CAPÍTULO 7

Ondas periódicas en una dimensión

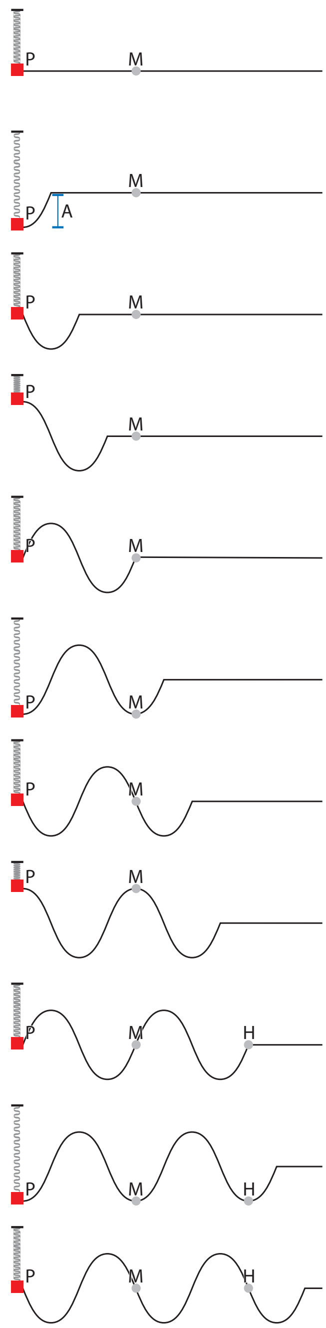

Fig 1. Onda periódica propagándose en una cuerda

Ya hemos visto como un pulso puede transferir energía de un lugar a otro del espacio sin desplazar masa. Ahora analizaremos qué ocurre cuando tenemos un conjunto de pulsos que se repiten periódicamente. En ese caso obtenemos una sucesión de pulsos, un tren de pulsos que se denomina onda periódica.

Onda periódica se denomina al conjunto de pulsos que son emitidos a intervalos iguales de tiempo. Es decir en cada período se provoca una perturbación idéntica a la anterior.

Cuando un punto del medio elástico es separado de su posición de equilibrio, se le realiza un trabajo, cediéndole energía. Ésta se propaga por las interacciones entre las partículas del medio, cada una "empuja" a su vecina. Si esto sucede, decimos que la energía se transfiere por un movimiento ondulatorio.

Pensemos en el siguiente ejemplo: una cuerda tensa y larga, con uno de sus extremos unido a una masa que puede oscilar al estar unida a un resorte (fig 1).

Separamos la masa de su posición de equilibrio una distancia "A" y la liberamos ("A" es la amplitud de la oscilación de la masa unida al resorte). Es natural pensar que el punto "P", que es el punto de la cuerda que está unido a la masa, adquiera el mismo movimiento que el cuerpo. Se moverá verticalmente alejándose de la posición de equilibrio una distancia también "A". Esta distancia la llamaremos amplitud de la onda. (Fig. 2). El mismo razonamiento podemos hacer del punto de la cuerda vecino a "P", y así sucesivamente. Esta transmisión no es instantánea, por ejemplo el punto "M" comenzará a moverse un tiempo después.

Amplitud es la máxima separación de cada punto del medio elástico con respecto a la posición de equilibrio. La representamos con la letra "A". Su unidad en el Sistema Internacional es el metro (m) y está relacionada con la energía que transmite la onda.

La energía que transfiere constantemente la masa al punto "P" comienza a viajar por la cuerda, mientras que cada punto de la misma sólo se mueve hacia arriba y abajo, al igual que la masa. Los pulsos generados viajan hacia la derecha mientras que cada punto de la cuerda oscila en forma vertical. Por lo tanto hemos generado una **onda periódica** transversal que viaja a través de la cuerda.

Es importante destacar que el sistema masa-resorte no crea la energía, algún agente externo que no se menciona en este ejemplo es el encargado de aportarla.

Un tiempo después que comienza a moverse "P", el punto "M", realiza el mismo movimiento que éste. Luego que "M" comienza a oscilar, ambos puntos tienen en todo momento la misma posición y la misma velocidad. Si siguiéramos la secuencia veríamos que sucede lo mismo con el punto "H". Diremos que los puntos que cumplen esta condición están en fase (fig 3).

