

Fundamentos de Física

Tema 4. MOVIMIENTO ONDULATORIO

Objetivo

El alumno describirá y analizará el fenómeno ondulatorio estudiando experimentalmente algunas variables físicas relevantes asociadas a dicho fenómeno y obtendrá experimentalmente la rapidez de propagación de una onda.

Contenido

- 4.1 Concepto de onda; ondas longitudinales y transversales; ondas viajeras y estacionarias.
- 4.2 Ondas mecánicas y ondas electromagnéticas
- 4.3 Naturaleza de la luz y del sonido.
- 4.4 Concepto de amplitud, longitud de onda, frecuencia, frecuencia angular y rapidez de propagación.
- 4.5 Función de onda.
- 4.6 Registro, tabulación y representación gráfica de la longitud de onda en función de la frecuencia, su modelo matemático e interpretación física de la pendiente de la recta obtenida.

4.1a Concepto de onda

Una onda es una perturbación que transporta energía y que se desplaza. Esta perturbación se propaga en el tiempo de una región a otra. Es importante mencionar que las ondas transportan energía, pero no materia.

4.1a Concepto de onda

El ejemplo clásico es cuando un objeto cae sobre el agua de una alberca se forman las ondas, es decir, se produce una perturbación que se propaga en círculos concéntricos y se extiende a todas las partes de la alberca, Si se encontrara un corcho flotando sobre la superficie éste se movería de arriba hacia abajo a medida que se propaga la perturbación sin embargo el desplazamiento del corcho es muy pequeño, prácticamente permanece en su lugar.



Imagen tomada de:

<https://docplayer.es/49450277-Ondas-perturbacion-que-se-propaga-a-traves-de-un-medio-material-o-en-el-vacio-sin-transporte-de-materia-pero-si-de-energia-masa.html>.

4.1b Onda viajera

Una onda viajera es una onda que se mueve con el tiempo a través del medio. Por ejemplo, una ola en el mar, antes de romper en la costa, constituye una onda viajera.

Otro ejemplo es una cuerda con su extremo izquierdo atado a un vibrador. El extremo del vibrador metálico se mueve arriba y abajo por lo que se envían una serie de pulsos a través de la cuerda. Las ondas resultantes están formadas por muchas crestas y valles que se mueven a lo largo de la cuerda con velocidad constante. La distancia entre dos crestas o valles adyacentes se llama longitud de onda y se representa por λ .

4.1b Onda viajera

Cada vez que el extremo del vibrador efectúa una oscilación completa, la onda se moverá a través de una distancia de una longitud de onda. El tiempo requerido para cubrir esta distancia se denomina periodo y se representa por T [s]. De este modo la rapidez de onda v se puede relacionar con la longitud de onda λ y el periodo T por la ecuación: $v = \frac{\lambda}{T}$

$$v \left[\frac{m}{s} \right] = \frac{\lambda [m]}{T [s]}$$

O también la rapidez de onda se puede expresar en función de la frecuencia recordando que la frecuencia es el inverso del periodo, por lo tanto:

