



Física  
Guía de Materia  
**ONDAS Y SONIDO**  
MÓDULO COMÚN  
I MEDIO



NICOLÁS MELGAREJO, VERÓNICA SALDAÑA  
*Licenciados en Ciencias Exactas, U. de Chile*  
*Estudiantes de Licenciatura en Educación, U. de Chile*

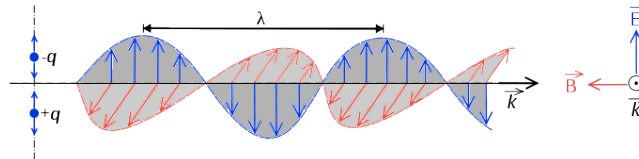
# 1. Onda

Es una perturbación que viaja a través de un medio elástico, ya sea sólido, líquido, gaseoso o en algunos casos a través del vacío. Transportan energía sin que exista desplazamiento de materia. Se Pueden clasificarse según varios criterios.

## 1.1. Clasificación de las ondas

### 1. Según el medio de propagación

- a) **Ondas mecánicas:** Son aquellas que necesitan de un medio elástico, material, que vibre. Se generan por perturbaciones mecánicas, como golpes. Un ejemplo son las ondas de sonido.
- b) **Ondas electromagnéticas:** Ondas que se propagan en el vacío, ya que no necesitan de un medio material para hacerlo. Son generadas por la oscilación del campo eléctrico y magnético, los que son inseparables. El campo eléctrico y magnético oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda, a su vez, los campos magnético y eléctrico son perpendiculares entre sí.



Otra característica general de las ondas electromagnéticas es la velocidad de propagación, que en el vacío alcanza un valor de  $300.000 \left[ \frac{km}{s} \right]$ , velocidad con la cual seríamos capaces de dar una vuelta a la Tierra en 20 milisegundos. Ejemplo de éstas son la luz y las ondas de radio.

### Desafío...



Lanza al agua inmóvil una piedra y se forman círculos concéntricos. ¿Qué forma tendrán las ondas, si la piedra se lanza cuando el agua fluya uniformemente? [Respuesta](#)

### 2. Según la periodicidad de la fuente que origina la onda

- a) **Ondas periódicas:** La perturbación que las origina se produce periódicamente, repitiéndose la misma onda en el tiempo.
- b) **Ondas no periódicas:** También llamadas pulsos, son ondas que no se repiten de la misma forma en el tiempo, debido a que la perturbación que las origina se da de forma aislada.

### 3. Según el sentido de propagación

- a) **Ondas estacionarias:** Se origina de la superposición de dos ondas, la incidente y la reflejada, que poseen la misma frecuencia, amplitud y dirección, pero con sentidos opuestos de propagación. Las ondas estacionarias se encuentran en medios limitados como un tubo lleno de aire, una cubeta de agua o una cuerda. En los límites del medio de propagación de la oscilación se produce la reflexión de la onda incidente, las que interfieren generando una nueva onda, la cual se denomina estacionaria debido a que posee puntos que están inmóviles o estacionarios los cuales son llamados nodos.

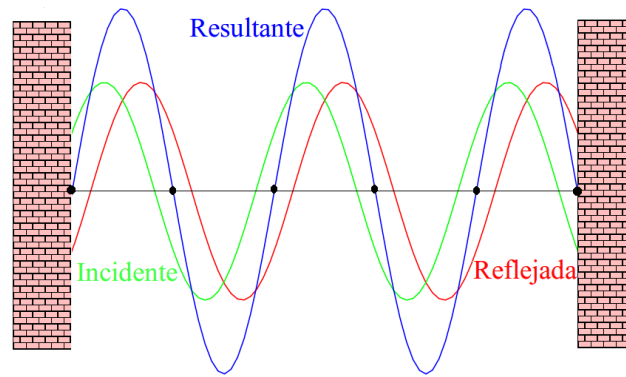
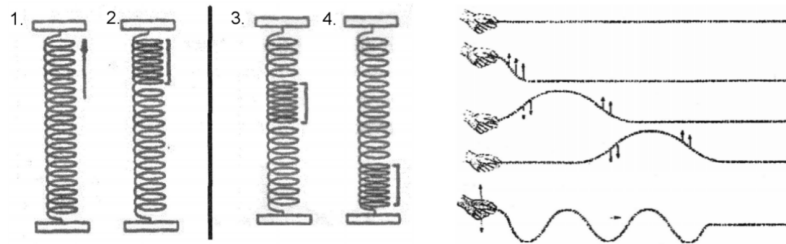


