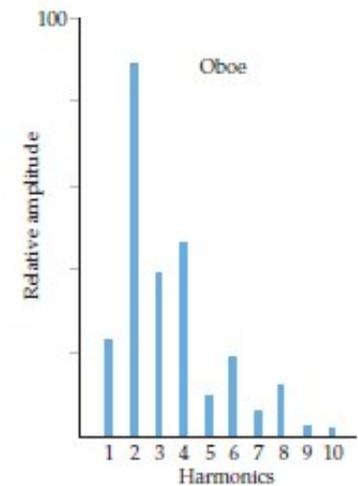
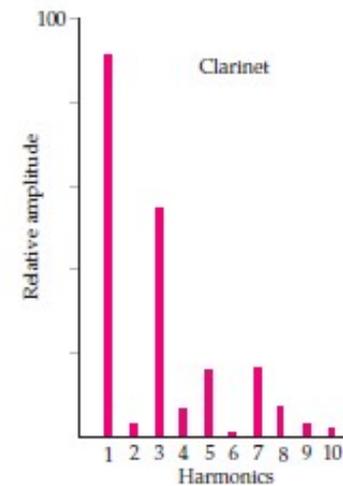
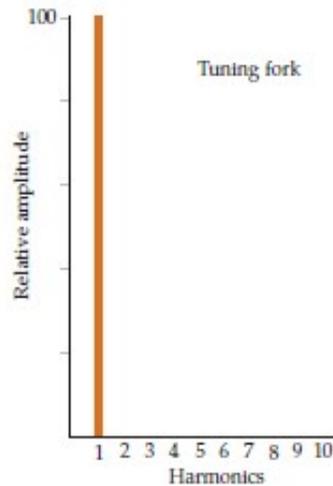
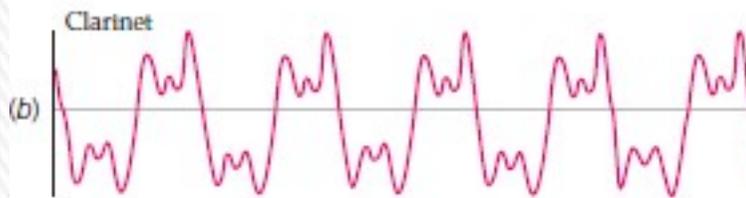
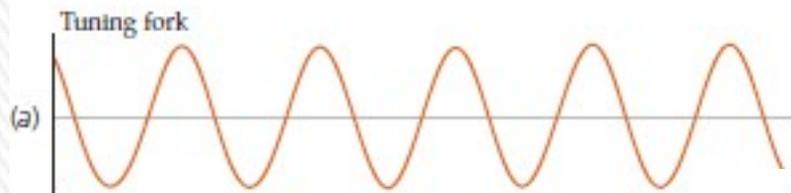
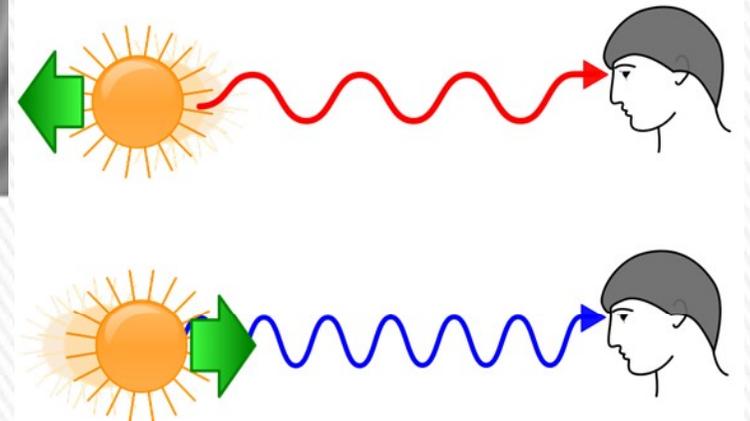
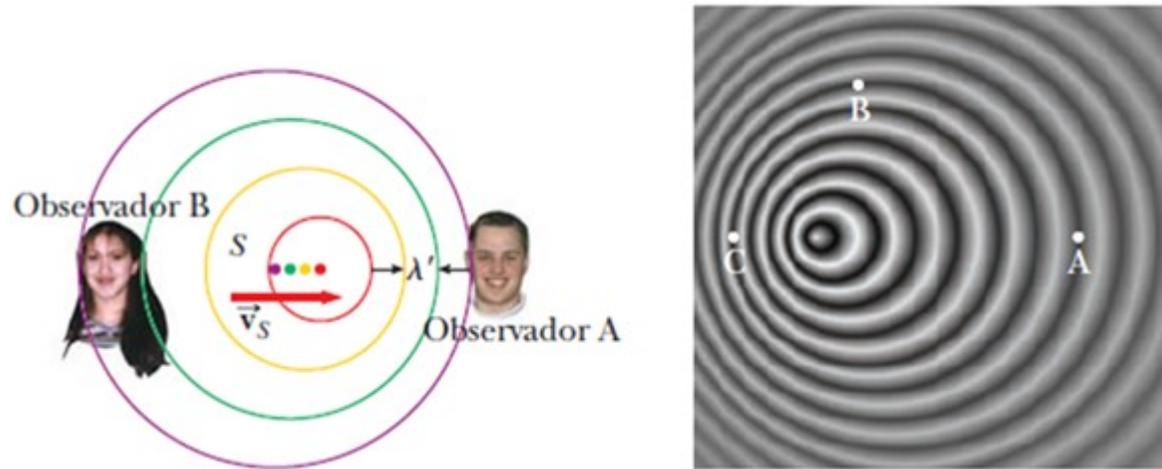
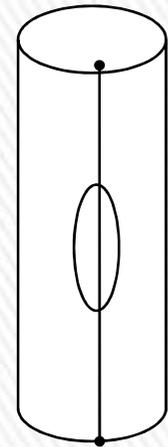


# 18- ONDAS SONORAS



## EJEMPLO- Ejercicio 4.2.2

Un instrumento musical consiste de un tubo cerrado en los dos extremos, con una apertura en la pared lateral, y una cuerda estirada fuera y paralela al tubo tal que pasa sobre la apertura. La cuerda y el tubo tienen la misma longitud de 50 cm. Al tocar la cuerda, los primeros 5 armónicos son excitados apreciablemente. Los armónicos de la cuerda dan lugar a un sonido fuerte solo si su frecuencia es cercana a una frecuencia resonante del tubo. La tensión en la cuerda es 588 N y su masa es 10 g.



a) ¿Cuáles son las frecuencias de los armónicos que están amplificados de esta manera?

b) ¿Cuáles serían las frecuencias si uno de los extremos del tubo se abre?

