

Bloque C: Comportamiento Ondulatorio



Resumen Conceptual — Física IB Nivel Superior



Pablo Lanz · Abril 2026

Contenidos

1	Movimiento Armónico Simple (MAS)	2
1.1	Concepto de fuerza recuperadora	2
1.1.1	Ejemplo 1: Péndulo simple. Ver simulación interactiva: MAS en GeoGebra	2
1.1.2	Ejemplo 2: Cilindro de corcho flotando en agua	3
1.2	Ecuaciones de movimiento a partir de la aceleración	3
1.3	Energía en el MAS	4
1.4	Amortiguamiento del MAS	4
2	Ondas: el concepto de MAS extendido	6
2.1	Tipos de ondas	6
2.2	Ecuación general de onda	6
2.3	Doble periodicidad	7
2.4	Frentes de onda	7
3	Principios Ondulatorios	8
3.1	Principio de superposición	8
3.2	Reflexión	8
3.2.1	Reflexión como “choque” contra una pared	8
3.2.2	Reflexión en la aproximación del rayo	9
3.3	Refracción	9
3.4	Difracción	10
3.5	Patrones de difracción	10
3.5.1	Difracción por una rendija. Ver simulación interactiva: Rendija en geogebra	10
3.5.2	Difracción por doble rendija. Ver simulación interactiva: Doble rendija en geogebra	10
4	Ondas Estacionarias	12
4.1	Principio de superposición de una misma onda	12
4.2	Ecuación de la onda estacionaria	12
4.3	Frecuencias de resonancia en tubos	13
4.3.1	Tubo abierto por ambos extremos	13
4.3.2	Tubo cerrado por un extremo (semiabierto)	14
4.3.3	Tubo cerrado por ambos extremos	14

Movimiento Armónico Simple (MAS)

Concepto de fuerza recuperadora

Definición de MAS

Un sistema describe **movimiento armónico simple** si y solo si la fuerza neta (o la aceleración) que actúa sobre él es:

- (i) **proporcional** al desplazamiento desde la posición de equilibrio, y
- (ii) de **sentido opuesto** a dicho desplazamiento (dirigida siempre hacia el equilibrio).

Matemáticamente, la **ecuación definitoria** del MAS es:

$$a = -\omega^2 x$$

donde $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ es la frecuencia angular y x es el desplazamiento.

La fuerza que produce esta aceleración se denomina **fuerza recuperadora**:

$$F = ma = -m\omega^2 x$$

El signo negativo es esencial: indica que la fuerza siempre apunta hacia la posición de equilibrio, opuesta al desplazamiento.

Ejemplo 1: Péndulo simple. Ver simulación interactiva: MAS en GeoGebra

Péndulo simple de longitud L

Consideremos una masa m suspendida de un hilo inextensible de longitud L . Cuando se desplaza un ángulo θ (pequeño) respecto a la vertical, la componente tangencial del peso actúa como fuerza recuperadora:

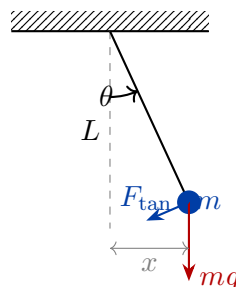
$$F_{\text{tan}} = -mg \sin \theta$$

Para ángulos pequeños ($\theta \ll 1$ rad), se cumple $\sin \theta \approx \theta$ y además $\theta \approx x/L$, donde x es el desplazamiento del arco. Entonces:

$$F \approx -mg \frac{x}{L} = -\left(\frac{mg}{L}\right)x$$

Comparando con $F = -m\omega^2 x$ se obtiene $\omega^2 = g/L$ y por tanto:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$