Figura 1: Una onda estacionaria es la resultante de la superposición de dos ondas con la misma frecuencia, amplitud y dirección, pero con sentidos de propagación opuestos.

- **Nodos:** Se llama nodo a todos los puntos de una *onda estacionaria* en donde la elongación es nula, y por lo tanto la energía es mínima. La distancia entre dos nodos consecutivos es siempre  $\frac{\lambda}{2}$ .
  - **Antinodos:** Puntos de una onda estacionaria en donde la elongación es máxima, por lo tanto, la energía es también lo es. Están a media distancia entre dos nodos.
- b) **Ondas viajeras:** Son aquellas que se propagan desde una fuente en un sentido único, disminuyendo su amplitud a medida que pasa el tiempo.

#### 4. Según la dirección de movimiento de las partículas

- a) **Ondas transversales:** Son aquellas en donde las partículas del medio vibran perpendicularmente al movimiento de propagación de la onda. Por ejemplo las ondas en el agua y las ondas electromagnéticas como la luz.
- b) **Ondas longitudinales:** Son aquellas en donde las partículas del medio vibran en la misma dirección de la onda, por ejemplo el sonido y las ondas sísmicas.



#### Desafío...



En una palabra, ¿qué es lo que se mueve de la fuente al receptor en el movimiento ondulatorio? [Respuesta](#)

#### 5. Según su número de dimensiones

- a) **Ondas unidimensionales:** Se propagan a lo largo de una sola dirección del espacio. Una cuerda vibrando es un ejemplo de esto.

- b) **Ondas bidimensionales:** Se propagan en dos direcciones, esto es sobre un plano, por lo que se les conoce también como ondas superficiales. Un ejemplo son las ondas producidas en el agua al lanzar una piedra.
- c) **Ondas tridimensionales:** Se propagan en tres direcciones, la mayoría de las veces en forma de esferas. El sonido y las ondas electromagnéticas son ejemplo de esto.

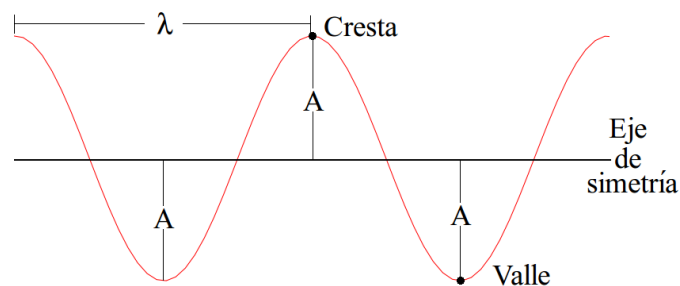
## 1.2. Características del movimiento ondulatorio

### 1.2.1. Cresta

Punto que ocupa la posición más alta en una onda.

### 1.2.2. Valle

Punto que ocupa la posición más baja en una onda.



### 1.2.3. Amplitud

Distancia medida desde el eje de simetría a la *cresta* o *valle*. En el caso de una onda mecánica es la elongación máxima que alcanza una partícula en medio de una vibración y es proporcional a la energía transmitida por la onda. La denotaremos con la letra  $A$  y su unidad de medida en el S.I. es el metro.

### 1.2.4. Período

Tiempo necesario para completar una oscilación. Lo denotaremos con la letra  $T$  y su unidad de medida en el S.I. es el segundo.

### 1.2.5. Frecuencia

Número de oscilaciones que realiza una onda por segundo. Su unidad de medida en el S.I. es el *Hertz* [ $Hz$ ], que es equivalente a [ $s^{-1}$ ]. Podemos calcular la frecuencia  $f$  como sigue:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Notar que entre más grande sea el período  $T$ , más pequeño será la frecuencia  $f$  y si el período es muy pequeño, entonces la frecuencia es muy grande. Esto quiere decir que  $f$  y  $T$  son inversamente proporcionales.

