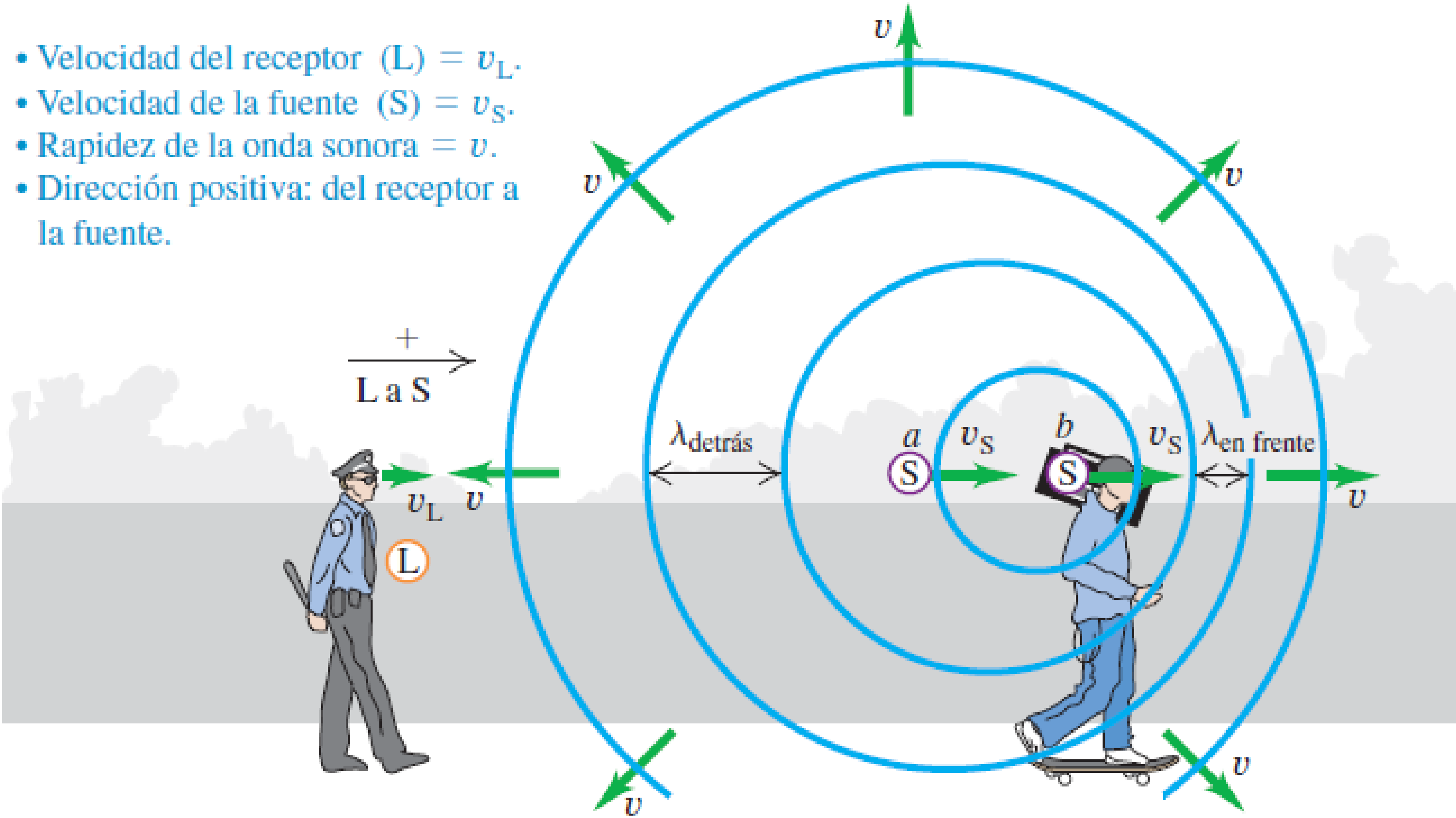
$$T = \frac{1}{f_S}$$

Durante este tiempo la onda viaja una distancia:

$$vT = \frac{v}{f_S}$$

Y la fuente se mueve una distancia:

$$v_S T = \frac{v_S}{f_S}$$


• Velocidad del receptor (L) = v_L.
• Velocidad de la fuente (S) = v_S.
• Rapidez de la onda sonora = v.
• Dirección positiva: del receptor a la fuente.
+
L a S
v_L
v
L
$\lambda_{\text{detrás}}$
$\lambda_{\text{en frente}}$
a
b
S
v_S
v

Las ondas que están por delante de la fuente la longitud de onda es:

$$\lambda_{\text{al frente}} = \frac{v}{f_S} - \frac{v_S}{f_S} = \frac{v - v_S}{f_S} \qquad \text{(longitud de onda adelante de una fuente móvil)}$$

