UNIDAD 5:
BASES FÍSICAS DE LA AUDICIÓN

ESTUDIO DE LAS ONDAS MECÁNICAS_1era parte

¿Qué se entiende por movimiento periódico?

Un movimiento periódico es aquél que se repite a intervalos regulares de tiempo. Esto significa que el objeto o entidad física en movimiento vuelve a pasar por la misma posición y en el mismo estado de movimiento (rapidez, sentido y dirección) después de un intervalo temporal constante, conocido como **periodo**

Características clave del movimiento periódico

- **Período (T)**: Es el tiempo que tarda un ciclo completo del movimiento en repetirse. Se mide en segundos.
- **Frecuencia (f)**: Es el número de ciclos o repeticiones que ocurren en una unidad de tiempo. Es el inverso del período ($f = 1/T$) y se mide en hertz (Hz), donde 1 Hz equivale a un ciclo por segundo.

Unidades

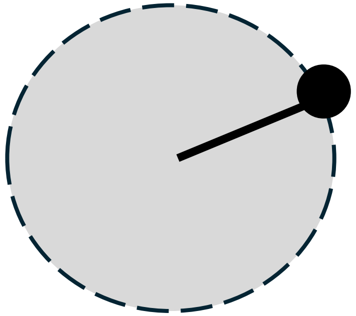
$$[\boldsymbol{T}]_{SI} = \boldsymbol{s}\ (\boldsymbol{segundo})$$

$$[\boldsymbol{f}]_{SI} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{s}} = \boldsymbol{Hz}\ (\boldsymbol{Hertz})$$

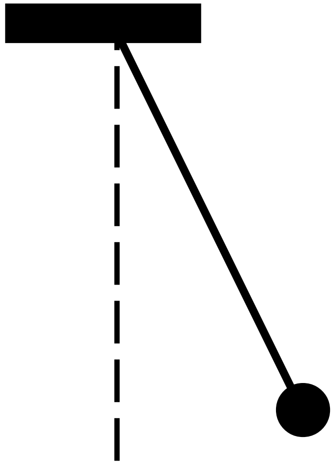
Un ejemplo clásico de movimiento periódico es el de un **péndulo** . Se balancea de un lado a otro, repitiendo su trayectoria una y otra vez. Otro ejemplo es el movimiento de la Tierra alrededor del Sol, que se completa en un período de aproximadamente 365 días, o la vibración de una cuerda de guitarra al ser tocada.

MOVIMIENTO PERIÓDICO

MOVIMIENTO CIRCULAR



MOVIMIENTO OSCILATORIO



MOVIMIENTO ONDULATORIO

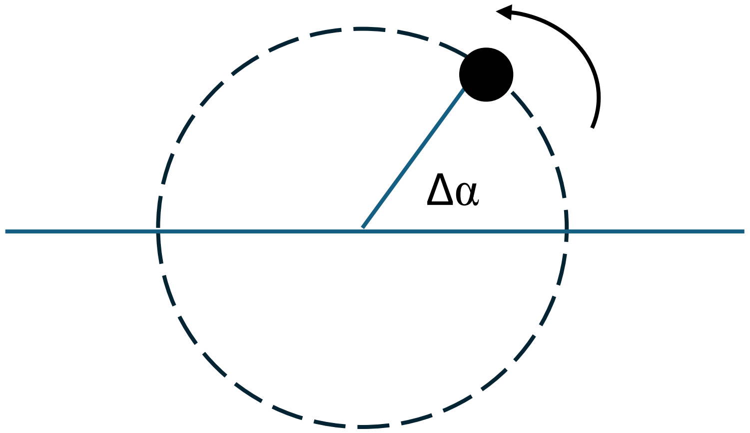
FRECUENCIA ANGULAR (ω)

Cuando se describe un ciclo en un movimiento circular uniforme, el objeto en movimiento "barre" un ángulo de 360° lo que equivale a 2π radianes a un ritmo constante
El ángulo "barrido" por unidad de tiempo se denomina frecuencia angular (ω)

$$\omega = \frac{\Delta\alpha}{\Delta t} \quad \frac{(ángulo\ barrido)}{(unidad\ de\ tiempo)}$$

Podemos decir, entonces:

$$\omega = 2\pi f$$



$$[\omega]_{SI} = \frac{r\ ad}{s}$$

Como el ángulo barrido es una función del tiempo, entonces $\alpha = \omega t = 2\pi t$

Esta misma relación es válida en otros movimientos periódicos como el ondulatorio

Los movimientos periódicos se describen matemáticamente mediante funciones periódicas continuas, como el seno y el coseno.

$$x(t) = A\cos(\omega t + \phi)$$

Donde:

- $x(t)$ = posición en función del tiempo
- A = amplitud (máximo desplazamiento)
- ω = frecuencia angular ($\omega = 2\pi f$)
- ϕ = fase inicial

¿QUÉ ES EL MOVIMIENTO ARMÓNICO?

El **movimiento armónico** es un tipo de movimiento oscilatorio que se caracteriza por ser **repetitivo y simétrico**, y cuya **posición varía en el tiempo siguiendo una función senoidal o cosenoidal.** Es la base de muchos fenómenos físicos, desde vibraciones de un resorte hasta ondas sonoras.

$$x(t) = A\sin(\omega t + \phi)$$

Donde:

- $x(t)$ = posición en función del tiempo
- A = amplitud máxima del movimiento
- ω = frecuencia angular ($\omega = 2\pi f$)
- ϕ = fase inicial, que determina dónde comienza la oscilación en $t = 0$

¿QUÉ RELACIÓN EXISTE ENTRE EL MOVIMIENTO OSCILATORIO Y EL MOVIMIENTO ONDULATORIO?

La relación fundamental entre el movimiento oscilatorio y el movimiento ondulatorio es que **el movimiento ondulatorio es la propagación de un movimiento oscilatorio**.

Movimiento Oscilatorio □

El **movimiento oscilatorio** es el movimiento de vaivén de un objeto individual alrededor de un punto de equilibrio. Es un movimiento local, confinado a un solo punto o a una sola partícula. Ejemplos incluyen el balanceo de un péndulo o la vibración de una cuerda de guitarra en un solo punto. En este movimiento, la energía está contenida en la propia partícula o sistema que oscila.

Movimiento Ondulatorio 🌊

El **movimiento ondulatorio** es la forma en que una perturbación se propaga a través de un medio (o el espacio), transportando **energía** pero no **materia**. Las ondas son el resultado de la transferencia de movimiento oscilatorio de una partícula a otra. Cada partícula del medio oscila en su lugar, pero la energía se mueve a lo largo de la onda.

