

Habiendo definido las ondas y estudiado sus principales características, en esta instancia haremos un estudio de los fenómenos ondulatorios. Pero antes de continuar, debemos saber qué se entiende por fenómeno ondulatorio. Los *fenómenos ondulatorios* son procesos en los cuales intervienen ondas, dando lugar a fenómenos especiales.

Así, estamos en condiciones de decir que son fenómenos ondulatorios la reflexión, refracción, difracción e interferencia de ondas. A continuación, realizaremos una descripción de los mismos.

Para poder comprender con claridad los fenómenos, primero debemos definir algunos conceptos que se ven involucrados en ellos. Comencemos por definir un *frente de ondas*: es la línea que une todos los puntos contiguos del medio que se encuentran en fase en cierto instante. Los *trenes de onda* son un conjunto de pulsos.

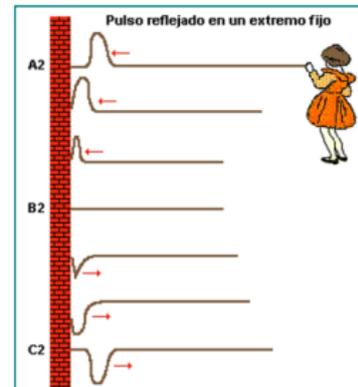
### Reflexión

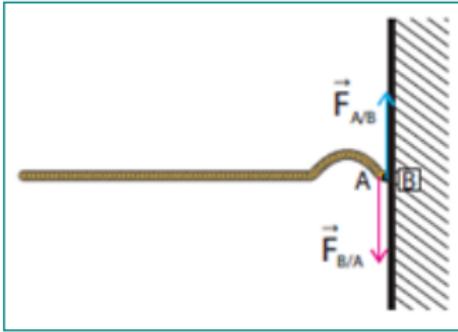
Tal como lo has estudiado en el curso de 1° de bachillerato, la luz se refleja al incidir en una superficie que separa dos medios (los casos más estudiados han sido superficies pulidas como el espejo). Como ya sabemos, la luz es una onda (electromagnética); todas las ondas que hemos clasificado pueden reflejarse como la luz. Estudiaremos la reflexión de ondas en una y dos dimensiones.

#### 1. Reflexión de ondas unidimensional (cuerdas)

##### 1. a Reflexión de un pulso en una cuerda de extremo fijo

Analicemos que ocurre cuando un pulso viaja por un medio y llega a un extremo fijo. Imaginemos una cuerda atada en un punto fijo de una pared. Si generamos en el otro extremo un pulso, este viaja por la cuerda y llegara al punto fijo, donde se producirán dos fenómenos, reflexión y absorción. Gran parte de la energía vuelve a la cuerda en un pulso reflejado y el resto es absorbido por la pared. Además, se observa que el pulso reflejado se invierte. Su velocidad cambia de sentido y su módulo permanece constante dado que el medio de propagación es el mismo.



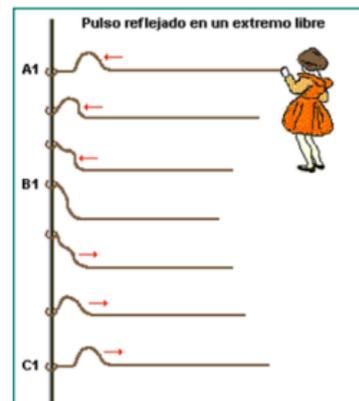


¿Por qué se invierte? Podemos explicar la inversión del pulso reflejado a partir de la 3ª Ley de Newton. Llamemos "A" al último punto de la cuerda, que está unido al punto "B" fijo en la pared. Cuando el pulso llega al punto "A", este aplica una fuerza sobre "B" vertical y hacia arriba. El punto "B" aplica por lo tanto una fuerza también vertical, con igual módulo, pero sentido opuesto. Dicha fuerza hacia abajo hace que el pulso reflejado se invierta. Los pulsos reflejado e incidente se mueven con velocidades del mismo módulo. Recuerda que la velocidad de propagación depende de la densidad lineal de masa y la tensión de la cuerda.



