

## TEMA 2: EL MOVIMIENTO ONDULATORIO

### 1. MOVIMIENTO ONDULATORIO

El sonido, la luz, las olas del mar o las ondas sísmicas son, entre otros, fenómenos naturales que presentan un movimiento ondulatorio.

Todos ellos son provocados por el cambio de alguna propiedad física, lo que genera una perturbación, al recibir energía un punto del medio llamado **foco**.

Cuando la energía se transmite al foco en un único instante, y avanza decimos que se genera un **pulso**.

Cuando la energía se transmite al foco de manera periódica, se genera una **onda**, y decimos que la transferencia de energía se efectúa por **movimiento ondulatorio**.

Una onda es una propagación de energía **sin transporte de materia**. En el ejemplo, las partículas de la cuerda no avanzan con la perturbación.

En las ondas hay, por tanto, **dos movimientos** involucrados: el avance de la energía (propagación de la perturbación) y el movimiento vibratorio que ésta provoca (oscilaciones).

#### 1.1. TIPOS DE ONDAS

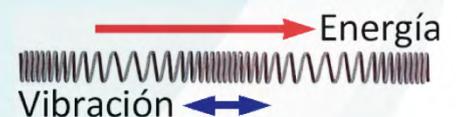
Las ondas se pueden clasificar según varios criterios.

**a)** Según la relación entre la dirección de propagación y la dirección de vibración:

- Ondas **longitudinales**: ambas direcciones coinciden.

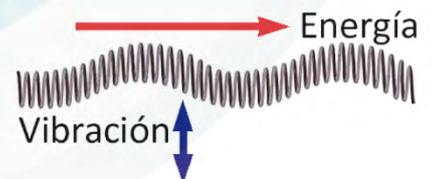
Se conocen como ondas de presión, porque producen expansiones y compresiones del medio.

Ejemplos: el sonido, y la onda generada en un muelle al comprimirlo.

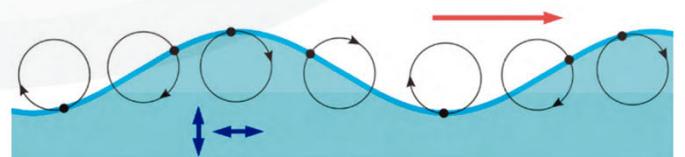


- Ondas **transversales**: las dos direcciones son perpendiculares.

Ejemplos: la luz, y la onda generada en una cuerda, o en un muelle, al hacer oscilar verticalmente uno de sus extremos.



Hay ondas mezcla de ambos tipos. Ejemplo: las ondas que se propagan en la superficie del mar, debido al viento; las partículas de agua describen circunferencias.



**b)** Según el número de dimensiones por las que se propagan:

- Ondas **unidimensionales, 1D**: la energía avanza en una única dirección.  
Ejemplo: las ondas en una cuerda, o en un muelle.



- Ondas **bidimensionales, 2D**: la energía avanza en las infinitas direcciones de un plano.  
Ejemplo: las ondas generadas en un estanque al dejar caer una piedra.



- Ondas **tridimensionales, 3D**: la energía avanza en las infinitas direcciones del espacio.  
Ejemplos: el sonido y la luz.



**c)** Según el tipo de energía que se propaga.

- Ondas **mecánicas**: la energía que se propaga es mecánica. Necesitan, para su propagación, un medio material elástico (sólido, líquido o gas), para que las partículas permanezcan unidas.  
Ejemplos: el sonido, las ondas en una cuerda, o en un muelle, y las olas.

- Ondas **electromagnéticas**: la energía que se propaga es electromagnética, que se produce por oscilaciones de cargas eléctricas aceleradas, o por saltos electrónicos a niveles energéticos inferiores. Pueden viajar por el vacío, además de por medios materiales. El único ejemplo es la luz (no solamente la luz visible, sino todo el espectro electromagnético).

Las ondas longitudinales son siempre mecánicas.

Las ondas transversales pueden ser mecánicas o electromagnéticas.

El sonido es una onda longitudinal, tridimensional y mecánica.

La luz es una onda transversal, tridimensional y electromagnética.

## 2. VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE UNA ONDA, O VELOCIDAD DE FASE

La celeridad con la que un tipo de onda se propaga por un medio concreto se conoce como **velocidad de propagación**, o **velocidad de fase**. Depende del medio por el que avance.

Algunos ejemplos:



- La celeridad de las ondas transversales en una cuerda depende de la tensión a la que esté sometida,  $T$  (N), y de su densidad lineal,  $\mu$  (kg/m):  $v_{\text{fase}} = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$

- La velocidad de propagación de las ondas longitudinales en un muelle depende de su longitud,  $L$  (m), de su constante elástica  $k$  (N/m) y de su masa,  $m$  (kg):  $v_{\text{fase}} = L \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}$

- La velocidad de propagación del sonido en el aire depende de su temperatura,  $T$  (K):  
 $v_{\text{fase}} = 331 \cdot \sqrt{\frac{T}{273}}$

La velocidad del sonido, en el aire a 15°C es **340 m/s**, valor que se usa por defecto, y aumenta con la temperatura.

- La velocidad de propagación de la luz depende de la permitividad dieléctrica del medio,  $\epsilon$  (C/N·m<sup>2</sup>) y de su permeabilidad magnética,  $\mu$  (T·m/A) :  $v_{\text{fase}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}}$

La velocidad de la luz en el vacío es  **$c = 3 \cdot 10^8$  (m/s)**, y en el aire prácticamente también.

### 3. MEDIOS IDEALES

**Medio Homogéneo:** formado por elementos de la misma naturaleza. Su composición es la misma en todos los puntos.

**Medio Perfectamente Elástico:** las ondas avanzan por el medio sin cederle energía a este.

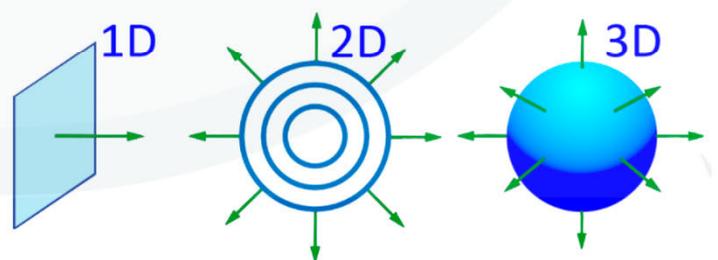
**Medio Isótropo:** cualquier acción recibida en un punto se transmite de la misma forma en todas las direcciones.

Nosotros supondremos **siempre Medios perfectos:** homogéneos, perfectamente elásticos e isótropos.

Si la onda es unidimensional la energía viaja por una única dirección, y si es bidimensional, o tridimensional, como por cualquiera de las infinitas direcciones la onda se propagará de la misma forma, bastará estudiar una dirección de avance cualquiera.

Entonces, **estudiaremos una única dirección de propagación.**

Así la onda avanzará con **M.R.U.** a un ritmo dado por su  $v_{\text{fase}}$ .



## 4. ONDAS ARMÓNICAS

Una onda es armónica cuando se genera al transmitir un oscilador armónico la energía al foco. Por tanto, el foco describirá un movimiento vibratorio armónico simple.

Nosotros estudiaremos **siempre ondas armónicas, viajando por medios ideales**, por lo que cada uno de los puntos alcanzados por la onda describirá el mismo m.v.a.s. que el foco.