La conexión

En esencia, el **movimiento oscilatorio es la causa y el movimiento ondulatorio es el efecto propagado.** Piénsalo como la "ola" que hace la gente en un estadio de fútbol: cada persona se levanta y se sienta (movimiento oscilatorio), pero la "ola" (la perturbación) viaja alrededor del estadio (movimiento ondulatorio). El movimiento individual de cada persona crea la onda que se propaga a través de la multitud, sin que nadie se mueva de su asiento.

Los rizos en un estanque, los sonidos musicales, los temblores sísmicos producidos por un terremoto: todos éstos son fenómenos *ondulatorios*. Las ondas surgen siempre que un sistema es perturbado de su posición de equilibrio y la perturbación puede viajar o *propagarse* de una región del sistema a otra. Al propagarse una onda, transporta energía. La energía de las ondas de la luz solar calienta la superficie terrestre; en tanto que la energía de las ondas sísmicas puede resquebrajar la corteza terrestre.

¿CÓMO SE CLASIFICAN LAS ONDAS?

1. Según la naturaleza del medio en que se propagan

- **Mecánicas**: necesitan un medio material (sólido, líquido o gas) para propagarse.
  - Ejemplo: ondas en una cuerda, ondas de sonido, olas en el agua.
- **Electromagnéticas**: no necesitan un medio material, se propagan en el vacío.
  - Ejemplo: luz, ondas de radio, microondas, rayos X.
- **De materia**: asociadas al comportamiento cuántico de las partículas.
  - Ejemplo: ondas de de Broglie en mecánica cuántica.

---

2. Según la dirección de vibración respecto a la propagación

- **Longitudinales**: la perturbación es **paralela** a la dirección de propagación.
  - Ejemplo: sonido en el aire.
- **Transversales**: la perturbación es **perpendicular** a la dirección de propagación.
  - Ejemplo: ondas en una cuerda, ondas electromagnéticas.
- **Mixtas**: tienen componentes longitudinales y transversales.
  - Ejemplo: olas en la superficie del agua.

3. Según su periodicidad en el tiempo

- **Periódicas**: se repiten en intervalos regulares.
  - Ejemplo: una onda senoidal.
- **No periódicas o pulsos**: ocurren una sola vez o en intervalos irregulares.
  - Ejemplo: una piedra que cae en el agua y genera un pulso.

---

4. Según su propagación en el espacio

- **Viajeras**: se desplazan transportando energía de un punto a otro.
  - Ejemplo: una onda en una cuerda cuando se agita un extremo.
- **Estacionarias**: no se desplazan, sino que parecen "quedarse fijas" con nodos y vientres.
  - Ejemplo: ondas en una cuerda sujeta en ambos extremos.

5. Según el número de dimensiones en que se propagan

- **Unidimensionales**: en una sola dirección (cuerda).
- **Bidimensionales**: en una superficie (ondas en el agua).
- **Tridimensionales**: en todo el espacio (sonido, luz).

IMPORTANTE!

EN ESTA PARTE DEL CURSO TRATAREMOS CON ONDAS MECÁNICAS TRANSVERSALES Y LONGITIDINALES.

A SU VEZ, NOS IMPORTA CONSIDERAR:

- LAS ONDAS VIAJERAS TRANSVERSALES Y LONGITUDINALES
- LAS ONDAS ESTACONARIAS TRANSVERSALES Y LONGITUDNALES

LAS ONDAS TRANSVERSALES LAS EJEMPLIFICAREMOS CON LAS QUE PRODUCEN LAS CUERDAS
LAS ONDAS LONGITUDINALES LAS EJEMPLIFICAREMOS CON LAS QUE SE PROPOGAN EN EL AIRE, ES DECIR, LAS ONDAS SONORAS.

LAS ONDAS ESTACIONARIAS SE OBTIENEN POR LA INTERFERENCIA (SUMA) DE DOS ONDAS VIAJERAS IDÉNTICAS QUE SE MUEVEN EN SENTIDO CONTRARIO, Y EL TIPO DE ONDA PRODUCIDA DEPENDERÁ DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA DENTRO DE LA CUAL ESTÁN CONFINADAS

¿QUÉ MAGNITUDES SON RELEVANTES PARA DESCRIBR UNA ONDA?

1. Amplitud (A)

- Es el valor máximo de la perturbación respecto a la posición de equilibrio.
- Mide la "intensidad" de la onda (cuanto mayor amplitud, más energía transporta).
- Unidad: depende del tipo de onda → metros (m) en una cuerda, pascales (Pa) en el sonido, voltios/metro (V/m) en ondas electromagnéticas.

---

2. Longitud de onda (λ)

- Distancia entre dos puntos equivalentes de la onda (dos crestas consecutivas, por ejemplo).
- Unidad: metro (m).

---

3. Período (T)

- Tiempo que tarda la onda en completar una oscilación.
- Unidad: segundo (s).

4. Frecuencia (f)

- Número de oscilaciones por unidad de tiempo.
- Se relaciona con el período: $f = \frac{1}{T}$.
- Unidad: hertz (Hz).

---

5. Número de onda (k)

- Cantidad de ondas por unidad de distancia.
- Se define como $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.
- Unidad: rad/m.

6. Velocidad de propagación (v)

- Rapidez con la que la perturbación se traslada en el medio.
- Relación fundamental:

$$v = \lambda f$$

- Unidad: m/s.

8. Intensidad o energía de la onda

- Es la cantidad de energía que la onda transporta por unidad de tiempo y por unidad de superficie.
- En ondas mecánicas, la intensidad es proporcional al **cuadrado de la amplitud** ($I \propto A^2$).
- Unidad: $\mathrm{W/m^2}$.

9. Frecuencia angular (ω)

- Indica la rapidez de la oscilación, pero expresada en radianes por segundo.
- Se relaciona con la frecuencia y el período:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

- Unidad: rad/s.

¿EN CASOS SE DICE QUÉ UNA ONDA ES ARMÓNICA?

Una **onda armónica** es un tipo de onda que se genera a partir de una fuente que realiza un **movimiento armónico simple (MAS)**. Es la forma de onda más simple y fundamental, y su perfil en un instante de tiempo se describe mediante una función senoidal (seno o coseno).

Características principales

- **Origen**: Nace de un oscilador armónico simple.
- **Forma**: Su perfil es una curva sinusoidal, por lo que a menudo se le llama **onda sinusoidal**.
- **Propiedades constantes**: Mantiene una **amplitud**, **frecuencia**, y **longitud de onda** constantes.