### 1.2.6. Longitud de onda

Distancia existente entre valle y valle o de cresta a cresta de una onda, también podemos definirla como la distancia que recorre una onda en un período. La denotaremos con la letra griega *lambda*  $\lambda$  y su unidad de medida en el S.I. es el metro.

### 1.2.7. Velocidad de propagación de una onda

Como  $\lambda$ , longitud de onda, es la distancia entre cresta y cresta, y  $T$ , período, es el tiempo que tarda en hacer una oscilación completa, entonces la rapidez de una onda se puede expresar de la siguiente manera:

$$v = \frac{\lambda}{T}, \quad \text{como } f = \frac{1}{T}$$

entonces

$$v = \lambda \cdot f \quad (2)$$

Dimensionalmente  $\lambda$  es  $[L]$  y  $f$  es  $[1/T]$ , lo que implica que  $v = [L/T]$ , por lo tanto,  $v$  está correcto en sus unidades de medida.

## 2. Velocidad de propagación del sonido

Depende del medio en el cual se propaga el sonido, destacando dos factores: la *densidad* y *temperatura* del medio, por lo que cualquier variación de estos factores altera la velocidad de propagación.

A continuación se muestran algunas velocidades del sonido en distintos medios y temperaturas:

Medio	Temperatura [ $^{\circ}C$ ]	Velocidad [ $m/s$ ]
Aire	0	331
Aire	15	340
Agua	25	1.493
Madera	20	3.900
Acero	15	5.100

### Desafío...



¿Cómo explicas que un sonido se transmita más rápidamente en un sólido que en un líquido o un gas? [Respuesta](#)

**La velocidad de propagación es independiente de la frecuencia y la amplitud**, por lo tanto, en un medio homogéneo con temperatura constante la velocidad de propagación es constante. Notar además en la tabla, que la velocidad de propagación del sonido es mayor en los medios más densos como los sólidos, así es más rápida en el acero que en el aire. Podemos concluir que **a mayor densidad del medio, mayor es la velocidad de propagación del sonido en ese medio**.

A mayor temperatura del medio, mayor rapidez en la transmisión del sonido. En el caso del aire a partir de los  $15^{\circ}C$ , por cada grado que aumenta la temperatura, la velocidad del sonido aumenta en  $0,6 \left[ \frac{m}{s} \right]$ , matemáticamente la relación existente entre la rapidez del sonido  $v$  y la temperatura del aire  $T_C$  en grados Celsius es:

$$v = (331 + 0,6 \cdot T_C) \left[ \frac{m}{s} \right]$$

### Desafío...



¿Es correcto afirmar que en todos los casos, sin excepción, una onda de radio se propaga más rápidamente que una onda sonora? [Respuesta](#)

## 3. Aplicaciones del sonido

### 3.1. Ultrasonido

El ultrasonido es aplicado en la ingeniería para la medición de distancias, caracterización interna de materiales, etc. En medicina el ultrasonido está presente en ecografías, fisioterapia, entre otros. Las ecografías se usan para obtener imágenes bidimensionales y tridimensionales del interior del cuerpo, con la ventaja de no usar radiación, como es el caso de los *Rayos X*. Actualmente se usa para el estudio de líquidos, que en presencia de ultrasonido forman cavidades (*fusión fría*).

### 3.2. Infrasonido

La principal aplicación de las ondas de infrasonido es la detección de objetos, esto debido al bajo nivel de absorción que sufren en el medio. El inconveniente es que puede ser usada, por ejemplo, en el aire para detectar objetos de más de 20[m] y en el agua, objetos de más de 100[m].

### 3.3. Efecto Doppler

Al pasar una ambulancia cerca de una persona, el sonido de la sirena que ésta escucha, va variando a medida que la ambulancia se acerca y aleja de ella. Mientras se viene aproximando, el tono parece aumentar, es decir, su frecuencia crece volviéndose más agudo y cuando se aleja su frecuencia decrece, tornándose más grave. Este fenómeno tan cotidiano se conoce como *efecto Doppler*, en honor a Christian Doppler.