Ejemplo 2: Cilindro de corcho flotando en agua

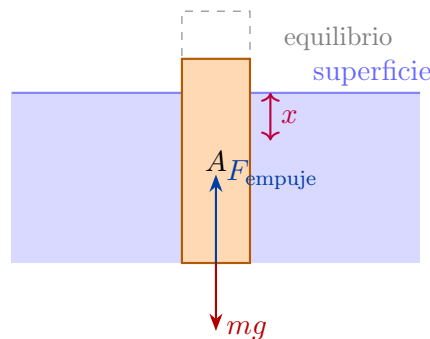
Cilindro de corcho en agua

Un cilindro de corcho de sección transversal A y masa m flota verticalmente en agua (densidad ρ). En equilibrio, el empuje de Arquímedes compensa el peso. Si se desplaza una distancia x hacia abajo desde el equilibrio, el volumen sumergido adicional es $A \cdot x$, lo cual genera un empuje extra:

$$F_{\text{empuje extra}} = -\rho g A x$$

El signo negativo indica que este empuje adicional se opone al desplazamiento (si se hunde más, la fuerza neta apunta hacia arriba y viceversa). Comparando con $F = -m\omega^2 x$:

$$\omega^2 = \frac{\rho g A}{m} \quad \Rightarrow \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{\rho g A}}$$



Idea general

En ambos ejemplos (y en un resorte ideal, $F = -kx$), la lógica es la misma: identificar la fuerza neta que actúa sobre el sistema al desplazarlo una distancia x del equilibrio, demostrar que es proporcional a x y de sentido contrario, y de ahí extraer ω^2 comparando con $F = -m\omega^2 x$.

Ecuaciones de movimiento a partir de la aceleración

Partimos de la ecuación definitoria del MAS:

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 x$$

La solución general de esta ecuación diferencial es:

Ecuaciones cinemáticas del MAS

$$x(t) = x_0 \sin(\omega t + \phi) \quad (1)$$

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = \omega x_0 \cos(\omega t + \phi) \quad (2)$$

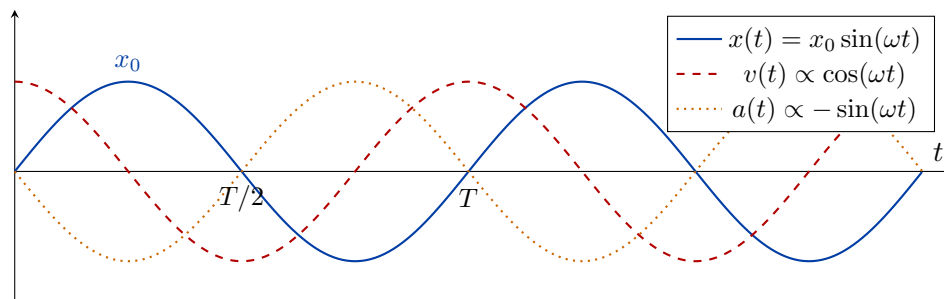
$$a(t) = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 x_0 \sin(\omega t + \phi) = -\omega^2 x(t) \quad (3)$$

donde x_0 es la **amplitud** (desplazamiento máximo) y ϕ es la **fase inicial**.

De la ecuación (2) se obtiene una relación útil entre velocidad y desplazamiento eliminando el tiempo:

$$v = \pm \omega \sqrt{x_0^2 - x^2}$$

La velocidad máxima se alcanza en $x = 0$: $v_{\max} = \omega x_0$.



Energía en el MAS

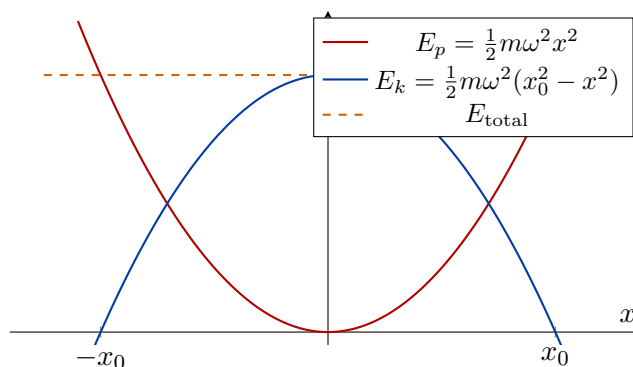
En un MAS sin disipación, la energía total se conserva y se reparte entre energía cinética y energía potencial:

Energía del MAS

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\omega^2(x_0^2 - x^2) \quad (4)$$

$$E_p = \frac{1}{2}m\omega^2 x^2 \quad (5)$$

$$E_{\text{total}} = E_k + E_p = \frac{1}{2}m\omega^2 x_0^2 = \text{constante} \quad (6)$$



Transferencia de energía

En $x = 0$ (equilibrio): toda la energía es cinética ($E_k = E_{\text{total}}$, $E_p = 0$).