La cuerda tiene sus dos extremos fijos, por lo que aparecerán ondas estacionarias cuyas frecuencias (armónicas) están dadas por:

$$f_n = n f_1 = n \frac{v}{2L} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Debo conocer la velocidad con que se propagan las ondas en la cuerda:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Para la cuerda:  $L = 0,50 \text{ m}$      $m = 10 \text{ g} = 0,010 \text{ kg}$      $T = 588 \text{ N}$

$$\mu = \frac{m}{L} = \frac{0,010 \text{ kg}}{0,50 \text{ m}} = 0,020 \text{ kg/m}$$

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} = \sqrt{\frac{588}{0,020}} = 171 \text{ m/s} \quad (171,46 \text{ m/s})$$

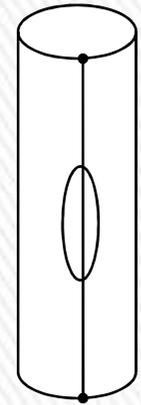
$$f_n = n \frac{v}{2L} = n \frac{171}{2(0,50)}$$

$$f_1 = 1,7 \times 10^2 \text{ Hz}; f_2 = 3,4 \times 10^2 \text{ Hz}; f_3 = 5,1 \times 10^2 \text{ Hz}$$

$$f_4 = 6,9 \times 10^2 \text{ Hz}; f_5 = 8,6 \times 10^2 \text{ Hz};$$

## EJEMPLO- Ejercicio 4.2.2

Un instrumento musical consiste de un tubo cerrado en los dos extremos, con una apertura en la pared lateral, y una cuerda estirada fuera y paralela al tubo tal que pasa sobre la apertura. La cuerda y el tubo tienen la misma longitud de 50 cm. Al tocar la cuerda, los primeros 5 armónicos son excitados apreciablemente. Los armónicos de la cuerda dan lugar a un sonido fuerte solo si su frecuencia es cercana a una frecuencia resonante del tubo. La tensión en la cuerda es 588 N y su masa es 10 g.



a) ¿Cuáles son las frecuencias de los armónicos que están amplificados de esta manera?

b) ¿Cuáles serían las frecuencias si uno de los extremos del tubo se abre?

Los modos normales para un tubo con ambos extremos cerrados, son iguales a los correspondientes a uno con ambos extremos abiertos, ya que tiene un nodo en c/u de los extremos, por lo que la longitud de onda del primer modo vale:  $\lambda_1=2L$  (igual que cuando ambos extremos están cerrados).

Considero que la velocidad del sonido en el aire vale  $v_s = 343$  m/s.

$$f_n = n \frac{v_s}{2L}$$

$$f_n = n \frac{v_s}{2L} = n \frac{343}{2(0,50)}$$

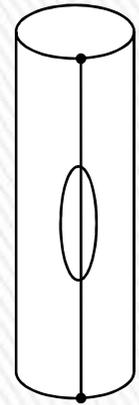
Los primeros armónicos son:

$$f_1 = 3,4 \times 10^2 \text{ Hz}; f_2 = 6,9 \times 10^2 \text{ Hz}; f_3 = 1,0 \times 10^3 \text{ Hz}$$

**Se amplificarían los siguientes armónicos:  $3,4 \times 10^2$  Hz,  $6,9 \times 10^2$  Hz**

## EJEMPLO- Ejercicio 4.2.2

Un instrumento musical consiste de un tubo cerrado en los dos extremos, con una apertura en la pared lateral, y una cuerda estirada fuera y paralela al tubo tal que pasa sobre la apertura. La cuerda y el tubo tienen la misma longitud de 50 cm. Al tocar la cuerda, los primeros 5 armónicos son excitados apreciablemente. Los armónicos de la cuerda dan lugar a un sonido fuerte solo si su frecuencia es cercana a una frecuencia resonante del tubo. La tensión en la cuerda es 588 N y su masa es 10 g.



a) ¿Cuáles son las frecuencias de los armónicos que están amplificados de esta manera?

b) ¿Cuáles serían las frecuencias si uno de los extremos del tubo se abre?

Si ahora el tubo tiene uno de los extremos abierto, las frecuencias de los modos normales están dados por:

$$f_{2n-1} = (2n - 1) \frac{v}{4L} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

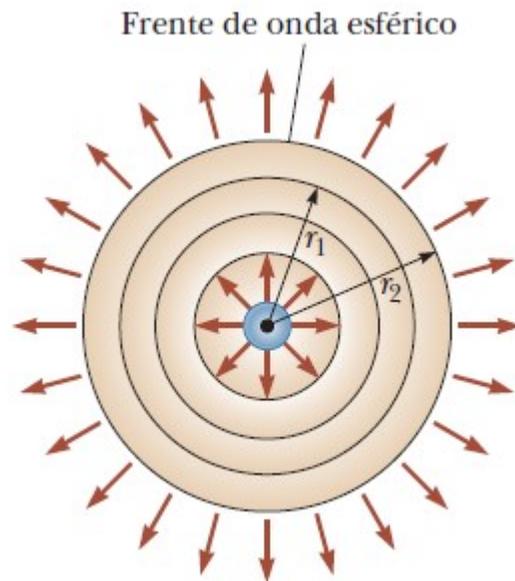
$$f_{2n-1} = (2n - 1) \frac{v_s}{4L} = (2n - 1) \frac{343}{4(0,50)} =$$

Los primeros armónicos son:

$$f_1 = 1,7 \times 10^2 \text{ Hz}; f_3 = 5,1 \times 10^2 \text{ Hz}; f_5 = 8,6 \times 10^2 \text{ Hz} \dots$$

Se amplificarían los siguientes armónicos:  $1,7 \times 10^2 \text{ Hz}$ ,  $5,1 \times 10^2 \text{ Hz}$  y  $8,6 \times 10^2 \text{ Hz}$

# ONDAS ESFÉRICAS Y PUNTUALES



Si un pequeño objeto esférico oscila de manera que su radio cambia periódicamente, se produce una **onda esférica**.

La onda se mueve hacia fuera de la fuente con velocidad constante.

Debido a que todos los puntos en una esfera que vibra se comportan de la misma forma, concluimos que la energía en una onda esférica se propaga igualmente en todas direcciones. Esto significa que ninguna dirección tiene preferencia sobre otra.

Si  $P_{prom}$  es la potencia promedio emitida por la fuente, entonces a cualquier distancia  $r$  de la fuente, esta energía se debe distribuir sobre una superficie esférica de área  $4\pi r^2$ , suponiendo que no hay ninguna absorción por el medio.

**Intensidad del sonido a una distancia  $r$  de la fuente es:**

$$I = \frac{P_{prom}}{A} = \frac{P_{prom}}{4\pi r^2}$$

Esta ecuación muestra que la intensidad de una onda decrece con el incremento de la distancia a la fuente.

El hecho de que  $I$  varíe en relación con  $1/r^2$  es un resultado del supuesto de que una pequeña fuente (algunas veces llamada **fente puntual**) emite una **onda esférica**.

# INTENSIDAD DE LAS ONDAS SONORAS

**Intensidad  $I$  de una onda, o potencia por unidad de área** se define como la rapidez a la cual la energía (es decir la potencia) transportada por la onda se transfiere a través de una unidad de área  $A$  perpendicular a la dirección de viaje de la onda:

$$I \equiv \frac{\mathcal{P}}{A}$$

**Fuente puntual:** emite ondas sonoras por igual en todas direcciones. La intensidad del sonido disminuye conforme uno se aleja de la fuente. Cuando una fuente emite sonido por igual en todas direcciones, el resultado es una **onda esférica**.