### Desafío...



Cuando una fuente sonora se mueve hacia ti, ¿percibes un aumento o disminución de la rapidez de la onda? [Respuesta](#)

Veámoslo en detalle: cuando la ambulancia viaja con una velocidad considerable, ésta tiende a alcanzar a las ondas de sonido que emite delante de ella y a distanciarse de las que propaga detrás. El resultado de esto es que para un receptor estático las ondas se comprimen delante y se expanden detrás. Por lo tanto, cuando la ambulancia se acerca al observador llegan más ondas por segundo a él (mayor frecuencia) y al alejarse llegan menos ondas por segundo (menos frecuencia), lo que se traduce en una variación del tono. Sintetizando, **el efecto Doppler establece que cuando la distancia relativa entre la fuente sonora y el observador varía, la frecuencia del sonido percibida por éste cambia, es distinta de la frecuencia del sonido emitida por la fuente.**

### Desafío...



- 1) ¿Por qué hay un efecto Doppler cuando la fuente sonora es estacionaria y el observador se acerca o aleja del emisor? ¿En qué dirección debe moverse el observador para escuchar una frecuencia mayor? ¿Para escuchar un sonido grave? [Respuesta](#)
- 2) Una auto de policía toca su sirena mientras persigue a un ladrón que corre alrededor de una plaza circular. Justo en el centro de la plaza se encuentra una abuelita tomando helado. ¿En esta situación, ella percibe el efecto Doppler? [Respuesta](#)

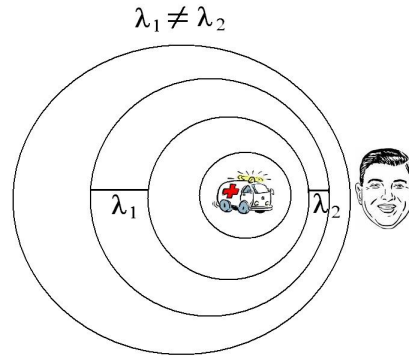


Figura 2: La variación de la longitud de onda se traduce en una variación del tono que percibe el observador.

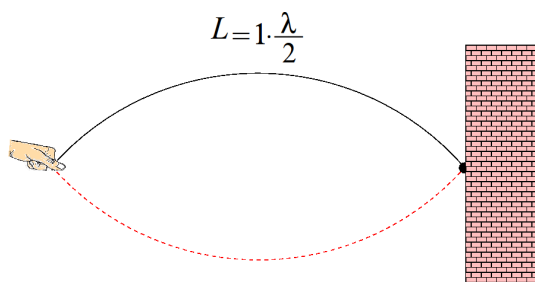
### 3.4. Resonancia

Es posible decir que cada objeto tiene una vibración particular, una *frecuencia natural*. Si un cuerpo induce una vibración cualquiera sobre otro lo denominaremos *frecuencia forzada*. Ahora bien, si aquella frecuencia forzada es igual a la *frecuencia natural*, se produce un aumento de forma progresiva de la amplitud de la vibración del objeto, lo que se denomina *resonancia*. Así es posible romper copas de cristal con sólo dar una nota apropiada continuamente o que un puente se derrumbe con una pequeña ventolera (Puente Tacoma, 1.940). Otras aplicaciones de la *resonancia* se encuentran frecuentemente en la música, como es el caso de las *cajas de resonancia* que amplifican la intensidad del sonido, sin modificar la frecuencia.

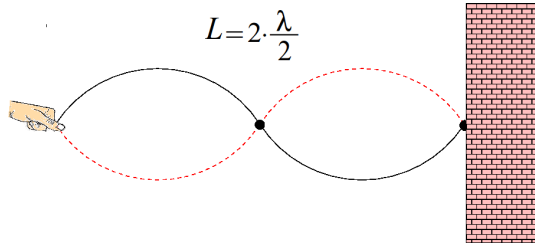
### 3.5. Cuerda vibrante

Tomemos el ejemplo de una cuerda de largo fijo  $L$ , sujeta a un muro y algún dispositivo en la otra punta que la haga vibrar. Las ondas generadas son *reflejadas* al chocar con los extremos, produciéndose *ondas estacionarias* con dos *nodos* obligados en los extremos y cualquier número de nodos entre ellos.