En $x = \pm x_0$ (extremos): toda la energía es potencial ($E_p = E_{\text{total}}$, $E_k = 0$, $v = 0$).

Amortiguamiento del MAS

En sistemas reales, fuerzas disipativas (fricción, resistencia del medio) reducen progresivamente la amplitud. El desplazamiento de un MAS **subamortiguado** se puede describir como el producto de dos funciones:

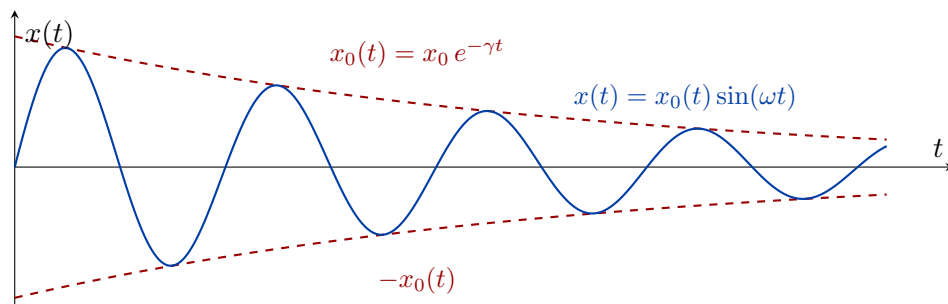
MAS amortiguado: combinación de funciones

$$x(t) = x_0(t) \cdot \sin(\omega t + \phi)$$

donde:

- $x_0(t) = x_0 e^{-\gamma t}$ es la **envolvente** exponencial decreciente ($\gamma > 0$ es el coeficiente de amortiguamiento). La amplitud decrece con el tiempo.
- $\sin(\omega t + \phi)$ es la **oscilación** con frecuencia angular ω .

La señal resultante es una senoide cuya amplitud decrece exponencialmente con el tiempo.

**Tipos de amortiguamiento**

Subamortiguado ($\gamma < \omega$): el sistema oscila con amplitud decreciente.

Críticamente amortiguado ($\gamma = \omega$): retorno al equilibrio en el menor tiempo posible sin oscilar.

Sobreamortiguado ($\gamma > \omega$): retorno lento al equilibrio sin oscilar.

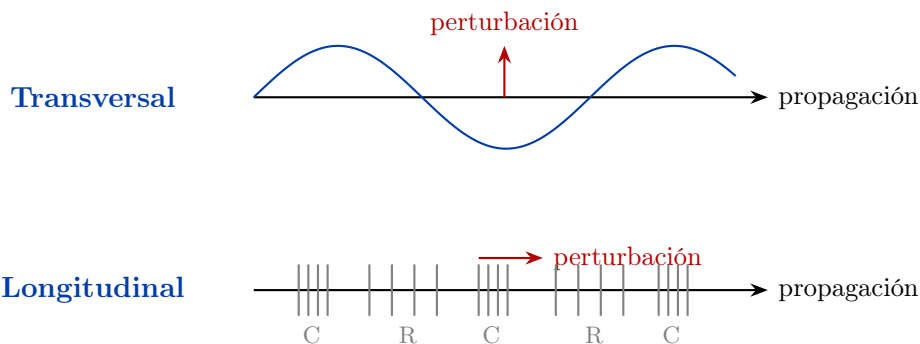
Ondas: el concepto de MAS extendido

Una **onda** se puede entender como la propagación espacial de un MAS: cada punto del medio realiza un MAS, pero con un desfase que depende de su posición. Así, el MAS queda “extendido” en el espacio.