Dos puntos del medio se encuentran en fase cuando están a la misma distancia de la posición de equilibrio y con la misma velocidad en todo momento.

Longitud de onda

A la distancia entre dos puntos consecutivos en fase la denominamos **longitud de onda** (fig 4). La representamos con la letra lambda del alfabeto grieto "λ". Su unidad en el sistema internacional es el metro "m", como toda distancia.

Longitud de onda es la distancia entre dos puntos consecutivos del medio, que se mueven en fase. Se representa con la letra lambda del alfabeto griego "λ" . Su unidad en el sistema internacional es el metro "m."

Período

En el tiempo que tarda una onda en viajar una distancia "λ", cada punto de la cuerda realiza una oscilación completa. Recuerda que una oscilación completa es cuando un punto del medio que es perturbado, vuelve a estar en la posición inicial y con la misma velocidad que tenía. A este tiempo lo denominaremos período y lo representamos con la letra "T". Su unidad en el sistema internacional es el segundo "s". Todos los puntos de la cuerda se mueven con el mismo período, que es el mismo del agente externo que genera los pulsos.

Período es el tiempo que demora cada punto del medio en realizar una oscilación completa. Lo representamos con la letra "T". Su unidad en el sistema internacional es el segundo "s".

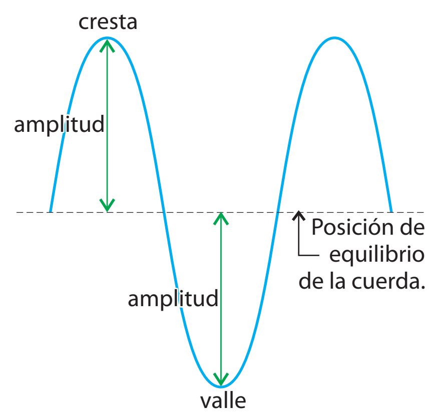

Fig 2. Amplitud de una onda. Llamaremos cresta a la elongaciones hacia arriba y valles a la elongaciones hacia abajo.

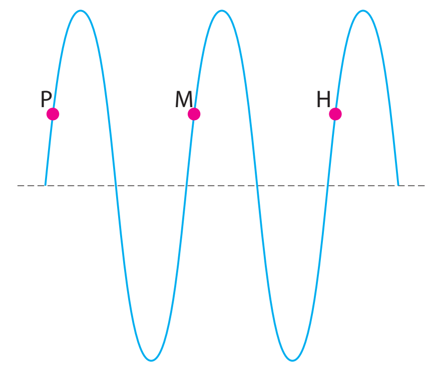

Fig 3. Los puntos "P", "M" y "H" están en fase. Están a la misma distancia de la posición de equilibrio y tienen la misma velocidad en todo momento.

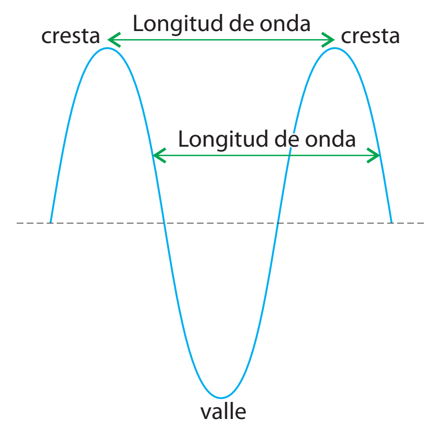

Fig 4. Longitud de onda es la distancia ente dos puntos en fase. También es la distancie entre dos crestas o valles consecutivos

Fig. 5. Heinrich Rudolf Hertz, físico alemán, nació en Hamburgo el 22 de febrero de 1857 y falleció en Bonn el 1 de enero de 1894.
En 1885 en la universidad de Karlsruhe descubrió las ondas electromagnéticas. Fue el primero en demostrar la existencia de la radiación electromagnética construyendo un aparato para producir ondas de radio.
A partir del experimento de Michelson en 1881 probó experimentalmente que las señales eléctricas pueden viajar a través del aire, como había sido predicho por James Maxwell y Michael Faraday.
También descubrió el efecto fotoeléctrico que fue explicado más adelante por Albert Einstein.