$$v = \lambda \cdot f$$

$$v \left[\frac{m}{s} \right] = \lambda [m] \cdot f \left[\frac{1}{s} \right]$$

4.1b Onda viajera

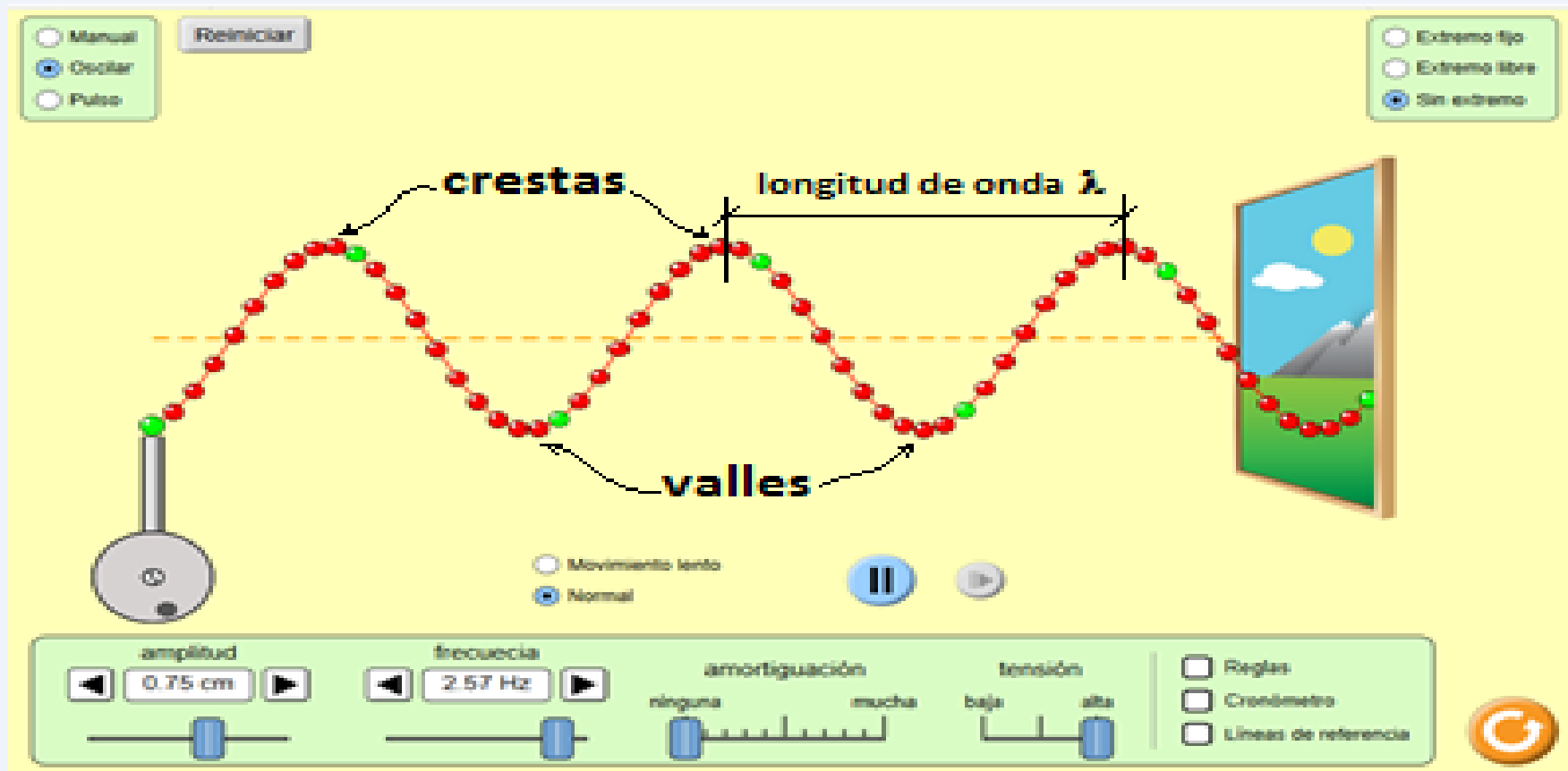


Imagen tomada del simulador Phet de la Universidad de Colorado.

<https://phet.colorado.edu/es/simulation/wave-on-a-string>

4.1b Onda viajera

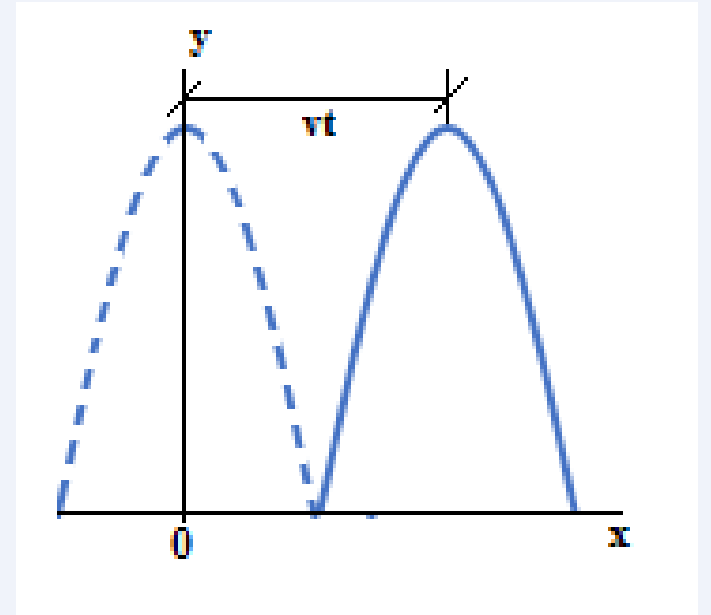
Una onda que se mueve en dirección x positiva con una rapidez v se describe por la función:

$$y(x, t) = f(x - vt)$$

La función $y(x, t)$ contiene la descripción completa de la forma de la onda y de su movimiento.

4.1b Onda viajera

En la figura se muestra una perturbación ondulatoria que viaja de $x = 0$ a algún punto x a la derecha del origen en un tiempo dado por x/v , donde v es la rapidez de la onda, entonces el movimiento del punto x en el instante t es el mismo que el movimiento del punto en el origen ($t=0$), es decir, el movimiento del punto x en el instante t es el mismo que en el instante anterior $t - x/v$, ya que la onda se ha movido hacia la derecha una distancia $x=vt$.



4.1b Onda viajera

Una onda viajera dependerá de x y t únicamente en la combinación $(x \pm vt)$

Una onda que se mueve en la dirección x positiva se describe por la función

$$y(x, t) = f(x - vt)$$

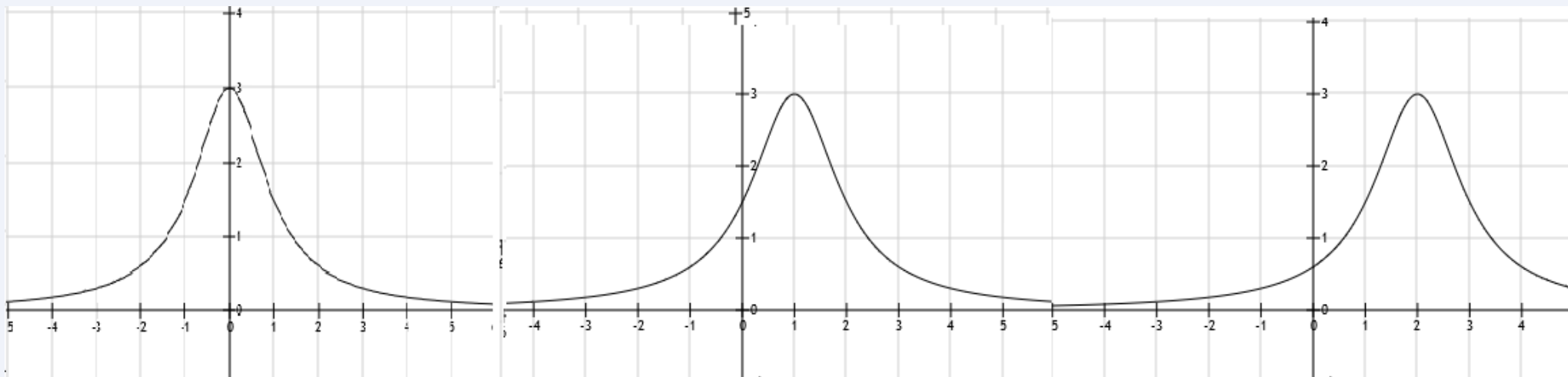
Una onda que se mueve en la dirección x negativa se describe por la función

$$y(x, t) = f(x + vt)$$

4.1b Onda viajera

Por ejemplo. La ecuación que define a cierta onda es: $y(x,t) = \frac{3}{(x-t)^2 + 1}$