Tipos de ondas

Clasificación de ondas

- **Ondas transversales:** la perturbación es perpendicular a la dirección de propagación (ejemplo: ondas en una cuerda, ondas electromagnéticas).
- **Ondas longitudinales:** la perturbación es paralela a la dirección de propagación (ejemplo: ondas de sonido, compresiones en un resorte).



Ecuación general de onda

Ecuación de onda viajera

La ecuación general de una onda armónica que se propaga en la dirección $+x$ es:

$$y(x, t) = y_0 \sin(\omega t - kx)$$

donde:

- y_0 : amplitud de la onda.
- $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$: frecuencia angular (periodicidad temporal).
- $k = \frac{2\pi}{\lambda}$: número de onda (periodicidad espacial).
- La velocidad de propagación es $v = f\lambda = \frac{\omega}{k}$.

$$y(x, t) = y_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}x\right)$$

Para propagación en la dirección $-x$, el argumento cambia a $(\omega t + kx)$.

Doble periodicidad

Doble periodicidad de las ondas

Una onda posee **dos periodicidades** simultáneas, lo que la distingue del MAS puntual:

1. **Periodicidad temporal** (período T): si se observa un punto fijo del medio, su desplazamiento se repite cada intervalo de tiempo T .

$$y(x_0, t + T) = y(x_0, t) \quad \text{con } T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$$

2. **Periodicidad espacial** (longitud de onda λ): si se toma una “fotografía” de la onda en un instante dado, el patrón se repite cada distancia λ .

$$y(x + \lambda, t_0) = y(x, t_0) \quad \text{con } \lambda = \frac{2\pi}{k}$$

Ambas se relacionan a través de la velocidad de propagación: $v = \lambda/T = \lambda f$.

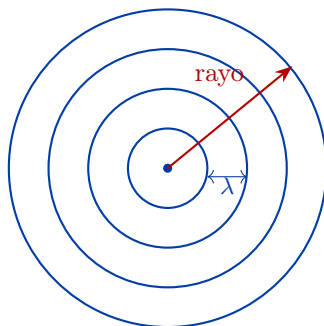
Frentes de onda

Frentes de onda y rayos

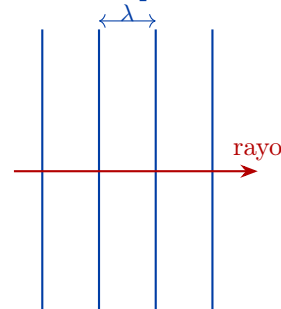
Un **frente de onda** es el lugar geométrico de todos los puntos del medio que vibran en la misma fase en un instante dado. Los **rayos** son líneas perpendiculares a los frentes de onda que indican la dirección de propagación.

- **Fuente puntual:** frentes de onda circulares (2D) o esféricos (3D). A gran distancia de la fuente, los frentes se aproximan a rectas/planos (**ondas planas**).
- Siempre tienen una dimensión menos que la onda.
- La distancia entre frentes de onda consecutivos (misma fase) es λ .

Frentes circulares



Frentes planos



Principios Ondulatorios

Principio de superposición

Superposición

Cuando dos o más ondas coinciden en una región del espacio, el **desplazamiento resultante** en cada punto es la **suma algebraica** de los desplazamientos individuales:

$$y_{\text{total}}(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t) + \dots$$

Esto conduce a fenómenos de **interferencia**:

- **Constructiva**: las ondas están en fase (diferencia de camino = $n\lambda$, con $n \in \mathbb{Z}$); las amplitudes se suman.
- **Destructiva**: las ondas están en antifase (diferencia de camino = $(n + \frac{1}{2})\lambda$); las amplitudes se cancelan total o parcialmente.

