

# Tema 05: Ondas mecánicas.



## 0501. Movimiento ondulatorio.

### Definición de onda

Un movimiento ondulatorio es una forma de transmisión de energía, sin transporte neto de materia, mediante la propagación de alguna forma de perturbación. Esta perturbación se llama onda.

En todo fenómeno de propagación de ondas se pueden apreciar algunos elementos comunes:

- Una perturbación inicial que se transmite de unos puntos a otros, sin desplazamiento neto de materia, desde un foco emisor.
- Una transmisión de energía a través de un medio.
- Cierta retraso entre el instante en que se produce la perturbación inicial y el instante en que ésta va alcanzando sucesivamente los puntos más alejados.

El concepto de onda no es solamente aplicable a la elongación de una partícula, sino que puede haber ondas de presión, de temperatura, de campos eléctricos, ... Cualquier variación periódica de una magnitud física que se propague por el espacio es una onda:

$$P = P_0 \sin(kx - \omega t).$$

### Ondas mecánicas y electromagnéticas.

Las ondas pueden clasificarse según su origen en:

- Ondas mecánicas: propagación de una perturbación mecánica a través de un medio material elástico. El medio material es indispensable para la propagación de la onda.
- Ondas electromagnéticas: transmisión de energía electromagnética mediante la propagación de campos eléctricos y magnéticos variables. No necesitan medio físico; se propagan por el vacío.

### Ondas longitudinales y transversales.

También pueden clasificarse las ondas según el movimiento de las partículas:

- ❖ Ondas transversales: cuando la dirección de propagación es perpendicular a la dirección de la oscilación que provoca en las partículas del medio perturbado. Sólo pueden propagarse en los sólidos.
- ❖ Ondas longitudinales: cuando la propagación es de igual dirección que la oscilación que provoca en las partículas.

### Velocidad de las ondas.

La velocidad de propagación de las ondas mecánicas depende únicamente de las propiedades del medio por el que se transmite y no de las características de las ondas. Ejemplos:

Ondas transversales en una cuerda:  $v = \sqrt{\frac{T}{\rho}}$

Ondas longitudinales bola-resorte:  $v = a \sqrt{\frac{k}{m}}$

Ondas longitudinales en un gas:  $v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$

Ondas sonoras en sólidos y líquidos:  $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$  y  $v = \sqrt{\frac{Q}{\rho}}$

No debe confundirse la velocidad de propagación de la onda que es constante, con la velocidad de vibración de cada partícula, que viene dada por la ecuación del MAS.

### Ondas armónicas.

De todos los movimientos ondulatorios son especialmente importantes y sencillos de estudiar las ondas armónicas. Son aquellas que pueden expresarse mediante funciones seno y coseno. Tienen su origen en las perturbaciones periódicas producidas en un medio elástico por un MAS.

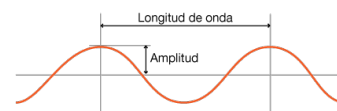
Su especial importancia se debe a que según un teorema matemático (Teorema de Fourier) cualquier función puede expresarse como combinación lineal de funciones seno y coseno.

### Características de las ondas armónicas:

**Elongación (y):** posición de cada punto en cada instante. Se mide en m.

**Amplitud (A):** valor máximo de la elongación. Se mide en m.

**Longitud de onda (λ):** distancia mínima entre dos puntos que se hallan en el mismo estado de vibración en el mismo instante (oscilan en fase). Se mide en m.



**Periodo (T):** tiempo que emplea cada punto en realizar una oscilación completa; o tiempo que emplea la onda en avanzar una longitud de onda. Se mide en s.

**Frecuencia (f):** inversa del periodo. Número de oscilaciones efectuadas por un punto en la unidad de tiempo. Se mide en Hz.

**Frecuencia angular ( $\omega$ ):** lo mismo que la frecuencia, pero medido en rad/s.  $\omega = 2\pi f$ .

**Número de ondas (k):** magnitud relacionada con la longitud de onda mediante la expresión:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

**Velocidad (v):** longitud que avanza la onda cada segundo:  $v = \lambda \cdot f$ .

## 0502. Ecuación de las ondas armónicas.

### Formas de la ecuación de una onda armónica.

La ecuación que describe una onda es una función de dos variables, la posición y el tiempo. Esta ecuación nos debe dar la posición de cada partícula en cada instante.