Frecuencia

Definiremos la frecuencia como la cantidad de oscilaciones o ciclos que cada punto realiza en una unidad de tiempo.

$$f = \frac{N^\circ \text{de oscilaciones}}{\Delta t}$$

Su unidad en el sistema internacional de medidas, es $\frac{1}{s} = s^{-1}$. A esta unidad se le denominó Hertz, "Hz" en honor al físico alemán. (Fig. 5)

Frecuencia es la cantidad de oscilaciones completas que cada punto del medio realiza por unidad de tiempo. Se representa con la letra "f". Su unidad en el sistema internacional es el Hertz "Hz".

Relación entre el período y la frecuencia

Analicemos ahora la relación que existe entra el período y la frecuencia. Retomemos el concepto de frecuencia, como el número de oscilaciones por unidad de tiempo:

$f = \frac{N^\circ \text{de oscilaciones}}{\Delta t}$ y recordemos que el período es el tiempo que demora cada punto del medio en realizar una oscilación completa.

Por lo tanto, cuando se realiza una "1" oscilación, el tiempo que tarda en producirse es un período "T". Sustituimos en la ecuación de definición de frecuencia y nos queda expresada la siguiente relación:

$$f = \frac{N^\circ \text{de oscilaciones}}{\Delta t} = \frac{1}{T} \Rightarrow f = \frac{1}{T}$$

Veamos otro ejemplo para reforzar la relación funcional entre el período y la frecuencia.

Si un punto demora medio segundo en cumplir un ciclo, podrá completar dos ciclos por segundo. Si demora un cuarto de segundo, podrá completar cuatro. Con este razonamiento se pone en evidencia la relación inversa entre la frecuencia y el período:

$$\boxed{T = \frac{1}{f}} \qquad \boxed{f = \frac{1}{T}}$$

Velocidad de propagación de una onda

La figura 6 muestra un tren de pulsos que se mueven hacia la derecha por una cuerda tensa. En la secuencia aparece una foto instantánea de la forma de la cuerda cada un tiempo $\frac{T}{10}$s. Se destacó con trazo azul un mismo pulso en cada imagen. Se puede observar que se desplaza hacia la derecha. Para medir su velocidad deberíamos saber el desplazamiento del pulso y dividirlo entre el tiempo que tarda en realizarlo. Ya hemos visto que si el medio es homogéneo, la velocidad de propagación es constante, por lo que podemos utilizar una expresión del Movimiento Rectilíneo Uniforme que seguramente ya estudiaste en años anteriores.

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Δx = desplazamiento

Δt = tiempo

Como ya hemos visto, la velocidad se mide en $\frac{m}{s}$ en el S.I.

Si observamos detalladamente la secuencias de imágenes, vemos que mientras el pulso viaja entre dos puntos en fase, todos los puntos de la cuerda cumplen una oscilación completa. La forma de la cuerda en estos dos instantes es la misma. Entonces, cuando el pulso viaja una distancia "λ" transcurre un tiempo "T",

En un ciclo el desplazamiento que tiene la onda es igual a una longitud de onda $\Delta x = \lambda$ y el tiempo que transcurre, es un período $\Delta t = T$.

Sustituyendo en la ecuación de velocidad nos queda expresada la siguiente relación entre la velocidad de propagación, la longitud de onda y el período.

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} \Rightarrow \boxed{v = \frac{\lambda}{T}}$$

La ecuación recién obtenida $v = \frac{\lambda}{T}$ podemos expresarla como, $v = \frac{1}{T} \times \lambda$ que es exactamente lo mismo.

Recordando que $f = \frac{1}{T}$, y sustituyendo en la expresión anterior y nos queda expresada la relación funcional entre la velocidad de propagación, la longitud de onda y la frecuencia.

$$\boxed{v = \lambda \times f}$$

Al igual que para los pulsos, la velocidad de propagación de una onda no depende del mecanismo que origine la onda, ni de su amplitud, ni de la frecuencia, ni tampoco de la longitud de onda. Es una característica propia del medio por donde viaja. Esta es una propiedad muy importante de todos los fenómenos ondulatorios. En este caso, depende únicamente de propiedades de la cuerda.

La velocidad de propagación de las ondas por una cuerda es independiente de la frecuencia y la longitud de onda. Es una característica propia del medio por donde viaja.