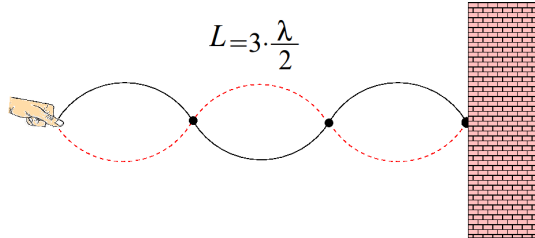
Como la distancia consecutiva entre dos nodos es  $\frac{\lambda}{2}$ , la longitud fija  $L$  de la cuerda puede expresarse según la cantidad de *medias longitudes de onda*  $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$  que se formen entre los nodos obligatorios.



Por ejemplo, si se hace vibrar la cuerda de tal manera de formar sólo una cresta o valle entre los dos nodos obligatorios, tendremos sólo 1 media longitud de onda.



Si se aumenta la frecuencia a tal punto que se genere un nodo entre los dos obligatorios, se tendrán 2 medias longitudes de onda como se muestra en la figura.



Si se aumenta aún más la frecuencia de oscilación a tal punto que se formen dos nodos entre los dos obligatorios, se tendrán 3 medias longitudes de onda como se muestra a continuación.

El valor de la longitud de onda  $\lambda$  varía respecto de la cantidad de nodos que se formen y la única cantidad fija es el largo  $L$  de la cuerda en vibración.

Notar además que el número total de nodos, es siempre una unidad mayor que el número de *medias longitudes de onda*  $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$  que denotaremos por  $n$ . Es decir, si se tienen en total 2 nodos entonces  $L = 1 \cdot \frac{\lambda}{2}$ , si hay 3 nodos tendremos que  $L = 2 \cdot \frac{\lambda}{2}$  y si hay 4 nodos  $L = 3 \cdot \frac{\lambda}{2}$ . Esta relación que existe entre el largo  $L$ , el número total de nodos y la cantidad de *medias longitudes de onda*,  $n$ , se puede generalizar en lo siguiente:

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

Como se dijo anteriormente, el largo de la cuerda  $L$  es fijo y es el valor de la longitud de onda  $\lambda$  el que cambia. Despejando  $\lambda$

$$\lambda = 2 \cdot \frac{L}{n} \quad (4)$$

Como  $f = \frac{v}{\lambda}$  las frecuencia de una onda cuerda vibrante pueden ser escrita como:

$$f = \frac{n}{2L} \cdot v \quad (5)$$

Por lo tanto la frecuencia depende del número de nodos que tenga la cuerda, a cada una de estas frecuencias se les denomina *frecuencias naturales*. Por otro lado, la velocidad de propagación está determinado por la siguiente relación:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (6)$$

donde  $T$  es la tensión de la cuerda<sup>1</sup> y  $\mu$  es la densidad lineal de la cuerda, esto es la masa de la cuerda dividida por el largo. Reemplazando (6) en (5):

<sup>1</sup>No debe confundir en la ecuación (7) la  $T$  de tensión con la  $T$  de período.



$$f = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (7)$$

Cuando  $n = 1$  se tiene la frecuencia más baja, denominada *frecuencia fundamental*; para  $n > 1$  las frecuencias se denominan *armónicos*, los cuales son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Cada armónico está asociado a una manera de vibración particular de la cuerda, denominada *modo*, el primero de ellos, llamado *modo fundamental de vibración*, se obtiene cuando  $n = 1$ , para  $n = 2$  se encuentra el *segundo modo de vibración* y su frecuencia asociada se denomina *segundo armónico* y así sucesivamente.

Si se hace vibrar una cuerda con su *frecuencia fundamental*, se produce un efecto llamado *resonancia* caracterizado por el logro de amplitudes relativamente grandes.