Reflexión

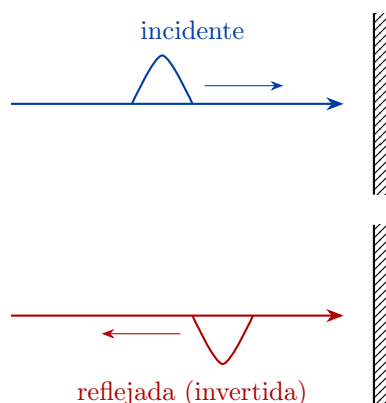
Reflexión como “choque” contra una pared

Reflexión de un pulso en un extremo fijo

Cuando un pulso viajero alcanza una pared rígida (extremo fijo), se refleja con las siguientes propiedades:

- La onda reflejada tiene la **misma velocidad y longitud de onda**.
- Se produce un **cambio de fase de π** (inversión): la cresta se convierte en valle.
- En el punto de la pared, la superposición del pulso incidente e invertido garantiza que el desplazamiento es siempre cero (condición de nodo).

Si el extremo es **libre**, la reflexión ocurre **sin** inversión de fase.



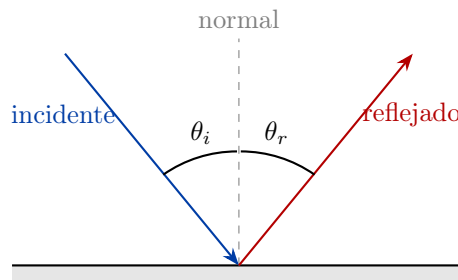
Reflexión en la aproximación del rayo

Ley de reflexión (aproximación de rayos)

Cuando una onda incide sobre una superficie reflectante plana, se cumple la **ley de reflexión**:

$$\theta_i = \theta_r$$

donde θ_i es el ángulo de incidencia y θ_r el de reflexión, ambos medidos respecto a la **normal** a la superficie. El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal están en el mismo plano.



Refracción

Refracción y Ley de Snell

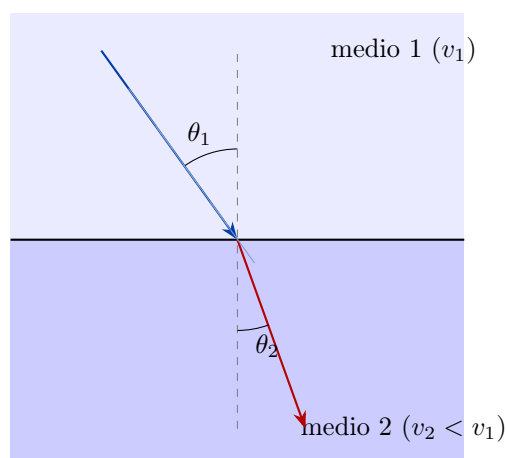
Cuando una onda pasa de un medio a otro con diferente velocidad de propagación, cambia su dirección (excepto si incide perpendicularmente). La frecuencia f se mantiene constante; lo que cambia es la longitud de onda y la velocidad.

Ley de Snell:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad \text{donde} \quad n = \frac{c}{v} \text{ (índice de refracción)}$$

Equivalentemente, en términos de velocidades:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$



Difracción

Difracción

La **difracción** es el fenómeno por el cual una onda se curva y se extiende al pasar por una abertura o rodear un obstáculo. Es más pronunciada cuando el tamaño de la abertura b es del mismo orden que la longitud de onda λ .

- Si $b \gg \lambda$: difracción despreciable, la onda se propaga casi en línea recta.
- Si $b \approx \lambda$: difracción máxima, la onda se extiende en todas direcciones tras la abertura.

Patrones de difracción

Difracción por una rendija. Ver simulación interactiva: [Rendija en geogebra](#)

