



## 1. Movimiento ondulatorio. Ideas básicas

La propagación de un movimiento oscilatorio, transportándose energía pero no materia, se denomina movimiento ondulatorio, aunque se suele hablar de ondas, ya que a veces lo que se propaga no es claramente un movimiento como ocurre en una cuerda, sino una perturbación en una propiedad del medio (presión en sonido, electromagnética en radio). Aquí nos centramos en ondas mecánicas; en medio material elástico.

En el movimiento ondulatorio tenemos dos direcciones distintas, que no tienen por qué coincidir:

-Dirección de oscilación: en la que oscila cada partícula mediante un MAS.

-Dirección de propagación: en la que se propaga la oscilación y la energía.

## 2. Clasificaciones movimiento ondulatorio. Tipos de ondas.

A. Según la duración de la perturbación del foco emisor:

**Pulsos:** una perturbación aislada. Ejemplo: estallido bomba, pulso luminoso, pulso cuerda.

**Tren de ondas:** sucesión de perturbaciones. Subtipo son las **ondas armónicas**, producidas MAS.

B. Según la dirección relativa de dirección de oscilación y de propagación:

**Transversales:** ambas son perpendiculares. Ejemplo: oscilación cuerda tensa, onda radio.

**Longitudinales:** ambas coinciden. Ejemplo: sonido, ondas en un muelle vertical.

C. En función del número de dimensiones en el que se propaga la energía/en función del frente de onda (el conjunto de puntos que son alcanzados al mismo tiempo por la onda y oscilan en fase).

**Tridimensionales:** frente de onda esférica, se propagan radialmente en todas direcciones.

**Bidimensionales:** frente de onda circular, se propagan radialmente sobre un plano.

**Unidimensionales/planas:** frente de onda plano, se propagan en una recta. Una onda tridimensional se puede considerar plana estando suficientemente alejada de la fuente.

Nos centramos en: *armónicas, planas y sin amortiguamiento.*

## 3. Magnitudes características de las ondas

Magnitudes básicas: Amplitud (A) y frecuencia f y frecuencia angular ( $\omega$ ) comunes a movimiento oscilatorio

**Longitud de onda  $\lambda$  "lambda":** distancia entre dos puntos consecutivos con misma elongación.

**Número de onda k:**  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  Cualitativamente es "frecuencia espacial", unidades SI rad/m

No confundir 2 conceptos que comparten letra k: número de onda (rad/s) y constante elasticidad MAS (N/m).

**Velocidad de propagación ó de fase**  $v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f = \frac{\omega}{k}$

Velocidad de propagación sólo depende del medio, no de foco como  $\lambda$ ,  $\omega$  ...

Uso de v (ni) frente a f: aquí f para evitar confusión con v de velocidad, símbolos muy similares.

## 4. Ecuación de las ondas armónicas planas

**Ecuación de onda**  $y(x, t) = A \cos(\omega t \pm kx + \varphi_0)$   $\varphi_0$  es la fase inicial, asociada a y para  $x=0$  y  $t=0$

Otras expresiones sin  $\varphi$  inicial  $y(x, t) = A \cos(2\pi(\frac{t}{T} \pm \frac{x}{\lambda})) = A \cos(\omega(t \pm \frac{x}{v})) = A \cos(k(vt \pm x))$

Similar a MAS: elección coseno o seno arbitraria, implicará un desfase distinto. Uso de radianes.

Distinto a MAS: significado "y" elongación, "x" sentido propagación, por defecto en metros (SI)

La ecuación tiene **doble periodicidad espacial y temporal**; para una posición fija se trata MAS. No se pueden representar estáticamente ambas al tiempo, se hace y-x ó y-t.

En la ecuación de onda el signo que precede a x va asociado a dirección propagación: - asociado a propagación en la dirección de x positivas, y + en dirección de x negativas.

No confundir conceptos asociados a velocidad: v de propagación y v de oscilación (dy/dt)

Expresión útil deducible:  $\Delta\varphi = \omega\Delta t \pm k\Delta x$ . Para t ó x fijo:  $\Delta\varphi = k\Delta x$  y  $\Delta\varphi = \omega\Delta t$ .

## 5. Aspectos energéticos en las ondas

$E = \frac{1}{2} k A^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2$  ;  $I = \frac{E}{St} = \frac{P}{S}$  [W/m<sup>2</sup>] Superficie perpendicular a dirección propagación.