La potencia promedio emitida por la fuente debe tener una distribución uniforme sobre cada frente de onda esférica:

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

# NIVEL SONORO EN DECIBELES

Sonidos más débiles que el oído humano puede detectar a una frecuencia de 1.000 Hz : intensidad de aproximadamente  $1,00 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$  (*umbral de audición*).

Los sonidos más fuertes que el oído tolera a esta frecuencia corresponden a una intensidad de aproximadamente  $1,00 \text{ W/m}^2$ , el *umbral de dolor*.

Como el intervalo es tan amplio, es conveniente usar una escala logarítmica, donde **el nivel sonoro  $\beta$**  se define mediante la ecuación:

$$\beta \equiv 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right)$$

**$I_0$  es la intensidad de referencia (umbral de audición) ( $I_0 = 1,00 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$ )**

*I* intensidad en  $\text{W/m}^2$  que corresponde el nivel de sonido  $\beta$ , donde  $\beta$  se mide en **decibeles (dB)**.

En esta escala, el umbral de dolor ( $I_0 = 1,00 \text{ W/m}^2$ ) corresponde a un nivel sonoro de 120 dB.

La exposición prolongada a niveles sonoros altos puede dañar seriamente el oído humano. Siempre que los niveles sonoros superen los 90 dB, se recomienda el uso de tapones de oídos.

# INTENSIDAD DE LAS ONDAS SONORAS

## Niveles sonoros

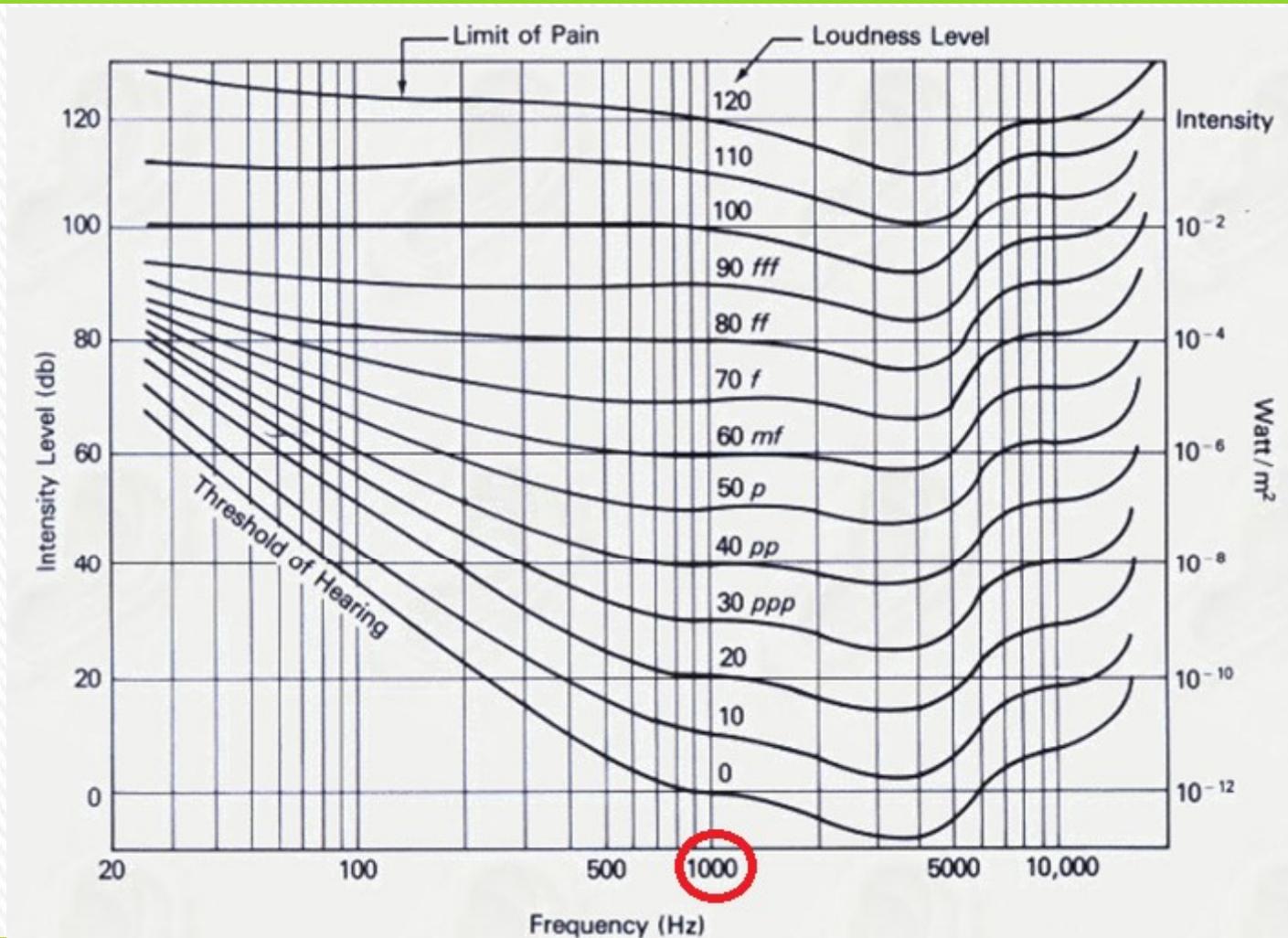
Fuente del sonido	$\beta$ (dB)
Avión jet cercano	150
Martillo hidráulico; ametralladora	130
Sirena; concierto de rock	120
Transporte subterráneo; podadora potente	100
Congestionamiento de tránsito	80
Aspiradora	70
Conversación normal	50
Zumbido de mosquito	40
Susurro	30
Hojas meciéndose	10
Umbral de audición	0

Límite higiénico laboral para 8 hs.: 80 dBA

En Montevideo se consideran ruidos molestos los que superan los 45 dB (decibeles) entre las 7.00 y las 22.00 horas, y 39 dB entre las 22.00 y las 7.00, medidos dentro de una casa

**Decibelio A (dBA):** unidad de nivel sonoro medido con un filtro previo que quita parte de las bajas y las muy altas frecuencias. De esta manera, después de la medición se filtra el sonido para conservar solamente las frecuencias más dañinas para el oído, razón por la cual la exposición medida en dBA es un buen indicador del riesgo auditivo y vital.

# RESPUESTA AUDITIVA



**Umbral de audición:** intensidad mínima necesaria para que un sonido de una frecuencia dada empiece a ser audible (curva inferior).

**Umbral de sensación dolorosa:** se experimenta una sensación de cosquilleo cuando los huesecillos vibran en forma tan fuerte que chocan con las paredes del oído medio. El intervalo de la audición normal se halla entre estas dos curvas.