En la región que está detrás de la fuente la longitud de onda será:

$$\lambda_{\text{detrás}} = \frac{v + v_S}{f_S} \qquad \text{(longitud de onda atrás de una fuente móvil)}$$

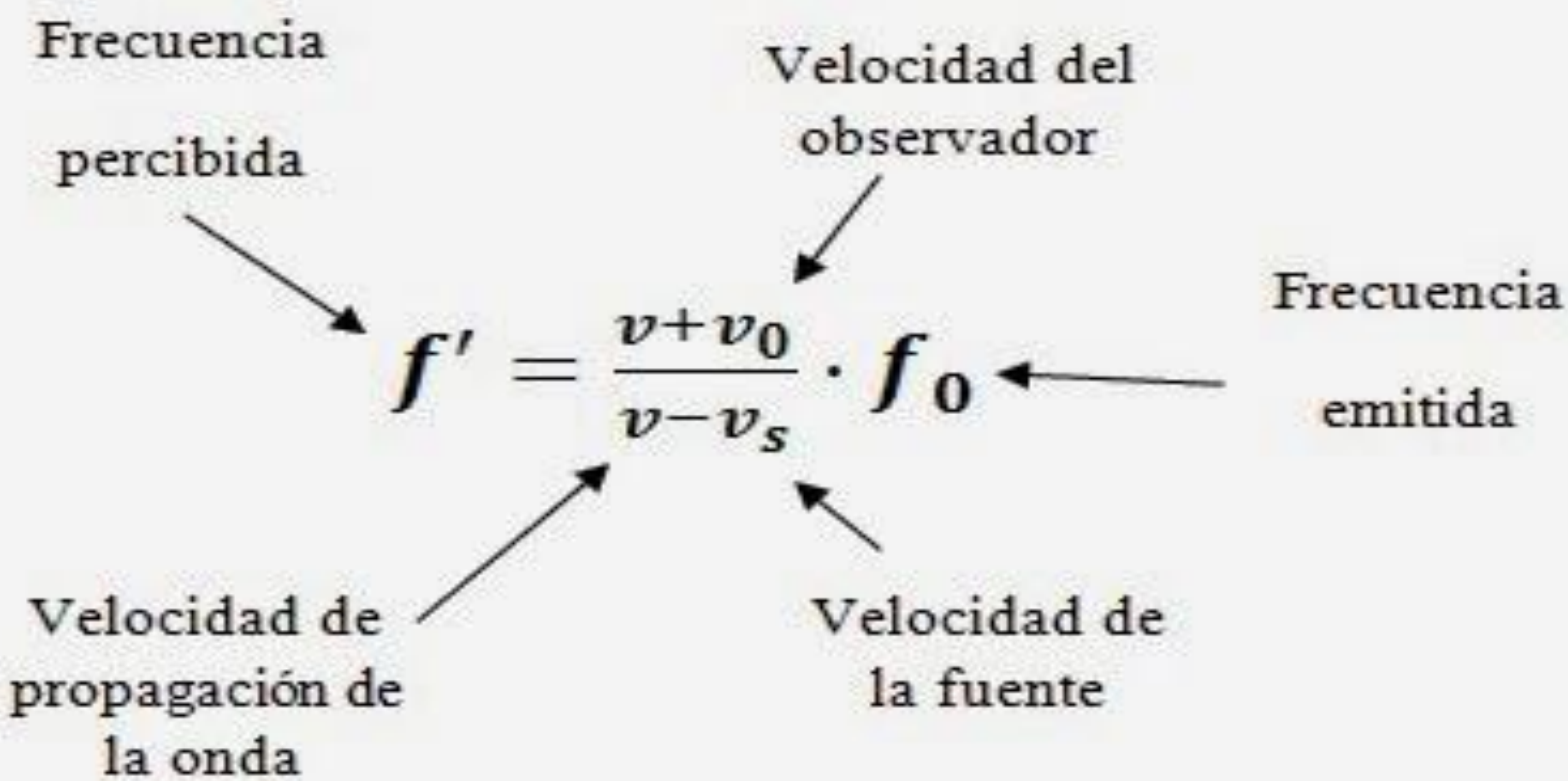
Así, las longitudes de onda adelante y atrás de la fuente se comprimen y se estiran, respectivamente por el movimiento de la fuente.