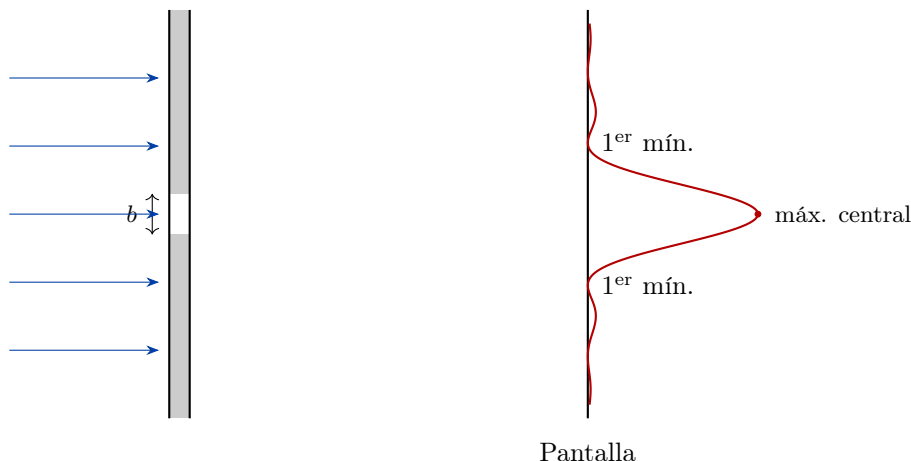
Patrón de difracción de una rendija

Cuando una onda plana monocromática atraviesa una rendija de ancho b , se produce un patrón de difracción con un **máximo central** ancho y brillante, flanqueado por mínimos y máximos secundarios de intensidad decreciente.

Los **mínimos** de intensidad (oscuridad) se producen cuando:

$$b \sin \theta = n\lambda \quad (n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots)$$

El primer mínimo ($n = 1$) define el ancho angular del máximo central: $\theta_1 = \arcsin(\lambda/b)$. El ancho angular total del máximo central es $2\theta_1$.



Pantalla

Difracción por doble rendija. Ver simulación interactiva: [Doble rendija en geogebra](#)

Patrón de doble rendija

Cuando la luz pasa por dos rendijas paralelas separadas una distancia d , se produce un patrón de **interferencia** (franja equiespaciadas) **modulado** por la envolvente de difracción de cada rendija individual.

Máximos de interferencia (franja brillantes):

$$d \sin \theta = n\lambda \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

En la aproximación de ángulos pequeños, la separación entre franjas en una pantalla a distancia

D es:

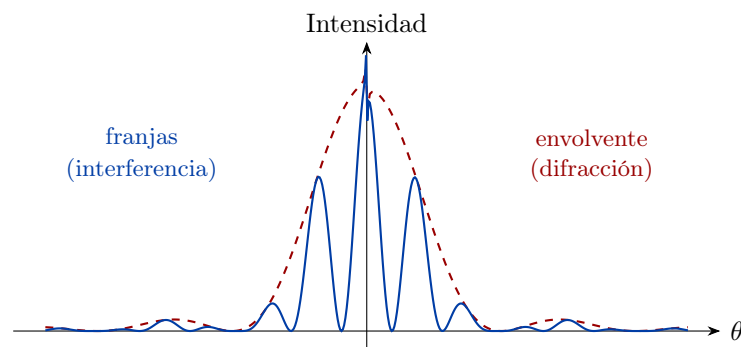
$$s = \frac{\lambda D}{d}$$

Mínimos de interferencia (franja oscura):

$$d \sin \theta = \left(n + \frac{1}{2}\right) \lambda$$

El patrón observado es la **combinación** de:

- Las franjas de interferencia finas (debidas a la separación d entre rendijas).
- La envolvente de difracción ancha (debida al ancho b de cada rendija individual).



Resumen de fórmulas clave para rendijas

Condición	Una rendija (ancho b)	Doble rendija (separación d)
Mínimos	$b \sin \theta = n\lambda$	$d \sin \theta = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$
Máximos	máx. central en $\theta = 0$	$d \sin \theta = n\lambda$

Ondas Estacionarias

Principio de superposición de una misma onda

Formación de ondas estacionarias

Una **onda estacionaria** se forma cuando dos ondas viajeras **idénticas** (misma amplitud, frecuencia y longitud de onda) se propagan en **sentidos opuestos** y se superponen. Esto ocurre típicamente cuando una onda se refleja en un extremo y se superpone con la onda incidente.