### 1. b Reflexión de un pulso en una cuerda de extremo libre

Ahora veamos que ocurre cuando el extremo de la cuerda está libre, es decir que el último punto puede oscilar libremente cuando llega el pulso incidente. En una situación ideal, esto lo podríamos lograr sujetando el extremo de la cuerda a un anillo que pasa por una varilla vertical. Si el rozamiento entre la varilla y el anillo es despreciable, él se movería libremente en forma vertical. Al llegar el pulso al punto "A", mueve el anillo hacia arriba, cediéndole energía en forma de trabajo. Al bajar, el anillo cede nuevamente la energía a la cuerda, generando un pulso derecho, que cambia solo el sentido de su velocidad de propagación.

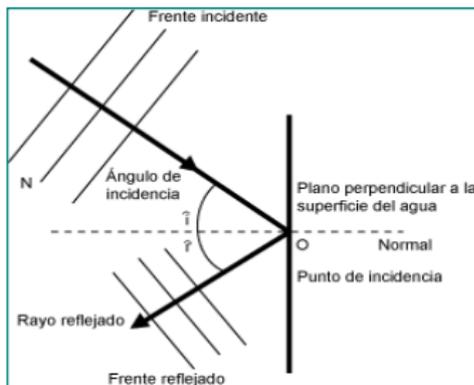


**Experimentar:** Ata una cuerda a la pata de una silla, genera un pulso con la cuerda apoyada en el piso, y observa... ¿Qué sucede? Realiza un esquema. ¿Cuánto tiempo tarda en llegar el pulso? ¿Qué tan fuerte la cuerda? ¿Cuál de los tipos anteriores es tu sistema casero?

## 2. Reflexión de ondas bidimensionales

Supón que, en un gran recipiente de agua, se produce una onda de pulsos rectos, que se propaga en dirección a una barrera (un trozo de madera, por ejemplo) colocada dentro del recipiente.

Esta onda se propaga en 2 dimensiones, por tanto ya tenemos herramientas para clasificarla según 2 criterios definidos anteriormente. Según el medio de propagación es una **onda mecánica** (se propaga en el agua) y según la dimensión en que lo hace es **bidimensional** (se propaga a lo largo de un plano, que es la superficie del agua).



Podemos observar en la imagen adjunta que cuando este frente de ondas llega a la barrera (superficie de separación de los medios), se refleja, originando una onda reflejada constituida también por pulsos rectos (llamados también tren de ondas plano).

Marcando la dirección de un rayo de la onda incidente (con dirección perpendicular a las crestas del frente de ondas) podemos medir en forma experimental, el ángulo que dicho rayo forma con la normal a la barrera. Este ángulo que designamos por  $i$  en la figura, se denomina *ángulo de incidencia* de manera similar a lo establecido en la reflexión de la luz.

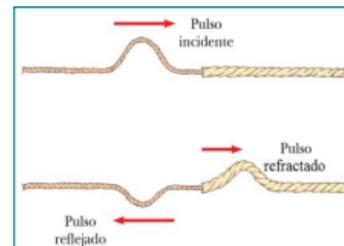
Así mismo podemos señalar la dirección del rayo de la onda reflejada y medir el *ángulo  $r$  de reflexión*. Comprobando que siempre se obtiene  $\hat{i} = \hat{r}$  es decir: *cuando una onda se refleja en una barrera, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión*.

## Refracción

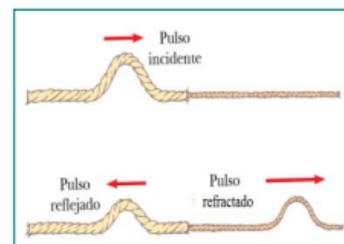
Al igual que lo hicimos con la reflexión de ondas, estudiaremos cómo se refractan las ondas en una y dos dimensiones, a través de algunos ejemplos

### 1. Refracción de ondas unidimensionales (cuerdas)

Consideremos ahora el caso en el que un pulso llega a un punto de unión entre dos cuerdas atadas, de diferentes densidades lineales de masa. Si generamos un pulso en la cuerda más liviana, es decir, la de menor densidad lineal de masa, cuando el pulso llega a la otra, de mayor densidad lineal de masa, parte del mismo se refleja invertido y el resto se transmite al nuevo medio. Se observan los dos fenómenos, reflexión y refracción. El primer punto de la cuerda gruesa recibe un impulso hacia arriba, por lo que el pulso transmitido o refractado es derecho.