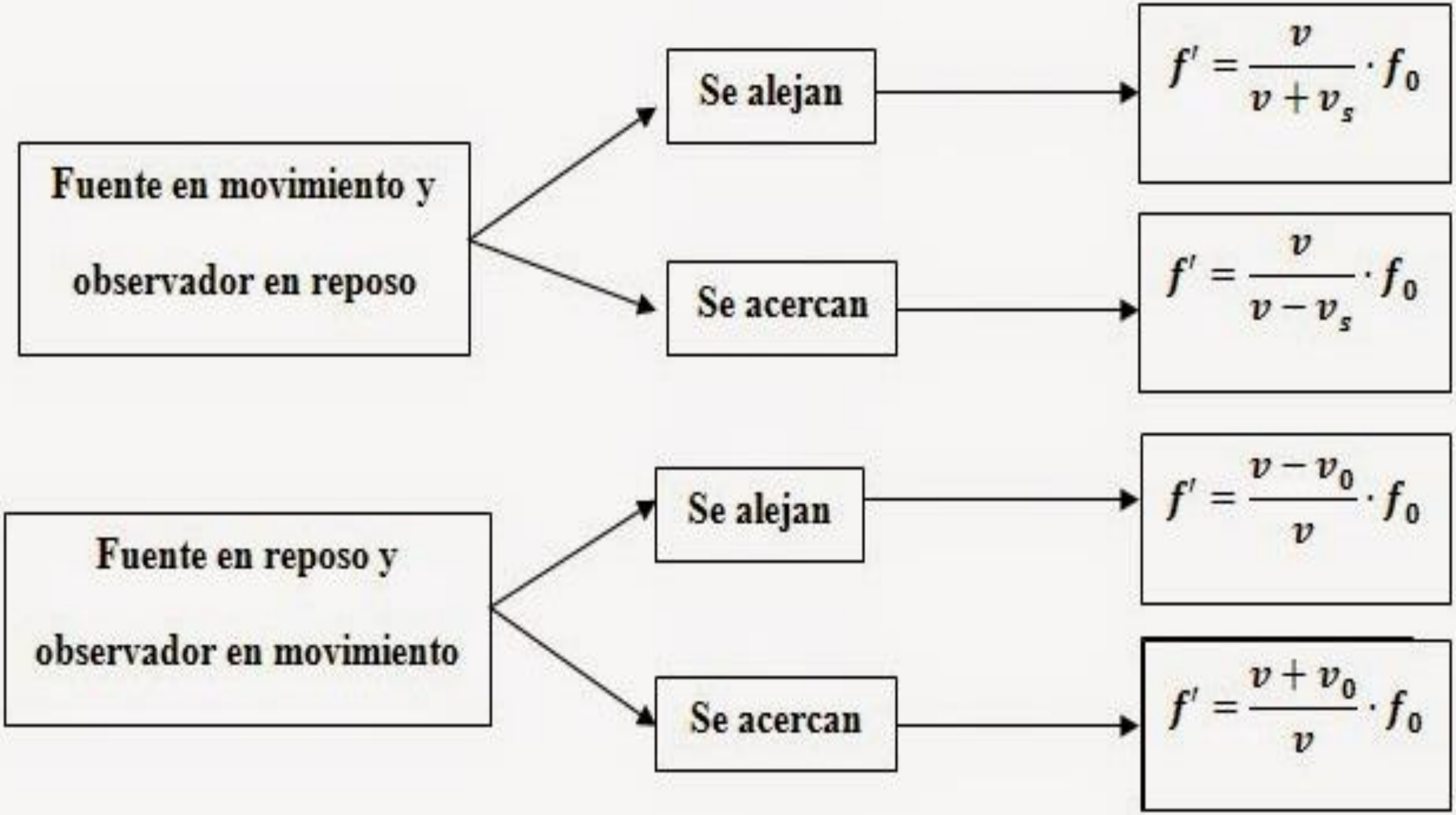
$$f_L = \frac{v + v_L}{\lambda} = \frac{v + v_L}{v + v_S / f_S}$$

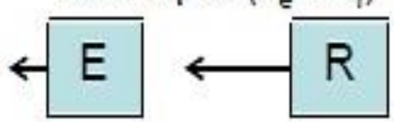
Entonces queda:

$$f_L = \frac{v + v_L}{v + v_S} f_S \qquad \text{(efecto Doppler, fuente móvil y receptor móvil)}$$

Como ejemplo, la frecuencia oída por un receptor en reposo ($v_L = 0$) es $f_L = [v/(v + v_S)]f_S$. Si la fuente se mueve hacia el receptor (en la dirección negativa), entonces $v_S < 0$, $f_L > f_S$, y el receptor escucha una frecuencia mayor que la emitida por la fuente. En cambio, si la fuente se mueve alejándose del receptor (en la dirección positiva), entonces $v_S > 0$, $f_L < f_S$, y el receptor oye una frecuencia menor.