## EJEMPLOS- Ejercicios del repartido

**4.2.3-** Si el nivel de intensidad del habla de una persona es de 50 dB, ¿cuál es el nivel de intensidad cuando 10 personas a la vez hablan de la misma manera?

$$\beta_1 = 10 \log \left( \frac{I_1}{I_0} \right) = 50 \text{ dB}$$

La intensidad del sonido de 10 personas será 10 veces que el de una persona ( $I_1$ ):  $I_2 = 10 I_1$ .

$$\beta_2 = 10 \log \left( \frac{I_2}{I_0} \right) = 10 \log \left( \frac{10I_1}{I_0} \right) = 10 \log 10 + 10 \log \left( \frac{I_1}{I_0} \right) = 10 + \beta_1 = 60 \text{ dB}$$

**4.2.4-** Una persona hablando emite sonido con una potencia de  $10^{-5}$  W. ¿Cuál es la máxima distancia a la cual otra persona puede escuchar su voz? (Supongamos que no hay otro sonido tapándolo ni absorción del sonido por el aire).

El límite auditivo corresponde a una intensidad  $I_0 = 1,0 \times 10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>

$$I_0 = \frac{\mathcal{P}}{4\pi r^2} \Rightarrow r = \sqrt{\frac{\mathcal{P}}{4\pi I_0}} = \sqrt{\frac{10^{-5}}{4\pi 10^{-12}}} = \sqrt{\frac{10^7}{4\pi}} = 892 \text{ m}$$

# EFECTO DOPPLER

Si un vehículo se mueven mientras hacen sonar su bocina, la frecuencia del sonido que se oye es más alta (más agudo) cuando el vehículo se acerca y más baja cuando se aleja (más grave).

Este fenómeno es un ejemplo del *efecto Doppler*.

Se oye el mismo efecto si el oyente se mueve y la bocina está fija: la frecuencia es más alta cuando nos acercamos a la fuente y más baja cuando nos alejamos.

Aunque el efecto Doppler se asocia más a menudo con el sonido, es común a todas las ondas, incluyendo las de luz (corrimiento hacia el rojo de galaxias que se alejan).

Por ejemplo, el movimiento relativo de la fuente y el observador produce un corrimiento de frecuencia en las ondas luminosas.

El efecto Doppler se usa por ejemplo en los sistemas de radar policíacos para medir la rapidez de los vehículos o los astrónomos para determinar la rapidez de estrellas, galaxias y otros objetos celestes en relación con la Tierra.

**Nos restringiremos al efecto Doppler aplicado al sonido y supondremos que el aire está inmóvil y que todas las medidas de la velocidad están hechas en relación con este medio inmóvil.**

**La velocidad  $v_o$  corresponde al observador,  $v_s$  es la velocidad de la fuente y  $v$  es la velocidad del sonido.**

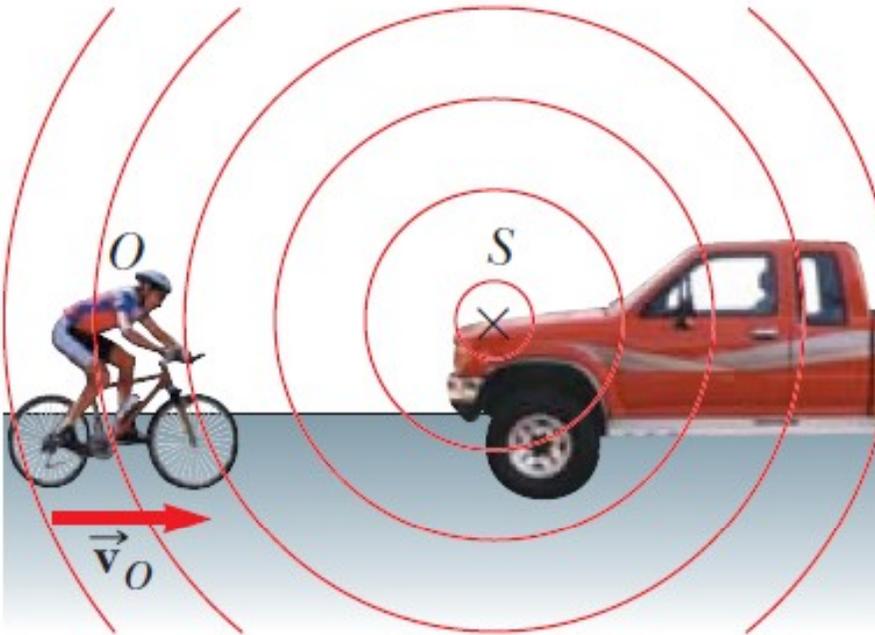
Efecto Doppler - Apps. de Física Walter Fendt:

[https://www.walter-fendt.de/html5/phes/dopplereffect\\_es.htm](https://www.walter-fendt.de/html5/phes/dopplereffect_es.htm)



# EFECTO DOPPLER

## Observador se mueve hacia la fuente



Un observador  $O$  (el ciclista) se mueve con una rapidez  $v_0$  hacia una fuente puntual estable  $S$ , la bocina de una camioneta estacionada.

El observador escucha una frecuencia  $f'$  mayor que la frecuencia de la fuente.

La longitud de onda no cambia.

Se percibe una frecuencia mayor.

Rapidez relativa de las ondas respecto al observador:  $v' = v + v_0$

La longitud de onda no cambia, entonces detecta una frecuencia  $f'$ :

$$f' = \frac{v'}{\lambda} = \frac{v + v_0}{\lambda} = \frac{v + v_0}{\frac{v}{f}} = \frac{v + v_0}{v} f$$

$$f' = \frac{v + v_0}{v} f$$

Si en cambio el observador se aleja de la fuente:

$$f' = \frac{v - v_0}{v} f$$

# EFECTO DOPPLER

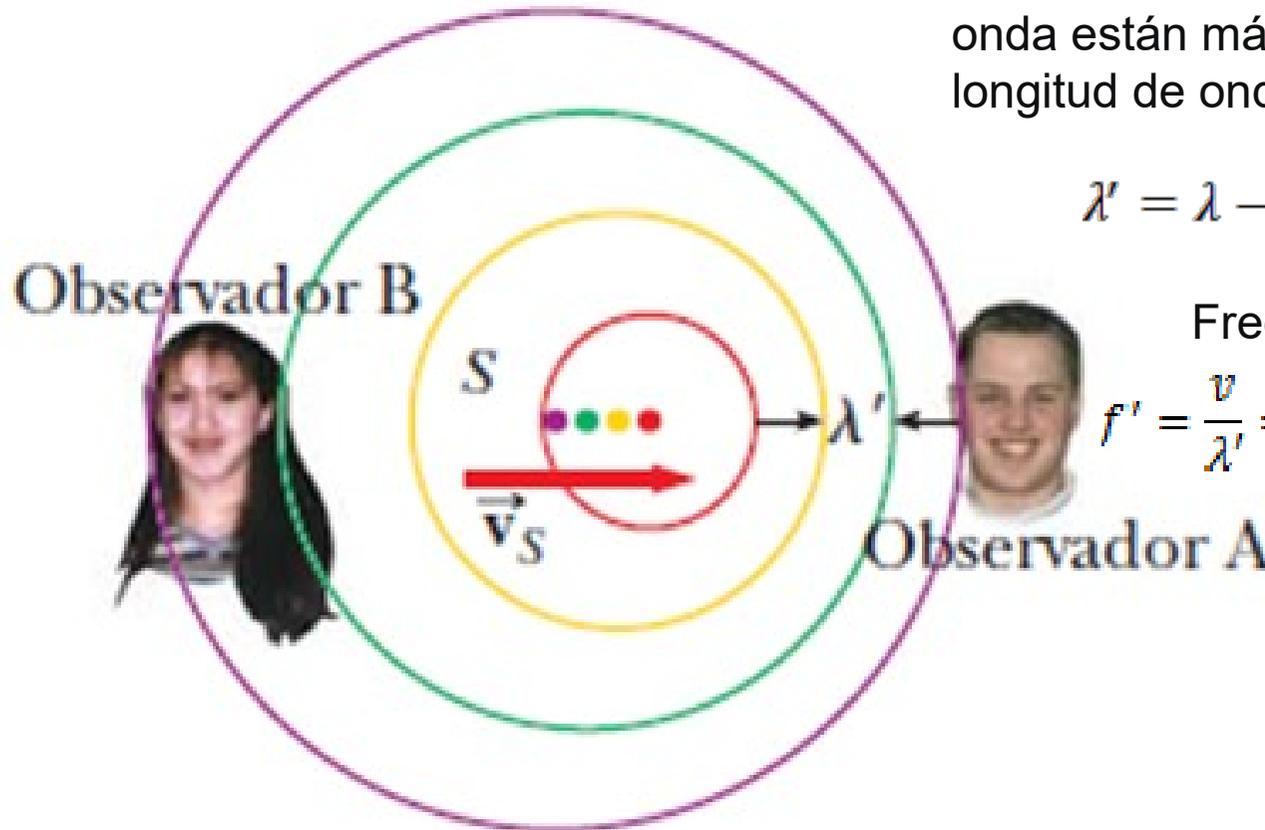
## Fuente en movimiento (velocidad $v_s$ ) y observadores en reposo

Para el observador A los frentes de onda están más juntos y se acorta la longitud de onda en un valor  $\Delta\lambda = v_s \cdot T$

$$\lambda' = \lambda - \Delta\lambda = \lambda - v_s T = \lambda - \frac{v_s}{f}$$

Frecuencia percibida por A

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{\lambda - \frac{v_s}{f}} = \frac{v}{\frac{v}{f} - \frac{v_s}{f}} = \frac{v}{v - v_s} f$$



$$f' = \frac{v}{v - v_s} f$$

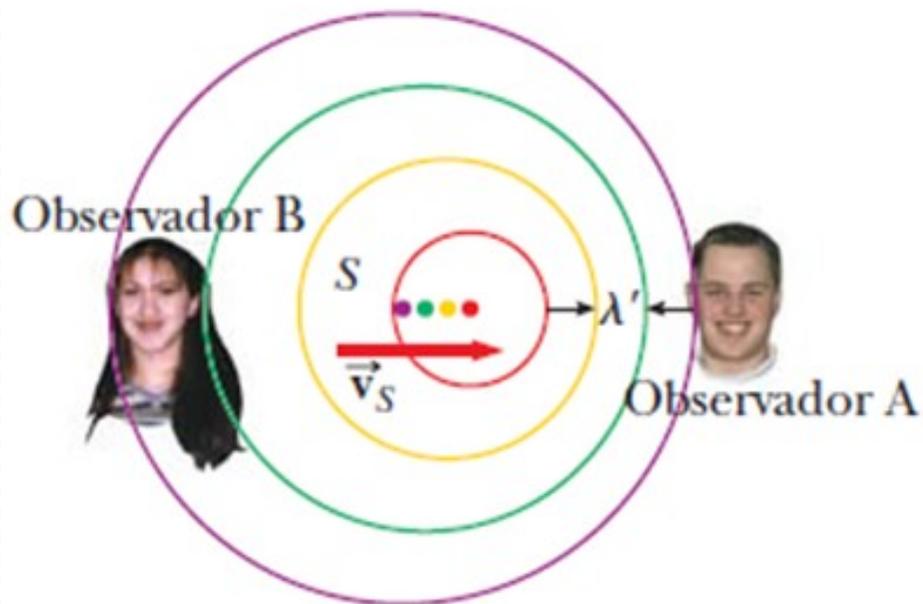
(fuente acercándose)

Si la fuente se aleja del observador estacionario (B) que mide una  $\lambda'$  mayor que  $\lambda$  y escucha una frecuencia:

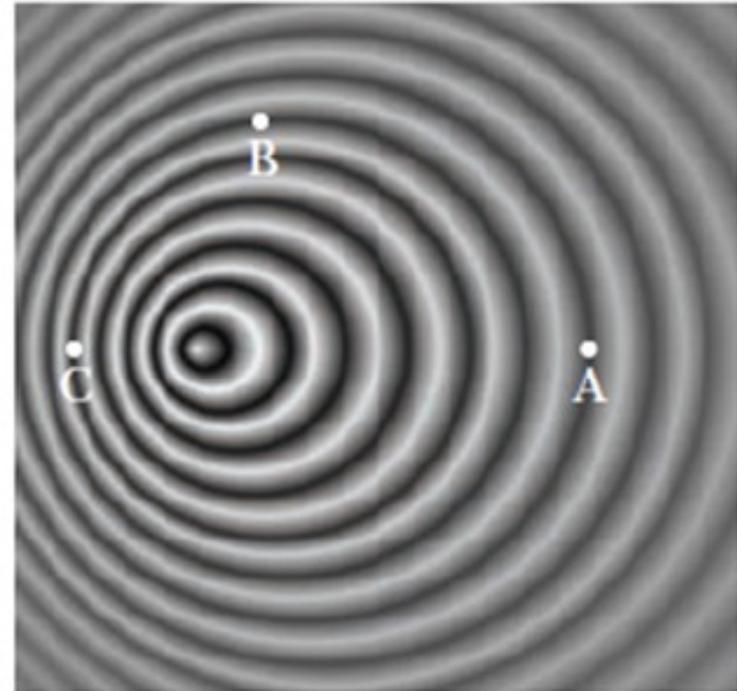
$$f' = \frac{v}{v + v_s} f$$

# EFECTO DOPPLER

Fuente en movimiento (velocidad  $v_s$ ) y observadores en reposo



a)



b)

a) Una fuente  $S$  se mueve con una rapidez  $v_s$  hacia un observador estable  $A$  y se aleja de un observador estable  $B$ . El observador  $A$  escucha una frecuencia mayor y el observador  $B$  una frecuencia reducida.

b) El efecto Doppler en el agua, observado en un tanque de ondas. Una fuente puntual que se mueve con rapidez  $v_s$ .

# EFECTO DOPPLER

Se pueden combinar los dos casos, para usar una única ecuación:

$$f' = \frac{v + v_0}{v - v_s} f$$

En esta expresión se deben usar los signos de las velocidades de la siguiente forma:

**$v_0$  es positiva si el observador se acerca a la fuente**, si se aleja es negativa

**$v_s$  es positiva si la fuente se acerca al observador**, si se aleja es negativa

El valor positivo se usa para el movimiento del observador o de la fuente hacia el otro acercándose, asociada con el aumento de la frecuencia percibida.