### 4.1. MAGNITUDES CARACTERÍSTICAS DE LAS ONDAS ARMÓNICAS

Como todos los movimientos armónicos son iguales llamamos **Amplitud,  $A$  (m)**, **Período,  $T$  (s)**, frecuencia,  **$f$  (Hz)**, **Pulsación, o Frecuencia angular,  $\omega$  (rad/s)**, de la onda a las mismas magnitudes de los m.v.a.s.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f \text{ (rad/s)}$$

Si llamamos eje  $X$  a la dirección en la que estudiamos el avance de la onda, como las elongaciones de todos los puntos no son al unísono, deberemos especificar, además del instante,  $t$ , el punto al que nos referimos, caracterizándolo por su **coordenada  $x$  (m)**.

La **Elongación** de una partícula cualquiera,  $x$ , en cualquier instante,  $t$ , es decir,  **$y(x, t)$  (m)** viene dada por una expresión que se conoce como **función de onda, o ecuación de onda**. Es una ecuación que debe contener todos los m.v.a.s., uno para cada valor de  $x$ .

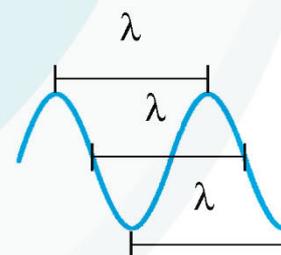
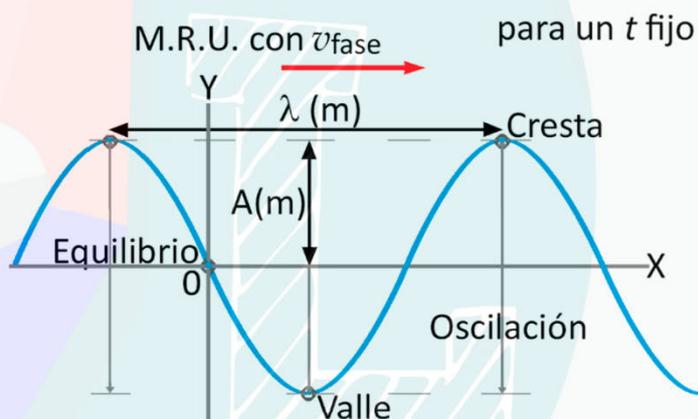
Las magnitudes que son específicas de las ondas son:

-  **$\lambda$  (m): longitud de onda**. Es la mínima distancia entre dos puntos que oscilan al unísono, es decir, que se encuentran siempre en el mismo estado de vibración (que oscilan en fase).

Pero el tiempo que debe avanzar la energía, con m.r.u., a  $v_{\text{fase}}$ , para recorrer  $\lambda$  (m), debe ser exactamente  $T$ (s)  $\rightarrow$

$$v_{\text{fase}} \cdot T = \lambda$$

Así que, viene determinada por dos factores: cómo se generan las ondas ( $T$ , o  $f$ ) y el medio por el que viajan ( $v_{\text{fase}}$ ).



-  **$k$  (rad/m): número de onda.** Es la magnitud equivalente a la pulsación, pero con longitud de onda, en vez de período. Se define como

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ (rad/m)}$$

$$\rightarrow k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{v_{\text{fase}} \cdot T} = \frac{\omega}{v_{\text{fase}}} \quad \rightarrow \quad v_{\text{fase}} \cdot k = \omega$$

-  **$v(x, t)$  (m/s): velocidad de vibración.** Es la velocidad del armónico simple de una partícula cualquiera,  $x$ , en cualquier instante,  $t$ . Se obtiene a partir de la función de onda:

$$v(x, t) = \frac{dy(x, t)}{dt} \text{ (m/s)}$$

## 4.2. ECUACIÓN, O FUNCIÓN DE ONDA DE LAS ONDAS ARMÓNICAS UNIDIMENSIONALES

Supongamos una cuerda tensa ubicada en el eje  $X$ , de manera que cada punto de la cuerda se caracterice por su coordenada  $x$ .

Si hacemos oscilar con m.v.a.s. vertical el extremo de la cuerda situado en  $x = 0$  (punto  $O$ , foco), su elongación vendrá dada por  $y(x=0, t) = A \text{ sen } (\omega t + \varphi_0)$ .

Como la energía avanza por la cuerda con m.r.u. con una celeridad  $v_{\text{fase}}$ , hacia la derecha, tardará en llegar a un punto  $P$ , genérico de la cuerda, situado en la coordenada  $x$ , un tiempo  $\frac{x}{v_{\text{fase}}}$   $\rightarrow$  cuando el punto

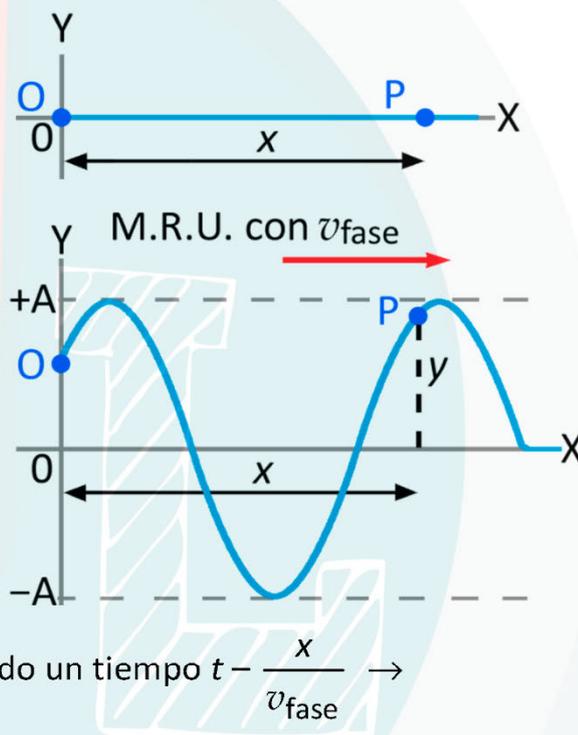
$x = 0$  lleve vibrando un tiempo  $t$ , el punto  $P$  llevará vibrando un tiempo  $t - \frac{x}{v_{\text{fase}}}$   $\rightarrow$

su elongación vendrá dada por  $y(x, t) = A \text{ sen } (\omega (t - \frac{x}{v_{\text{fase}}}) + \varphi_0) =$

$$A \text{ sen } (\omega t - \frac{2\pi}{T v_{\text{fase}}} x + \varphi_0) = A \text{ sen } (\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x + \varphi_0) = A \text{ sen } (\omega t - k x + \varphi_0).$$