Fuente en movimiento y observador en reposo
Se alejan
$f' = \frac{v}{v + v_s} \cdot f_0$
Se acercan
$f' = \frac{v}{v - v_s} \cdot f_0$
Fuente en reposo y observador en movimiento
Se alejan
$f' = \frac{v - v_0}{v} \cdot f_0$
Se acercan
$f' = \frac{v + v_0}{v} \cdot f_0$

Acercamiento			Alejamiento		
$f_1 = f\dfrac{V+V_r}{V-V_e}$	(a)	simultáneo 	simultáneo 	(d)	$f_1 = f\dfrac{V-V_r}{V+V_e}$
$f_1 = f\dfrac{V-V_r}{V-V_e}$	(b)	del emisor ($V_e > V_r$) 	del emisor ($V_e > V_r$) 	(e)	$f_1 = f\dfrac{V+V_r}{V+V_e}$
$f_1 = f\dfrac{V+V_r}{V+V_e}$	(c)	del receptor ($V_e < V_r$) 	del receptor ($V_e < V_r$) 	(f)	$f_1 = f\dfrac{V-V_r}{V-V_e}$

IDENTIFICAR *los conceptos relevantes:* El efecto Doppler se presenta siempre que una fuente de ondas, el detector de las ondas (receptor) o ambos están en movimiento.

PLANTEAR *el problema* siguiendo estos pasos:

1. Establezca un sistema de coordenadas. Defina la dirección positiva como la que va del receptor a la fuente, y asegúrese de conocer los signos de todas las velocidades pertinentes. Una velocidad en la dirección del receptor a la fuente es positiva; una en la dirección opuesta es negativa. Todas las velocidades deben medirse relativas al aire en el que viaja el sonido.
2. Use una notación consistente para identificar las cantidades: subíndice S para la fuente (*source*), L para el receptor (*listener*).
3. Determine cuáles son las incógnitas.

EJECUTAR *la solución* de la siguiente manera:

1. Use la ecuación (16.29) para relacionar las frecuencias en la fuente y en el receptor, la rapidez del sonido y las velocidades de la fuente y el receptor. Si la fuente está en movimiento, se puede obtener la longitud de onda medida por el escucha empleando la ecuación (16.27) o la (16.28).
2. Si una onda se refleja de una superficie, sea estacionaria o móvil, el análisis puede efectuarse en dos pasos. En el primero, la superficie hace las veces de receptor; la frecuencia con que las crestas de onda llegan a la superficie es f_L. Luego, considere la superficie como nueva fuente, que emite ondas con esta misma frecuencia f_L. Por último, determine qué frecuencia oye un receptor que detecta esta nueva onda.

EVALUAR *la respuesta:* Vea si su resultado final es lógico. Si la fuente y el receptor se están acercando entre sí, $f_L > f_S$; si se están alejando, $f_L < f_S$. Si la fuente y el receptor no tienen movimiento relativo, $f_L = f_S$.

$$f_L = \frac{v + v_L}{v + v_S} f_S \quad \text{(efecto Doppler, fuente móvil y receptor móvil)} \qquad (16.29)$$

$$\lambda_{\text{al frente}} = \frac{v}{f_S} - \frac{v_S}{f_S} = \frac{v - v_S}{f_S} \quad \text{(longitud de onda adelante de una fuente móvil)} \qquad (16.27)$$

$$\lambda_{\text{detrás}} = \frac{v + v_S}{f_S} \quad \text{(longitud de onda atrás de una fuente móvil)} \qquad (16.28)$$

Ejemplo 16.15 Efecto Doppler I: Longitudes de onda

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

SOLUCIÓN

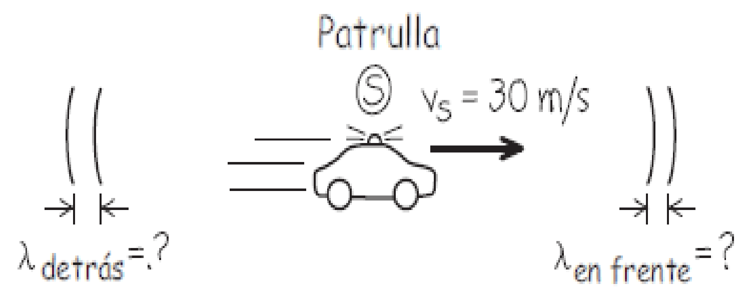
IDENTIFICAR: El efecto Doppler no interviene en el inciso *a*), ya que ni la fuente ni el receptor están en movimiento. En el inciso *b*), la fuente está en movimiento, así que deberemos considerar el efecto Doppler.

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

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

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

16.29 Nuestro esquema de este problema.



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

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

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

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

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

Ejemplo 16.16 Efecto Doppler II: Frecuencias

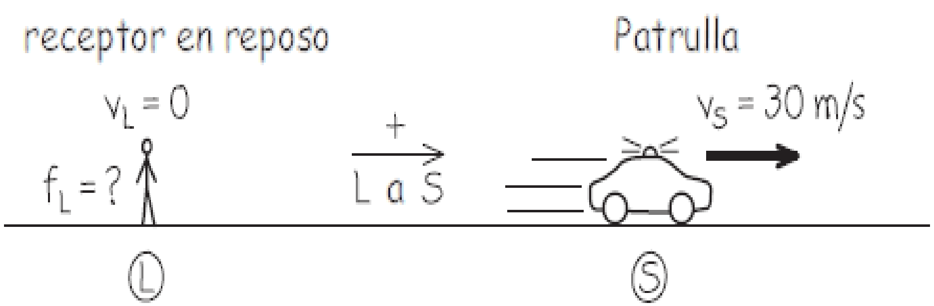
Si un receptor L está en reposo y la sirena del ejemplo 16.15 se aleja de L a 30 m/s, ¿qué frecuencia oye el receptor?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Nuestra incógnita es la frecuencia f_L que escucha el receptor, quien está detrás de la fuente móvil.