El valor negativo se usa para el movimiento de uno alejándose del otro, asociada con una disminución de la frecuencia percibida.

## EJEMPLO- Ejercicio 4.2.9

Un auto de policía que suena una sirena con una frecuencia de 1200 Hz viaja a 126 km/h . Otro automóvil viaja en sentido contrario a una velocidad de 72,0 km/h. Considere que la velocidad del sonido en el aire vale 343 m/s. ¿Cuánto vale, en Hz, la diferencia entre la frecuencia que percibe el conductor del auto antes y después de que lo pase el auto de policía?

$$v = 343 \text{ m/s} \quad f = 1.200 \text{ Hz} \quad v_s = 126 \text{ km/h} = 35,0 \text{ m/s} \quad v_o = 72,0 \text{ km/h} = 20,0 \text{ m/s}$$

Antes de cruzarse, se están aproximando por lo que la frecuencia que percibe el conductor del auto  $f_A$  estará dada por:

$$f_A = \frac{v + v_o}{v - v_s} f = \frac{343 + 20,0}{343 - 35,0} (1.200 \text{ Hz}) = 1.414,29 \text{ Hz}$$

Después de cruzarse, el conductor del auto percibe una frecuencia  $f_D$  que estará dada por:

$$f_D = \frac{v - v_o}{v + v_s} f = \frac{343 - 20,0}{343 + 35,0} (1.200 \text{ Hz}) = 1.025,40 \text{ Hz}$$

$$\Delta f = f_A - f_D = 1414,29 - 1025,40 = 388,89 \text{ Hz}$$

$$\Delta f = 389 \text{ Hz}$$

# FUENTES DE ONDAS SONORAS

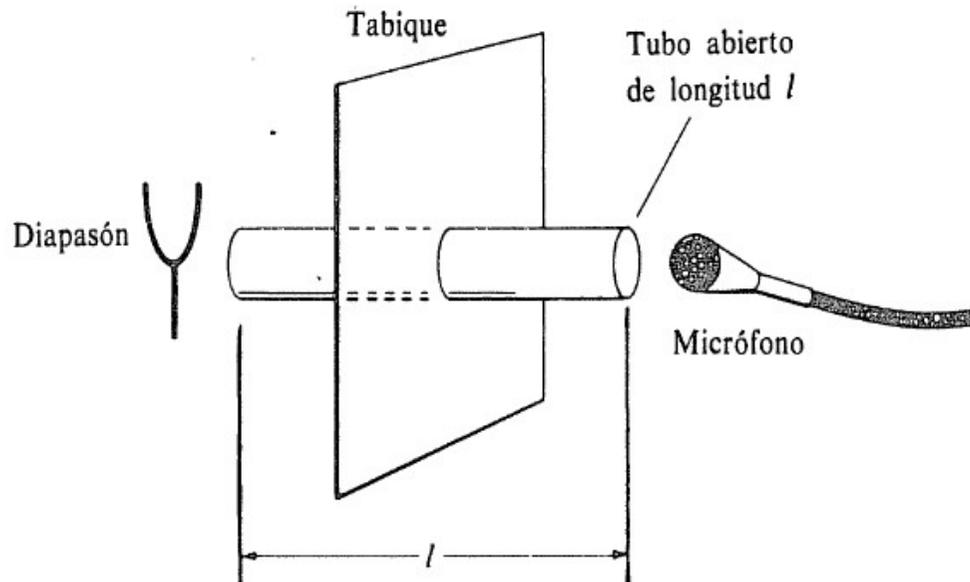
En general toda **fente sonora** tiene **dos componentes** principales: un **generador de vibraciones** y una **estructura resonante**.

Violín o guitarra: las cuerdas vibran y sus vibraciones son emitidas eficazmente al aire mediante la cavidad resonante del instrumento

Seres humanos, las cavidades bucal y nasal sirven como estructuras resonantes para las vibraciones producidas por las cuerdas vocales.

Modelo del sistema: tubo cilíndrico longitud  $L$  con ambos extremos abiertos que puede mantener ondas resonantes con una frecuencia dada por:

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



Se usan diapasones de frecuencias diferentes pero próximas entre sí, y se analiza con un micrófono el sonido en el extremo opuesto del tubo.

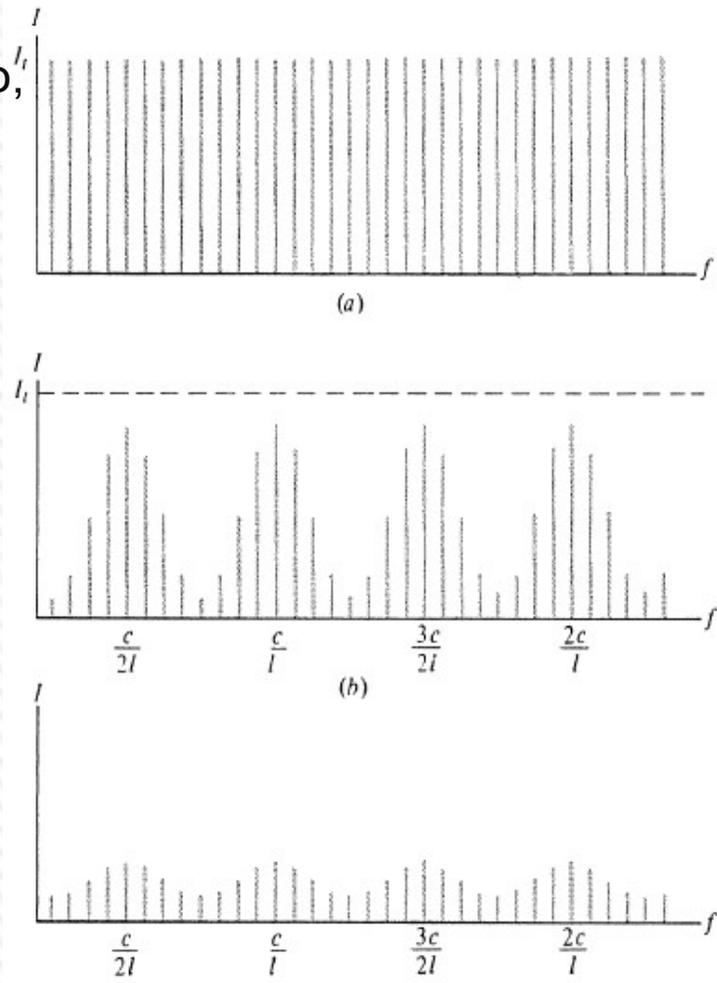
El tubo sirve como estructura resonante que transmite el sonido de forma selectiva en las proximidades de ciertas frecuencias resonantes y suprime las otras frecuencias.