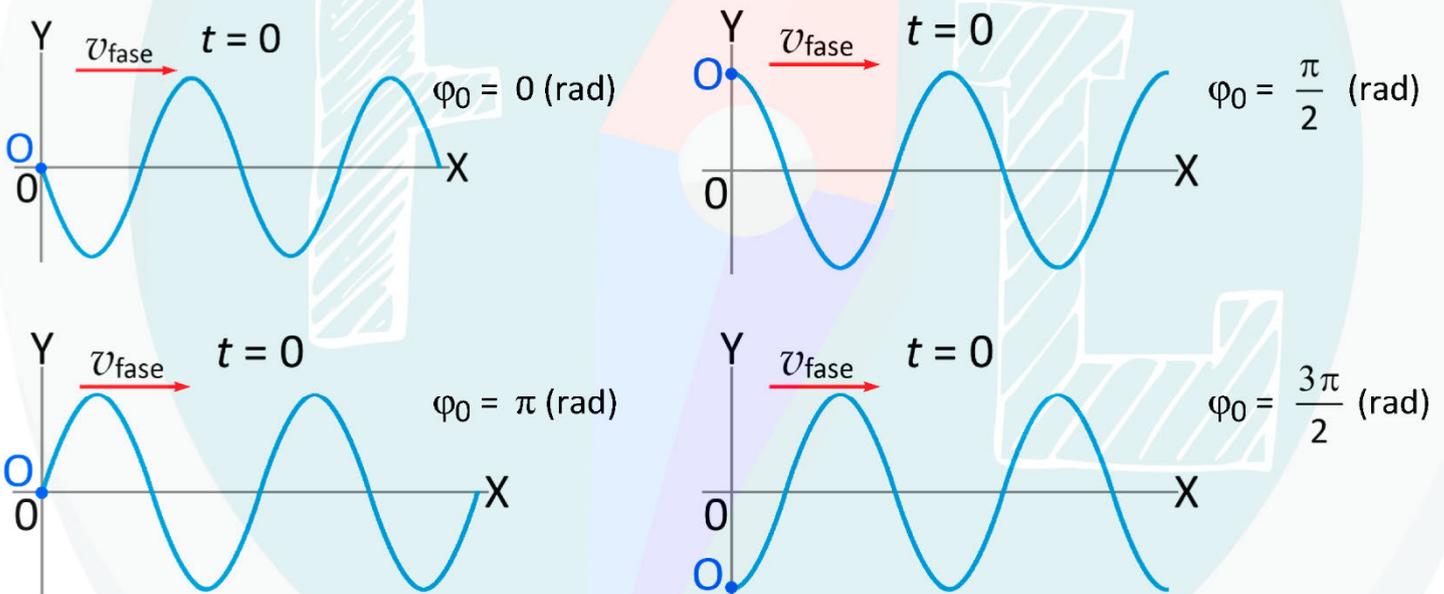
Si el extremo de la cuerda que se hace oscilar es el derecho, de manera que la energía avance hacia la izquierda  $\rightarrow$  cuando el punto  $x = 0$  lleve vibrando un tiempo  $t$ , el punto  $P$  llevará vibrando un tiempo  $t + \frac{x}{v_{\text{fase}}}$   $\rightarrow$  su elongación vendrá dada por  $y(x, t) = A \text{ sen } (\omega t + k x + \varphi_0)$ .

Así que, la ecuación general de una onda armónica unidimensional será:

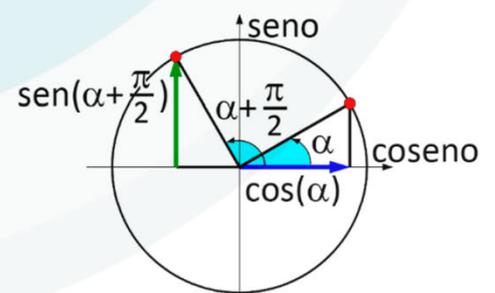


$$y(x, t) = A \text{ sen } (\omega t \pm kx + \varphi_0) = A \text{ sen } \left( \frac{2\pi}{T} \cdot t \pm \frac{2\pi}{\lambda} \cdot x + \varphi_0 \right)$$

- La función de onda depende de dos variables: de la distancia al foco,  $x$ , y del tiempo,  $t$ .
- Si se fija el valor de  $x$ , resulta la ecuación del m.v.a.s. del punto de la cuerda que tiene esa coordenada. Un único punto en todos los instantes (como un vídeo enfocado en dicho punto).
- Si se fija el valor de  $t$ , resulta la forma de la onda en dicho instante. Todos los puntos de la cuerda en un único instante (como una fotografía de toda la cuerda).
- El signo que precede al número de onda depende del sentido de avance de la energía: si se propaga en el sentido positivo del eje  $X \rightarrow -kx$ , y si avanza hacia las  $X$  negativas  $\rightarrow +kx$ .
- La fase inicial,  $\varphi_0$ , se determina imponiendo las condiciones iniciales ( $t = 0$ ) al punto  $x = 0$ .



- Como  $\cos(\alpha) = \text{sen}\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right)$   $\rightarrow$



la función de onda también puede expresarse en términos del coseno:

$$y(x, t) = A \cos(\omega t \pm kx + \varphi_0 - \frac{\pi}{2}) = A \cos(\omega t \pm kx + \varphi_0')$$



### 4.3. PERIODICIDADES DE UNA ONDA ARMÓNICA TRANSVERSAL

$y(x, t) = A \sin(\omega t \pm kx + \varphi_0) = A \sin(\varphi)$ , siendo la Fase  $\varphi$  (rad) =  $\omega t \pm kx + \varphi_0$   
Como las razones trigonométricas se repiten cada  $2\pi$  (rad) las ondas tienen dos periodicidades:

#### Periodicidad Temporal.

Si nos fijamos en un punto concreto, de coordenada  $x$  ( $x$  fija), en un primer instante,  $t_1$  y en un instante posterior,  $t_2$ , su diferencia de fase, o desfase temporal, en el intervalo  $\Delta t = t_2 - t_1$  será:

**Desfase temporal**  $\equiv \Delta\varphi_{\text{temporal}} = \varphi_2 - \varphi_1 = (\omega t_2 \pm kx + \varphi_0) - (\omega t_1 \pm kx + \varphi_0) =$   
 $\omega(t_2 - t_1) = \frac{2\pi}{T}(t_2 - t_1) = \frac{2\pi}{T}\Delta t \rightarrow$  podemos escribir la proporción:

$$\frac{T(s)}{\Delta t(s)} = \frac{2\pi(\text{rad})}{\Delta\varphi_{\text{temporal}}(\text{rad})}$$

Si  $\Delta t = T, 2T, \dots \rightarrow \Delta\varphi = 2\pi, 4\pi, \dots$ , y, como

$\sin(\varphi) = \sin(\varphi + 2\pi) = \sin(\varphi + 4\pi) \rightarrow$  la elongación,  $y$ , es la misma en todos esos instantes.

$\cos(\varphi) = \cos(\varphi + 2\pi) = \cos(\varphi + 4\pi) \rightarrow$  la velocidad,  $v$ , es la misma en todos esos instantes.

$T(s) \equiv$  **Período Temporal de la onda**: tiempo que tarda cada partícula en volver a encontrarse en el mismo estado de vibración, es decir, en describir un ciclo de su M.V.A.S.

#### Periodicidad Espacial.

Si nos fijamos en un instante concreto, de valor  $t$  ( $t$  fijo), en dos puntos de coordenadas  $x_1$  y  $x_2$ , su diferencia de fase, o desfase espacial, para la distancia  $\Delta x = |x_2 - x_1|$  será

**Desfase espacial**  $\equiv \Delta\varphi_{\text{espacial}} = \varphi_2 - \varphi_1 = (\omega t \pm kx_2 + \varphi_0) - (\omega t \pm kx_1 + \varphi_0) =$   
 $\pm k(x_2 - x_1) = \frac{2\pi}{\lambda}|x_2 - x_1| = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta x \rightarrow$  podemos escribir la proporción:

$$\frac{\lambda(m)}{\Delta x(m)} = \frac{2\pi(\text{rad})}{\Delta\varphi_{\text{espacial}}(\text{rad})}$$

Si  $\Delta x = \lambda, 2\lambda, \dots \rightarrow \Delta\varphi = 2\pi, 4\pi, \dots$ , y, como seno y coseno se repiten cada  $2\pi$  radianes  $\rightarrow$  la elongación,  $y$ , y la velocidad,  $v$ , son las mismas siempre para todos esos puntos.