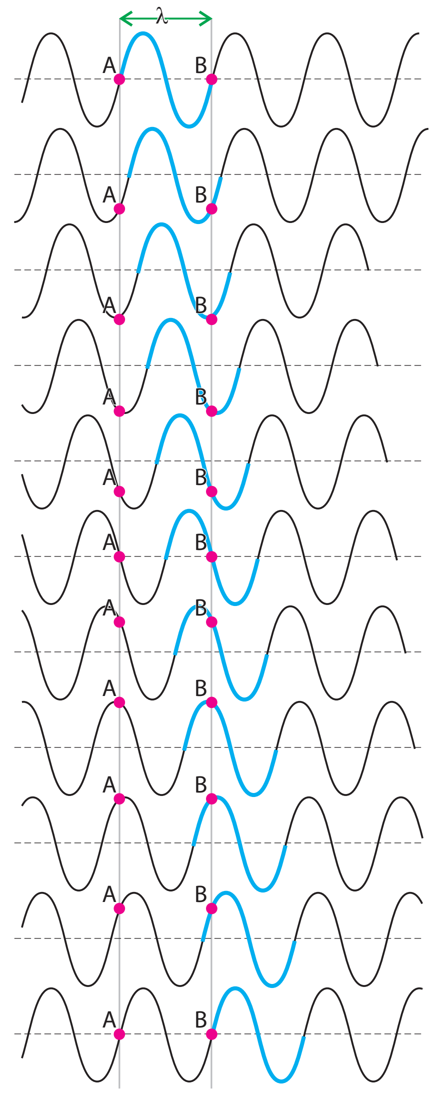

Fig. 6. Velocidad de propagación de una onda periódica en una cuerda

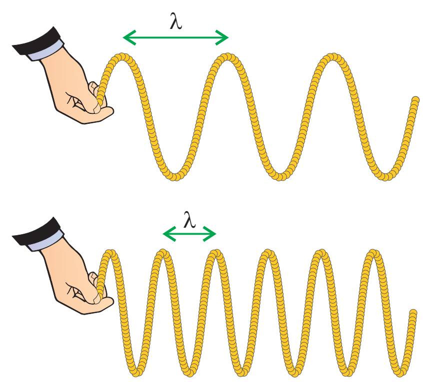

Fig. 7. Al aumentar al doble la frecuencia de la oscilación, a la misma cuerda, sometida a la misma tensión, la longitud de onda se reduce a la mitad. La velocidad de propagación de las ondas es la misma, ya que solo depende del medio.

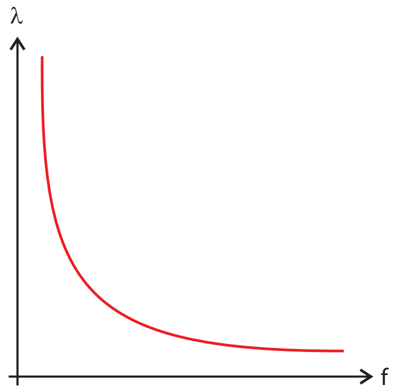

Fig. 8. La gráfica de dos magnitudes inversamente proporcionales es un arco de una curva llamada hipérbola.

La velocidad de propagación de las ondas por una cuerda es independiente de la frecuencia y de la longitud de onda. Éstas magnitudes están vinculadas de tal manera que su producto es un valor constante. (Fig. 7)

Si el agente externo que genera los pulsos aumenta su frecuencia, la frecuencia de la onda también aumentará. En este caso la longitud de la onda disminuirá de forma tal que $\lambda \times f = K$.

Es decir "λ" es inversamente proporcional a "f" (fig 8). Esta relación la expresamos de la siguiente forma:

$$\lambda \propto \frac{1}{f}$$

Ejemplo 1

En una cuerda homogénea se generan 120 pulsos cada 1,0 minutos. La cuerda tiene un largo de 16m y cada pulso la recorre completamente en 4,0s.