Las gráficas obtenidas para los tiempos $t=0$ [s], $t=1$ [s], $t=2$ [s] son las siguientes

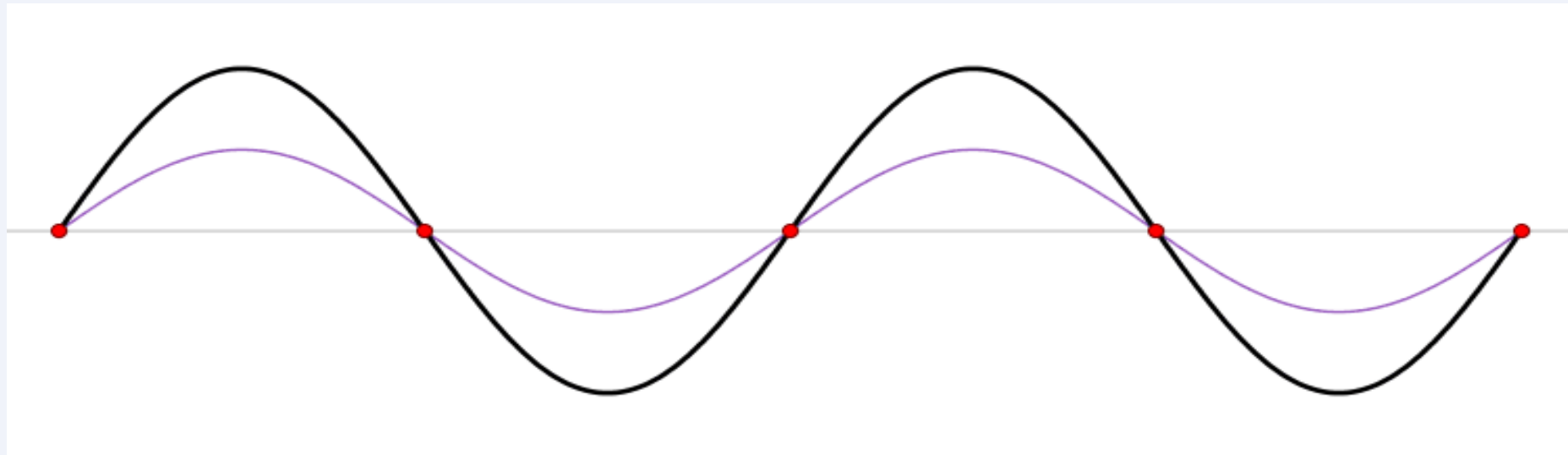


Se observa que la onda se ha desplazado o viajado en los tiempos 1 y 2, pero la forma, la amplitud y su frecuencia permanece constante.

4.1c Ondas estacionarias

Las ondas estacionarias son aquellas ondas en las cuales, ciertos puntos de la onda llamados nodos, permanecen inmóviles.

Enlace de una onda estacionaria. Corre en internet. Imagen tomada de: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7d/Standing_wave_2.gif

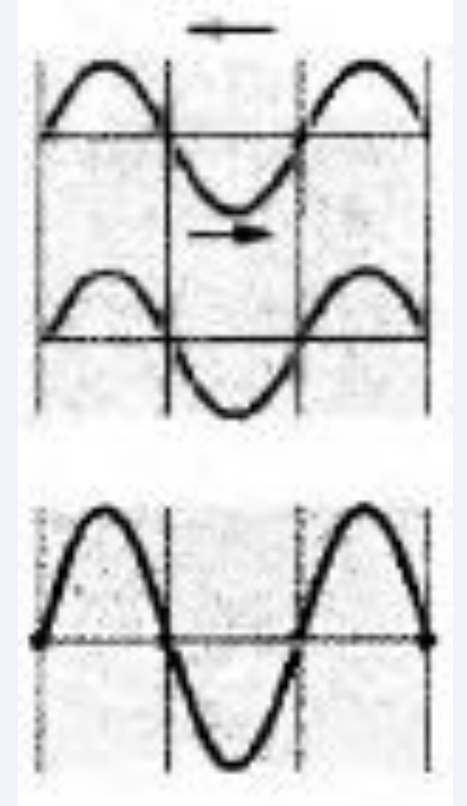


4.1c Ondas estacionarias

Una onda estacionaria se forma por la interferencia de dos ondas de la misma naturaleza con igual amplitud, longitud de onda (o frecuencia) que avanzan en sentido opuesto a través de un medio.

Por ejemplo, en la siguiente figura se observan dos ondas de la misma amplitud y misma frecuencia que viajan en sentido contrario.

En la figura inferior se observa que, al sumarlas, punto a punto, se obtiene otra de mayor amplitud. Los puntos negros indican los nodos donde la amplitud de la onda es nula.

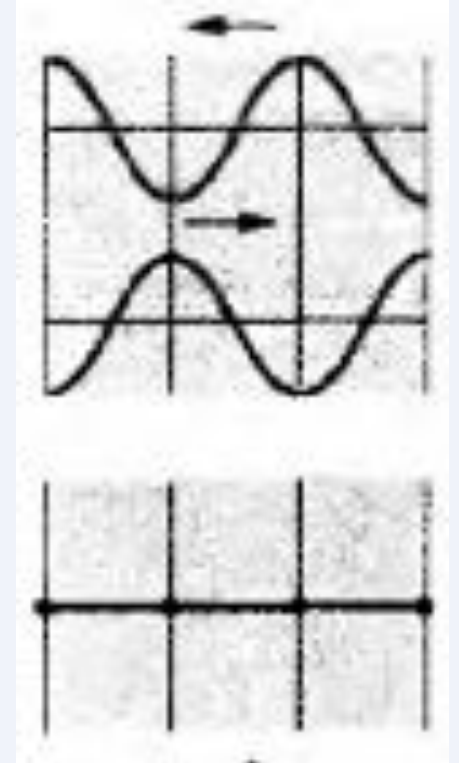


4.1c Ondas estacionarias

En esta otra figura las mismas ondas se desplazan, pero con tiempos diferentes, de tal manera que al sumarlas se obtiene una resultante nula.