$\lambda(m) \equiv$  **Período Espacial de la onda**: mínima distancia entre dos puntos que oscilan al unísono, es decir, que se encuentran siempre en el mismo estado de vibración (que oscilan en fase).



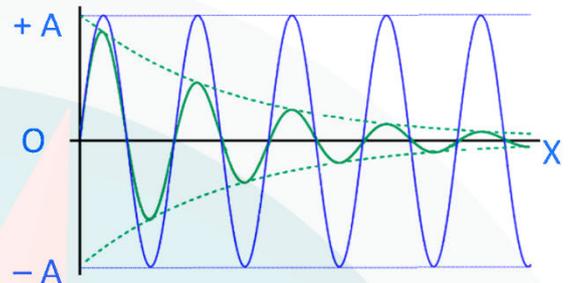
## 5. ASPECTOS ENERGÉTICOS DEL MOVIMIENTO ONDULATORIO

### 5.1. AMORTIGUACIÓN DE ONDAS

La energía que se propaga en una onda es la del M.V.A.S.  $E_{MVAS} = \frac{1}{2} m A^2 \omega^2 = \frac{1}{2} m A^2 (2\pi f)^2$

→ es proporcional a  $A^2, f^2$  → solamente depende de cómo se genere la onda, y, en el caso ideal, una vez generada no varía.

Si, a medida que una onda se va propagando se mantiene su amplitud es una **Onda Ideal**, en azul, (en realidad ninguna es así), y si va disminuyendo es una **Onda Amortiguada**, en verde.



La amortiguación puede ser originada por dos factores diferentes:

#### ABSORCIÓN

El medio por el que viaja la onda va absorbiendo parte de su energía, generalmente por fricciones → cuanto más lejos estén del foco las partículas, menos energía les llega para oscilar, y, como oscilan con la misma  $f$  que el foco, deben disminuir su  $A$ .

$$A = \frac{A_0}{e^{\alpha x}} \text{ donde } x(m) \equiv \text{longitud del medio atravesada y } \alpha(m^{-1}) \equiv \text{Coeficiente de absorción.}$$

Aunque esto sucede para cualquier onda nosotros lo despreciamos:  $\alpha \approx 0 \rightarrow A \approx A_0$

#### ATENUACIÓN

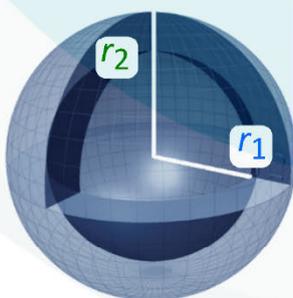
**Frente de onda:** lugar geométrico de los puntos a los que llega la energía simultáneamente.

**Rayos:** direcciones de propagación de la onda. Son siempre perpendiculares a los frentes de onda.

#### Ondas 3-D

Frentes de onda esféricos, de superficie  $4\pi r^2$

(Sonido, Luz)



Una vez entregada la energía de vibración al foco, en forma de onda de frecuencia  $f$ , lo que hace es avanzar

$$\rightarrow E_{\text{total frente onda 1}} = E_{\text{total frente onda 2}}$$

Pero el número de partículas que se reparten la energía aumenta con  $r^2$  →

$E_{MVAS}$  de cada partícula disminuye con  $r^2$  →

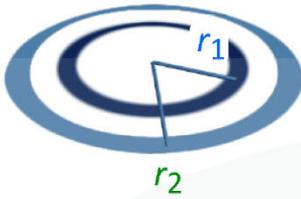
$$\left. \begin{array}{l} E_{MVAS} \sim \frac{1}{r^2} \\ E_{MVAS} \sim A^2 \end{array} \right\} \rightarrow A^2 \sim \frac{1}{r^2} \rightarrow \boxed{A \sim \frac{1}{r}}_{3D} \rightarrow \frac{A_2}{A_1} = \frac{r_1}{r_2}$$

Si te alejas 4 veces más la amplitud es la cuarta parte.



## Ondas 2-D

Frentes de onda  
circunferenciales,  
de perímetro  
 $2\pi r$



(Gotas en  
Estanque de  
agua)

Ahora el número de partículas que se reparten la  
energía aumenta con el perímetro  $\rightarrow$  aumenta con  $r$

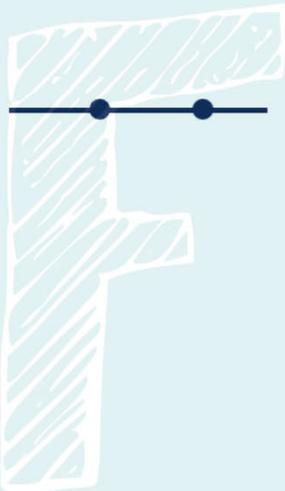
$\rightarrow E_{\text{MVAS}}$  de cada partícula disminuye con  $r \rightarrow$

$$\left. \begin{array}{l} E_{\text{MVAS}} \sim \frac{1}{r} \\ E_{\text{MVAS}} \sim A^2 \end{array} \right\} \rightarrow A^2 \sim \frac{1}{r} \rightarrow \boxed{A \sim \frac{1}{\sqrt{r}}}_{2\text{D}} \rightarrow \frac{A_2}{A_1} = \sqrt{\frac{r_1}{r_2}}$$

Si te alejas cuatro veces más la amplitud es la mitad.

## Ondas 1-D

Frentes de onda  
puntuales



(Onda  
transversal en  
una Cuerda)

Ahora el número de partículas en cada frente de onda  
no cambia  $\rightarrow$

$\rightarrow E_{\text{MVAS}}$  es constante

$\rightarrow$   $\boxed{A_{\text{constante}}}_{1\text{D}}$

$\rightarrow$  No hay atenuación en Ondas Unidimensionales.

Si te alejas cuatro veces más la amplitud es la misma.

## Casos Especiales

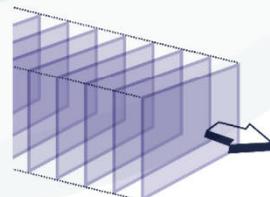
Luz Láser perfecta: luz con una  
frecuencia concreta y un haz  
cilíndrico.

Los frentes de onda son círculos  
idénticos y paralelos.



Ondas planas (y esféricas muy lejos del foco)

Los frentes de onda son planos idénticos y  
paralelos



En estos casos los frentes de onda contienen el mismo número de partículas  $\rightarrow$   
No hay atenuación.



## 5.2. INTENSIDAD DE UNA ONDA, Y POTENCIA DE SU FOCO EMISOR

Para cuantificar la atenuación de las ondas se define la

**Intensidad de una onda en un punto, I:** energía que pasa en la unidad de tiempo, por la unidad de superficie perpendicular a la dirección de propagación. Son los julios que en cada segundo (vatios) atraviesan  $1 \text{ m}^2$  de superficie del frente de onda.