Características principales de una onda armónica

1. **Forma matemática:**

   Se puede expresar como:

$$y(x,t) = A\,\sin(\omega t - kx + \varphi)$$

   donde:

$$y\,(x,t) = A\,sen\,(2\pi\,\mathrm{f}\,\mathrm{t} - \frac{2\pi}{\lambda} x + \varphi)$$

   - A = amplitud
   - ω = frecuencia angular
   - k = número de onda
   - φ = fase inicial

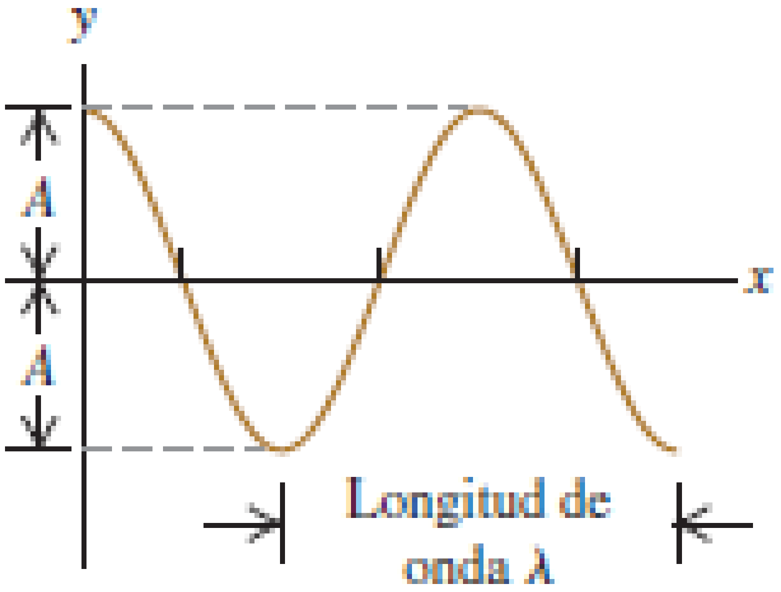
2. **Propagación uniforme:**

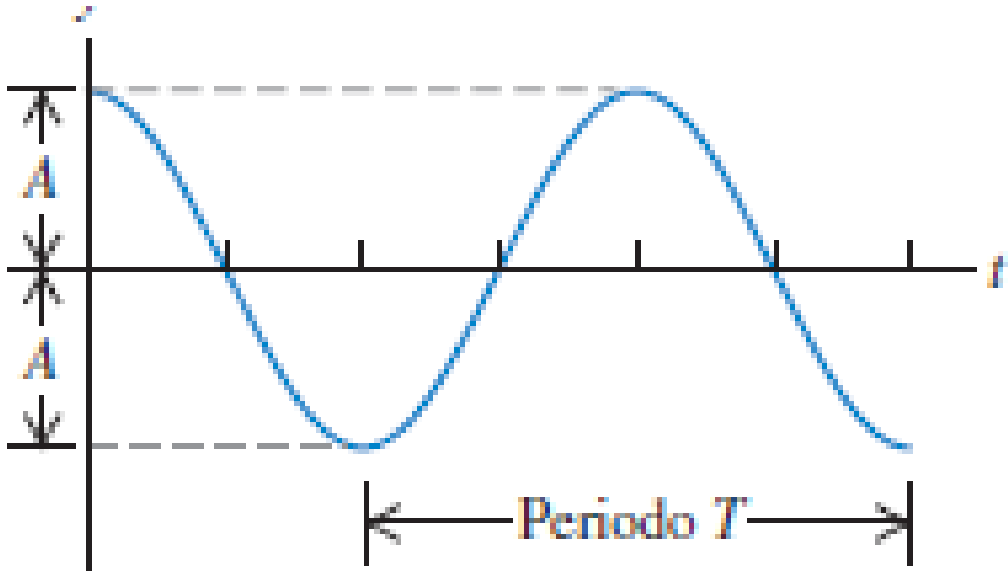
   Transporta energía de manera constante sin cambiar su forma.

3. **Periodicidad:**

   La onda se repite de manera **regular en el tiempo y en el espacio**, formando crestas y valles equidistantes.