a) Determina la velocidad de propagación de la onda por la cuerda.
La velocidad de propagación la podemos calcular como el cociente entre la distancia recorrida por cualquier pulso de la cuerda y el tiempo que demora en hacerlo:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \qquad v = \frac{16\text{m}}{4{,}0\text{s}} = 4{,}0\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

b) Determina la frecuencia y el período de la onda en la cuerda.
Si se generan 120 pulsos cada 1,0 minuto (60 segundos), quiere decir que se crean 2,0 pulsos por segundo, por lo tanto la frecuencia es de 2,0Hz. Comprobemos este razonamiento, utilizando la definición de frecuencia, $f = \frac{\text{N° de oscilaciones}}{\Delta t} \Rightarrow f = \frac{120\text{osc}}{60\text{s}} = 2{,}0\text{Hz}$ $\boxed{f = 2{,}0\text{Hz}}$
El período lo podemos calcular de la relación $T = \frac{1}{f}$

$$T = \frac{1}{2{,}0\text{Hz}} = 0{,}50\text{s} \qquad \boxed{T = 0{,}50\text{s}}$$

c) Calcula la longitud de onda de la onda en la cuerda.

$$\lambda \times f = v \quad \text{por lo tanto} \quad \lambda = \frac{v}{f} \qquad \lambda = \frac{4{,}0\frac{\text{m}}{\text{s}}}{2{,}0\text{Hz}} \Rightarrow \boxed{\lambda = 2{,}0\text{m}}$$

d) Si aumentamos la frecuencia cuatro veces, ¿cómo varían la velocidad de propagación y la longitud de onda?

La velocidad de propagación no depende de la forma como se generan los pulsos, por lo tanto no depende de la frecuencia. Mientras no cambie la tensión y la densidad lineal de masa, la velocidad permanecerá constante.

La longitud de onda si cambiará. Considerando que $\lambda \times f = v$ constante, si la frecuencia aumenta cuatro veces, la longitud de onda debe disminuir a la cuarta parte, entonces el producto se mantiene igual.

Esto es

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{4{,}0\frac{m}{s}}{8{,}0Hz} \Rightarrow \qquad \boxed{\lambda = 0{,}50\ m}$$

Reflexión de ondas periódicas en una dimensión

Cuando un tren de ondas periódicas viaja por una cuerda tensa y llega a un extremo fijo que no oscila, cada uno de sus pulsos se refleja invertido. La velocidad de propagación cambia sólo de sentido, mientras que la frecuencia y longitud de onda no varían.

Si el extremo es móvil, cada pulso se refleja derecho, y la onda reflejada tiene las mismas características que la onda incidente. Lo único que cambia es el sentido de la velocidad de propagación.

Tanto en el extremo libre como fijo, la amplitud de la onda reflejada será la misma que la de la onda incidente, siempre y cuando el extremo fijo no "absorba" una fracción de la energía de la onda.

Refracción de ondas periódicas en una dimensión

Hasta aquí hemos considerado ondas que se propagan por un medio homogéneo. En nuestros ejemplos las perturbaciones viajan por una cuerda cuyos puntos tienen idénticas propiedades. No estudiaremos en este curso qué ocurre si la cuerda no es homogénea, o sea que sus propiedades van cambiando. Sí analizaremos el caso en que la onda se transmite de un medio a otro. Esto puede suceder si tenemos dos cuerdas unidas, una a continuación de la otra. Dado que los medios son diferentes, las velocidades de propagación no serán iguales.

En la figura 9 se muestra una onda periódica viajando por una cuerda, que llega al punto de unión con otra cuerda de diferente "μ". Las cuerdas tienen diferente densidad lineal de masa y podemos suponer que la tensión en ambas es la misma. Al llegar al punto de unión, parte de la onda incidente se refleja y parte se refracta a la cuerda 2.

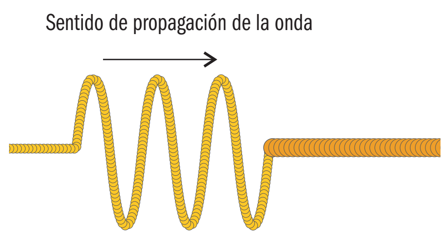

Fig. 9. Onda incidente propagándose con v_1, λ_1 y f_1, por una cuerda de densidad lineal de masa μ_1.

Refracción de ondas en una dimensión, es el fenómeno físico que se lleva a cabo cuando una onda incidente cambia de medio de propagación.