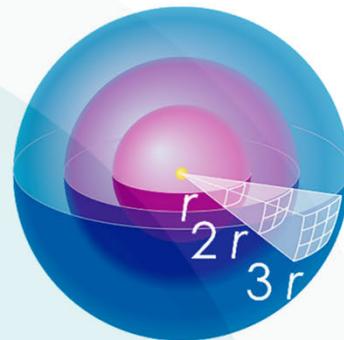
$$I = \frac{E}{t \cdot S} = \frac{P}{S} \quad (\text{W} / \text{m}^2)$$

Para un frente de onda esférico  $I = \frac{P}{S} = \frac{P}{4\pi r^2}$ , por tanto, si la

potencia emisiva de la onda es constante la intensidad decrece con el cuadrado de la distancia: Ley del inverso del cuadrado de la

distancia.  $I_{(2r)} = \frac{1}{2^2} I_{(r)} = \frac{1}{4} I_{(r)}$   $I_{(3r)} = \frac{1}{3^2} I_{(r)} = \frac{1}{9} I_{(r)}$

En general,  $I_1 = \frac{P}{4\pi r_1^2}$   $I_2 = \frac{P}{4\pi r_2^2}$   $\rightarrow \frac{I_2}{I_1} = \frac{r_1^2}{r_2^2} = \frac{A_2^2}{A_1^2}$ , pues  $A^2 \sim \frac{1}{r^2}$

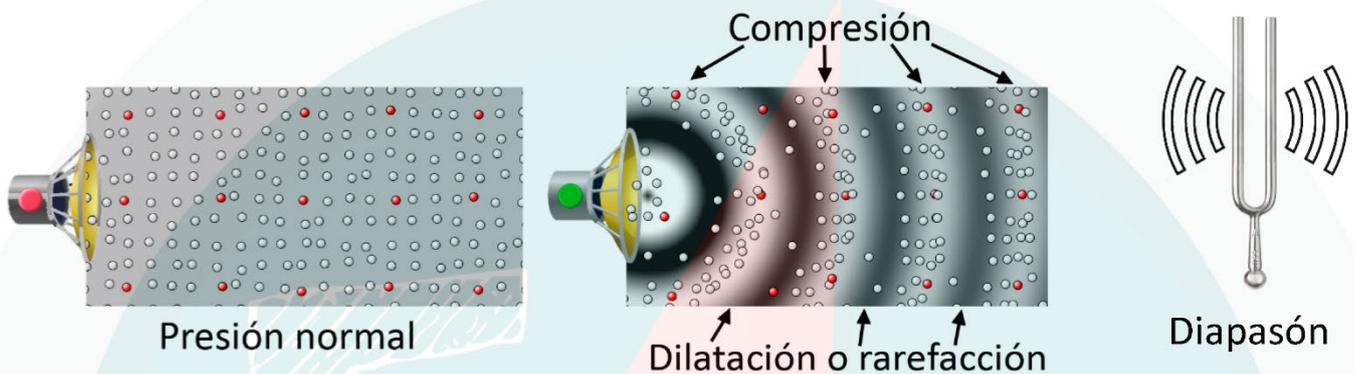


## 6. EL SONIDO

Los sonidos son ondas **longitudinales**, **tridimensionales** y **mecánicas**.

### Generación

Los sonidos se generan cuando un cuerpo (el foco sonoro) vibra y hace vibrar al medio que le rodea, provocando **variaciones de presión** en cada una de las direcciones de avance de la onda, al ir transfiriendo la energía las partículas que vibran a las partículas adyacentes. Se forman compresiones, que provocan que las moléculas estén más juntas de lo normal, y dilataciones, que provocan que se alejen más de lo normal.



Si el foco vibra con un m.v.a.s. las ondas sonoras son sinusoidales. Aunque estas oscilaciones puras solamente se dan en dispositivos como diapasones, la inmensa mayoría de las oscilaciones con formas no sinusoidales pueden ser consideradas como una superposición, o suma, de varias sinusoidales. Esas componentes sinusoidales son denominadas **armónicos**.

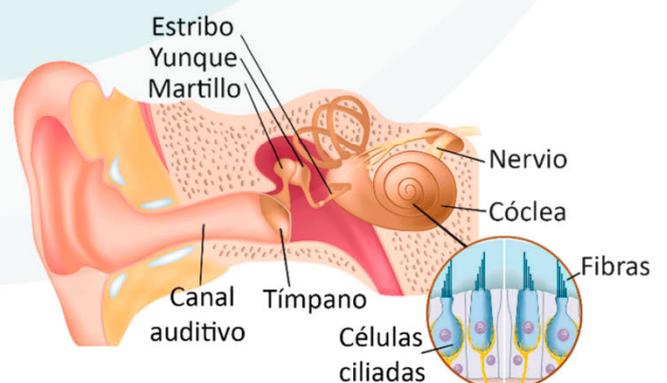
### Propagación

La propagación requiere un medio material, por lo que los sonidos no se propagan en el vacío. Cuanto más denso sea el medio más juntas están sus partículas y más rápido avanza el sonido. Las ondas sonoras viajan más rápido en medios sólidos, algo más lento en medios líquidos y más lento aun en medios gaseosos.

Además, en los gases, cuanto mayor sea la temperatura  $T(K)$  mayor es la velocidad de fase. Por ejemplo, en el aire a  $15^{\circ}C$   $v_{fase} = 340 \text{ m/s}$ , que es el valor que se usa por defecto, aunque aumenta con la temperatura.

### Recepción

Las vibraciones del medio, con frecuencias y amplitud determinadas, son recogidas por la oreja, viajan a través del canal auditivo y acaban golpeando a la membrana llamada tímpano, que transmite dichas vibraciones a unos pequeños huesos que las amplifican y las transmiten al líquido que hay dentro de la cóclea, que es una estructura en forma de espiral.



Dentro de la cóclea están las células ciliadas, que, mediante las fibras de Corti, se encargan de transformar la energía mecánica de las vibraciones en impulsos eléctricos que envían a los nervios acústicos, que a su vez los transmiten al nervio auditivo que llega al cerebro.

El funcionamiento de las fibras está basado en el fenómeno de la **resonancia**. Todos los cuerpos poseen una frecuencia natural, o **frecuencia propia** de vibración. Si les llegan vibraciones de frecuencia igual, o cercana, a su frecuencia propia oscilan con una amplitud mucho mayor que si les llegan con frecuencias distintas.

Los humanos tenemos fibras con frecuencias propias entre 20 Hz y 20 kHz. Así, si por ejemplo nos llega un sonido de 1 kHz solamente oscilarán con amplitudes muy grandes las fibras que tengan esa frecuencia propia. Esto provoca que las células que contienen a esas fibras segreguen un componente químico que genera un impulso eléctrico.

Nuestro rango auditivo entonces está entre **20 Hz y 20 kHz**. Por debajo de esas frecuencia están los infrasonidos (los usan los elefantes), y por encima los ultrasonidos (los usan los delfines y los murciélagos).

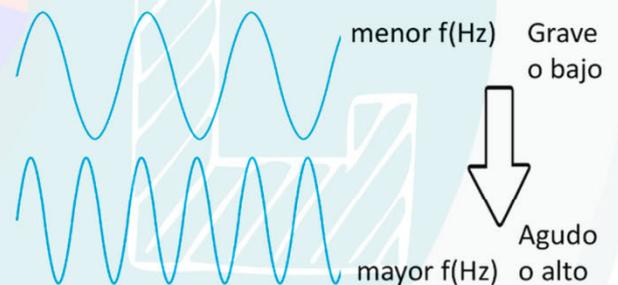
## 6.1. CUALIDADES DEL SONIDO

Cada sonido tiene cuatro cualidades que lo diferencian de otros sonidos:

### Tono, o Altura

Cualidad relacionada con la **frecuencia** fundamental de la onda sonora.