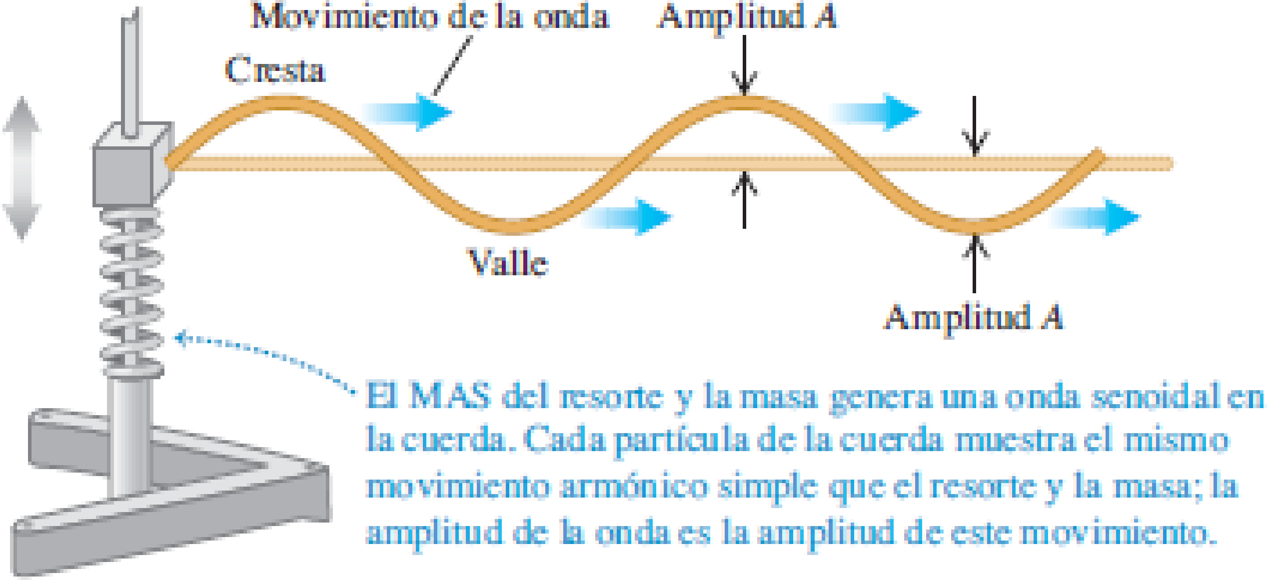
ONDAS ARMÓNICAS

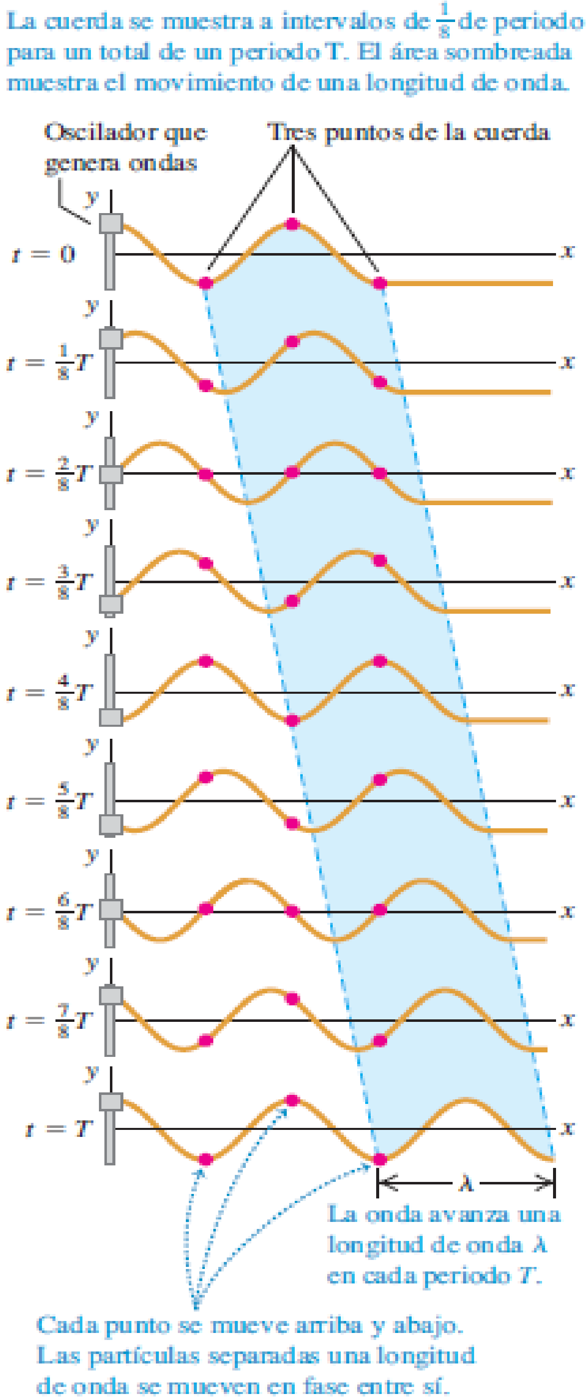


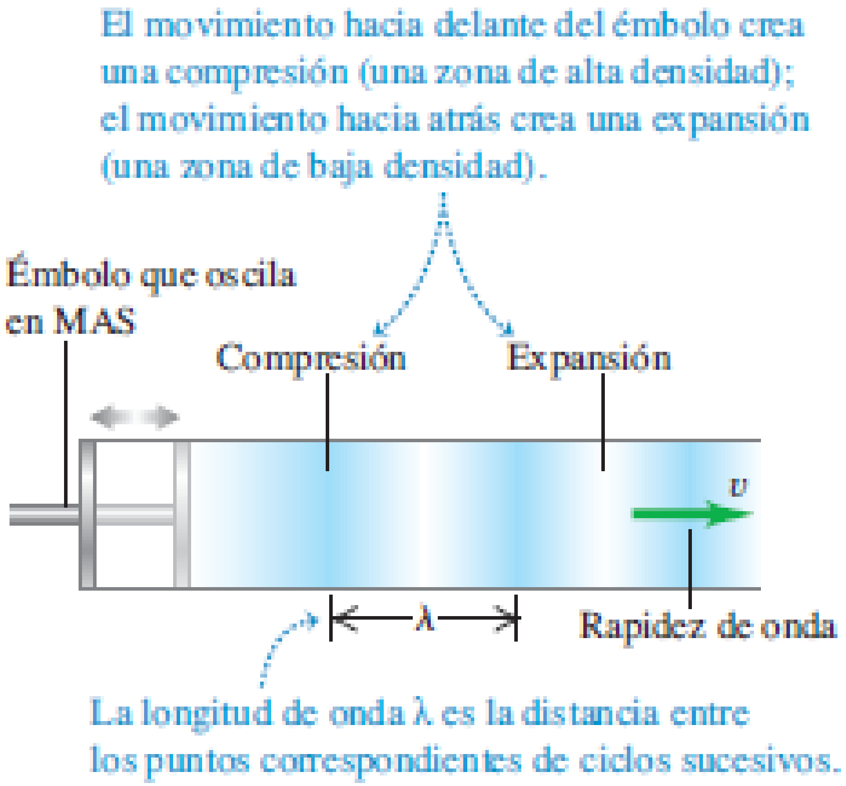


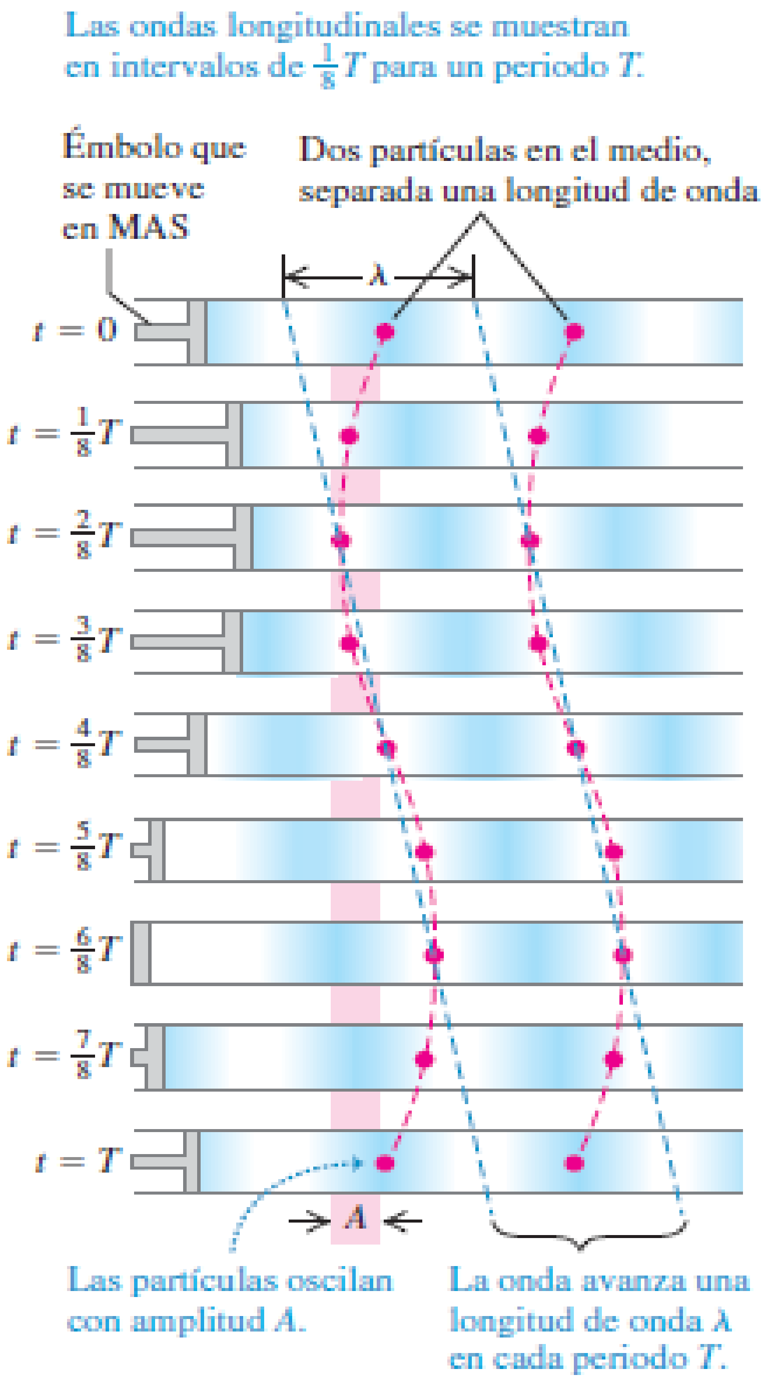
Ejemplos de ondas armónicas

- Una cuerda vibrando con un modo fundamental o armónico.
- Sonido de un diapasón afinado.
- Luz monocromática (una sola frecuencia).


Movimiento de la onda
Amplitud A
Cresta
Valle
Amplitud A
El MAS del resorte y la masa genera una onda senoidal en la cuerda. Cada partícula de la cuerda muestra el mismo movimiento armónico simple que el resorte y la masa; la amplitud de la onda es la amplitud de este movimiento.

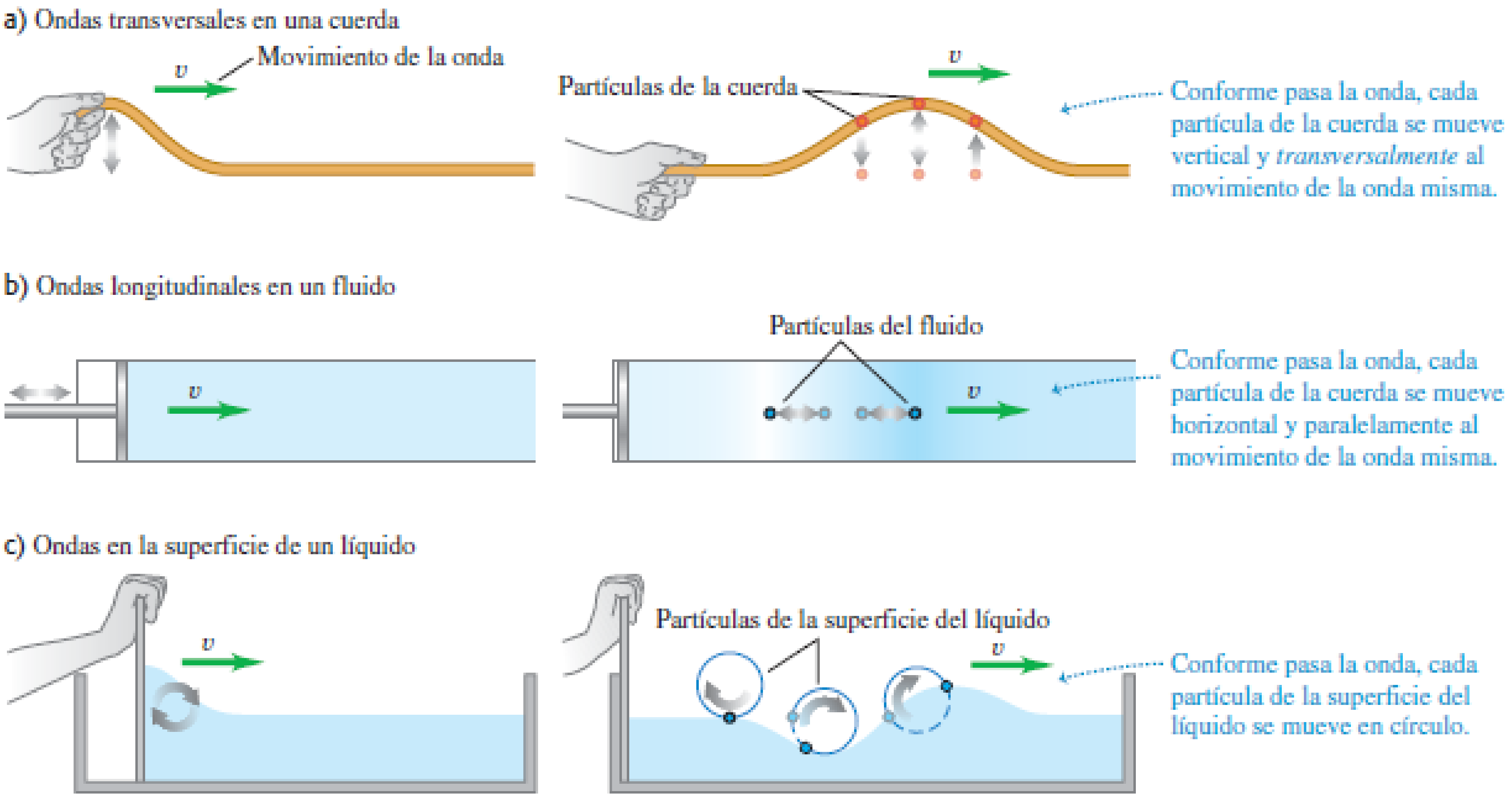

La cuerda se muestra a intervalos de $\frac{1}{8}$ de periodo para un total de un periodo T. El área sombreada muestra el movimiento de una longitud de onda.
Oscilador que genera ondas
Tres puntos de la cuerda
$t = 0$
$t = \frac{1}{8}T$
$t = \frac{2}{8}T$
$t = \frac{3}{8}T$
$t = \frac{4}{8}T$
$t = \frac{5}{8}T$
$t = \frac{6}{8}T$
$t = \frac{7}{8}T$
$t = T$
y
x
λ
La onda avanza una longitud de onda λ en cada periodo T.
Cada punto se mueve arriba y abajo. Las partículas separadas una longitud de onda se mueven en fase entre sí.


El movimiento hacia delante del émbolo crea una compresión (una zona de alta densidad); el movimiento hacia atrás crea una expansión (una zona de baja densidad).
Émbolo que oscila en MAS
Compresión
Expansión
v
λ
Rapidez de onda
La longitud de onda λ es la distancia entre los puntos correspondientes de ciclos sucesivos.


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

ONDAS MECÁNICAS

Una **onda mecánica** es una perturbación que viaja por un material o una sustancia que es el **medio** de la onda. Al viajar la onda por el medio, las partículas que constituyen el medio sufren desplazamientos de varios tipos, dependiendo de la naturaleza de la onda.



¿QUÉ SE ENTIENDE POR ONDA ESTACIONARIA?