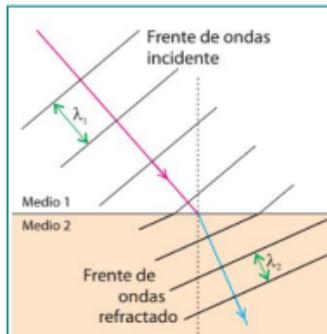


También puede ocurrir que el pulso incidente viaje por la cuerda de mayor densidad lineal de masa y se transmita a otra más liviana, es decir, de menor densidad lineal. En este caso tendremos un pulso reflejado similar al caso de reflexión en un extremo libre, ya que la cuerda fina permite oscilar la unión de las cuerdas con mucha facilidad. El primer punto de la cuerda fina recibe un impulso hacia arriba, por lo que el pulso transmitido o refractado es derecho. Por lo tanto en los dos medios obtendremos pulsos derechos, tanto el transmitido (refractado) como el reflejado.



En ambos casos analizados el pulso transmitido se propaga con distinta velocidad que el pulso incidente. Si las cuerdas están unidas podemos asumir que están sometidas a la misma tensión. Por lo tanto, si el pulso pasa de una cuerda menos densa a otra más densa (primer caso), la velocidad de propagación en la segunda cuerda será menor que en la primera. Si el pulso se transmite de una cuerda a otra menos densa, la velocidad de propagación en la segunda cuerda será mayor que en la primera.

## 2. Refracción de ondas bidimensionales



Ahora consideremos otro recipiente con agua, en el cual se diferencian 2 zonas: una más profunda y la otra menos profunda (medios 1 y 2 respectivamente). Al hacer que una onda se propague en la superficie del agua, encontramos que la velocidad de la onda en la región más profunda es mayor que en la región de menor profundidad ( $v_1$  es mayor que  $v_2$ ), de manera que estas regiones se comportan como dos medios diferentes para la propagación de la onda. Dado que la frecuencia es la misma en ambos medios, a mayor velocidad de propagación, mayor es la longitud de onda; esto se deduce de la relación directamente proporcional entre la velocidad de propagación y la longitud de onda:  $v_p = \lambda \cdot f$

### • La ley de la refracción de una onda

Seguramente recuerdes la ley de Snell, cuando la estudiaste en el curso de 4° aplicada a los rayos de luz; sucede que también se cumple cuando se trata de ondas que se propagan en el agua y se encuentran en diferentes profundidades. Para dos medios determinados, los valores de  $v_1$  y  $v_2$  son fijos. Entonces,  $v_1/v_2$  es constante, y así, cuando una onda se refracta al pasar de un medio a otro, los ángulos de incidencia y de refracción son tales que:

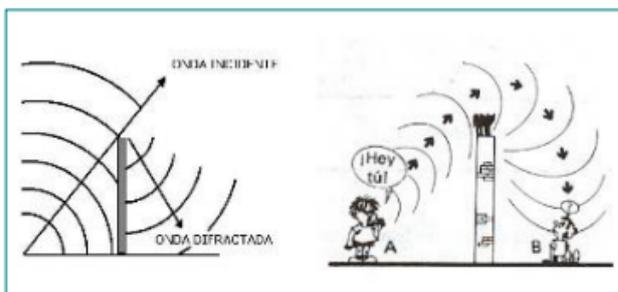
$$\frac{\sin \hat{i}}{\sin \hat{R}} = cte$$

Como conclusión, podemos decir que **el hecho de que una onda se refleje y se refracte obedeciendo las mismas leyes observadas en la reflexión y en la refracción de la luz, nos lleva a suponer que la luz es un movimiento ondulatorio.**

## Difracción

La difracción es la propiedad que posee una onda en rodear un obstáculo al ser interrumpida su propagación parcialmente por él. La difracción, como el resto de los fenómenos analizados, es un fenómeno que ocurre con cualquier tipo de onda.