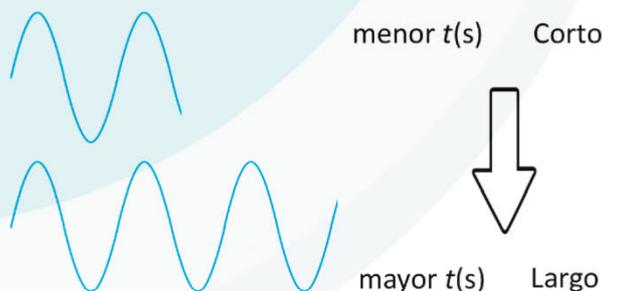
Cuanto menor sea su frecuencia los sonidos son más **graves** (o **bajos**), y cuanto mayor sea son más **agudos** (o **altos**).



### Duración, o Longitud

Cualidad relacionada con el **tiempo** que dure la emisión de la onda sonora.

Cuanto menor sea su duración los sonidos son más **cortos**, y cuanto mayor sea son más **largos**.

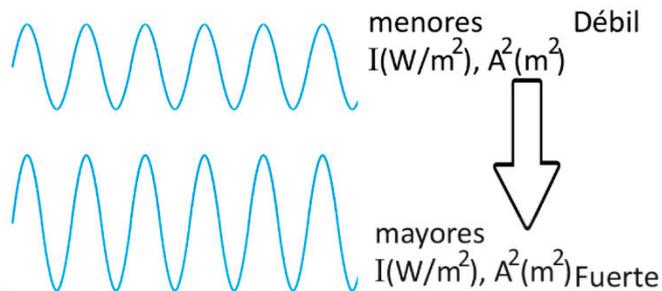


## Intensidad.

Cualidad relacionada con la **Intensidad** de la onda sonora, y por tanto con su **amplitud**, porque la intensidad es proporcional al cuadrado de la

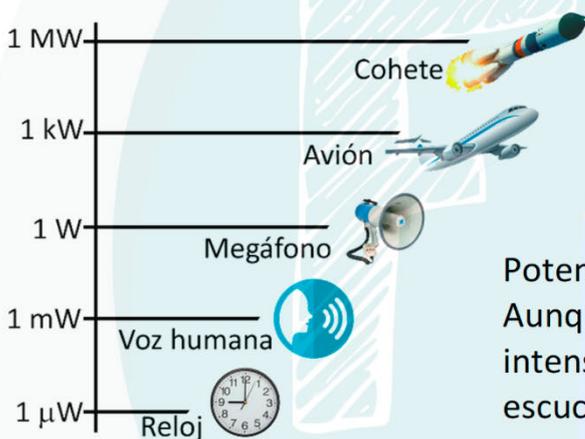
$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \sim A^2.$$

Cuanto menor sea su intensidad ( y su amplitud) los sonidos son más **débiles**, y cuanto mayor sea son más **fuertes**.



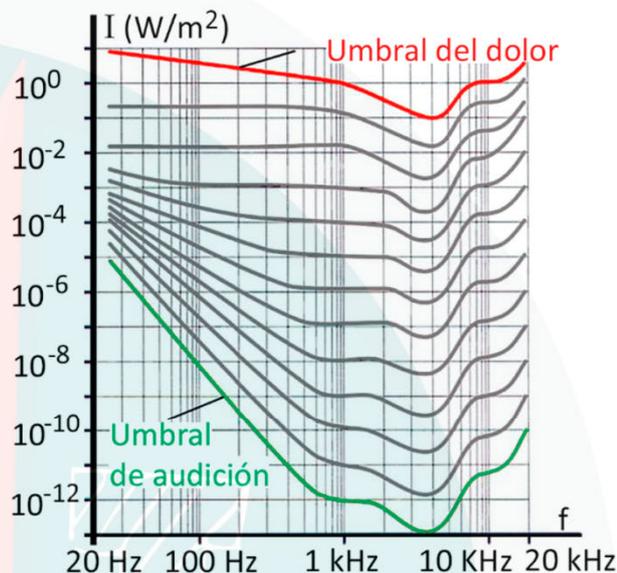
En general, los humanos solamente percibimos los sonidos con una intensidad mayor que el **valor umbral de audición**,  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ , y notamos dolor si se supera el valor umbral de dolor, que es  $1 \text{ W/m}^2$ .

En realidad, estos valores son para un sonido de frecuencia 1 000 Hz, pero se usan por defecto.



Potencias sonoras de algunas fuentes.

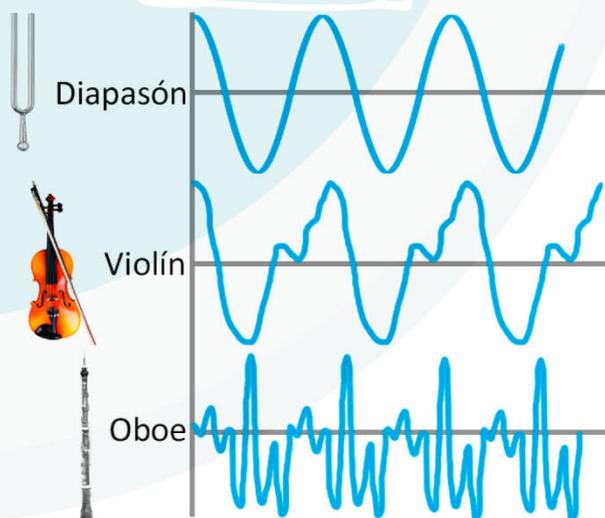
Aunque la potencia del foco emisor sea constante, la intensidad percibida depende de la distancia del punto de escucha a dicho foco.



## Timbre

Cualidad relacionada con la **forma de la onda sonora**, que depende de la intensidad de cada uno de los **armónicos** (sonidos de frecuencia doble de la fundamental, triple, cuádruple, etc.) que, superpuestos forman la onda sonora.

Cada instrumento musical, incluida la voz humana tiene un timbre diferente. Con práctica podemos distinguir al emisor del sonido.



## 6.2. SENSACIÓN SONORA, O SONORIDAD, O NIVEL DE INTENSIDAD SONORA.

Aunque la intensidad de las ondas sonoras,  $I$ , es una magnitud objetiva para medir lo intenso que es un sonido, nuestra manera de percibirlo no es lineal con esta magnitud: si el sonido no supera el umbral de audición,  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$  no lo percibimos y, además, para sonidos poco intensos con un ligero aumento de  $I$  sentimos un aumento de volumen, pero para notar que aumenta el volumen de sonidos muy intensos requerimos una gran variación en  $I$ .