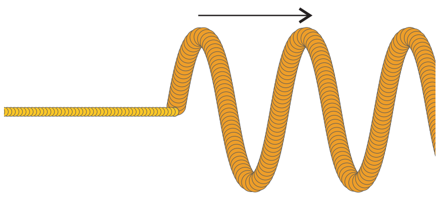

Fig. 10. Onda refractada, con su v_2, λ_2, f_2 viajando por una cuerda de μ_2
Omitimos representar la onda reflejada para centrarnos en el fenómeno de la refracción.

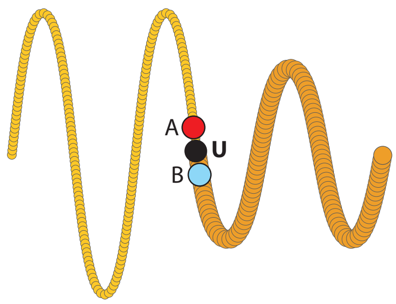

Fig. 11. "U" es el punto de unión ente las cuerdas. "A" pertenece a la cuerda 1, "B" a la cuerda 2 y vibran con la misma frecuencia.

Si $\mu_1 < \mu_2 \Rightarrow v_1 > v_2$

Como $f_1 = f_2 \Rightarrow \lambda_1 > \lambda_2$

Si $\mu_1 > \mu_2 \Rightarrow v_1 < v_2$

Como $f_1 = f_2 \Rightarrow \lambda_1 < \lambda_2$

Fig. 12. Cambios en la longitud de onda al refractarse.

Analizaremos qué propiedades tiene la onda refractada (fig 10).

Recordando que $v_p = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ la velocidad de propagación será menor en la cuerda que tenga mayor densidad lineal de masa "μ".

Veamos esto con mayor detalle. Si generamos una onda en la cuerda 1, viajará con una velocidad v_1. Al pasar a la cuerda 2 tendrá una velocidad v_2. Como $\mu_1 < \mu_2$, entonces $v_1 > v_2$.

Pongamos atención ahora en el punto de unión de las cuerdas (U) (fig 11). Razonando análogamente a como lo hicimos con la masa acoplada al resorte que generaba los pulsos en la cuerda, el punto de unión vibra con la misma frecuencia de su puntos contiguos (A y B). Por lo tanto, "A y B", que son puntos de cuerdas diferentes, deberán oscilar a la misma frecuencia.

La frecuencia de una onda no cambia cuando se transmite de un medio a otro, es decir cuando se refracta.

Si las velocidades son diferentes pero la frecuencia es la misma, recordando $v = \lambda \times f$ entonces la longitud de onda en cada cuerda deberá ser diferente.

Despejando $\lambda = \frac{v}{f}$, como la frecuencia es la misma,

si $v_1 > v_2$, entonces $\lambda_1 > \lambda_2$ (fig 12)

En el medio en que la onda se propaga con mayor velocidad tendrá mayor longitud de onda, en el medio en se propaga con velocidad menor, tendrá menor longitud de onda.

Ejemplo 2

En el extremo de una cuerda de $\mu_1 = 1{,}8 \times 10^{-3} \frac{kg}{m}$ se generan ondas periódicas con una frecuencia de 16,0Hz. Esta cuerda se encuentra unida a otra de $\mu_2 = 5{,}4 \times 10^{-3} \frac{kg}{m}$. Ambas están sometidas a una Tensión de 4,2N.

a) Determina la longitud de onda en la cuerda 1 (λ_1)

Como $v = \lambda \times f \Rightarrow \lambda = \frac{v}{f}$, para determinar λ_1 necesitamos primero calcular la velocidad de propagación. $v_{p1} = \sqrt{\frac{T}{\mu_1}}$ sustituyendo tenemos

que $v_{p1} = \sqrt{\dfrac{4{,}2N}{1{,}8 \times 10^{-3} \frac{kg}{m}}} \Rightarrow \boxed{v_{p1} = 48 \frac{m}{s}}$

$\lambda_1 = \frac{v_1}{f}$ $\quad \lambda_1 = \dfrac{48 \frac{m}{s}}{16{,}0Hz} \Rightarrow \boxed{\lambda_1 = 3{,}0 \text{ m}}$

b) Determina la frecuencia de la onda al viajar por la cuerda 2.