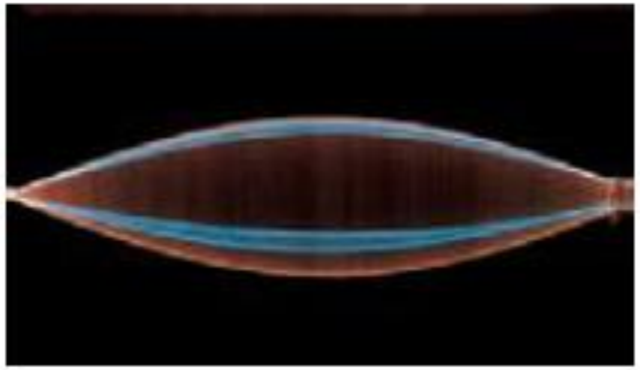
Una **onda estacionaria** es una onda que parece "no moverse" en el espacio; es decir, la distribución de desplazamiento de la onda **permanece fija en el tiempo**, aunque las partículas del medio sí oscilan localmente.

Se forma generalmente por la **interferencia de dos ondas de igual frecuencia y amplitud que se propagan en direcciones opuestas**. En algunos puntos llamados **nodos**, la amplitud es siempre cero, mientras que en otros puntos llamados **vientres**, la amplitud alcanza su valor máximo.

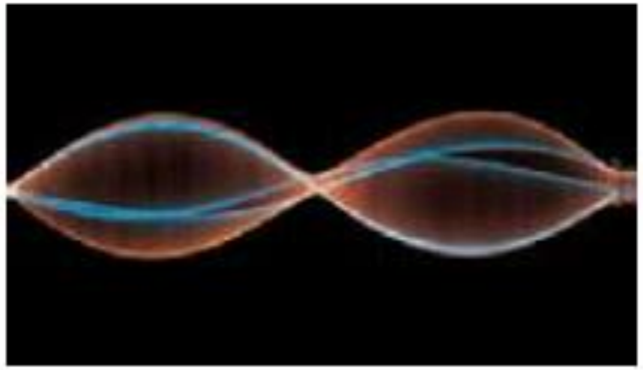
Características principales:

1. Se produce por **interferencia constructiva y destructiva** de ondas en direcciones opuestas.
2. Los **nodos** son puntos donde la amplitud siempre es cero.
3. Los **vientres** son puntos donde la amplitud máxima ocurre.
4. No hay transporte neto de energía a lo largo de la dirección de la onda, solo oscilación local de las partículas.
5. Su frecuencia está determinada por las condiciones del medio y la longitud del "recipiente" donde se forma (como una cuerda fija en ambos extremos).

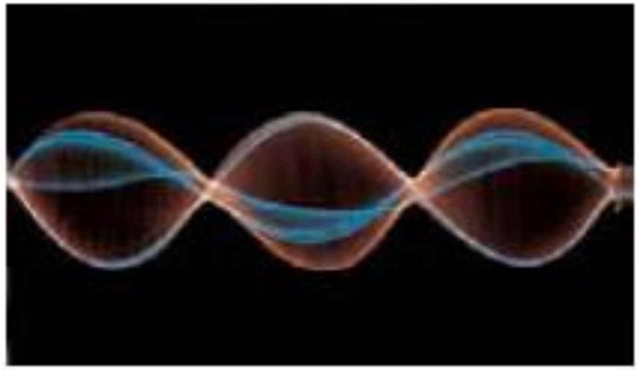
a) La cuerda tiene media longitud de onda



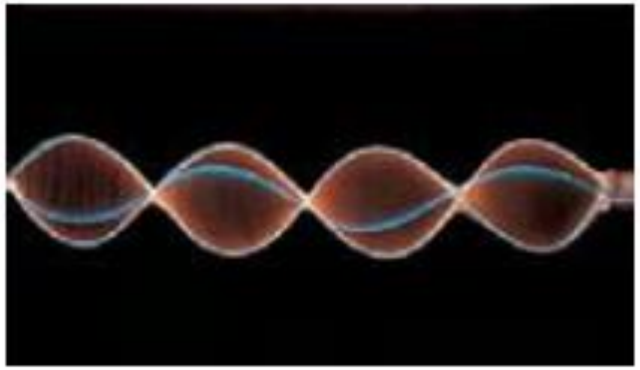
b) La cuerda es de una longitud de onda



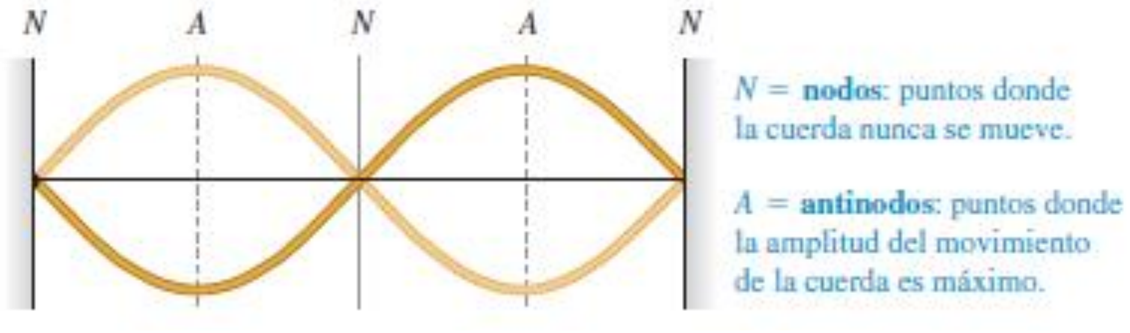
c) La cuerda es de una y media longitudes de onda



d) La cuerda es de dos longitudes de onda



e) La forma de la cuerda en b) en dos instantes diferentes



Nota: los vientres de una onda estacionaria también se conocen como antinodos

FRECUENCIA FUNDAMENTAL, ARMÓNICOS O SOBRETONOS

La **frecuencia fundamental sonora** se refiere a la **frecuencia más baja a la que vibra un cuerpo sonoro** (como una cuerda, una columna de aire, un altavoz, etc.) y que determina el **tono percibido por nuestro oído.** En otras palabras: es la **nota principal** que escuchamos cuando suena un instrumento o cualquier fuente sonora.

Los **armónicos** o **sobretonos** son **frecuencias adicionales que acompañan a la frecuencia fundamental de un sonido.** Son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental y son los que le dan **timbre** o color al sonido, es decir, permiten distinguir, por ejemplo, una guitarra de un piano aunque toquen la misma nota.