Diferenciar atenuación y absorción:

**Atenuación** en propagación tridimensional con frentes de onda esféricos (Superficie esfera=4 $\pi r^2$ ):

$$A \propto \frac{1}{r} ; I \propto \frac{1}{r^2} ; I \propto A^2 ; \frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1^2}{A_2^2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \Rightarrow \frac{r_2}{r_1} = \frac{A_1}{A_2}$$

**Absorción:**  $I = I_0 e^{-\beta r}$  donde  $\beta$  = coeficiente de absorción, para cada medio, tipo onda, f.





## 6. Ondas sonoras

Sonido y sensación auditiva. Rango de frecuencias del oído humano: aproximadamente 20 Hz a 20 kHz  
 Escala logarítmica, más cercana a cómo lo interpreta el cerebro (en amplitud)  
 Diferenciar Intensidad ( $I$ , en  $W/m^2$ ) y Nivel de intensidad ( $\beta$ , en dB) ó S sensación sonora.

$$\beta (dB) = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad \text{Intensidad umbral de audición } I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \quad \beta = 10 \log \frac{r_o^2}{r^2} \quad \Delta \beta = 10 \log \frac{r_A^2}{r_B^2}$$

### 6.1 Contaminación acústica: Sus fuentes y efectos.

Contaminación/ruido: sonido excesivo y molesto, altera condiciones normales: afecta salud (auditiva, física, mental). OMS 70 dB límite superior deseable. 140 dB umbral del dolor

## 7. Efecto Doppler

(Expresión general; se simplifica si  $v_{\text{observador}}$  ó  $v_{\text{foco}}$  nulas, varios casos signos: ++, +-, -+, --)  
 $f' = f \frac{v \pm v_{ob}}{v \pm v_{fo}}$  Acercamiento:  $f'$  crece (signo + numerador si es observador y - denominador si es foco).  
 Alejamiento:  $f'$  decrece (signo - numerador si es observador y + denominador si es foco)

Luz y relatividad; casos especiales que se tratan en otros bloques (óptica física/ física moderna)

## 8. Principio de superposición. Interferencias y casos

Principio de **superposición**: varias ondas en mismo espacio y tiempo se suman elongaciones y se produce una onda de amplitud mayor o menor.

**Interferencias**: fenómeno asociado a la superposición de 2 o más ondas en el mismo medio. La interferencia depende de la diferencia de fase  $\delta = \Phi_2 - \Phi_1$

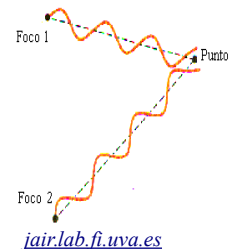
Para que la interferencia sea estacionaria (en espacio y tiempo) deben ser ondas coherentes (fase relativa constante: misma  $\omega$  y  $\lambda$ ). Sencillez misma  $\phi_0$

En ese caso  $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d$  donde  $d = (x_2 - x_1)$

Caso general:  $A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2 A_1 A_2 \cos \delta$ ;  $I = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$

-**Máximos (constructiva)**, llegan en fase):  $d = n \lambda$ . Si  $A_1 = A_2$ ,  $A = 2A_1$ ,  $I = 4I_1$

-**Mínimos (destruictiva)**, llegan en oposición de fase):  $d = (2n-1) \lambda/2$ . Si  $A_1 = A_2$ ,  $A = 0$ ,  $I = 0$



### 8.1. Ondas estacionarias

**Interferencias / superposición** de dos ondas con misma  $A$  y  $\omega$  que se propagan en sentidos opuestos (incidente y reflejada, que en reflexión cambia  $180^\circ$  fase)

$$y(x, t) = A \cos(\omega t - kx) - A \cos(\omega t + kx) = A_r \text{sen}(\omega t) \quad \text{donde } A_r = 2A \text{sen} kx : \text{ la amplitud}$$

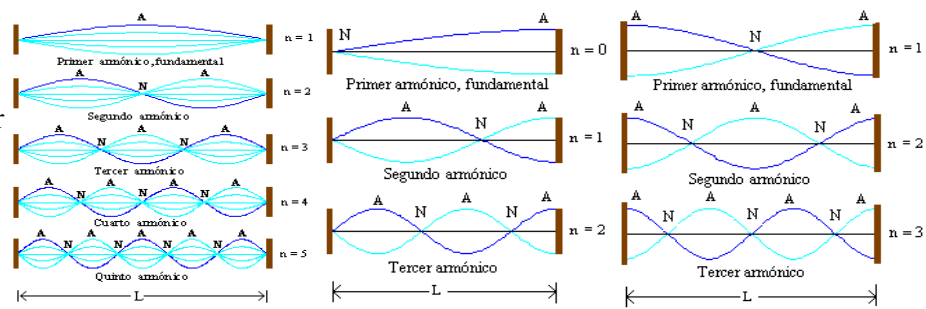
resultante varía según la posición.