La frecuencia de la onda en la cuerda 2 es la misma que en la cuerda 1. Si no fuera así, el punto de unión entre las cuerdas debería oscilar con dos frecuencias distintas simultáneamente y esto es físicamente imposible. Por lo tanto $f_2 = f_1 = 16{,}0\ \text{Hz}$

c) Determina la longitud de onda en la cuerda 2 (λ_2)

Repetimos los pasos seguidos en la parte a). Primero determinamos la velocidad de propagación en la cuerda 2.

$$v_{p2} = \sqrt{\frac{T}{\mu_2}} \quad \text{sustituyendo,} \quad v_{p2} = \sqrt{\frac{4{,}2\text{N}}{5{,}4 \times 10^{-3}\,\frac{\text{kg}}{\text{m}}}} \Rightarrow V_{p2} = 28\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Ahora sí podemos determinar la longitud de onda en la cuerda 2.

$$\lambda_2 = \frac{v_{p2}}{f} \quad \lambda_2 = \frac{28\frac{\text{m}}{\text{s}}}{16{,}0\text{Hz}} \qquad \boxed{\lambda_2 = 1{,}8\ \text{m}}$$

PREGUNTAS

1) ¿En qué se diferencia un pulso de una onda periódica?
2) ¿Qué es la amplitud de una onda?¿Cuáles son sus unidades?
3) ¿Cuándo dos puntos están en fase?
4) ¿Qué es la longitud de onda? ¿Cuáles son sus unidades?
5) ¿Qué es el período de una onda? ¿Cuáles son sus unidades?
6) ¿Qué es la frecuencia de una onda? ¿Cuáles son sus unidades?
7) ¿Qué relación hay entre período y frecuencia de una onda?
8) ¿Cuánto avanza una onda en un tiempo igual a un período?
9) ¿Cómo se determina la velocidad de propagación de una onda en función de la frecuencia y la longitud de onda?
10) Si los datos son el período y longitud de onda,¿cómo se determina la velocidad de propagación en este caso?
11) Si en una cuerda viaja una onda periódica, y en determinado instante se triplica su frecuencia, ¿cómo varía su longitud de onda?

12) En una cuerda viaja una onda de cierta longitud de onda y período. Si queremos que la longitud de onda disminuya a la mitad, ¿cómo debemos variar el período?

13) Indica qué características de las ondas se verán afectadas si aumentamos al doble la frecuencia con la que perturbamos el extremo de una cuerda, manteniendo constante la tensión a la que está sometida:
   a. Velocidad de propagación.
   b. Período.
   c. Longitud de onda.

14) En una misma cuerda genero ondas de diferentes amplitudes ¿Cuál tendrá mayor velocidad?

15) En dos cuerdas idénticas sometidas a la misma tensión generamos ondas de distinta frecuencia. En la primera generamos ondas del doble de frecuencia que en la segunda. ¿En qué cuerda la onda se propaga con mayor velocidad? ¿En cuál tiene mayor longitud de onda?

16) Midiendo el tiempo que transcurre entre que vemos el destello de un rayo y escuchamos el trueno y dividiéndolo entre tres, obtenemos aproximadamente la distancia en km a la que cayó el rayo. Explica por qué este cálculo es una buena aproximación.

17) Una onda periódica viaja por una cuerda y pasa a otra que tiene mayor densidad lineal de masa. Suponiendo que la tensión es la misma en ambas cuerdas, explica cómo varían la frecuencia, el período, la velocidad de propagación y la longitud de onda en la segunda cuerda.

PROBLEMAS

1) Mi abuelo escucha radio Clarín que transmite en AM, a una frecuencia de 560 KHz. Determina el período y la longitud de la onda, sabiendo que las ondas de radio se propagan a la misma velocidad que la luz.

2) Cuando pulso la cuerda de una guitarra para emitir la nota LA, esta genera ondas de sonido de frecuencia 440 Hz. Determina la longitud de onda y el período del sonido generado. $V_{SONIDO} = 3{,}4x10^2$ m/s

3) Se generan ondas periódicas en una cuerda de tal forma que la distancia entre dos valles sucesivos es de 0,80m y cada punto demora 0,10s en cumplir un ciclo. Determina su frecuencia y velocidad de propagación.