1. **Frecuencia fundamental (f_1):**
   - Es la frecuencia más baja y determina el **tono principal** del sonido.
2. **Armónicos ($f_2, f_3, f_4, \ldots$):**
   - Son múltiplos enteros de f_1:

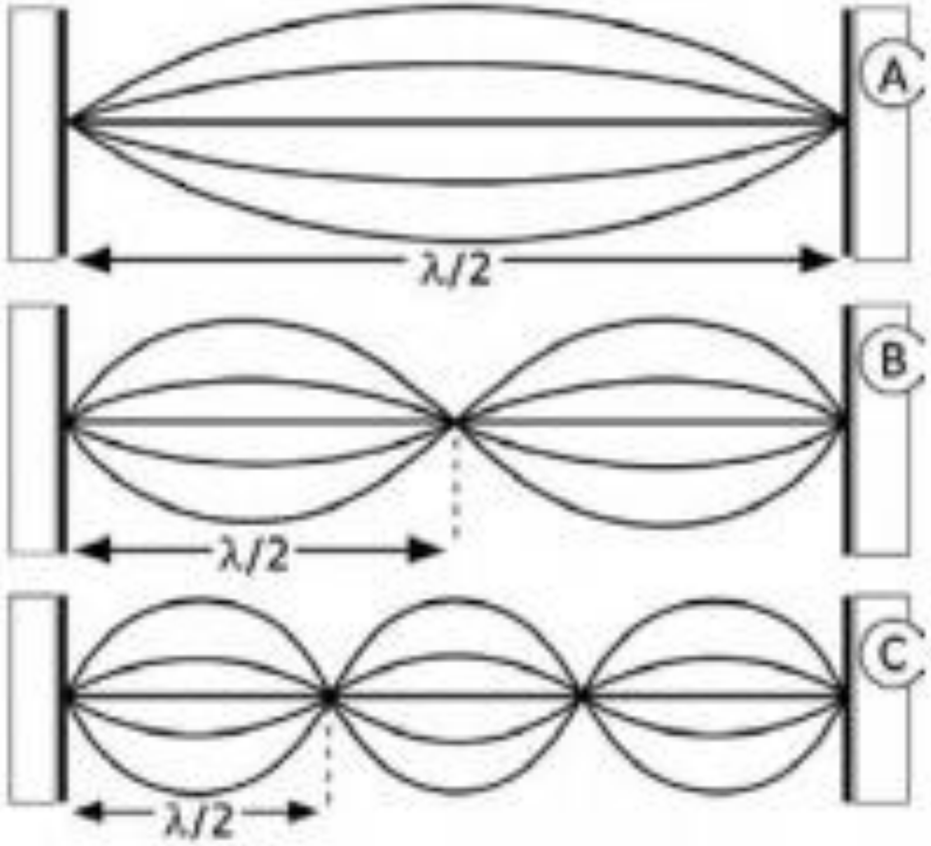
$$f_n = n \cdot f_1 \quad (n = 2, 3, 4, \ldots)$$

   - $f_2 = 2f_1$ → segundo armónico
   - $f_3 = 3f_1$ → tercer armónico, y así sucesivamente.
3. **Sobretonos:**
   - Son los armónicos **excepto la fundamental**.
   - Ejemplo: si $f_1 = 100\,\mathrm{Hz}$, los sobretonos serían 200 Hz, 300 Hz, 400 Hz, etc.

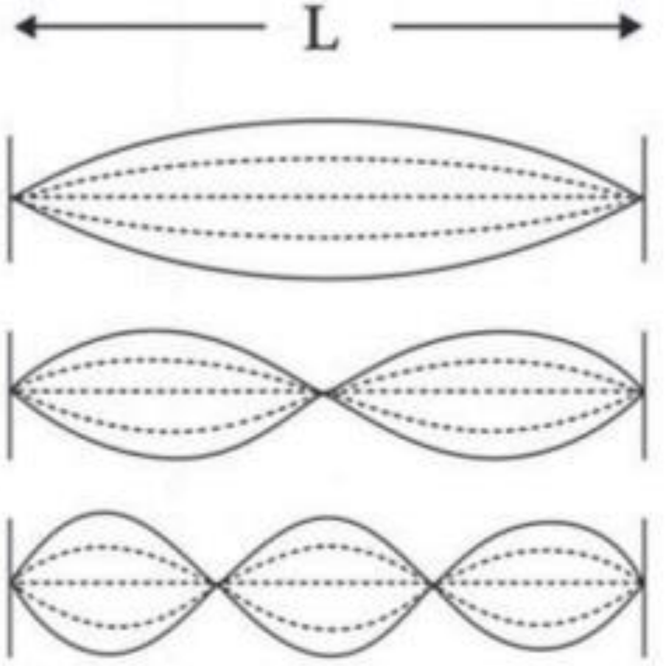
4. **Importancia:**
   - Los sobretonos determinan **el timbre** de un instrumento o voz.
   - Sin ellos, todos los instrumentos sonarían igual, aunque tocaran la misma nota.

ONDAS ESTACIONARIAS EN CUERDAS CON EXTREMOS FIJOS

Cuando se produce la interferencia de dos ondas viajeras que se propagan en un cuerda con extremos fijos, estas condiciones de contorno determinan el tipo de frecuencias que pueden excitarse



Distintas ondas estacionarias en una cuerda con ***ambos*** extremos fijos. Se observa que hay puntos que permanecen fijos: son los llamados nodos. La distancia ***entre dos nodos es igual a la mitad de la longitud de onda,*** $\lambda/2$. Se llama vientre a los puntos que oscilan con mayor amplitud. La distancia ***entre un nodo y un vientre consecutivo es un cuarto de longitud de onda***, $\lambda/4$.



$\lambda_1 = \frac{2L}{1}$, *primer armónico*, $f_1 = 1f_0$, *dos nodos*, (n = 1).

$\lambda_2 = \frac{2L}{2}$, *segundo armónico*, $f_2 = 2f_0$, *tres nodos*, (n = 2).

$\lambda_3 = \frac{2L}{3}$, *tercer armónico*, $f_3 = 3f_0$, *cuatro nodos*, (n = 3).