PLANTEAR: La figura 16.30 muestra la situación. Conocemos $f_S = 300$ Hz por el ejemplo 16.15, y tenemos $v_L = 0$ y $v_S = 30$ m/s. (La velocidad de la fuente v_S es positiva porque la sirena se mueve en la dirección que va del receptor a la fuente.)

16.30 Nuestro esquema de este problema.



EJECUTAR: Por la ecuación (16.29),

$$f_L = \frac{v}{v + v_S} f_S = \frac{340 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} + 30 \text{ m/s}} (300 \text{ Hz}) = 276 \text{ Hz}$$

EVALUAR: La fuente y el receptor se están separando, así que la frecuencia f_L oída por el receptor es menor que la frecuencia f_S emitida por la fuente.

Veamos otro enfoque que nos puede servir para comprobar nuestro resultado. Por el ejemplo 16.15, la longitud de onda detrás de la fuente (que es donde está parado el receptor de la figura 16.30) es 1.23 m, así que

$$f_L = \frac{v}{\lambda} = \frac{340 \text{ m/s}}{1.23 \text{ m}} = 276 \text{ Hz}$$

Aunque la fuente se está moviendo, no cambia la rapidez de la onda v relativa al receptor estacionario.

Ejemplo 16.17 Efecto Doppler III: Un receptor móvil

Si la sirena está en reposo y el receptor se mueve alejándose de la sirena a 30 m/s, ¿qué frecuencia oye?

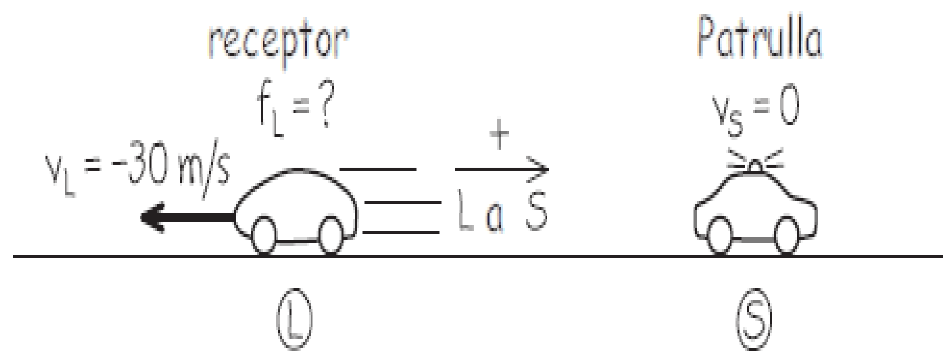
SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: De nuevo nuestra variable es la frecuencia f_L escuchada por el receptor, pero ahora el receptor está en movimiento y la fuente está en reposo.

PLANTEAR: La figura 16.31 muestra la situación. La dirección positiva (del receptor a la fuente) sigue siendo de izquierda a derecha, así que $v_L = -30$ m/s.

EJECUTAR: Por la ecuación (16.29),

$$f_L = \frac{v + v_L}{v} f_S = \frac{340 \text{ m/s} + (-30 \text{ m/s})}{340 \text{ m/s}} (300 \text{ Hz}) = 274 \text{ Hz}$$



16.31 Nuestro esquema de este problema.

EVALUAR: Otra vez, la frecuencia que el receptor oye es menor que la de la fuente. La *velocidad relativa* de la fuente y el receptor es la misma que en el ejemplo anterior, pero el desplazamiento Doppler es distinto porque las velocidades relativas al *aire* son distintas.

Ejemplo 16.18 Efecto Doppler IV: Fuente en movimiento, receptor en movimiento

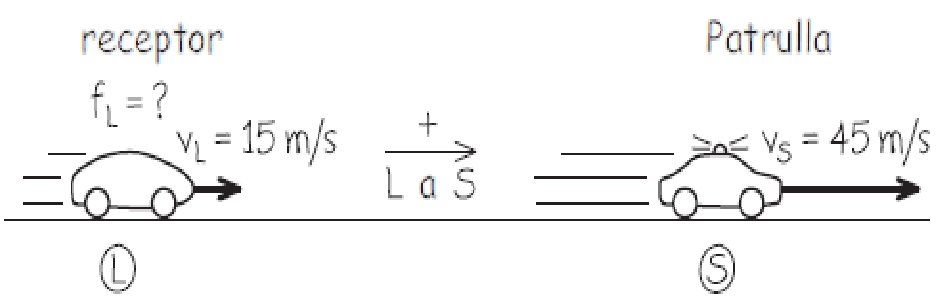
Si la sirena se está alejando del receptor con una rapidez de 45 m/s relativa al aire, y el receptor se mueve hacia la sirena con una rapidez de 15 m/s relativa al aire (figura 16.33), ¿qué frecuencia oye el escucha?