# FUENTES DE ONDAS SONORAS

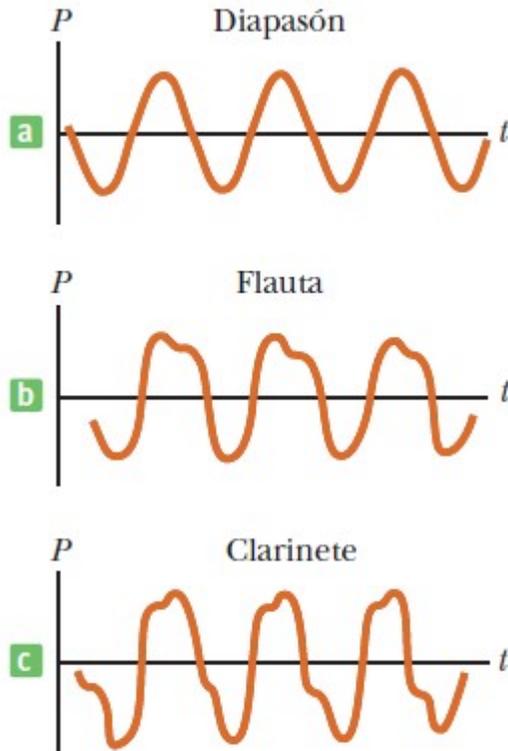
Si una de las frecuencias del diapasón coincide con alguna de las frecuencias resonantes del tubo, se producen en éste ondas estacionarias y el sonido se transmite al micrófono en forma eficaz. Sonidos de otros diapasones no producen ondas estacionarias y llega mucho menos sonido al micrófono.

El diapasón produce sonido a una sola frecuencia, el sonido llegará al micrófono a través del tubo.

- Sonidos (intensidad  $I$ ) producidos por una serie de diapasones a la entrada del tubo.
- Intensidad que llega al micrófono, es máxima a las frecuencias resonantes del tubo.
- Si el tubo fuera más estrecho, los picos serían menos agudos alrededor de las frecuencias resonantes.

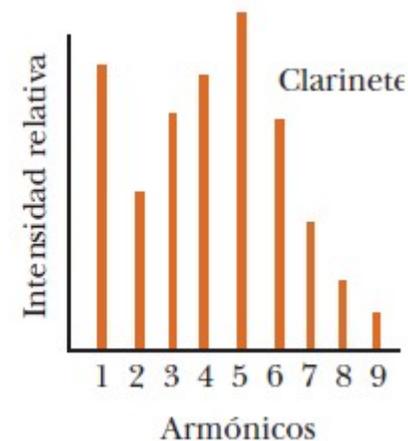
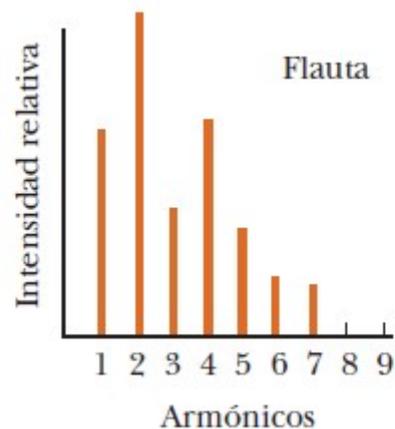
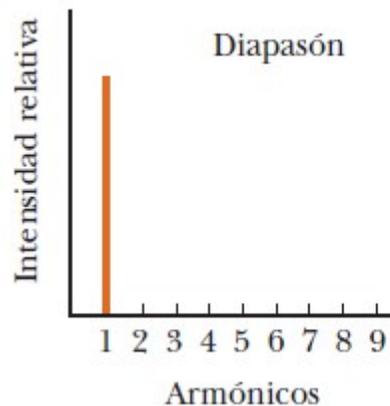


# FUENTES DE ONDAS SONORAS



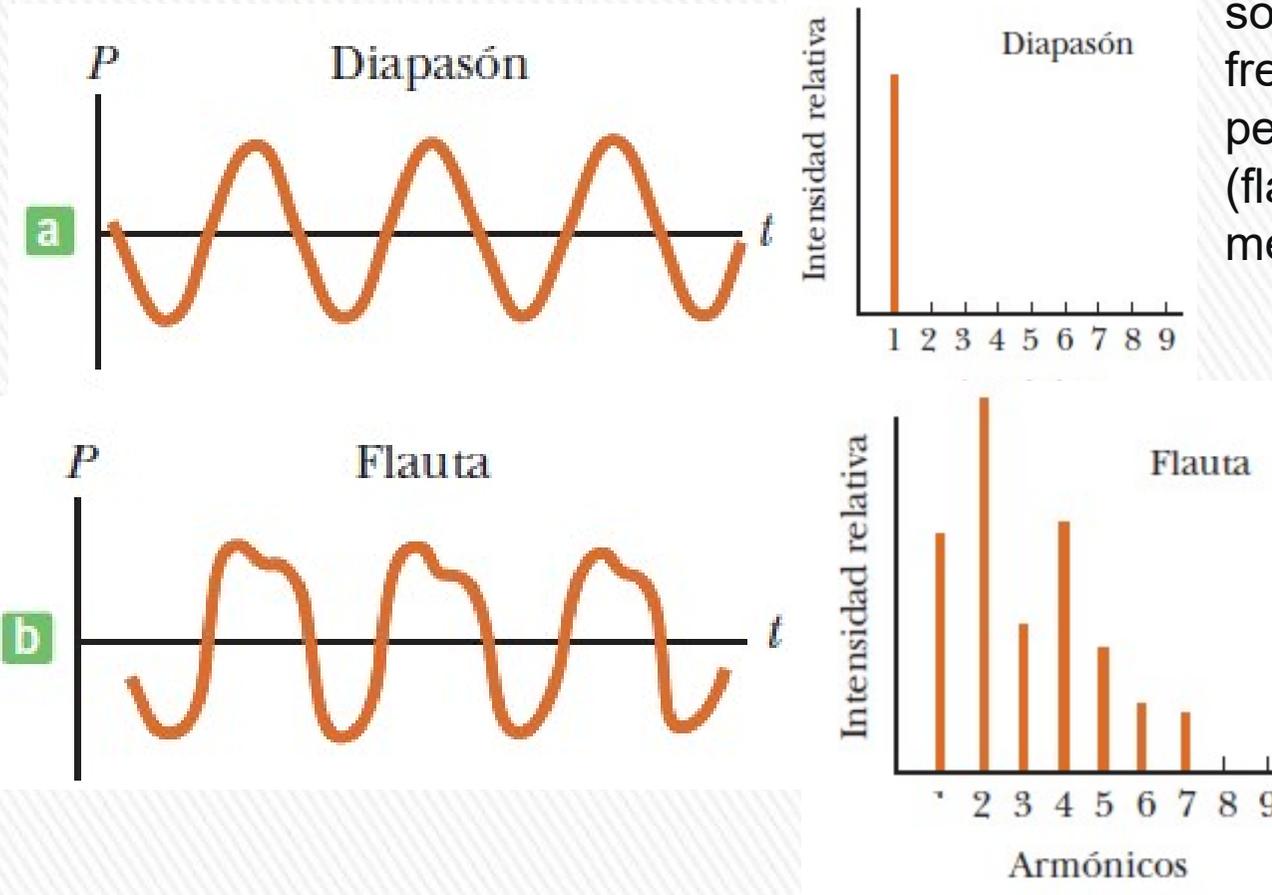
Formas de onda (variación de la presión en función del tiempo) ejecutando la misma nota por un diapasón, una flauta y un clarinete. Cada uno a una frecuencia fundamental de 440 Hz y con aproximadamente la misma intensidad

Intensidades relativas de los armónicos en las formas de onda que se muestran en la figura de arriba para el diapasón, la flauta y el clarinete.