Consideremos las dos ondas:

$$y_1(x, t) = y_0 \sin(\omega t - kx) \quad (\text{onda hacia } +x)$$

$$y_2(x, t) = y_0 \sin(\omega t + kx) \quad (\text{onda hacia } -x)$$

Por el principio de superposición, $y = y_1 + y_2$. Aplicando la identidad trigonométrica de suma a producto:

$$\sin A + \sin B = 2 \sin\left(\frac{A+B}{2}\right) \cos\left(\frac{A-B}{2}\right)$$

se obtiene la ecuación de la onda estacionaria.

Ecuación de la onda estacionaria

Ecuación y dependencia de la amplitud con la posición

$$y(x, t) = \underbrace{2y_0 \cos(kx)}_{\text{amplitud}(x)} \cdot \sin(\omega t)$$

La diferencia fundamental con una onda viajera es que la **amplitud depende de la posición** x :

$$A(x) = 2y_0 \cos(kx) = 2y_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right)$$

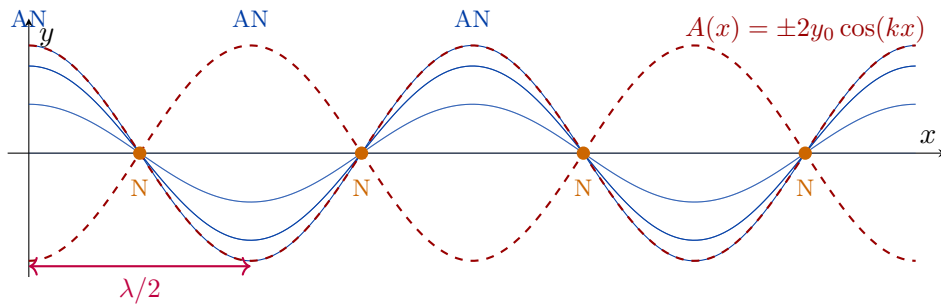
- **Nodos:** puntos donde $A(x) = 0$ permanentemente. Se producen cuando $\cos(kx) = 0$, es decir:

$$x_{\text{nodo}} = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \dots = \frac{(2m+1)\lambda}{4} \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

- **Antinodos:** puntos donde $|A(x)| = 2y_0$ (amplitud máxima). Se producen cuando $|\cos(kx)| = 1$, es decir:

$$x_{\text{antinodo}} = 0, \frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3\lambda}{2}, \dots = \frac{m\lambda}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

- La distancia entre dos nodos consecutivos (o dos antinodos consecutivos) es $\lambda/2$.
- Todos los puntos entre dos nodos consecutivos oscilan **en fase** entre sí.
- Cada punto de una longitud de onda de la onda estacionaria **tiene una amplitud distinta**.
- La onda estacionaria **no transporta energía** neta.



Frecuencias de resonancia en tubos

Las ondas estacionarias se forman en tubos (columnas de aire) cuando la longitud del tubo L es un múltiplo adecuado de la semilongitud de onda. Las condiciones de contorno dependen de si los extremos son abiertos (antinodo de desplazamiento) o cerrados (nodo de desplazamiento).

Tubo abierto por ambos extremos

Tubo abierto-abierto

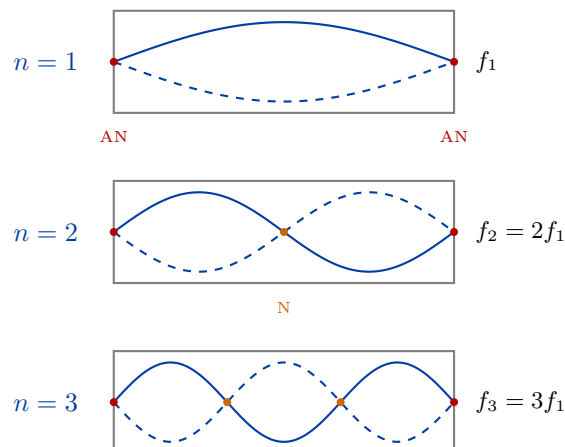
Ambos extremos son antinodos. La condición es que un número entero de semilongitudes de onda quepa en L :

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

De donde $\lambda_n = \frac{2L}{n}$ y usando $v = f\lambda$:

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

Se producen **todos los armónicos** (pares e impares). La frecuencia fundamental es $f_1 = \frac{v}{2L}$.