SOLUCIÓN

IDENTIFICAR: Ahora *tanto* el receptor *como* la fuente están en movimiento. Una vez más, la incógnita es la frecuencia f_L escuchada por el receptor.

PLANTEAR: La figura 16.32 muestra la situación. Tanto la velocidad de la fuente $v_S = 45$ m/s y la velocidad del receptor $v_L = 15$ m/s son

16.32 Nuestro esquema para este problema.



positivas porque los vectores apuntan en la dirección del receptor a la fuente).

EJECUTAR: Usamos otra vez la ecuación (16.29) para obtener

$$f_L = \frac{v + v_L}{v + v_S} f_S = \frac{340\ \text{m/s} + 15\ \text{m/s}}{340\ \text{m/s} + 45\ \text{m/s}} (300\ \text{Hz})$$
$$= 277\ \text{Hz}$$

EVALUAR: La frecuencia que el receptor oye es otra vez menor que la de la fuente, pero el valor es distinto del de los dos ejemplos anteriores, aunque la fuente y el receptor se están alejando mutuamente a 30 m/s en los tres casos. El *signo* del cambio de frecuencia Doppler (es decir, si f_L es menor o mayor que f_S) depende del movimiento relativo entre la fuente y el receptor; para determinar el *valor* del cambio de frecuencia Doppler, hay que conocer las velocidades de la fuente y el receptor relativas al aire.

Ejercicio de aplicación

Cierto tipo de murciélago emite pulsos de ultrasonidos con una gama de *40* y *80 kHz* y con una duración de alrededor de *2,0 ms* (a) ¿Cuál es la gama de longitudes de onda que emite el animal? (b) ¿Cuánto tiempo tarda el murciélago en "oír" una señal que le llega reflejada desde una pared situada a *2,50 m* de distancia? (c) Se ha determinado que este animal puede discriminar distancias mínimas de *1,20 cm*, ¿cuál es el tiempo que tarda en procesar una señal auditiva?. La velocidad en el aire es: $v_{aire}=344\ m/s$.

Presione

Solución

(a)

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

$$\lambda = \frac{344}{40\,000} m \qquad \lambda = \frac{344}{80\,000} m$$

$$\lambda = 8,6 \times 10^{-3} \qquad \lambda = 4,3 \times 10^{-3}$$

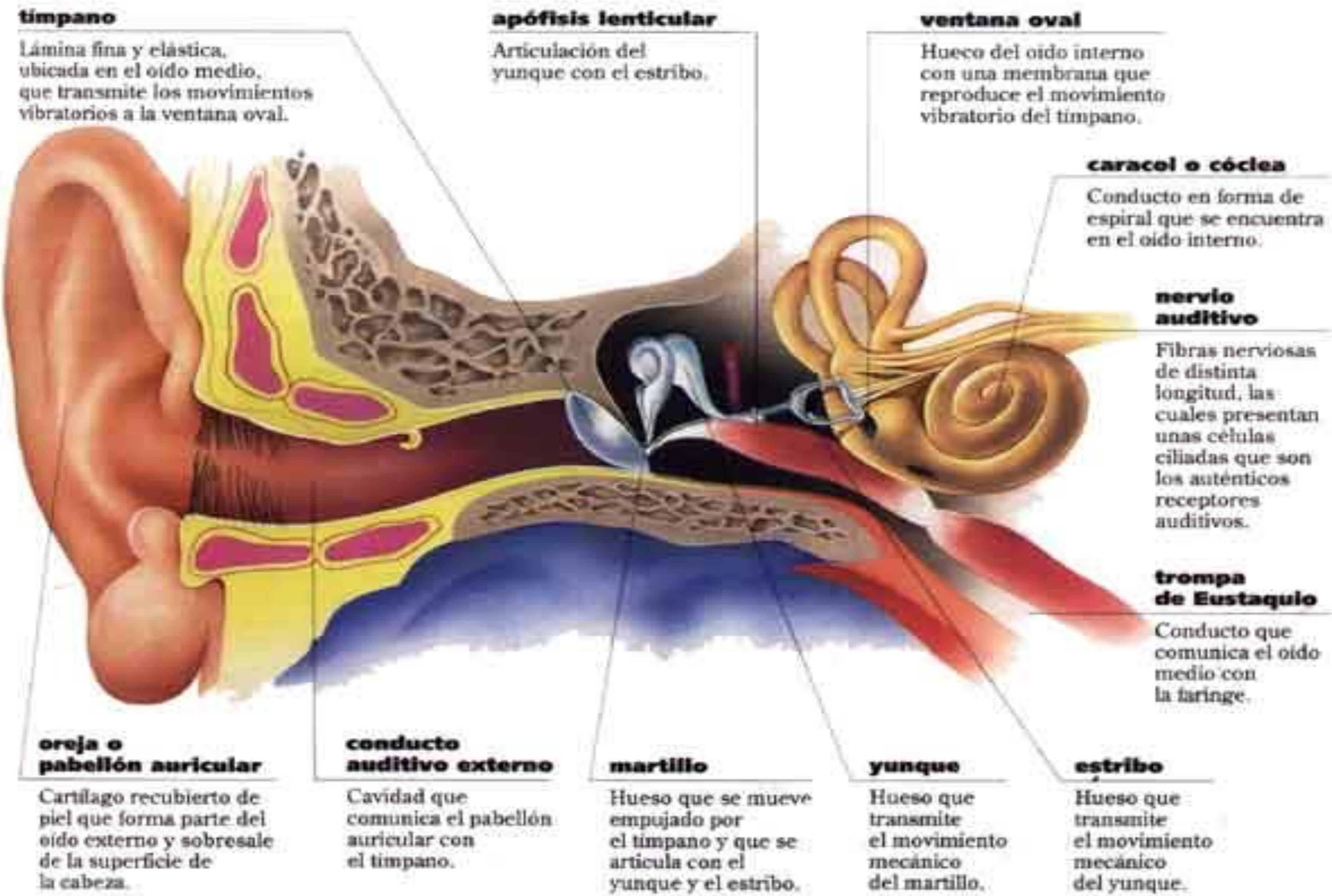
(b y c)