De la superposición resulta una característica particular:

Existen ciertos puntos a lo largo de la cuerda, llamados *nodos*, en los cuales el desplazamiento es nulo *en todo momento*.



4.2 Ondas mecánicas y ondas electromagnéticas

Ondas mecánicas. Las ondas mecánicas son aquellas donde la perturbación física se produce en un medio material, es decir, el movimiento ondulatorio viaja sobre el medio. La onda en el agua es una onda mecánica porque su existencia misma depende de una fuente mecánica y de un medio material, al igual que la onda en una cuerda o un resorte.

4.2a Ondas mecánicas longitudinales

Las ondas mecánicas se pueden clasificar de diferentes formas:

A) Según la dirección de vibración de las partículas y de propagación de la onda.

Las ondas se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de movimiento que generan en una parte determinada del medio en el cual se producen, con respecto a la dirección en la que se propaga la onda. Para su estudio, las ondas clasifican en ondas longitudinales y ondas transversales.

4.2a Ondas mecánicas longitudinales

La vibración de las partículas individuales es paralela a la dirección de propagación de la onda.

Un ejemplo es un resorte en espiral al cual se le da un impulso. Las espiras cercanas al impulso se comprimen y después se expanden y así se propaga la onda. La dirección de vibración coincide con la dirección de propagación.

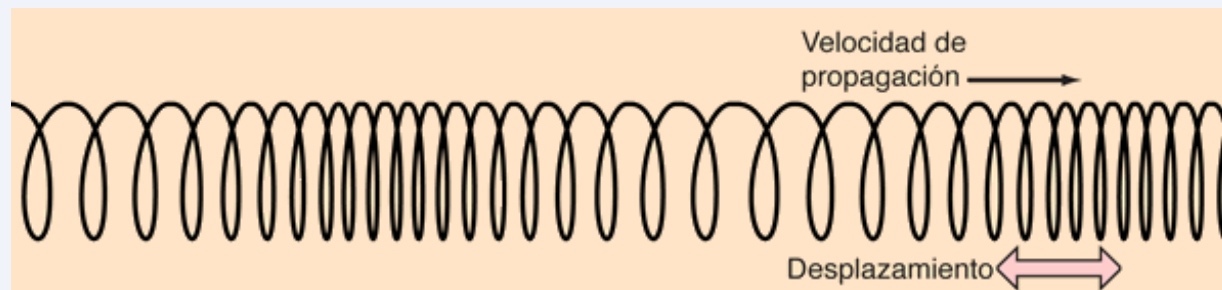


Imagen tomada de: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Sound/tralon.html>

42a Ondas mecánicas transversales

La vibración de las partículas individuales del medio es perpendicular a la dirección de propagación de la onda.

Por ejemplo, si una cuerda es atada por un extremo a un poste y se agita el otro extremo, hacia arriba y hacia abajo, se envía una perturbación a lo largo de la cuerda. Las partículas individuales se mueven hacia arriba y hacia abajo mientras que la perturbación se mueve hacia la derecha con una rapidez v .

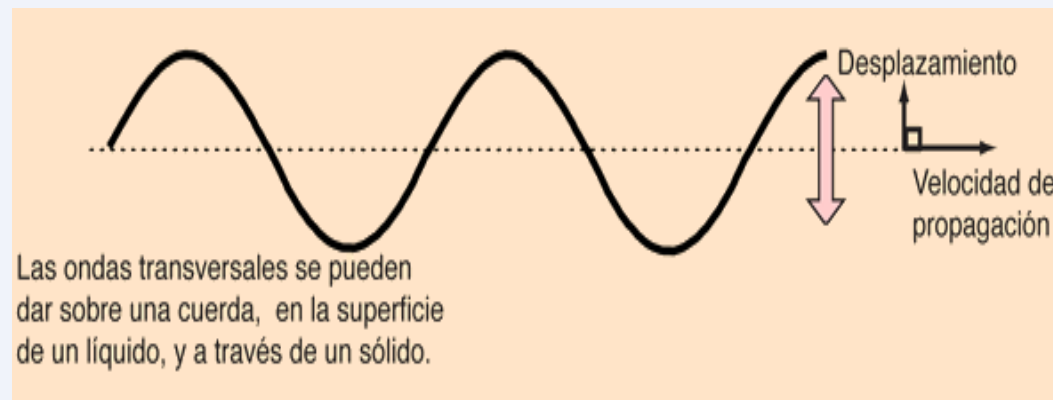


Imagen tomada de:

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Sound/tralon.html>

4.2b. Ondas electromagnéticas

A diferencia de las ondas mecánicas, las ondas electromagnéticas se propagan por el espacio sin que sea necesario un medio a través del cual se transporten, pudiendo, por tanto, propagarse en el vacío, entre otras, la luz visible, las ondas de radio, televisión y telefonía.

4.3 Naturaleza del sonido y de la luz

El sonido.

El sonido es una onda longitudinal que necesita de un medio material (gaseoso, líquido o sólido) para propagarse. Un ejemplo son las cuerdas de una guitarra que al hacerlas vibrar generan ondas que se propagan por el aire.

4.3a. El sonido

Ejemplo.