L: Longitud de la cuerda

$\lambda_n = \frac{2L}{n}$ *con* $n = 1,2,3 \ldots$ *y la cantidad de nodos es* $n + 1$.

$$f_n = \frac{nV}{2L}$$

$$Y(x,t) = 2A.\,sen\,(\frac{2\pi}{\lambda}x)\,.\cos\,(2\pi f t)$$

Ecuación de la onda estacionaria en cuerdas con extremos fijos

ONDAS ESTACIONARIAS SONORAS EN TUBOS

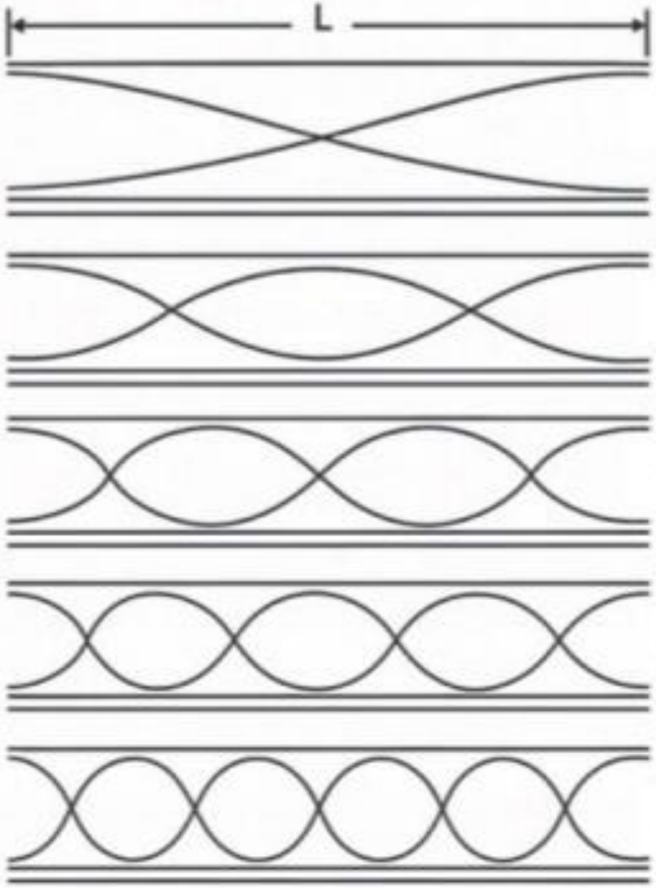
Cuando se produce la interferencia de dos ondas sonoras que se propagan en un tubo existen dos condiciones de contorno que determinan el tipo de frecuencias que pueden excitarse

Extremo abierto: El aire puede vibrar libremente, por lo que allí se forma un vientre (máxima amplitud de desplazamiento de partículas).

Extremo cerrado: El aire no puede moverse, actuando como un nodo (mínima amplitud de desplazamiento de partículas).

ONDAS SONORAS EN TUBOS CON AMBOS EXTREMOS ABIERTOS

L: longitud del tubo



$\lambda_1 = \frac{2L}{1}$, *primer armónico*, $f_1 = 1f_0$, *un nodo*, (n = 1).

$\lambda_2 = \frac{2L}{2}$, *segundo armónico*, $f_2 = 2f_0$, *dos nodos*, (n = 2).

$\lambda_3 = \frac{2L}{3}$, *tercer armónico*, $f_3 = 3f_0$, *tres nodos*, (n = 3).

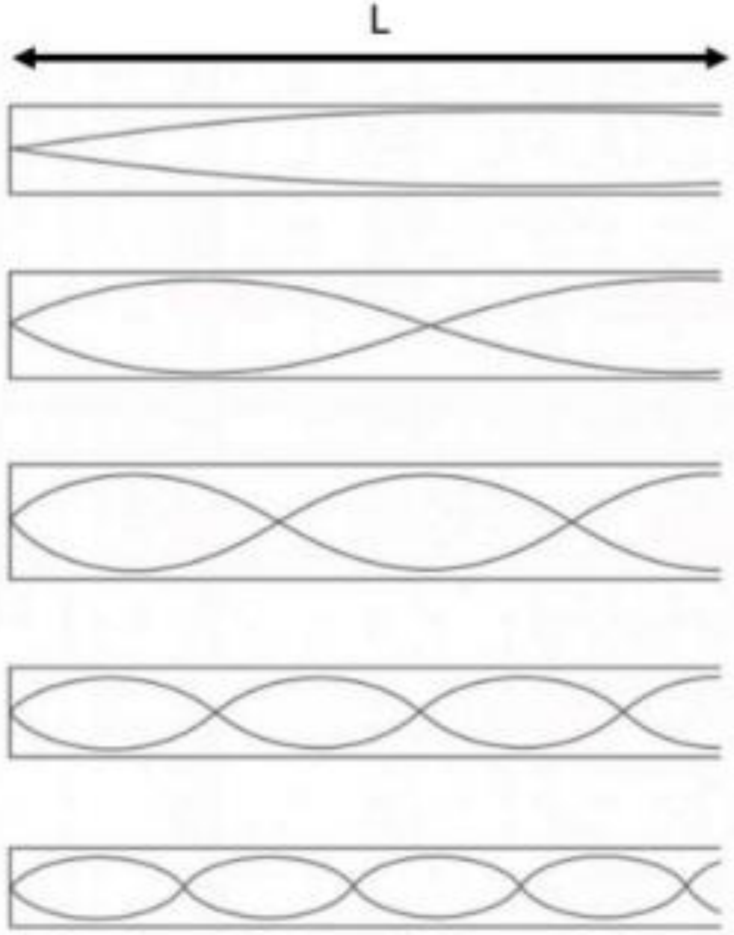
$\lambda_4 = \frac{2L}{4}$, *cuarto armónico*, $f_4 = 4f_0$, *cuatro nodos* (n = 4).

$\lambda_5 = \frac{2L}{5}$, *quinto armónico*, $f_5 = 5f_0$, *cinco nodos*, (n = 5).

$\lambda_n = \frac{2L}{n}$ *con* $n = 1,2,3 \ldots$ *y la cantidad de nodos es* n.

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{n\,v}{2\,L} = \mathrm{n}\,f_0$$

ONDAS SONORAS EN TUBOS CON UN EXTREMO ABIERTO



L: longitud del tubo

$\lambda_1 = \frac{4L}{1}$, *primer armónico*, $f_1 = 1f_0$, *un nodo*, (n = 1).

$\lambda_2 = \frac{4L}{3}$, *segundo armónico*, $f_2 = 3f_0$, *dos nodos*, (n = 2).

$\lambda_3 = \frac{4L}{5}$, *tercer armónico*, $f_3 = 5f_0$, *tres nodos*, (n = 3).

$\lambda_4 = \frac{4L}{7}$, *cuarto armónico*, $f_4 = 7f_0$, *cuatro nodos*, (n = 4).

$\lambda_5 = \frac{4L}{9}$, *quinto armónico*, $f_5 = 9f_0$, *cinco nodos*, (n = 5).

$\lambda_n = \frac{4L}{2n-1}$ *con* $n = 1,2,3 \ldots$ *y la cantidad de nodos es* n.

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{(2n-1)\,v}{4\,L}$$

Créditos:

Esta presentación fue generada tomando como fuentes:

- Apunte teórico Unidad 5 de la cátedra Silva de Biofísica_CBC-UBA
- Texto Física Universitaria_Vol 1 (12° edición): Sears – Zemansky
- IA: Chat GPT-Gemini
- Compilado y resolución de problema modelo de efecto Doppler por Prof. Gustavo Demmel