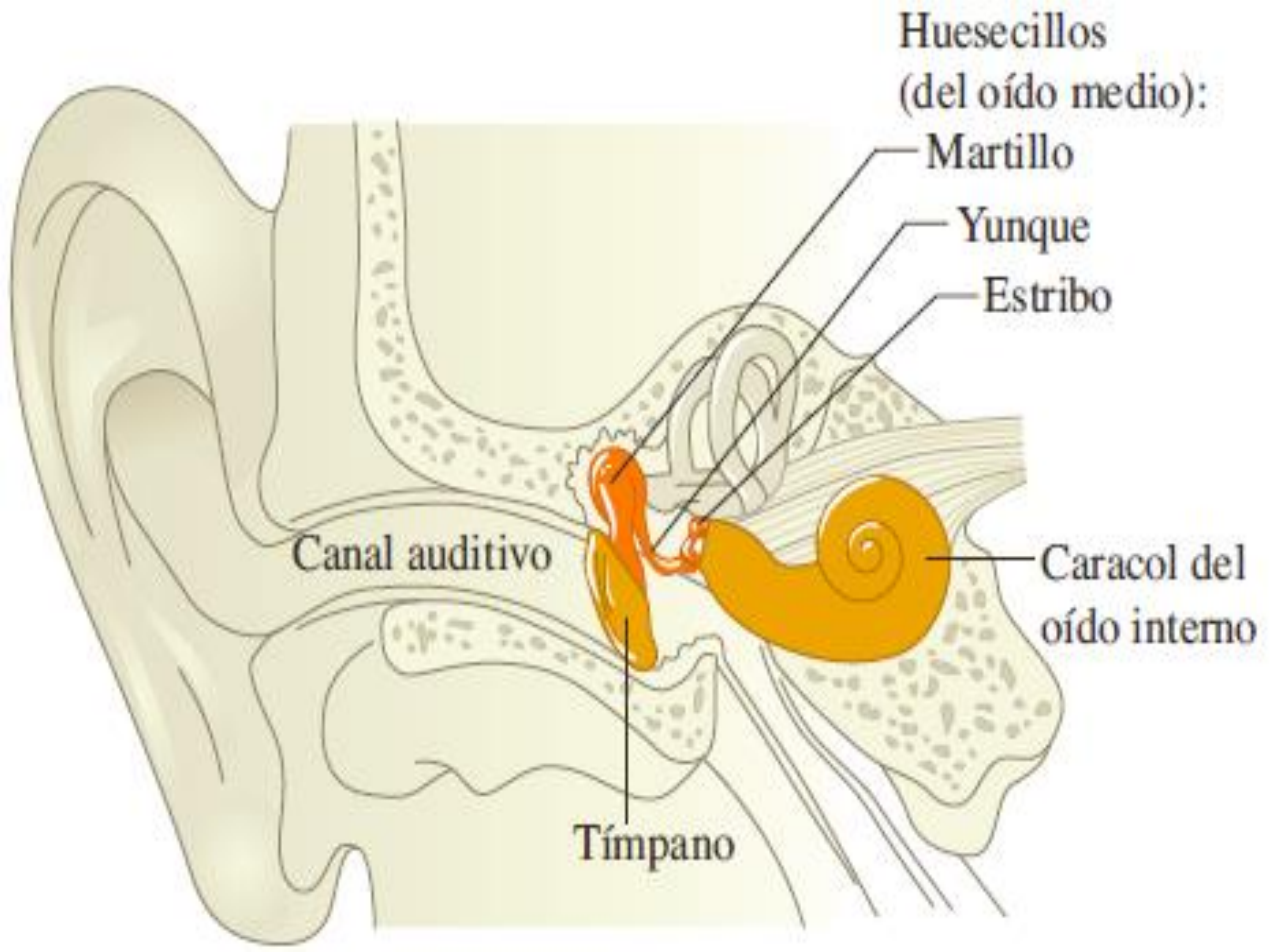
$$t = \frac{2d}{v}$$

$$t = \frac{2 \times 2,5}{344} = 1,5 \times 10^{-2}\, s$$

$$t = \frac{2 \times 1,2 \times 10^{-2}}{344} = 7,0 \times 10^{-5}\, s$$

RECEPCIÓN DEL SONIDO




Huesecillos
(del oído medio):
Martillo
Yunque
Estribo
Canal auditivo
Caracol del
oído interno
Tímpano

Cuando una onda sonora entra en el oído, pone a oscilar el tímpano que, a la vez, hace oscilar los tres *huesecillos* del oído medio (figura 16.4). Esta oscilación se transmite finalmente al oído interno, que está lleno de fluido. El movimiento del fluido perturba a las células pilosas que transmiten impulsos nerviosos al cerebro, para informarle que está presente un sonido. La parte móvil del tímpano tiene un área de unos 43 mm^2, y el estribo (el huesecillo más pequeño) en su contacto con el oído interno, de unos 3.2 mm^2. Para el sonido del ejemplo anterior, determine *a*) la amplitud de presión y *b*) la amplitud de desplazamiento de la onda en el fluido del oído interno. La rapidez del sonido en este fluido es del orden de 1500 m/s.

a) Utilizando el área del tímpano y la amplitud de presión obtenida en el ejemplo 16.1, vemos que la fuerza máxima ejercida por la onda sonora en aire sobre el tímpano es $F_{\text{máx}} = p_{\text{máx(aire)}} S_{\text{tímpano}}$. Por lo tanto, la amplitud de presión en el fluido del oído interno es

$$p_{\text{máx (oído interno)}} = \frac{F_{\text{máx}}}{S_{\text{estribo}}} = \frac{p_{\text{máx (aire)}} S_{\text{tímpano}}}{S_{\text{estribo}}}$$

$$= \frac{(3.0 \times 10^{-2}\ \text{Pa})(43\ \text{mm}^2)}{3.2\ \text{mm}^2} = 0.40\ \text{Pa}$$