La rapidez del sonido depende de la temperatura; a 20 °C, es de 344 m/s. Calcule la longitud de onda de una onda sonora en aire a 20 °C, si la frecuencia es de 262 Hz.

De acuerdo con la expresión de rapidez en la onda

$$v \left[\frac{m}{s} \right] = \frac{\lambda [m]}{T [s]}$$

$$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f} = \frac{344 \left[\frac{m}{s} \right]}{262 [Hz]} = \frac{344 \left[\frac{m}{s} \right]}{262 [s^{-1}]} = 1.31 [m]$$

4.3. La luz

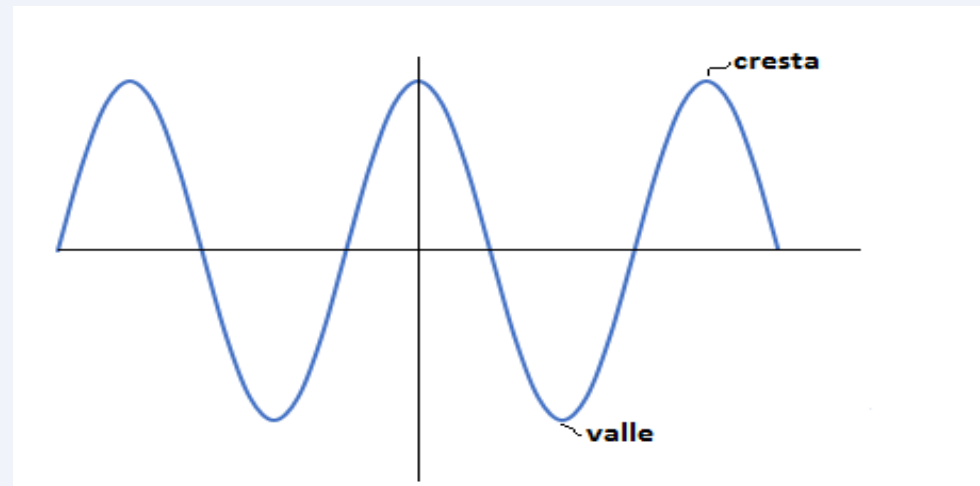
La luz.

La luz es una onda electromagnética que no requiere medio material para su propagación (la luz del Sol llega a la Tierra después de recorrer una gran distancia en el vacío).

4.4 Concepto de amplitud, longitud de onda, frecuencia, frecuencia angular y rapidez de propagación.

Cuando se tiene una cuerda y se agita de manera continua se observan las ondas que se mueven a lo largo de la cuerda con velocidad constante.

La onda resultante se puede describir como una serie de crestas y valles como se muestra en la siguiente figura.



4.4 Concepto de amplitud, longitud de onda, frecuencia, frecuencia angular y rapidez de propagación.

Las características de una onda son las siguientes:

- **Cresta.** Es el punto más alto de la onda.
- **Valle.** Es el punto más bajo de la onda. Si las crestas y valles se repiten constantemente se define la onda como onda armónica.
- **Amplitud (A).** Es la medida de la línea de referencia a la cresta. La amplitud pico a pico es la medida que hay del punto más alto, al punto más bajo de la onda. Se cumple que la amplitud pico a pico es dos veces la amplitud $A_{pp} = 2A$.
- Un ciclo es una oscilación completa, es decir, es la unión del semiciclo positivo más el semiciclo negativo.

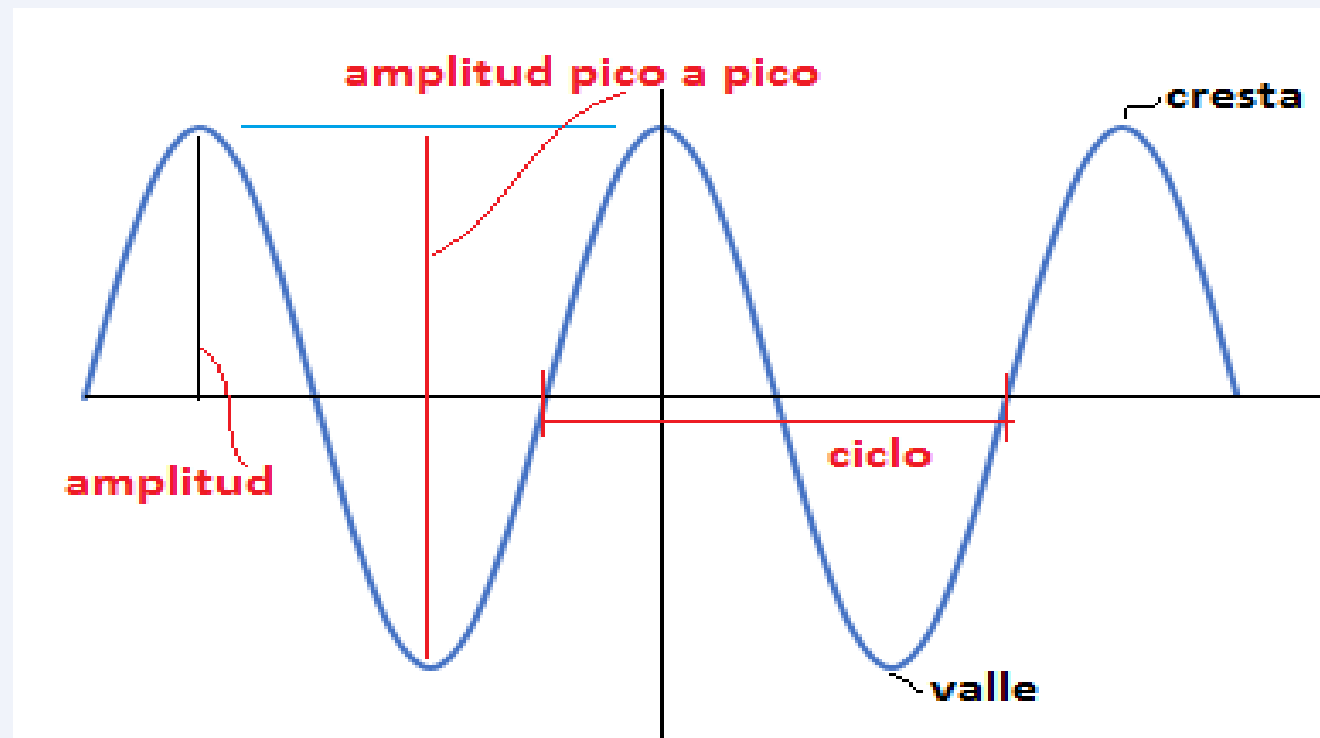
4.4 Concepto de amplitud, longitud de onda, frecuencia, frecuencia angular y rapidez de propagación.