Si se hace vibrar una cuerda con una frecuencia distinta a la de cualquier armónico, entonces se generan *ondas forzadas* con una amplitud muy pequeña.

Si se detiene la emisión de ondas en una cuerda, entonces las oscilaciones se amortiguan de forma gradual, debido a la disipación de energía en los extremos y al roce con el aire.

### Ejemplo

Una cuerda de densidad lineal  $\mu = 2 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{kg}{m} \right]$  está sometida a una tensión de  $45[N]$  y fija en ambos extremos. Una de las frecuencias de resonancia es  $375[Hz]$  y la siguiente más alta es de  $450[Hz]$ . Determine cuales son esos modos de resonancia y el largo de la cuerda.

**Solución:** Primero determinaremos cuál es el largo de la cuerda usando la ecuación (7) para cada frecuencia. Notar que las frecuencias naturales que nos dan son consecutivas, esto quiere decir que los modos de vibración,  $n$ , de cada frecuencia son consecutivos. Llamemos  $f_1 = 375[Hz]$  y  $f_2 = 450[Hz]$

$$f_1 = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Por otro lado:

$$f_2 = \frac{n+1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

La diferencia entre ellas es:

$$\begin{aligned} f_2 - f_1 &= \frac{n+1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} - \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \\ &= (n+1) \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} - n \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \\ &= \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \end{aligned}$$

Reemplazando los valores dados:

$$450[Hz] - 375[Hz] = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{45 \left[ kg \cdot \frac{m}{s^2} \right]}{2 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{kg}{m} \right]}}$$

$$75[s^{-1}] = \frac{1}{2L} \cdot 150 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

$$75 = \frac{1}{L} \cdot 75[m]$$

$$1 \left[ \frac{1}{m} \right] = \frac{1}{L}$$

$$L = 1[m]$$

Por lo tanto, el largo de la cuerda es  $L = 1[m]$ . Los modos de vibración  $n$  los encontramos reemplazando  $L$  en la ecuación (7):

$$f_1 = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

$$375 = \frac{n}{2} 150$$

$$5 = n$$

Luego  $f_1 = 375[Hz]$  corresponde al quinto modo de vibración. Como según el enunciado  $f_2 = 450[Hz]$  es el armónico siguiente, entonces  $f_2$  corresponde al sexto modo de vibración.

### Desafío...



Imagina que haces vibrar una cuerda con un extremo fijo a un muro, formando una onda estacionaria de tres segmentos (o medias longitudes de onda). Si entonces agitas la mano con el doble de frecuencia. ¿Qué modo fundamental obtendrás? ¿Cuántas longitudes de onda se forman en la cuerda? [Respuesta](#)

## Desafíos resueltos

- ✓ Desafío I: Si se lanza una piedra a un flujo de agua uniforme las ondas que se generen no se deformarán, es decir, seguirán teniendo la forma de círculos concéntricos tal cual se generan al tirar la piedra en agua inmóvil. Lo anterior se debe a que una onda transporta energía, pero no materia. [Volver](#)
- ✓ Desafío II: Energía. [Volver](#)
- ✓ Desafío III: Sabemos que las ondas sonoras son perturbaciones mecánicas, es decir, que necesitan de un medio material que vibre para propagarse. En el estado sólido las moléculas se encuentran muy juntas, unidas por fuerzas electromagnéticas bastante grandes que les impide desplazarse, por otro lado, en el estado líquido las moléculas están más alejadas entre sí que en el sólido, la fuerza de

cohesión entre ellas es más débil y el movimiento de vibración se hace con más libertad, permitiendo su traslación. En el estado gaseoso la separación entre las moléculas es mucho mayor que en los otros estados, siendo la fuerza de cohesión prácticamente nula, por lo que las partículas se mueven en todas direcciones.