4) Una onda periódica se propaga por una cuerda hacia la izquierda. En cierto instante, la forma de la cuerda es la que muestra en la figura 13. Cada punto de la cuerda demora 0,20s en completar un ciclo.
   a) Determina su amplitud, frecuencia y longitud de onda.
   b) Determina su velocidad de propagación.
   c) Un instante después, el punto "P" ¿se encuentra por encima o por debajo de la posición que muestra la figura?

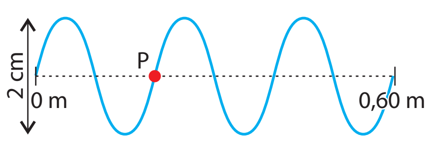

Fig. 13. Problema 4

5) Una onda periódica se propaga en una cuerda de $l = 50{,}0\text{m}$ y $m = 400\text{g}$. La cuerda está sometida a una tensión de 500N
   a) Determina la velocidad de propagación de la onda en la cuerda.
   b) Si la frecuencia de la onda es 10Hz, determina la distancia entre dos crestas consecutivas.

6) Una onda periódica de λ=20cm y T=0,12s se propaga por una cuerda.
   a) Determina su frecuencia.
   b) Determina su velocidad de propagación.
   c) Si se duplica su frecuencia sin variar la tensión ¿cómo varía su velocidad de propagación? ¿cómo varía su longitud de onda?

7) En una cuerda se generan 4 pulsos por segundo. La cuerda tiene un largo de 20m y cada pulso la recorre completamente en 2,0s.
   a) Determina la velocidad de propagación de la onda.
   b) Determina su longitud de onda.
   c) Si la cuerda está sometida a una tensión de 12,5N, determina su densidad lineal de masa.

8) Tres cuerdas perturbadas con la misma frecuencia se ven como muestra la figura 14. Ordena en forma creciente:
   a) Sus longitudes de onda.
   b) Sus velocidades de propagación.

9) Tres cuerdas de igual densidad lineal de masa y sometidas a la misma tensión se ven como muestra la figura 15. Ordena en forma creciente:
   a) Sus longitudes de onda.
   b) Sus velocidades de propagación.
   c) Sus frecuencias

10) En el extremo de una cuerda de $\mu_1 = 4{,}8 \times 10^{-3}\,\frac{\text{kg}}{\text{m}}$ se generan ondas periódicas con una frecuencia de 12,0Hz. (Fig. 16).
   Esta cuerda se encuentra unida a otra de $\mu_2 = 1{,}2 \times 10^{-3}\,\frac{\text{kg}}{\text{m}}$.
   Ambas están sometidas a una tensión de 5,4N.
   a) Determina frecuencia y longitud de onda en la cuerda 1.
   b) Determina frecuencia y longitud de onda en la cuerda 2.

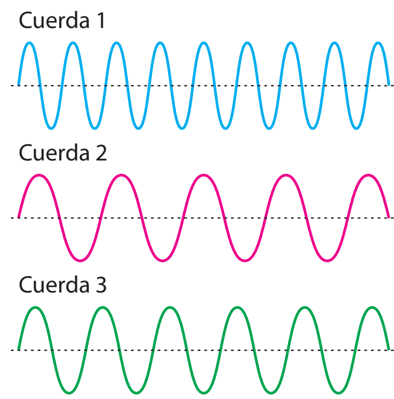

Fig. 14. Problema 8.

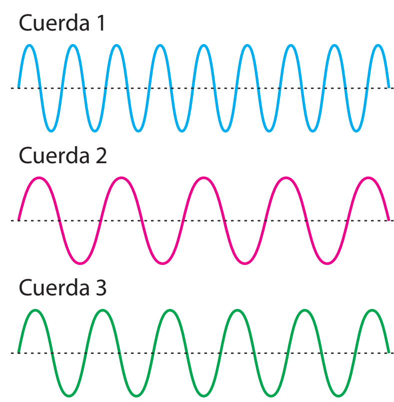

Fig. 15. Problema 9.

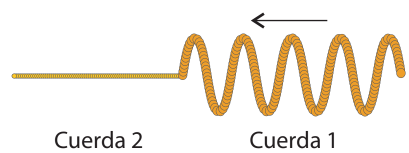

Fig. 16. Problema 10.