-**Nodos**: puntos fijos con elongación nula en cualquier instante de tiempo ( $y=0$ ).

$$A_r = 0 \rightarrow x_N = n \cdot \lambda/2$$

-**Vientres o antinodos**: puntos con elongación máxima  $A_{\text{máx}} = 2A_{\text{original}}$ .

$$A_r = 2A \rightarrow x_V = (2n-1) \cdot \lambda/4$$



-Límites fijos ( $y=0$ ) y límites libres ( $y=A$ )  $\lambda = 2 \frac{L}{n}$  ( $n=1,2,3,4, \dots$ ); ( $\lambda = 2L, L, 2 \frac{L}{3}, \frac{L}{2}, \dots$ )

-Límite fijo y límite abierto ( $y=0$  e  $y=A$ )  $\lambda = 4 \frac{L}{(2n-1)}$  ( $n=1,2,3,4, \dots$ ); ( $\lambda = 4L, 4 \frac{L}{3}, 4 \frac{L}{5}, 4 \frac{L}{7}, \dots$ )

Armónicos ( $n=1$ , 1º armónico,...) o frecuencia fundamental ( $n=1$ ) y sobretonos ( $n=2$ , 1º sobretono)

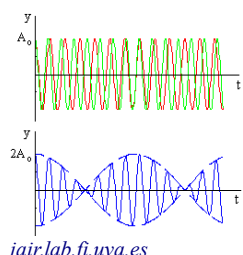
### 8.2. Batidos o pulsaciones. Amplitud modulada

Interferencias entre ondas de misma  $A$  y  $\omega$  similares:  $\omega = (\omega_1 + \omega_2)/2$

$$y(x, t) = A \text{sen}(\omega_1 t - k_1 x) + A \text{sen}(\omega_2 t + k_2 x) = A_{\text{modulada}} \text{sen}(\omega t - k x)$$

$$A_{\text{modulada}} = 2A \text{sen}\left(\frac{\Delta \omega}{2} t - \frac{\Delta k}{2} x\right)$$

$$\left[ \omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}, k = \frac{k_1 + k_2}{2}; \Delta \omega \ll \omega; \Delta k \ll k \right]$$





## 9. Anexos / temas para profundizar

### 9.1 Otros fenómenos ondulatorios

Hay otros fenómenos ondulatorios asociables a este bloque de ondas, que solamente se citan aquí pero se tratan por separado en bloque "óptica física": **Principio de Huygens**, **difracción** (un caso concreto de interferencias entre las ondas producidas al encontrar un obstáculo de tamaño comparable a  $\lambda$ ), **reflexión** (citada indirectamente al hablar de ondas estacionarias), **refracción**, y polarización.

### 9.2 Espectro y ondas sonoras

El concepto de espectro se puede tratar con ondas en general; en el bloque de óptica física es tratado el espectro electromagnético, pero con ondas sonoras se puede hablar de espectro sonoro. El espectro sonoro está asociado al rango de frecuencias que oye el ser humano, aproximadamente 20 Hz a 20 kHz, hablándose de infrasonidos o **ultrasonidos** para frecuencias inferiores superiores, que pueden ser emitidas y/o recibidas por otros animales como ballenas, murciélagos o perros. El límite superior del espectro que oye el ser humano varía con la edad, y en la adolescencia se oyen frecuencias altas que de adulto no se oyen.

### 9.3 Aplicaciones de las ondas al desarrollo tecnológico y a la mejora de las condiciones de vida. Impacto en el medio ambiente.

Al hablar de aplicaciones de ondas se puede considerar cualquier tipo de ondas; en el bloque de óptica física se tratan las ondas electromagnéticas, y este bloque se tratan las aplicaciones de ondas sonoras, que casi siempre utilizan ultrasonidos. Algunos ejemplos de aplicaciones de ondas sonoras son:

-SONAR (Sound Navigation And Ranging) utiliza la emisión y la reflexión de sonido debajo del agua para detectar objetos, de manera similar al eco y al RADAR. Por ejemplo permite detectar desde barcos submarinos o bancos de peces. Se usan ultrasonidos con frecuencias del orden de 50000 Hz.

-Ecografías: el principio es similar al sonar, se recibe el eco asociada a la distinta reflexión de ultrasonidos en los distintos tejidos. Las ecografías en 3D ó en 4D (3D en movimiento) se realizan combinando ecografías en varios planos. Se utilizan en medicina y en ginecología ya que tienen mucha menos energía que los rayos X y no producen daños en los tejidos.

-Litotricia, ruptura de cálculos (renales y biliales) mediante ultrasonidos.

-Limpiezas dentales con ultrasonidos.

### 9.4 Velocidades de propagación en algunos medios

**Sonido en gas**  $v = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}}$

$\gamma$  coeficiente adiabático, R constante gases ideales, T temperatura y M masa molecular.