De acuerdo a lo anterior, es en el estado sólido en donde las moléculas se encuentran más juntas, por lo tanto, la energía de vibración de la primera partícula va a demorar menos tiempo en transmitirse a la segunda, de ahí a la tercera, etcétera; dado que están extremadamente próximas. En líquidos y gases la transmisión de la energía de una partícula a otra es un proceso más lento, ya que existe una mayor distancia entre moléculas. [Volver](#)

- ✓ Desafío IV: Efectivamente, una onda de radio siempre se propagará con mayor rapidez que una onda sonora. Las ondas de radio son ondas luminosas, corresponden a un tipo de onda electromagnética, por lo tanto, se propagan a la rapidez de la luz,  $300.000 \left[ \frac{km}{s} \right]$ , la rapidez límite conocida. [Volver](#)
- ✓ Desafío V: Al aproximarse una fuente sonora hacia ti la rapidez de la onda no varía, ya que el medio de propagación sigue siendo el mismo. Es cierto que cuando un sonido se mueve hacia ti varía su frecuencia, ésta aumenta haciendo disminuir su longitud de onda, pero dichas variaciones se producen de manera proporcional, por lo tanto, la rapidez de propagación se mantiene constante. [Volver](#)
- ✓ Desafío VI.I: El efecto Doppler se produce siempre que la distancia relativa entre la fuente sonora y el observador varíe. Cuando la fuente sonora se encuentra fija y el observador es el que se aleja o acerca de ésta, evidentemente que la distancia relativa entre el emisor y el receptor del sonido cambia, por lo tanto, el observador puede percibir las consecuencias del efecto Doppler.

Para que el observador pueda escuchar un sonido de mayor frecuencia que el que originalmente emite la fuente sonora, debe acercarse de ésta.

Los sonidos graves corresponden a ondas con baja frecuencia, por lo tanto, para percibirlos el observador deberá alejarse de la fuente sonora. [Volver](#)

- ✓ Desafío VI.II: La abuelita se encuentra justo a centro de la circunferencia que el auto de policía sigue como trayectoria, es decir, la distancia entre ella y la patrulla es siempre igual al radio de esta circunferencia. Al no existir una variación de la distancia relativa entre la fuente sonora, el móvil de la policía, y el observador, la abuelita, ésta última no percibe el efecto Doppler. [Volver](#)
- ✓ Desafío VII: Sabemos que el número de medias longitudes de onda es  $n = 3$ , por lo tanto, la frecuencia de oscilación está dada por:

$$f = \frac{n}{2L} \cdot v = 3 \cdot \frac{v}{2L}$$

donde  $L$  es el largo de la cuerda y  $v$  la velocidad de propagación de la onda en la cuerda. Si la frecuencia de la perturbación aumenta al doble, entonces:

$$2f = 2 \cdot 3 \frac{v}{2L} = 6 \cdot \frac{v}{2L}$$

Vemos que el número de medias longitudes de onda se incrementa a  $n = 6$ . Sabemos que el número de medias longitudes de la onda estacionaria coincide con el modo fundamental, por lo tanto, el modo fundamental obtenido es el sexto. Si hay 6 medias longitudes de onda, eso implica que hay 3 longitudes de onda que se forman en la cuerda. [Volver](#)

## Bibliografía

- [1 ] FÍSICA 1° EDUCACIÓN MEDIA, *Cuarta edición*, Santillana (2009)  
*Mario Toro Frederick, Rodrigo Marchant Ramirez, Mauricio Aguilar Baeza.*
- [2 ] FÍSICA TOMOS I, *Tercera edición*, Mc Graw-Hill. México (1992)  
*Raymond A. Serway.*
- [3 ] CIENCIAS PLAN COMÚN, FÍSICA, Chile (2007)  
*Dirección académica CEPECH.*
- [4 ] FÍSICA GENERAL, Tercera edición, Harla. México (1981)  
*Beatriz Alvarenga, Antônio Máximo.*
- [5 ] FÍSICA CONCEPTUAL, *Novena edición*, Pearson Educación. México (2004)  
*Paul Hewitt.*
- [6 ] MANUAL DE ENTRENAMIENTO ACTIVE LEARNING IN OPTICS AND PHOTONICS, (2006)  
*UNESCO.*
- [7 ] INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA, *Séptima edición*, Editorial Kapelusz, Argentina (1958)  
*Alberto Maiztegui, Jorge Sabato.*