Por eso introducimos una nueva magnitud, que se ajusta a nuestra percepción: se define la **sensación sonora, sonoridad, o nivel de intensidad sonora** como

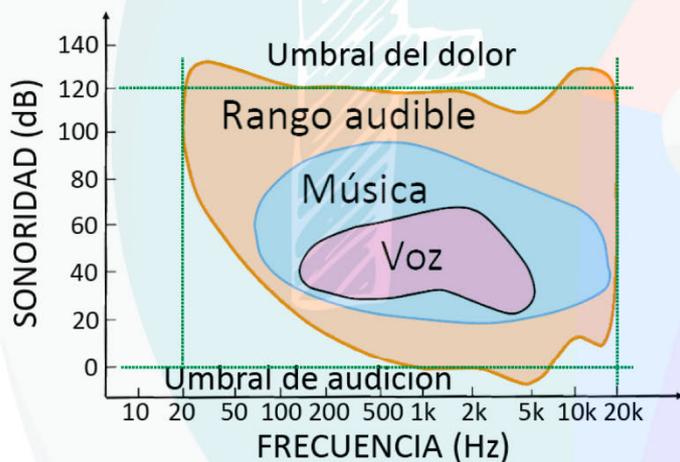
$$\beta = \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \text{ (B), Belios. Como 1 B es mucho se emplea siempre el decibelio } 1 \text{ B} = 10 \text{ dB.}$$

Intensidad	Sonoridad
$10^{-12} \text{ (W m}^{-2}\text{)}$	$\rightarrow 0 \text{ dB}$
$10^{-11} \text{ (W m}^{-2}\text{)}$	$\rightarrow 10 \text{ dB}$
$10^{-6} \text{ (W m}^{-2}\text{)}$	$\rightarrow 60 \text{ dB}$
$10^0 \text{ (W m}^{-2}\text{)}$	$\rightarrow 120 \text{ dB}$

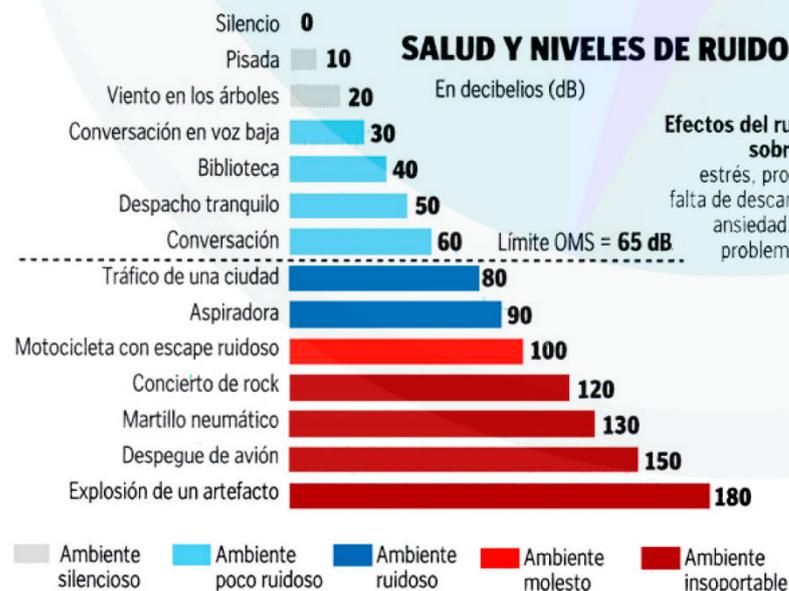
$\cdot 10^5$   
 $\cdot 10^6$

$\cdot 6$   
 $\cdot 2$

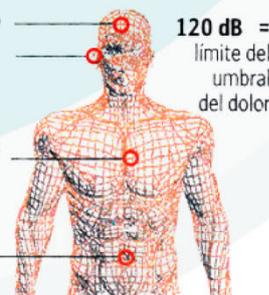
Vemos que con el umbral no oímos nada. Cuanto mayor es la  $I$ , la variación en  $\beta$  es menor. El umbral de dolor corresponde a 120 dB.



No oímos todas las frecuencias de la misma forma. En la banda de frecuencias medias, es decir, de los 500 Hz a los 5 kHz, los sonidos de 0 dB son audibles para los más jóvenes. A frecuencias más bajas y más altas los sonidos deben ser más intensos para poder percibirlos. Por ejemplo, para un sonido de 50 Hz se requieren 40 dB. La parte más baja de la curva naranja muestra el umbral de audición.



**Efectos del ruido prolongado sobre el organismo:**  
estrés, problemas de sueño, falta de descanso, hipertensión, ansiedad, dolor de cabeza, problemas digestivos, etc



Todos los valores dependen de la distancia al foco emisor.



### 6.3. CONTAMINACIÓN ACÚSTICA

Se llama así al exceso de sonido que altera las condiciones normales del ambiente en una determinada zona.

Las fuentes de contaminación sonora más habituales son la maquinaria en industrias y en el transporte, las derivadas de la construcción, los eventos sociales e incluso algunos aparatos usados en el hogar, como la aspiradora o la lavadora.

Para evitar la contaminación acústica se deben adoptar medidas preventivas (uso de silenciadores en vehículos o en industrias, prohibición del tráfico rodado en grandes ciudades, control de ruido en zonas de ocio), paliativas (colocación de pantallas acústicas, insonorización de locales de ocio, uso de auriculares aislantes) y educativas (formar a los ciudadanos).

### 6.4. APLICACIONES TECNOLÓGICAS DEL SONIDO

Las ondas sonoras tienen muchas y variadas aplicaciones en la actualidad.

#### Sonidos audibles

**Música:** producción de sonido en instrumentos musicales y sistemas de afinación de la escala.

**Electroacústica:** tratamiento electrónico del sonido, incluyendo la captación (micrófonos y estudios de grabación), procesamiento (efectos, filtrado comprensión, etc.) amplificación, grabación, producción (altavoces) etc.

**Arquitectura:** diseño de las propiedades acústicas de un local a efectos de fidelidad de la escucha, y formas efectivas de aislar del ruido los locales habitados.

#### Infrasonidos

**Prevención de desastres naturales:** sismógrafos para la detección de terremotos, sensores de infrasonidos para la detección de erupciones volcánicas y tornados.

#### Ultrasonidos

**Sonar:** usa la propagación del sonido bajo el agua para navegar, comunicarse y detectar otros buques o bancos de pesca, utilizando la reflexión de la onda de forma similar a la que ocurre con el eco.

**Limpieza ultrasónica:** se sumerge el objeto a limpiar (joyas, lentes, relojes, instrumentos quirúrgicos) en un líquido que transmite los ultrasonidos, y estos provocan vibraciones que separan las partículas de suciedad. También se usa en limpiezas dentales.

**Ecógrafo:** dispositivo de diagnóstico por imagen no invasivo, que funciona de manera similar al sonar. Se usa para obtener imágenes de tejidos blandos.

**Terapias:** su uso puede ser analgésico, de regeneración, antiinflamatorio (lo usan los fisioterapeutas) y también para destruir tejidos enfermos o anormales, como eliminar pequeños tumores cerebrales, o romper pequeñas piedras de calcio que se forman en los riñones.

**Medida de distancias:** en procesos industriales, en los autofocos de las cámaras fotográficas y móviles, ajustando para que la imagen salga enfocada.



## 7. LA LUZ

Las ondas electromagnéticas, la luz, son **transversales**, **tridimensionales** y **electromagnéticas**.

### Generación

Se generan cuando cargas eléctricas se mueven con aceleración, o por saltos electrónicos hacia niveles energéticos inferiores. Dependiendo de cómo su origen se clasifican en distintos grupos.