La ecuación de una onda que se propaga en el sentido positivo del eje X puede escribirse como:

$$y(x, t) = A \cdot \text{sen}(kx - \omega t)$$

También puede expresarse en función de la longitud de onda y el periodo:

$$y(x, t) = A \cdot \text{sen} 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right)$$

o bien, en función del número de onda y la velocidad:

$$y(x, t) = A \cdot \text{sen}[k(x - vt)]$$

Consideraciones respecto a la función de onda:

❖ En las ondas no suele considerarse la fase inicial, por lo que hemos tomado  $\delta=0$ . Una ecuación más general sería:

$$y(x, t) = A \cdot \text{sen}[(kx - \omega t) + \delta]$$

❖ La función de onda puede expresarse igualmente en función del coseno:

$$y(x, t) = A \cdot \cos(kx - \omega t)$$

la única diferencia está en las condiciones iniciales, puesto que:

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

❖ La función de onda también puede expresarse como:

$$y(x, t) = A \cdot \text{sen}(\omega t - kx)$$

La única diferencia está en las condiciones iniciales:  $\text{sen}(-\alpha) = \text{sen}(\alpha + \pi)$

❖ Si la onda se propaga en el sentido negativo del eje X la función de onda es:

$$y(x, t) = A \cdot \text{sen}(kx + \omega t)$$

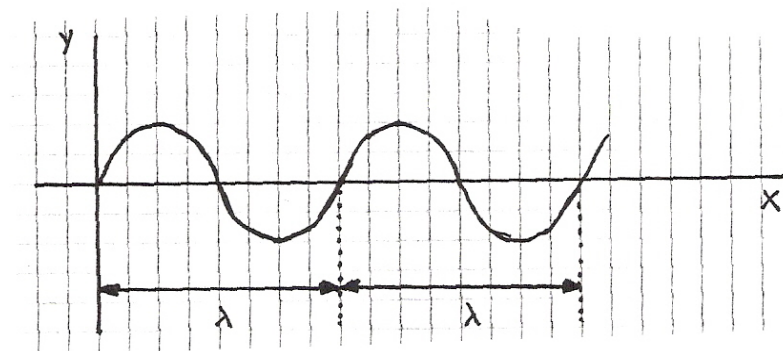
### Doble periodicidad

La función de onda es una ecuación doblemente periódica; periódica respecto a la posición y periódica respecto al tiempo.

• Periodicidad respecto a la posición x:

Para un tiempo fijo

$$y(x + \lambda, t) = A \cdot \text{sen} 2\pi \left( \frac{x + \lambda}{\lambda} \right) = \dots = A \cdot \text{sen} 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) = y(x, t)$$

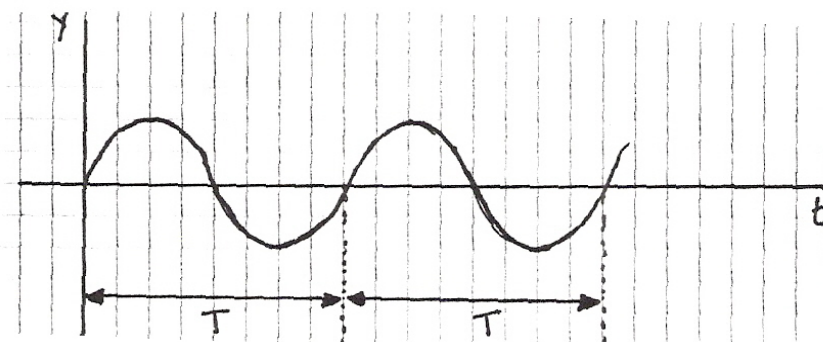


Las partículas separadas por un número entero de longitudes de onda están en fase; y las separadas por un número impar de medias longitudes de onda están en oposición de fase.

- Periodicidad respecto al tiempo:

Para una partícula ( $x = \text{cte}$ )

$$y(x, t+T) = A \cdot \text{sen } 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \frac{t+T}{T} \right) = \dots = A \cdot \text{sen } 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) = y(x, t)$$



Los estados de vibración de una partícula separados por un número entero de periodos están en fase; y los separados por un número impar de medias periodos están en oposición de fase.

Tanto la velocidad como la aceleración de un punto alcanzado por la onda son variables y se calculan derivando la ecuación de la elongación respecto al tiempo.

### 0503. Energía de las ondas.

#### Intensidad de una onda

Cuando una partícula es alcanzada por un movimiento ondulatorio describe un MAS y por tanto adquiere una energía:

$$E = \frac{1}{2} k A^2$$

La energía transmitida por una onda armónica es proporcional al cuadrado de la amplitud y al cuadrado de la frecuencia.

$$E = \frac{1}{2} k A^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} m (2\pi f)^2 A^2 = 2\pi^2 m A^2 f^2$$

La energía adquirida por una partícula no es una magnitud representativa de la energía que puede proporcionar una onda, por ello se define la intensidad de onda. Esta magnitud se define como la energía que atraviesa por unidad de tiempo una superficie unidad perpendicular a la dirección de propagación de la onda:

$$I = \frac{E}{S \cdot t} = \frac{P}{S}$$

Las unidades de la intensidad de onda en el S. I. son  $\text{W/m}^2$ .

Las ondas se debilitan al alejarse del foco emisor. Debido a ello pierden energía y su intensidad disminuye. Esto se produce principalmente por dos mecanismos:

#### Atenuación de ondas esféricas.

En muchos casos una onda se produce en un punto del espacio y se propaga con la misma velocidad en todas las direcciones. En este caso hablamos de ondas esféricas.