**Para pensar...** Analiza situaciones de la vida cotidiana en las que se haga evidente la difracción de ondas, y regístralo en tu cuaderno.



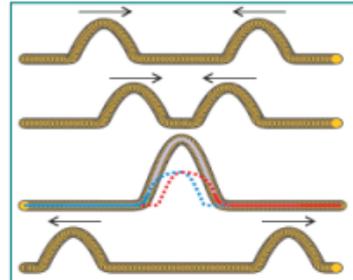
Analicemos un ejemplo donde la difracción se hace evidente cada vez que nos comunicamos o escuchamos algún ruido. Una persona A al lado de un muro, puede ser escuchada por otra persona B colocada detrás del mismo, porque las ondas sonoras emitidas por A, en virtud de la difracción, rodean el obstáculo y llegan al oído de B.

## Interferencia

Es un fenómeno que se da cuando dos o más frentes de ondas llegan a un mismo punto, y puede ocurrir en ondas de una, dos o tres dimensiones, por lo cual analizaremos el fenómeno en las primeras dos situaciones. Este fenómeno ocurre cuando se superponen dos ondas.

### 1. Interferencia de ondas unidimensionales (cuerdas)

Si generamos pulsos a la vez en ambos extremos de una cuerda, se propagarán a través de ella con velocidades del mismo valor, pero con sentido contrario. Cuando los pulsos se encuentran, la forma de la cuerda es momentáneamente distinta a la forma de cada perturbación. Luego cada pulso continúa con sus mismas características iniciales. A este fenómeno en el que dos perturbaciones que viajan por el mismo medio se superponen se le llama interferencia.



¿Cómo se puede determinar la forma que adquiere la cuerda en el momento en que se superponen las perturbaciones? La forma de la cuerda resulta de la suma de los desplazamientos que produciría independientemente cada pulso, considerando el sentido de cada desplazamiento. A esta forma de obtener la configuración de la cuerda sumando el aporte de cada pulso se le denomina principio de superposición. Si al superponerse los pulsos se refuerzan formando una deformación mayor que cada pulso, es un caso de interferencia constructiva. Si uno de los pulsos es invertido con respecto al otro, al superponerse se generará momentáneamente una deformación menor que cada pulso. A este caso le llamamos interferencia destructiva.

### 2. Interferencia de ondas bidimensionales



Las ondas bidimensionales pueden vibrar en fase, es decir, pueden ambas ondas viajar con la misma frecuencia y longitud de onda. En este caso, son emitidas por dos focos coherentes.

En la figura adjunta se observa una sencilla y común experiencia de la vida cotidiana. Dos piedras caen en la superficie del agua, generando superposiciones: esto es lo que denominamos interferencia de ondas en el agua.

Si golpeamos periódicamente con dos pequeños objetos la superficie de un líquido, dos ondas circulares se propagarán en ella. Los dos objetos  $F_1$  y  $F_2$ , son las fuentes donde se producen tales ondas. Supongamos que dichos dispositivos vibran con la misma frecuencia y percuten simultáneamente el líquido, es decir, en el momento en que uno produce una cresta, el otro también genera la suya, y cuando uno produce un valle, el otro también lo hace. En estas condiciones, decimos que las dos fuentes vibratorias están en fase.



Además, supondremos que las ondas producidas por ambas fuentes tienen la misma amplitud.

Obviamente, las dos ondas originadas en  $F_1$  y  $F_2$ , se superpondrán al propagarse en la superficie del líquido. En virtud de tal superposición, la superficie del mismo adquiere el aspecto que se observa en la fotografía anterior.



Esta configuración es lo que denominamos figura de interferencia; en otras palabras, se expresa que las dos ondas se interfieren, dando origen a la configuración de la fotografía. Producto de dicha interferencia se puede apreciar zonas donde la amplitud es máxima en todo momento (antinodo) y zonas donde la amplitud es nula (nodo). La línea que unen dichas zonas se llaman líneas antinodales y nodales respectivamente.