**Luz en vacío**  $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$  (se trata en bloque óptica física)

$\mu_0$  permeabilidad magnética del vacío y  $\epsilon_0$  constante dieléctrica de vacío.

**Cuerda**  $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$  T tensión de la cuerda y  $\mu$  densidad lineal de la cuerda.

### 9.5 Velocidad de grupo

Velocidad de propagación de las variaciones en amplitud de la onda (modulación ó envolvente)

$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k}$  Velocidad de grupo y de propagación en general son distintas; solamente coinciden cuando la

velocidad de propagación no depende de la frecuencia, que es en medios no dispersivos.

### 9.6 Trigonometría

Algunas relaciones útiles al combinar ondas armónicas descritas por senos y cosenos

$\cos(a \pm b) = \cos(a) \cdot \cos(b) \mp \sin(a) \cdot \sin(b)$   
 $\sin(a \pm b) = \sin(a) \cdot \cos(b) \pm \cos(a) \cdot \sin(b)$

*Razones trigonométricas suma y diferencia de ángulo*

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

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

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

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

*Transformaciones de sumas en productos*





### 9.7 Tabla de valores de decibelios asociada a situaciones concretas

Hay tablas similares en varios sitios, algunas incompletas: el nivel de intensidad depende de la distancia concreta que separa emisor y receptor, por lo que por ejemplo no tiene sentido asociar ciertos dB a una taladradora si no se indica la distancia. Se incluye una simple con referencia oficial

La referencia permite enlazar con los riesgos de salud al escuchar música. Los móviles android al subir el volumen dan un aviso, ya que escuchar puntualmente sonidos con volumen alto (por encima de 85 dB) no tiene por qué ser dañino, pero sí lo es durante periodos prolongados.

¿Subir el volumen por encima del nivel de seguridad?  
 Escuchar sonidos a alto volumen durante largos períodos de tiempo puede dañar tus oídos.

Cancelar
 Aceptar

Fuente y situación de observación	dB SPL
Umbral de audición	0 dB
Susurro de las hojas	20 dB
Susurro en el oído	30 dB
Conversación normal para un participante	60 dB
Vehículos para un observador cercano	60-100 dB
Despegue avión para observador cercano	120 dB
Umbral del dolor	120-140 dB

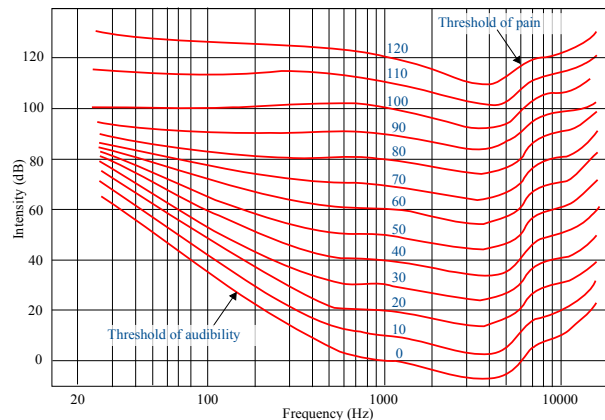
[Potential health risks of exposure to noise from personal music players and mobile phones including a music playing function, 2008, Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks, European Commission.](#)

### 9.6 Decibelios y referencias: dB SPL, dB SIL, dBA, dBB, dBC

Realmente el decibelio es una unidad adimensional y relativa, y puede haber decibelios distintos: para usarlo como medida hay que definir una referencia de unidades. Los decibelios son unas unidades logarítmicas útiles en magnitudes donde hay rangos amplios de valores, y se usan también para voltaje, electrónica asociada a sonido, en radio / antena / comunicaciones.

En la referencia anterior aparece dB SPL (Sound Pressure Level), que es la habitual al hablar de dB en acústica que usa como referencia de presión en el aire  $P_0=20 \cdot 10^{-6}$  Pa,  $dB\ SPL = 10 \log (P^2/P_0^2)$ , y que coincide aproximadamente con dP SIL (Sound Intensity Level) que usa como referencia  $I_0=10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>

El oído humano no percibe igual las distintas frecuencias en todo el espectro, y alcanza el máximo de percepción en las frecuencias medias; para dar una medida de la percepción sonora se pondera según unas curvas que se llaman isofónicas, que miden para que nivel de intensidad la sensación sonora humana es la misma. Los dB ponderados mediante distintas curvas son dBA, dBB y dBC. En las curvas se indican valores de 0 a 120 cuyas unidades son fon ó fonios (phon), que son valores de sonoridad asociados a una frecuencia de 1000 Hz.



*Fletcher Munson ELC (Equal Loudness Contours), wikimedia GFDL*