Al propagarse una onda esférica cada vez tiene que abarcar una superficie mayor y por tanto su intensidad disminuye.

$$I = \frac{P}{4\pi R^2}$$

Si consideramos dos puntos A y B situados a distancias  $R_1$  y  $R_2$  del foco emisor, y no hay pérdidas de energía ( $P = \text{cte.}$ )

$$P = I_1 4\pi R_1^2 = I_2 4\pi R_2^2 \Rightarrow \text{cte} \cdot A_1^2 \cdot R_1^2 = \text{cte} \cdot A_2^2 \cdot R_2^2 \Rightarrow \frac{A_1}{A_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

En una onda esférica en la que no hay pérdida de energía, la amplitud es inversamente proporcional a la distancia al foco.

La ecuación de una onda esférica atenuada sería:

$$y = \frac{A_0}{R} \sin(kR - \omega t)$$

### Absorción.

Es el fenómeno por el que parte de la energía que transporta la onda es transferida al medio material por el que se propaga la onda, debido al rozamiento.

Experimentalmente se comprueba que la absorción se rige por la siguiente ecuación exponencial:

$$I = I_0 \cdot e^{-\beta \cdot x}$$

$I$  = Intensidad de la onda

$I_0$  = Intensidad inicial

$\beta$  = coeficiente de absorción del medio (Unidad SI:  $\text{m}^{-1}$ )

$x$  = espesor del medio atravesado por la onda.

## 0504 Propagación de las ondas.

### Principio de Huygens.

Se llama frente de ondas al conjunto de todos los puntos que están en el mismo estado de vibración en un instante; dos frentes de ondas están separados por una longitud de onda. En 1690, Huygens estaba interesado en encontrar un método que permitiese construir el frente de ondas en un instante dado, conocido dicho frente en un instante anterior. Para ello supuso que **"cada uno de los puntos del frente de ondas, al ser alcanzado por la perturbación se convierte en una fuente secundaria de emisión"**; es decir, cada uno emite de nuevo ondas de las mismas características que la onda original. El nuevo frente de ondas es la envolvente de las curvas que representan a dichas ondas.

Esta interpretación es adecuada para ondas mecánicas, pero no para ondas electromagnéticas. Y además presenta el problema de que aparecerían ondas de retroceso que no existen. Posteriormente **Kirchhoff** elaboró matemáticamente esta teoría demostrando que las ondas de retroceso tenían energía nula y por tanto no existían, y haciendo el principio aplicable a las ondas electromagnéticas.

### Reflexión de las ondas.

Cuando una onda choca con una superficie de separación de dos medios, experimenta dos fenómenos típicos: una parte de la onda penetra en el segundo medio modificando su velocidad de propagación, tanto en módulo como en dirección (refracción), mientras otra parte de la onda rebota y se propaga por el mismo medio de donde provenía y cambiando de dirección y sentido (reflexión).

Según la interpretación de Huygens los puntos de la superficie de separación de ambos medios se convierten en focos emisores secundarios al ser alcanzados por la perturbación. Las nuevas ondas pueden seguir dos caminos:

- Pasar al segundo medio: refracción
- Volver por el primer medio: reflexión

Experimentalmente se conocen las siguientes leyes:

• Las direcciones de incidencia y reflexión están en un mismo plano perpendicular a la superficie de separación.

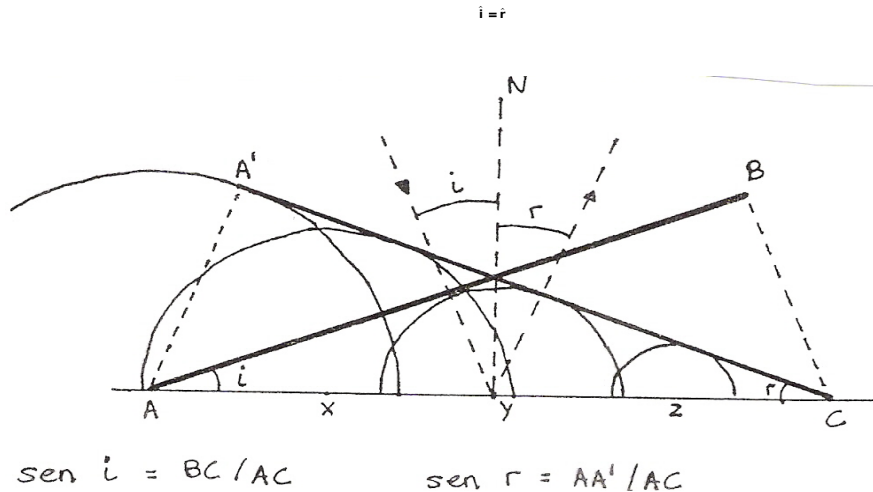
•El ángulo de incidencia es igual al de reflexión.

Justificación de estas leyes:

❖No hay razón para que el rayo reflejado se aparte del plano que contiene al rayo incidente y es perpendicular a la superficie.

❖La ley de la reflexión puede justificarse empleando el principio de Huygens.