b) Para calcular el desplazamiento máximo, usamos otra vez la relación $A = p_{\text{máx}}/Bk$ como hicimos en el ejemplo 16.1. El fluido del oído interno es principalmente agua, que tiene un módulo de volumen mucho mayor que el aire porque es mucho más difícil de comprimir. Por la tabla 11.2, la compresibilidad del agua (desafortunadamente también llamada k) es de $45.8 \times 10^{-11}\ \text{Pa}^{-1}$, así que $B_{\text{fluido}} = 1/(45.8 \times 10^{-11}\ \text{Pa}^{-1}) = 2.18 \times 10^{9}\ \text{Pa}$.

Determinamos el valor del número de onda k utilizando el valor de ω del ejemplo 16.1 y $v = 1500$ m/s para el fluido del oído interno. Entonces,

$$k_{\text{oído interno}} = \frac{\omega}{v_{\text{oído interno}}} = \frac{(2\pi \text{ rad})(1000 \text{ Hz})}{1500 \text{ m/s}} = 4.2 \text{ rad/m}$$

Juntando todo, el desplazamiento máximo del fluido en el oído interno es

$$A_{\text{oído interno}} = \frac{p_{\text{máx(oído interno)}}}{B_{\text{fluido}} k_{\text{oído interno}}} = \frac{0.40 \text{ Pa}}{(2.18 \times 10^9 \text{ Pa})(4.2 \text{ rad/m})}$$
$$= 4.4 \times 10^{-11} \text{ m}$$

El resultado del inciso *a*) demuestra que el efecto de los huesecillos es aumentar la amplitud de presión en el oído interno por un factor de $(43 \text{ mm}^2)/(3.2 \text{ mm}^2) = 13$. Este factor de amplificación contribuye a la gran sensibilidad del oído humano.

La amplitud de desplazamiento en el oído interno es aún menor que en el aire; sin embargo, lo que realmente importa ahí es la amplitud de *presión*, ya que las variaciones de presión en el fluido son lo que mueve las células pilosas.