# FUENTES DE ONDAS SONORAS

Aunque cada instrumento tiene su propio patrón característico, la figura muestra que cada una de las formas de la onda es periódica.



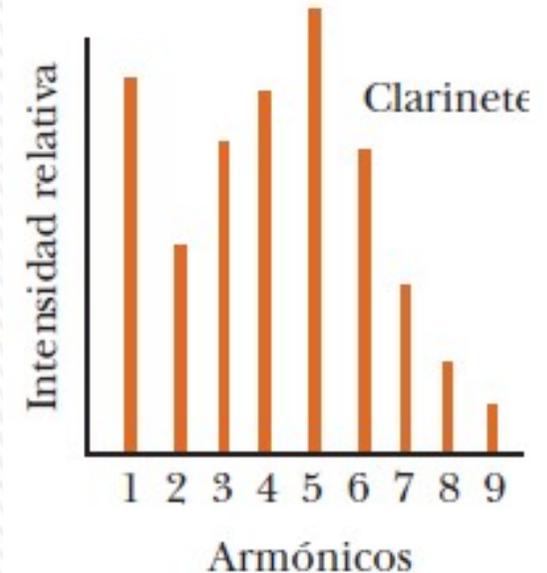
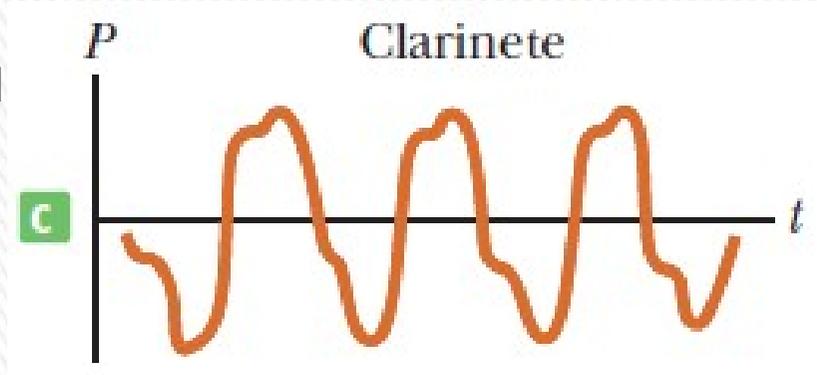
El **diapasón** produce solamente un armónico (la frecuencia fundamental), pero los dos instrumentos (flauta y clarinete) emiten mezclas de armónicos

Cuando una nota se toca con la **flauta**, parte del sonido consiste en una vibración en la frecuencia fundamental, una intensidad aun más alta es aportada por el segundo armónico; el cuarto armónico produce una intensidad casi igual que el fundamental y así sucesivamente.

Estos sonidos se suman juntos según el principio de la superposición para dar la forma compleja de la onda mostrada.

# FUENTES DE ONDAS SONORAS

El **clarinete** emite una cierta intensidad a una frecuencia del primer armónico, cerca de la mitad de la intensidad con la frecuencia del segundo armónico y así sucesivamente.



La superposición resultante de estas frecuencias produce el patrón que se ve en la figura c.

En música, el sonido característico de cualquier instrumento se conoce como **calidad, o timbre del sonido**.

*La calidad depende de la mezcla de armónicos en el sonido.*

*Decimos que la nota Do de una flauta difiere en calidad de la misma nota Do de un clarinete.*

Instrumentos como el clarinete, la trompeta, el violín y la tuba son ricos en armónicos



# FACTORES SUBJETIVOS DEL SONIDO

A menudo se utilizan para describir los sonidos propiedades tales como: **sonoridad, tono y calidad**. Estos conceptos son subjetivos. Por ejemplo, un sonido a 20 dB a 1000 Hz parece más ruidoso que un sonido de 20 dB a 600 Hz.

**Sonoridad** mide la subjetiva de la intensidad con la que un sonido es percibido por el oído humano. Permite ordenar sonidos en una escala del de mayor intensidad al de menor intensidad percibida.

La unidad que mide la sonoridad es el **fonio**.

La sensación sonora de intensidad (sonoridad) se agudiza para sonidos débiles, y disminuye para sonidos fuertes, lo que se debe a que **la audición humana no es lineal, sino logarítmica**.

La sonoridad depende tanto de la intensidad como de la frecuencia.

**Escala de decibeles A (dBA):** unidad de nivel sonoro medido con un filtro previo que quita parte de las bajas y las muy altas frecuencias.

Después de la medición se filtra el sonido para conservar solamente las frecuencias más dañinas para el oído, razón por la cual la exposición medida en dBA es un buen indicador del riesgo auditivo y vital.

# FACTORES SUBJETIVOS DEL SONIDO

**Tono** de un sonido está relacionado con su frecuencia.

Es la sensación auditiva (atributo psicológico) de los sonidos que los caracteriza como más agudos o más graves, en función de la frecuencia.

Por encima de los 3.000 Hz, el tono aumenta con la intensidad aunque la frecuencia se mantenga constante.

Por debajo de 2.000 Hz, el tono disminuye al aumentar la intensidad.

Un **tono puro** corresponde a una onda senoidal:  $f(t) = A \sin(2\pi ft)$ , donde  $A$  es la amplitud,  $t$  es el tiempo y  $f$  la frecuencia.

En el mundo real no existen tonos puros, pero cualquier onda periódica se puede expresar como suma de tonos puros de distintas frecuencias (análisis de Fourier).

Existiría una **frecuencia fundamental** y varias frecuencias múltiplos de la fundamental, llamados **armónicos**.

Las frecuencias de estos armónicos son un múltiplo entero de la principal.

**Calidad o timbre** de un sonido es todavía más ambigua.

La respuesta perceptiva humana asociada con diferentes mezclas de armónicos es la *calidad o timbre del* sonido

Algunos tipos de sonidos constituidos por armónicos son agradables.

No podemos caracterizar la calidad con una definición precisa con parámetros que se puedan medir físicamente

# FACTORES SUBJETIVOS DEL SONIDO

Dos tonos producidos por diferentes instrumentos podrían tener la misma frecuencia fundamental (y por lo tanto el mismo tono), pero sonar distinto debido al contenido de diversos armónicos.

Esta diferencia se llama *color de tono*, *calidad* o **timbre**, y a menudo se describe con términos subjetivos como “delgado”, “dorado”, “redondo”, “suave” y “débil”.

A diferencia de los tonos creados por instrumentos musicales o las vocales del habla humana, el **ruido** es una combinación de *todas las frecuencias, no solo* las que son múltiplos enteros de una frecuencia fundamental.

Un caso extremo es el “**ruido blanco**”, que contiene cantidades iguales de todas las frecuencias de la gama audible.

Como ejemplos está el sonido del viento.