Supongamos un frente de onda plano AB que llega con cierta inclinación a la superficie de separación de dos medios: como la onda no cambia de medio, el módulo de la velocidad no se modifica y por tanto  $BC = AA'$  puesto que se emplea igual tiempo en recorrer distancias iguales.



### Refracción de ondas.

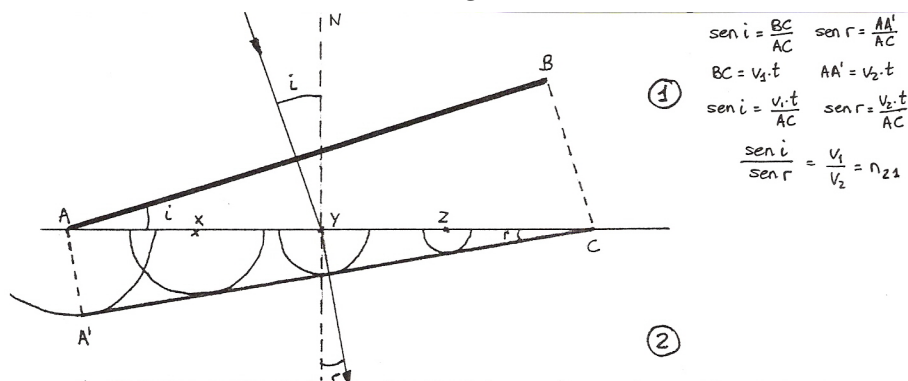
Experimentalmente se conocen las siguientes leyes:

❖Las direcciones de incidencia y reflexión están en un mismo plano perpendicular a la superficie de separación.

❖El cociente entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es constante.

$$\text{sen } i / \text{sen } r = n$$

La ley de la refracción también se justifica por medio del principio de Huygens, teniendo en cuenta que la velocidad de la luz varía al entrar en el segundo medio.



La constante  $n$  es el cociente entre las velocidades en ambos medios y se llama **índice de refracción**. Normalmente se usa el índice de refracción de un medio respecto a otro que se toma como patrón. Si llamamos  $c$  a la velocidad en el medio patrón:

$$n = c/v$$

Por tanto

$$\text{sen } i / \text{sen } r = n_2/n_1.$$

Cuando una onda pasa a un medio de mayor índice de refracción se acerca a la normal.

Normalmente suele llamarse **ley de Snell** a esta tercera ley de la refracción, aunque algunos autores llaman leyes de Snell a las dos (la de refracción y la de reflexión).

Otra alternativa para explicar las leyes de la reflexión y la refracción es el **principio del tiempo mínimo de Fermat**. Según él, de todos los caminos posibles para que una onda se propague entre dos puntos, ésta lo hace siempre por aquél que requiere un tiempo menor.

### Difracción.

Se llama difracción a un fenómeno característico del movimiento ondulatorio que se presenta cuando la onda es distorsionada por un obstáculo, o cuando pasa a través de un orificio. Este fenómeno es apreciable cuando el tamaño del obstáculo es de tamaño comparable a la longitud de onda.

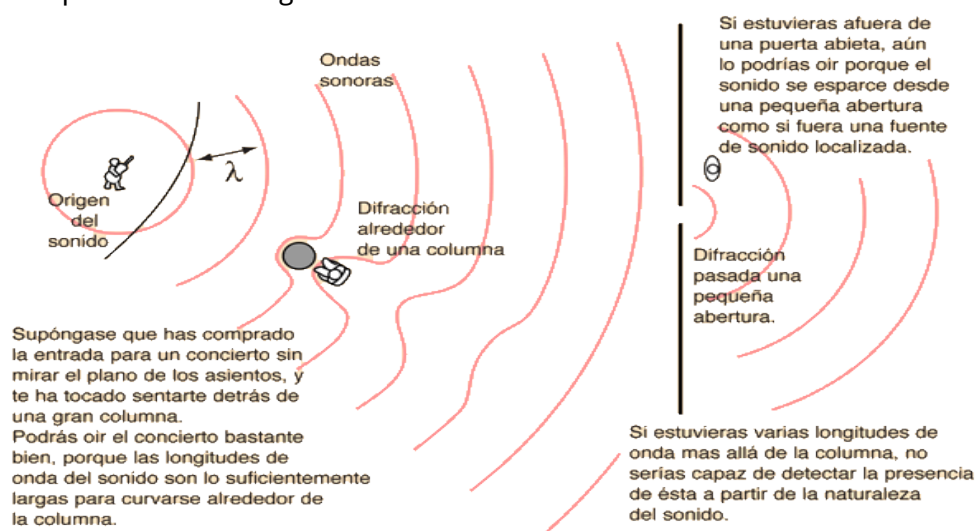
Se usa para distinguir si un fenómeno es de carácter ondulatorio o corpuscular. También sirve para conocer de forma aproximada la longitud de onda de las ondas que se propagan.