- **Longitud de onda (λ [m])** es la distancia entre dos crestas o dos valles consecutivos.
- **Periodo (T [s])** es el tiempo transcurrido en completar un ciclo.
- **Frecuencia (f [Hz])** o también (f [s^{-1}]) es el número de veces que se repite un ciclo en un segundo, se mide en (Hz) y su inversa es el periodo ($f=1/T$).
- **La frecuencia angular, ω** representa la rapidez de cambio y es 2π veces la frecuencia.

$$\omega \left[\frac{rad}{s} \right] = 2\pi \left[\frac{rad}{ciclo} \right] f \left[\frac{ciclos}{s} \right]$$

4.4 Concepto de amplitud, longitud de onda, frecuencia, frecuencia angular y rapidez de propagación.

La rapidez de propagación es la magnitud de la velocidad con la que se propaga la onda. V [m/s].



4.5 Función de onda.

La función de onda es una función que permite describir para cualquier instante la forma de la onda que se propaga a través de una cuerda.

Recordando que una onda estacionaria se obtiene de la interferencia de dos ondas que viajan en sentidos contrario y que al sumarse punto a punto se tendrán ciertos puntos con amplitud mínima o nula denominados nodos que dependen de la forma característica o modo de vibración de la cuerda.

Dicho de otra manera, se denomina modo de vibración de una cuerda a las diversas formas en que ella puede vibrar, generando ondas estacionarias.

4.5 Función de onda.

Si una onda incidente $y_i = A \text{sen}(k \cdot x - w \cdot t)$ se produce sobre una cuerda con un extremo fijo, ésta se refleja con igual amplitud, frecuencia y longitud de onda, pero en sentido contrario $y_r = A \text{sen}(k \cdot x + w \cdot t)$ por lo tanto se genera una onda estacionaria cuya resultante es:

$$y = y_i + y_r = 2A \text{sen}(k \cdot x) \cos(w \cdot t)$$

Los nodos que tienen una amplitud nula se obtienen de:

$$\text{sen}(k \cdot x) = \text{sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right) = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot x = n \cdot \pi$$

Por lo tanto: $x = n \cdot \frac{\lambda}{2}$

4.5 Función de onda.

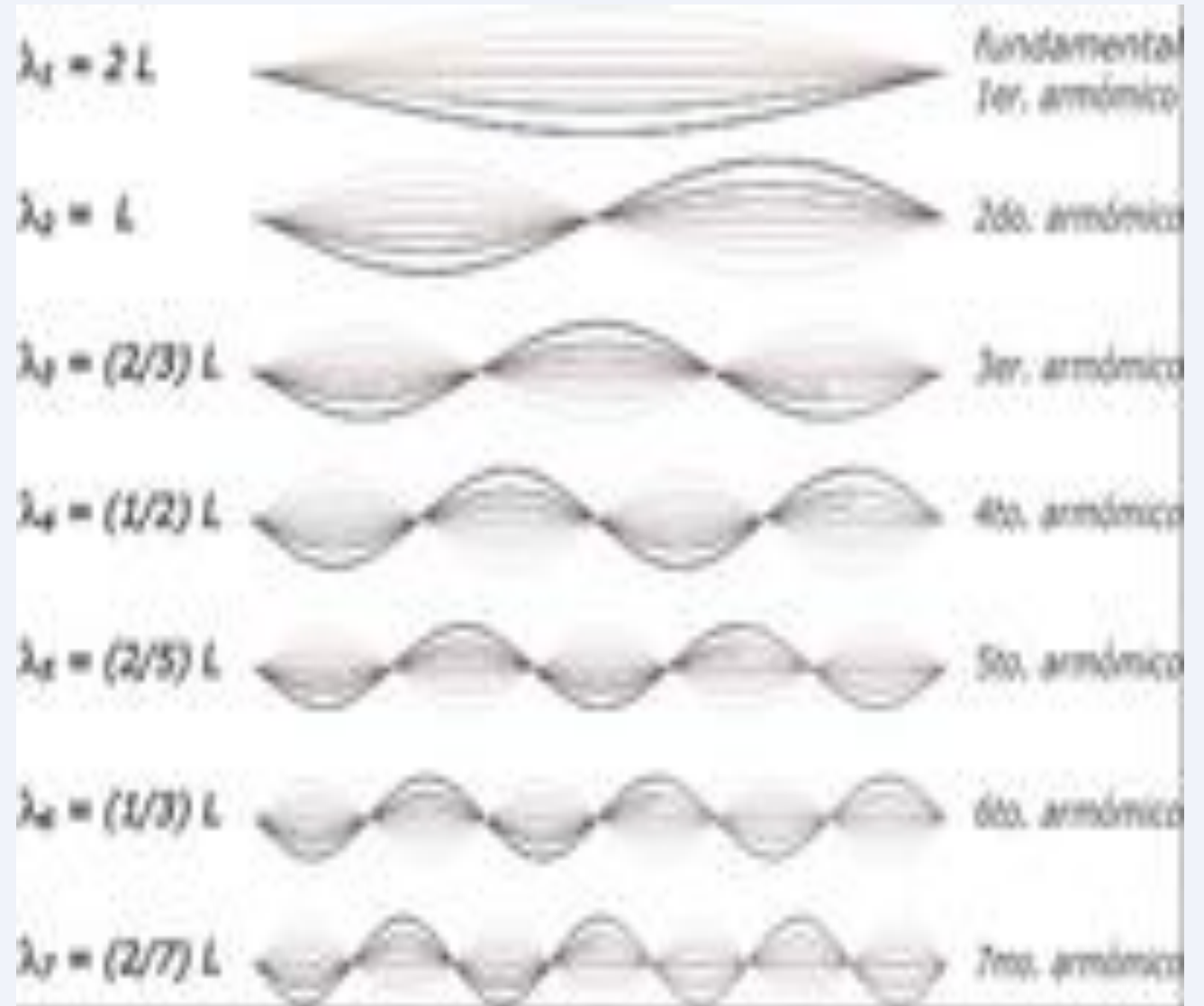
Esto significa que las ondas estacionarias que se generan en una cuerda fija por ambos extremos de longitud L no pueden tener cualquier valor de longitud de onda sino sólo aquellos que satisfagan la siguiente expresión, donde x es la longitud de la cuerda L y λ es la longitud de la onda:

$$\lambda = \frac{2L}{n} \rightarrow n = 1, 2, 3, \dots$$

Es decir, si se tiene una cuerda de longitud L fija en los extremos. La cuerda tiene un conjunto de modos normales de vibración, cada uno con una frecuencia característica. Las frecuencias se pueden calcular fácilmente. El primer modo de vibración será aquél en el que la longitud de la cuerda sea igual a media longitud de onda $\lambda = 2L$. Para el segundo modo de vibración, la longitud de la cuerda será igual a una longitud de onda, $\lambda = L$. Para el tercer modo, $\lambda = (2/3)L$, y así sucesivamente.

4.5 Función de onda.

- Modos de vibración de una cuerda. Imagen tomada de: [http://musiki.org.ar/Modos de vibraci%C3%B3n](http://musiki.org.ar/Modos%20de%20vibraci%C3%B3n)



4.5 Función de onda.

Las frecuencias correspondientes de vibración, que se denominan frecuencias características de vibración, se pueden determinar de la expresión que permite determinar la velocidad de una onda, es decir,

$$v = \lambda \cdot f$$

Sustituyendo la expresión que define el modo de vibración de las ondas estacionarias, tenemos:

$$v = f \cdot \frac{2L}{n}$$

Y despejando la frecuencia, se obtiene:

$$f = \frac{n \cdot v}{2 \cdot L} \rightarrow n = 1, 2, 3 \dots$$

4.5 Función de onda

Cuando la onda se propaga sobre una cuerda con masa m y longitud L y dicha cuerda se mantiene en una tensión constante F por medio de una masa suspendida, la velocidad de la onda se puede determinar por medio de la siguiente expresión:

Al cociente de la masa de la cuerda entre su longitud se le denomina densidad lineal de la cuerda y se representa por la letra μ , entonces:

$$v = \sqrt{\frac{F}{m/L}}$$

$$v \left[\frac{m}{s} \right] = \sqrt{\frac{F [N]}{\mu \left[\frac{kg}{m} \right]}}$$

4.5 Función de onda. Ejemplo

En un extremo de una cuerda horizontal larga se genera una onda sinusoidal transversal por medio de una barra que mueve al extremo de arriba a abajo en una distancia de 1.30 [cm]. El movimiento es continuo y se repite regularmente 125 veces por segundo, si la cuerda tiene una densidad lineal de 0.251 [kg/m] y se mantiene sometida a una tensión de 96 [N], determine:

- a) la amplitud
- b) la frecuencia
- c) la velocidad
- d) la longitud de onda del movimiento de la onda.

4.5 Función de onda. Resolución.

a) La amplitud.

Al moverse la barra un total de 1.30 cm, el extremo de la cuerda se mueve $(1/2) * (1.30 \text{ [cm]}) = 0.65 \text{ [cm]}$ fuera de su posición de equilibrio, primero sobre ella, luego bajo ella; por lo tanto, la amplitud será $A = 0.65 \text{ [cm]}$.

b) La frecuencia de la onda

$$f = \frac{125 \text{ [ciclos]}}{1 \text{ [s]}} = 125 \left[\frac{\text{ciclos}}{\text{s}} \right] = 125 \text{ [Hz]}$$

c) La rapidez de la onda

$$v = \sqrt{\frac{F \text{ [N]}}{\mu \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}} \right]}} = \sqrt{\frac{96 \text{ [N]}}{0.251 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}} \right]}} = 19.6 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

d) La longitud de la onda está dada por $\lambda = v/f$ de modo que

$$\lambda = \frac{19.6 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]}{125 \text{ [Hz]}} = 0.156 \text{ [m]} = 15.6 \text{ [cm]}$$

4.6 Registro, tabulación y representación gráfica de la longitud de onda en función de la frecuencia, su modelo matemático e interpretación física de la pendiente de la recta obtenida.

Como ya se mencionó en las ondas estacionarias existen ciertos puntos a lo largo de la cuerda, llamados nodos, en los cuales el desplazamiento es nulo en todo momento. Estos se pueden observar en una cuerda tensa inextensible, de masa de valor pequeño y constante en toda su longitud de tal manera que la rapidez de propagación de las ondas sea constante para todos los modos de vibración. Estos modos de vibración se logran variando la frecuencia del impulsor de ondas.