Tubo cerrado por un extremo (semiabierto)

Tubo cerrado–abierto

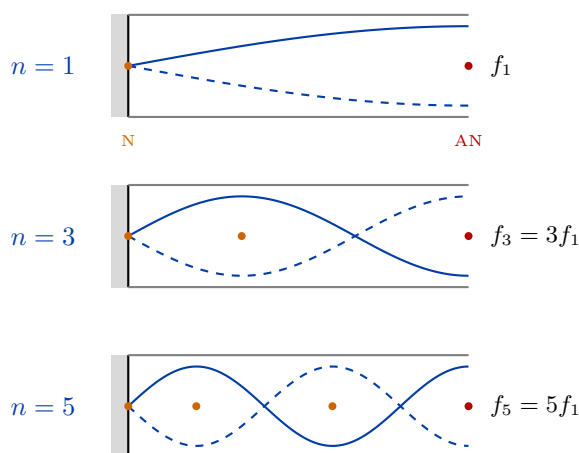
Un extremo cerrado (nodo) y un extremo abierto (antinodo). La condición es que un número impar de cuartos de longitud de onda quepa en L :

$$L = n \frac{\lambda_n}{4} \quad (n = 1, 3, 5, \dots)$$

De donde $\lambda_n = \frac{4L}{n}$ y:

$$f_n = n \frac{v}{4L} = n f_1 \quad (n = 1, 3, 5, \dots \text{ solo impares})$$

Solo se producen **armónicos impares**. La frecuencia fundamental es $f_1 = \frac{v}{4L}$.



Tubo cerrado por ambos extremos

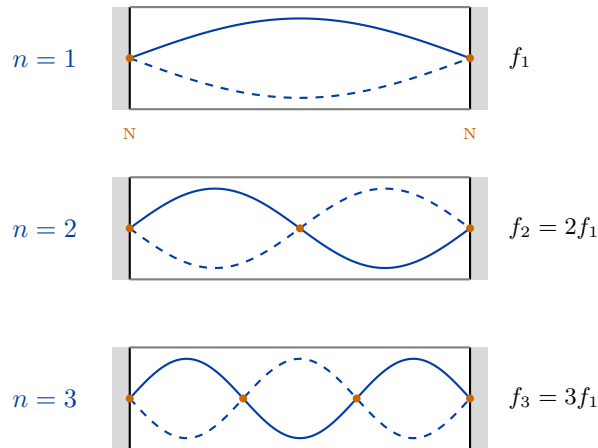
Tubo cerrado–cerrado

Ambos extremos son nodos. La condición es idéntica a la del tubo abierto por ambos extremos (pero con nodos en lugar de antinodos en los extremos):

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

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

Se producen **todos los armónicos**, al igual que en el tubo abierto. La frecuencia fundamental es $f_1 = \frac{v}{2L}$, idéntica a la del tubo abierto de la misma longitud. La diferencia está en la distribución de nodos y antinodos: aquí hay nodos en ambos extremos.



Resumen comparativo de frecuencias en tubos

Tipo de tubo	Extremos	f_n	Armónicos
Abierto–abierto	AN–AN	$f_n = n \frac{v}{2L}$	todos ($n = 1, 2, 3, \dots$)
Cerrado–abierto	N–AN	$f_n = n \frac{v}{4L}$	solo impares ($n = 1, 3, 5, \dots$)
Cerrado–cerrado	N–N	$f_n = n \frac{v}{2L}$	todos ($n = 1, 2, 3, \dots$)

Nota: el tubo semiabierto (cerrado–abierto) tiene una frecuencia fundamental que es la **mitad** de la del tubo abierto de la misma longitud, y solo produce armónicos impares. Esto le da un timbre característicamente diferente.