Es un fenómeno de propagación no rectilínea producida por interferencias múltiples entre las ondas producidas en el obstáculo, y dan lugar a un patrón típico de zonas de máxima amplitud y otras de amplitud nula. Se interpreta por el principio de Huygens.

### Difracción del Sonido

**Difracción: la curvatura de las ondas alrededor de pequeños obstáculos y la propagación de las ondas mas allá de las pequeñas\* aberturas.**

\* pequeña comparada con la longitud de onda



La difracción forma parte importante de nuestra experiencia con el sonido. El hecho de que se pueda escuchar sonidos alrededor de las esquinas y alrededor de barreras, involucra tanto la difracción como la reflexión del sonido. La difracción en estos casos ayuda a que el sonido se "curve en torno a" los obstáculos. El hecho de que la difracción sea más pronunciada con longitudes de ondas mas largas implica que se puede escuchar las frecuencias bajas alrededor de los obstáculos, mejor que las altas frecuencias, como se ilustra en el ejemplo de una banda de música en la calle. Otro ejemplo común de la difracción, es el contraste entre el sonido de un rayo cercano y otro lejano. El trueno de un rayo cercano se experimenta como un chasquido nítido marcado, lo que indica la presencia de una gran cantidad de sonidos de alta frecuencia. El trueno de un rayo distante se experimenta como un ruido sordo, ya que son longitudes de ondas largas, que pueden doblarse alrededor de los obstáculos para llegar a uno. Hay otros factores tales como la mayor absorción de aire de las altas frecuencias involucradas, pero la difracción juega un papel importante en la experiencia.

Se puede percibir que la difracción tiene una naturaleza dual, ya que el mismo fenómeno que hace que las ondas se curven alrededor de los obstáculos, hace que se extiendan pasadas las aberturas pequeñas. Este aspecto de la difracción también tiene muchas implicaciones. Además de poderse escuchar el sonido cuando se encuentre al otro lado de la puerta como en la ilustración de arriba, esta propagación de las ondas sonoras

tiene consecuencias cuando se trata de una habitación insonorizada. La insonorización adecuada requiere que la sala esté bien sellada, porque cualquier abertura permite que el sonido en el exterior se difunda en la sala -es sorprendente la cantidad de sonido que puede entrar a través de una pequeña abertura-. Por razones similares, es necesario un buen sellado en las cajas de altavoces.

Otra consecuencia de la difracción es el hecho de que una onda que sea mucho más larga que el tamaño de un obstáculo, como el poste en el auditorio de arriba, no puede dar información acerca de ese obstáculo. Un principio fundamental del tratamiento de imagen, es que no se puede ver un objeto que sea más pequeño que la longitud de onda de la luz con la que se mira. No se puede ver un virus con un microscopio de luz, porque el virus es más pequeño que la longitud de onda de la luz visible. La razón de esta limitación se puede visualizar con el ejemplo del auditorio: las ondas sonoras se curvan y el frente de onda se reconstruye más allá del pilar. Cuando se está posicionada a varias veces las longitudes de ondas del sonido más allá del pilar, no hay nada de la onda que dé información sobre el pilar. Por consiguiente, de la experiencia con el sonido, se puede obtener ideas sobre las limitaciones de todo tipo en el procesamiento de imágenes.

Tomado de HyperPhysics

## 0505. Interferencias.

### Interferencias de ondas coherentes.

Cuando dos ondas se encuentran en una misma zona del espacio suman sus efectos en cada punto, manteniendo cada una su forma cuando se separan. Este comportamiento es general en los movimientos ondulatorios y se conoce como Principio de Superposición:

“ Cuando se propagan dos o más ondas por un medio, la perturbación resultante en cada punto del medio es igual a la suma de las perturbaciones que produciría cada onda por separado.”

La coincidencia de dos o más ondas en un punto del medio se conoce como interferencia. Si la perturbación resultante es mayor que las originales se habla de **interferencia constructiva**; en caso contrario de **interferencia destructiva**.

Supongamos que tenemos dos ondas coherentes (ello significa que tengan igual amplitud, frecuencia y longitud de onda) y que queremos calcular la perturbación producida en cualquier punto del espacio. La perturbación producida por cada onda será:

$$y_1 = A \operatorname{sen}(kx_1 - \omega t)$$

$$y_2 = A \operatorname{sen}(kx_2 - \omega t)$$

Según el principio de superposición la perturbación resultante es:

$$y = y_1 + y_2 = A \operatorname{sen}(kx_1 - \omega t) + A \operatorname{sen}(kx_2 - \omega t) = A [\operatorname{sen}(kx_1 - \omega t) + \operatorname{sen}(kx_2 - \omega t)]$$

Recordando que  $\operatorname{sen} a + \operatorname{sen} b = 2 \operatorname{sen} (a+b)/2 \cos (a-b)/2$

$$y = A [ 2 \operatorname{sen} (kx_1 - \omega t + kx_2 - \omega t)/2 \cdot \cos (kx_1 - \omega t - kx_2 + \omega t)/2 ]$$

$$y = 2A \operatorname{sen} \left[ \frac{k(x_1 + x_2)}{2} - \omega t \right] \cos k \frac{x_1 - x_2}{2}$$

La expresión  $2 A \cos (kx_1 - kx_2)/2$  recibe el nombre de Amplitud Resultante ( $A_r$ ). Por tanto:

$$y = A_r \operatorname{sen}(kd - \omega t), \text{ siendo } d = (x_1 + x_2)/2$$

O sea, que la perturbación resultante es una onda armónica de la misma frecuencia y longitud de onda que las ondas originales, cuyo origen se encontraría a una distancia  $(x_1 + x_2)/2$  del punto P, pero cuya amplitud es diferente para cada punto del espacio.