**Ondas de Comunicación:** generadores con circuitos eléctricos alternos.

**Microondas:** vibración de moléculas.

**Radiación Infrarroja:** oscilaciones de átomos debidas a la temperatura.

**Luz Visible:** transiciones electrónicas en las cortezas de los átomos.

**Rayos Ultravioleta:** oscilaciones de los electrones más internos de los átomos.

**Rayos X:** choque de electrones muy energéticos con átomos metálicos.

**Rayos Gamma:** emisiones nucleares radiactivas.



A mayor frecuencia, mayor energía transportada por la onda, y menor longitud de onda, pues  $\lambda = v_{\text{fase}} / f$ . Las longitudes de onda de la figura son en el vacío.

### Propagación

La luz se propaga con M.R.U. en cada dirección. El medio por el que viaja más rápido es el vacío, en el que su velocidad de fase es  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s. Según la física actual **nada puede viajar más rápido que la luz por el vacío**. En cualquier otro medio, por tanto, viaja más lenta.

Se define el **índice de refracción de un medio,  $n$** , como el cociente de la velocidad de la luz en el vacío y su velocidad en dicho medio:

$$n = \frac{c}{v}$$

$\geq 1$  (adimensional)

$$n_{\text{vacío}} = 1 \quad n_{\text{aire}} = 1,00 \text{ (para nosotros como el vacío)}$$

$$n_{\text{agua}} = 4/3 = 1,33 \quad n_{\text{cristalino}} = 1,44$$

$$n_{\text{cuarzo}} = 1,54 \quad n_{\text{diamante}} = 2,42$$

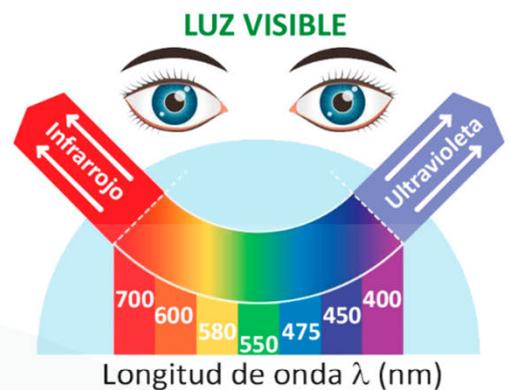


## Recepción

Los humanos solamente podemos detectar, con los ojos, una pequeña parte del espectro: la **luz visible**.

Las frecuencias de las ondas determinan sus colores.

Una luz de un color puro, como la que emite un puntero láser, es de frecuencia única (en realidad de varias frecuencias, pero todas muy próximas). La luz blanca está formada por ondas electromagnéticas de todos los colores.



Las longitudes de onda de la luz visible, en el vacío, están comprendidas entre **700 nm y 400 nm** ( 1 nanómetro =  $10^{-9}$  m).

La luz entra por la parte negra del iris (pupila) y atraviesa el cristalino, que es la lente del ojo. Ésta procesa la imagen que estamos viendo en la retina, una zona sensible a la luz que actúa como si fuese una pantalla.

La retina está formada por dos tipos de células sensibles: los bastones, que detectan la intensidad de la luz, y los conos que detectan su frecuencia. Ambas transforman la energía que reciben en impulsos eléctricos y la llevan al cerebro mediante los nervios ópticos.

## 7.1. APLICACIONES TECNOLÓGICAS DE LA LUZ

Las ondas electromagnéticas tienen muchas y variadas aplicaciones en la actualidad.

### Ondas de Comunicaciones

Se emplean en las telecomunicaciones: radio, televisión y telefonía.

### Microondas

Se usan en radares, y en las telecomunicaciones: radio, televisión y telefonía.

### Radiación infrarroja

Se utilizan en dispositivos de visión nocturna, en mandos a distancia, y las lámparas infrarrojas tienen aplicaciones terapéuticas, para aliviar el dolor, y otras, como mantener la temperatura de los alimentos..

### Luz visible

Se emplea en todo tipo de dispositivos de iluminación, y la luz láser en medicina.

### Rayos ultravioleta

Se usan para estimular el bronceado, para detectar billetes falsos y en lámparas de la policía científica.

### Rayos X

Se utilizan en medicina para la obtención de imágenes de diagnóstico, en restauración de pinturas, en control de fisuras en materiales y en vigilancia, como el control de equipajes en aeropuertos.

### Rayos gamma

Se usan en medicina para radioterapia y en la esterilización tanto de alimentos como de materiales médicos.



## FORMULARIO MOVIMIENTO ONDULATORIO

$v$ sonido en el aire	340 (m/s) o (m s <sup>-1</sup> ) a 15°C (valor por defecto, y aumenta con T)
$c$ velocidad luz vacío	3·10 <sup>8</sup> (m/s) o (m s <sup>-1</sup> ) (en el aire es prácticamente la misma) Nada puede moverse más rápido que la luz por el vacío
$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$	Pulsación o frecuencia angular de la onda (rad/s) o (rad s <sup>-1</sup> ), con T(s) período temporal, y f (Hz) frecuencia de la onda
$\lambda = v_{\text{fase}} \cdot T$	Longitud de onda de la onda (m), con $v_{\text{fase}}$ Velocidad de propagación o Velocidad de fase del M.R.U de la onda (m/s)
$k = \frac{2\pi}{\lambda}$	Número de onda de la onda (rad/m) o (rad m <sup>-1</sup> )
$y(x,t) = A \text{sen}(\omega t \pm kx + \varphi_0)$	Ecuación de una onda armónica transversal que avanza por el eje X (– hacia x positivas, + hacia x negativas), y vibra en el eje Y
$v(x,t) = \frac{dy(x,t)}{dt}$	Velocidad de vibración del punto x en el instante t (m/s) o (m s <sup>-1</sup> )
$\cos(\alpha) = \text{sen}\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right)$	Relación trigonométrica entre ángulos diferenciados $\frac{\pi}{2}$ (rad)
$\frac{T(s)}{\Delta t(s)} = \frac{2\pi(\text{rad})}{\Delta\varphi_{\text{temporal}}(\text{rad})}$	Como T(s) es el período temporal de la onda se cumple esta proporción
$\frac{\lambda(m)}{\Delta x(m)} = \frac{2\pi(\text{rad})}{\Delta\varphi_{\text{espacial}}(\text{rad})}$	Como $\lambda(m)$ es el período espacial de la onda se cumple esta proporción
$A \sim \frac{1}{r} \quad 3D$ $A \sim \frac{1}{\sqrt{r}} \quad 2D$ $A_{\text{constante}} \quad 1D$	Relación de proporcionalidad entre la amplitud de oscilación de un punto, A (m), y su distancia al foco, r (m) para 3D, 2D, 1D
$I = \frac{E}{t \cdot S} = \frac{P}{S}$	Intensidad de una onda en un punto (W/m <sup>2</sup> ) o (W m <sup>-2</sup> ), con P(W) potencia con la que emite el foco. 1 W = 1 J/s
$S_{\text{esfera}} = 4\pi r^2$	Superficie de una esfera (m <sup>2</sup> )
$I_0$ Umbral de audición	10 <sup>-12</sup> (W/m <sup>2</sup> ) o (W m <sup>-2</sup> ) Intensidad sonora umbral de humanos
$\beta = \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$	Nivel de intensidad sonora o sonoridad (B), 1 B = 10 dB
$n = \frac{c}{v}$	Índice de refracción de un medio (adimensional) $\geq 1$