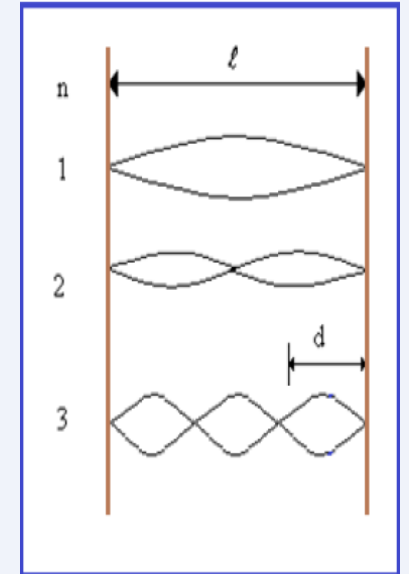
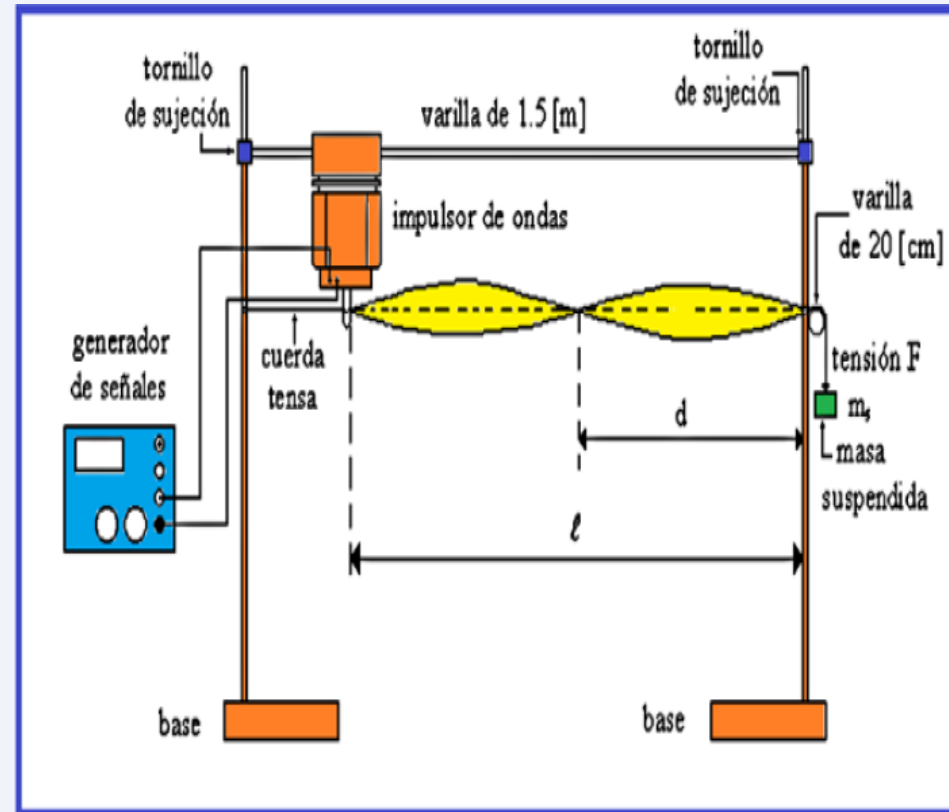
4.6 Registro, tabulación y representación gráfica de la longitud de onda en función de la frecuencia, su modelo matemático e interpretación física de la pendiente de la recta obtenida.

En esta práctica para cada valor de frecuencia se mide la longitud de onda y se construye un modelo gráfico; al realizar el cambio de variable adecuado se puede obtener una distribución de los puntos experimentales de forma muy aproximada a una recta y por lo tanto se puede obtener su modelo matemático por el método de mínimos cuadrados que relaciona la longitud de onda en función del periodo; se observa que la pendiente representa a la rapidez de propagación de la onda.

4.6 Registro, tabulación y representación gráfica de la longitud de onda en función de la frecuencia, su modelo matemático e interpretación física de la pendiente de la recta obtenida.

El dispositivo experimental es el siguiente:

- Es necesario aumentar la frecuencia del generador de señales de tal manera que el impulsor genere en la cuerda los modos de vibración que se muestran en la figura:



4.6 Registro, tabulación y representación gráfica de la longitud de onda en función de la frecuencia, su modelo matemático e interpretación física de la pendiente de la recta obtenida.

Registrar los valores en la siguiente tabla y completarla.

Modo de vibración (n)	f [Hz]	d=L/n [m]	λ [m]	τ [s]
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

4.6 Registro, tabulación y representación gráfica de la longitud de onda en función de la frecuencia, su modelo matemático e interpretación física de la pendiente de la recta obtenida.

Obtener el modelo gráfico y el modelo matemático de la longitud de onda en función de la frecuencia: $\lambda = f(\mathbf{f})$

Si el modelo gráfico no es lineal realizar el cambio de variable correspondiente para obtener el modelo matemático lineal.

El modelo matemático lineal permite determinar el significado físico de la pendiente de la recta obtenida.

Referencias.

- Cuaderno de ejercicios de Física Experimental
<http://dcb.ingenieria.unam.mx/wp-content/themes/tempera/CoordinacionesAcademicas/FQ/Documents/Series/CUADERNO-EJERCICIOS-FE.pdf>
- Física Conceptos y aplicaciones.
Tippens.
McGraw Hill. 2008
- Física Vol. 1
Resnick, Halliday, Krane. 2001

Fuentes electrónicas

- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Waves/standw.html>
- <https://www.fisic.ch/contenidos/ondas-y-sonido/ondas-estacionarias/>
- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/wavrel.html#c1>
- <https://www.fisicalab.com/apartado/que-son-las-ondas#contenidos>
- <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/estacionarias/estacionarias.html>