En algunos puntos se produce una intensificación de las ondas componentes y en otros una debilitación de éstas, incluso la anulación.

Veamos los dos casos extremos:

#### ⊗ Interferencia constructiva

Se produce cuando la amplitud resultante es máxima en valor absoluto.

Para ello ha de cumplirse:



$$\cos k \frac{x_1 - x_2}{2} = \pm 1 \Rightarrow k \frac{x_1 - x_2}{2} = n\pi$$

O bien, en función de la longitud de onda:

$$\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{x_1 - x_2}{2} = n\pi \Rightarrow$$

$$x_1 - x_2 = n\lambda$$

Con  $n = 0, 1, 2, \dots$

En estos puntos la amplitud de la onda resultante es máxima e igual al doble de la amplitud de las ondas que interfieren. La diferencia de recorrido de las ondas es cero o un número entero de longitudes de onda. Las ondas llegan en concordancia de fase. Estos puntos se llaman vientres.

### ⊗ Interferencia destructiva

Se produce cuando la amplitud resultante es cero.

Para ello ha de cumplirse:

$$\cos k \frac{x_1 - x_2}{2} = 0 \Rightarrow k \frac{x_1 - x_2}{2} = (2n + 1) \frac{\pi}{2}$$

O bien:

$$x_1 - x_2 = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$$

En estos puntos la amplitud resultante es cero. La diferencia de recorrido de las ondas es un número impar de medias longitudes de onda. Las ondas llegan en oposición de fase. Estos puntos se llaman nodos.

## 0506. Ondas estacionarias.

Cuando las ondas están confinadas en un espacio limitado se produce el fenómeno conocido como **ondas estacionarias**. Se deben a interferencias de una onda con la misma onda reflejada. Se caracterizan por la existencia de puntos que están siempre en reposo, que se llaman nodos, y los demás puntos se mueven con movimientos vibratorios armónicos de distintas amplitudes. Los puntos que vibran con amplitud máxima se llaman vientres o antinodos. Los nodos impiden la propagación de la energía y por lo tanto no es una verdadera onda sino un conjunto de osciladores armónicos.

Si la onda incidente tiene una ecuación  $y_1 = A \sin(kx - \omega t)$ , la ecuación de la onda reflejada será:  $y_2 = A \sin(kx + \omega t)$ . La perturbación resultante en cada punto será:

$$y = A \sin(kx - \omega t) + A \sin(kx + \omega t).$$

Utilizando la relación trigonométrica:

$$\sin a + \sin b = 2 \sin(a+b)/2 \cos(a-b)/2, \text{ obtenemos:}$$

$$y = 2A \sin kx \cos \omega t$$

que puede escribirse como  $y = A_r \cos \omega t$ , siendo  $A_r = 2A \sin kx$ . Esto ya no es la ecuación de una onda sino de un conjunto de osciladores armónicos.

La ecuación de una onda estacionaria también puede escribirse como:

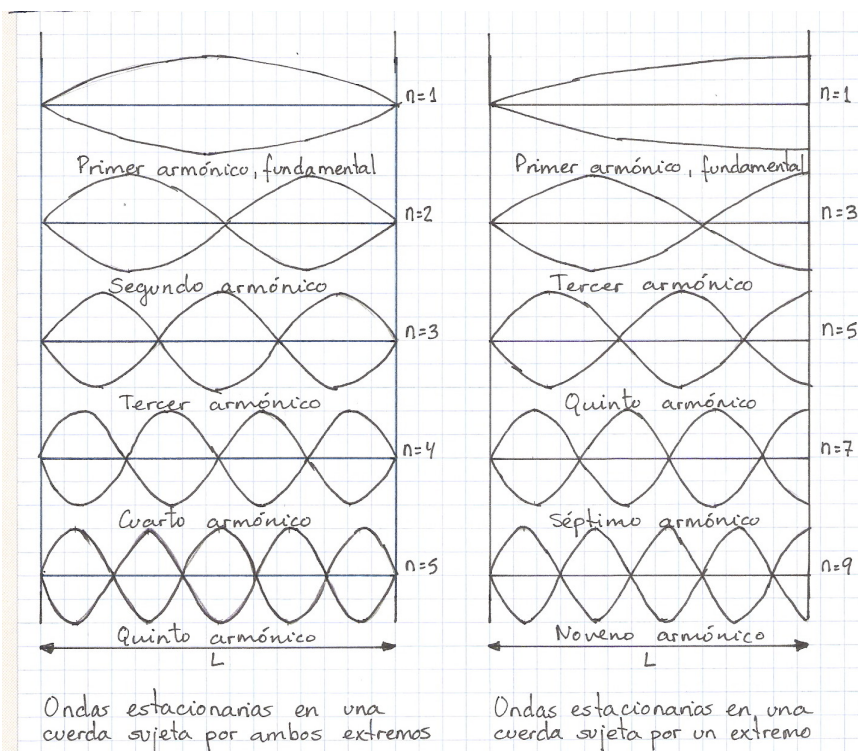
$$y = 2A \cos kx \sin \omega t$$

$$y = 2A \cos kx \cos \omega t$$

La amplitud resultante es nula en los puntos que cumplen:

$kx = n\pi$  con  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$  o bien,  $x = n\lambda/2$ , que es la ecuación que cumplen los nodos de la cuerda.

Un caso especialmente interesante es el de una cuerda fija por ambos extremos. Para que se produzcan ondas estacionarias, los puntos  $x = 0$  y  $x = L$  deben ser nodos:  $L = n\lambda/2$  (condición de ondas estacionarias)  $\lambda = 2L/n$  o bien,  $f = nv/2L$ . Estas frecuencias se llaman frecuencias de resonancia, la más baja, correspondiente a  $n = 1$ , se llama frecuencia fundamental de vibración o primer armónico. Las demás se llaman modos de vibración, armónicos o sobretonos.

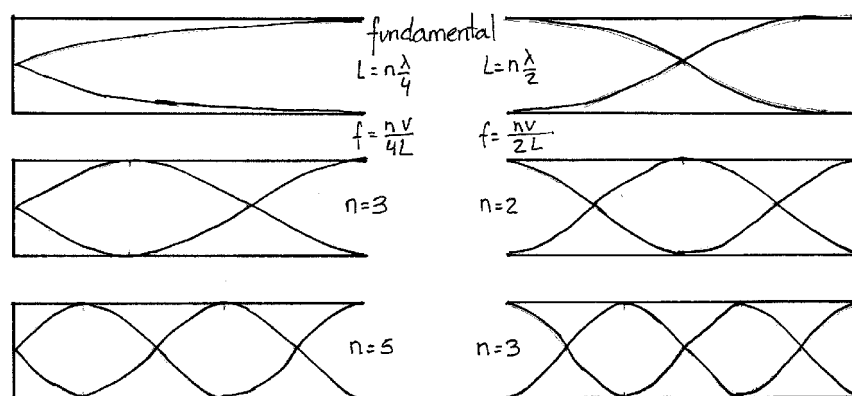


Cuando una cuerda está fija sólo por un extremo, la condición de ondas estacionarias es:  $L = n\lambda/4$ , y sus frecuencias de vibración  $f = nv/4L$ . En este caso  $n$  debe ser impar.

La distancia entre dos nodos o dos vientres es la mitad de la longitud de onda.

La frecuencia no varía de forma continua, puede decirse que está cuantizada. Esta situación es frecuente en muchos campos de la física.

También se producen ondas estacionarias en los tubos cerrados por un extremo o abiertos por ambos extremos.



Ondas estacionarias formadas en tubos cerrados por un extremo o abiertos por ambos extremos.

## 0507. El sonido.

### Ondas sonoras

"Tratemos de explicar qué es el sonido. El sonido consiste en variaciones ondulatorias de la presión del aire. Imaginemos que, por no importa qué causa, en una minúscula región del aire se produce una ligerísima bajada de presión. En la región inmediatamente vecina se produciría un movimiento de las partículas de aire que acudirían a rellenar la zona de baja presión inicial. Esta

*región vecina quedaría ahora con menos partículas, y a su vez sus regiones vecinas enviarían sus partículas de aire para compensarlo. En definitiva, la baja presión se iría desplazando. El aire que acude de la vecindad a la región de baja presión inicial, en lugar de hacer que esta recupere la presión normal, produce por un instante una sobrepresión. E igual que anteriormente, por movimientos de una regiones a otras, esta alta presión se va propagando. En el instante siguiente la alta presión de la región inicial se convierte ya en baja presión que también se propaga. Como consecuencia, una serie alternativa de bajas y altas presiones se propaga desde la región inicial hacia fuera.*

*Si pudiéramos ver una fotografía instantánea de lo que ocurre veríamos una alternancia de máximos y mínimos de presión. La distancia entre dos máximos se llama longitud de onda. Si al contrario nos fijamos en un punto cualquiera, veríamos que allí la presión varía en el tiempo, alcanzando máximos y mínimos alternativamente según transcurre el tiempo. El tiempo que media entre dos máximos consecutivos de presión se llama periodo. Al inverso del periodo se le llama frecuencia, que por ser el inverso será el número de oscilaciones que se producen en un lugar dado por unidad de tiempo. Si dividimos la longitud de onda por el periodo obtenemos la llamada velocidad del sonido, pues coincide con la velocidad de (por ejemplo) uno de los máximos.*

*El movimiento no es eterno, pues todo acaba disipándose por rozamiento, pero si en la región central original, artificialmente, vamos creando periódicamente altas y bajas presiones, el sonido duraría en la región circundante tanto como persistiera nuestra provocación de altas y bajas presiones en la región central original. Esta provocación emisora puede mantenerse artificialmente o mediante cualquier efecto natural. La velocidad de la onda dependerá de las propiedades intrínsecas del aire (o del agua, o de la tierra, porque el sonido se puede propagar en gases, líquidos y sólidos), tales como su temperatura o su composición química. En cambio el periodo, y por tanto la longitud de onda, pueden ser elegidos por quien produce la oscilación emisora. Por lo tanto, con la misma velocidad pueden propagarse ondas con longitudes de onda diferentes."*

Texto tomado del libro "Física de las noches estrelladas" de Eduardo Battaner.

El sonido es una vibración o perturbación mecánica de algún cuerpo que se propaga en forma de ondas longitudinales a través de cualquier medio o material elástico.

El sonido es una onda longitudinal, que puede considerarse como una onda de presión o una onda de densidad o una onda de desplazamiento.

Se caracteriza por tener una frecuencia dentro del intervalo de percepción del oído humano normal, entre 20 y 20000 Hz.

Existen ondas producidas por el mismo mecanismo que no son perceptibles por el oído humano:

➤ Infrasonidos: con frecuencias inferiores a 20 Hz. Se producen, por ejemplo, en los temblores de tierra.

➤ Ultrasonidos: con frecuencias superiores a 20000 Hz. Se utilizan, por ejemplo, en las ecografías.

La velocidad de las ondas sonoras es mayor en los sólidos que en los líquidos y en éstos que en los gases. La velocidad del sonido en el aire seco a 20 °C es aproximadamente de 340 m/s.

## Cualidades del sonido

### INTENSIDAD

La sensación sonora de mayor o menor intensidad que percibe el oído humano está directamente relacionada con la intensidad que ya hemos definido (energía por unidad de superficie y por unidad de tiempo). Coincide con lo que llamamos volumen de un sonido.

El intervalo de intensidades que puede percibir el oído humano va desde el umbral de audición  $10^{-12} \text{ W/m}^2$  hasta el umbral de dolor  $1 \text{ W/m}^2$ .

Para medir el nivel de intensidad sonora percibido por el oído se establece una escala logarítmica, que se mide en decibelios (dB).

$$B = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

Siendo  $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ . Un valor de 0 dB equivale al umbral de audición. Y 120 dB equivalen al umbral de dolor. Los sonidos de menos de 10 dB son difícilmente audibles, mientras que los superiores a 100 dB producen molestias; a partir de 140 dB experimentamos dolores agudos.

### TONO

Permite distinguir los sonidos graves de los agudos. Se corresponde con la frecuencia del sonido. Los sonidos graves o tonos bajos corresponden a frecuencias pequeñas. Los tonos altos o sonidos agudos corresponden a frecuencias grandes.

### TIMBRE

Normalmente los sonidos no corresponden a una sola frecuencia, sino que son el resultado de la superposición a la onda fundamental de varios movimientos periódicos que se denominan armónicos o sobretonos. El resultado es una onda que no es perfectamente armónica.

El timbre depende del número, de la intensidad y de la frecuencia de los distintos armónicos que acompañan al sonido fundamental y permite distinguir sonidos de igual intensidad y tono emitidos por focos distintos.

### Efecto Doppler

Se llama efecto Doppler a la variación de la frecuencia que se produce cuando existe un movimiento relativo del foco emisor respecto al receptor. Se manifiesta en un aumento de la frecuencia cuando foco y receptor se acercan y en una disminución de la frecuencia cuando foco y receptor se alejan.

#### Efecto Doppler

Se oye el tono alto de la sirena de la ambulancia que se acerca, y se nota que su tono cae repentinamente cuando pasa la ambulancia. Eso se llama el efecto Doppler.

El movimiento de la fuente altera la longitud de onda y la frecuencia del sonido recibido, a pesar de que la frecuencia de la fuente y la velocidad de la onda permanezcan inalteradas.

Fuente de frecuencia estacionaria  $f_{\text{fuente}}$

$$f_{\text{fuente}} = \frac{v}{\lambda}$$

Velocidad del sonido  $v$

Fuente acercándose:  $f'' = \frac{v}{\lambda''} = \frac{v}{v - v_s} f_{\text{fuente}}$

En el periodo  $T$ , la fuente se acerca  $v_s T$ , así pues

Fuente alejándose:

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{v + v_s} f_{\text{fuente}}$$

Velocidad de la fuente  $v_s$

Movimiento de la fuente de frecuencia  $f_{\text{fuente}}$

$$\lambda = vT$$

$$\lambda' = (v + v_s)T$$

$$\lambda'' = (v - v_s)T$$

Tomado de HyperPhysics.