

CAPITULO 4

PROPAGACIÓN DE ONDAS

INTRODUCCION:

Independientemente de la clase de onda que estemos estudiando y del medio de propagación, resulta interesante descubrir que todas ellas tienen propiedades comunes que se hacen evidentes al propagarse en el espacio pasando de un medio a otro con características diferentes.

Tales diferencias serán decisivas sobre todo en los cambios de velocidad y dirección que sufre la perturbación ondulatoria en la interface, de modo que, de acuerdo a la característica del medio de propagación un cambio en algunas de sus propiedades traerá como consecuencia que el movimiento ondulatorio, siguiendo leyes deducibles de principios físicos generales, como los de Huygens o Fermat, cambie irremediamente.

Son cinco los fenómenos ondulatorios básicos: reflexión, refracción o transmisión, interferencia, difracción y polarización.

REFLEXION Y TRANSMISIÓN DE ONDAS EN UNA CUERDA:

Cuando una perturbación ondulatoria se encuentra en su camino un obstáculo, o llega al límite del medio material en que se propaga, por lo menos una parte de ella es reflejada. Este fenómeno es característico de todas las clases de onda, como por ejemplo; la reflexión de la luz en un espejo, con lo cual podemos ver nuestra imagen, o el eco de las ondas sonoras en un sitio cerrado o en un acantilado.

Por supuesto también aparece de modo más apreciable cuando un pulso se propaga en una cuerda tensada y rebota en los extremos restringidos, como se ilustra en la figura N° 18.

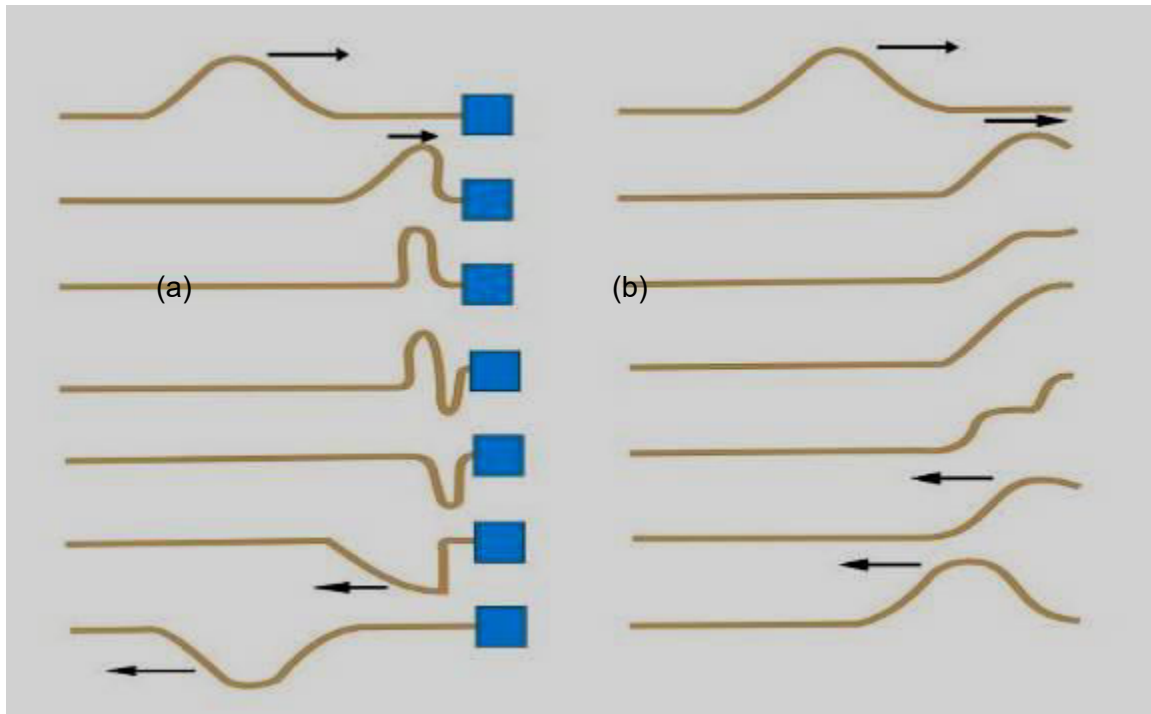


Figura N° 18: Reflexión de una onda en una cuerda tensa: (a) cuando el extremo está fijo y (b) cuando está libre

Obsérvese que **el pulso reflejado en el extremo fijo** cambia no sólo de dirección sino que **se refleja invertido**, pero si por el contrario la cuerda está libre en el extremo el pulso regresa con la cresta hacia arriba, tal cual llegó.

La explicación es muy simple a partir de las leyes de Newton, tomando en cuenta que el pulso al llegar al extremo empotrado ejerce una fuerza hacia arriba sobre el soporte, el cual a su vez ejerce otra igual, pero de sentido contrario, sobre la cuerda, produciendo el pulso reflejado invertido.

En el segundo caso, no hay soporte, y el extremo libre se desplaza verticalmente hacia arriba un poco más que la amplitud del pulso, ejerciendo con ello un “latigazo” o “tirón” hacia arriba en la cuerda, por lo cual, reaparece el pulso en sentido contrario pero sin invertirse.

En realidad, el pulso reflejado debe tener menos amplitud, debido a la pérdida de energía en la interacción con el soporte, de hecho parte de la energía original se convierte en energía térmica y parte de ella se transmite al soporte.

Si un pulso se desplazara en una cuerda formada por dos trozos de diferente diámetro (o masa), aparecerán dos pulsos; uno reflejado propagándose en sentido contrario a la onda incidente e invertido en el trozo más delgado y otro en el mismo sentido y derecho en el trozo más grueso, esto se ilustra apropiadamente en la figura N° 19. Puede resultar interesante probar estos resultados haciendo el experimento con una cuerda o un resorte largo y flexible.

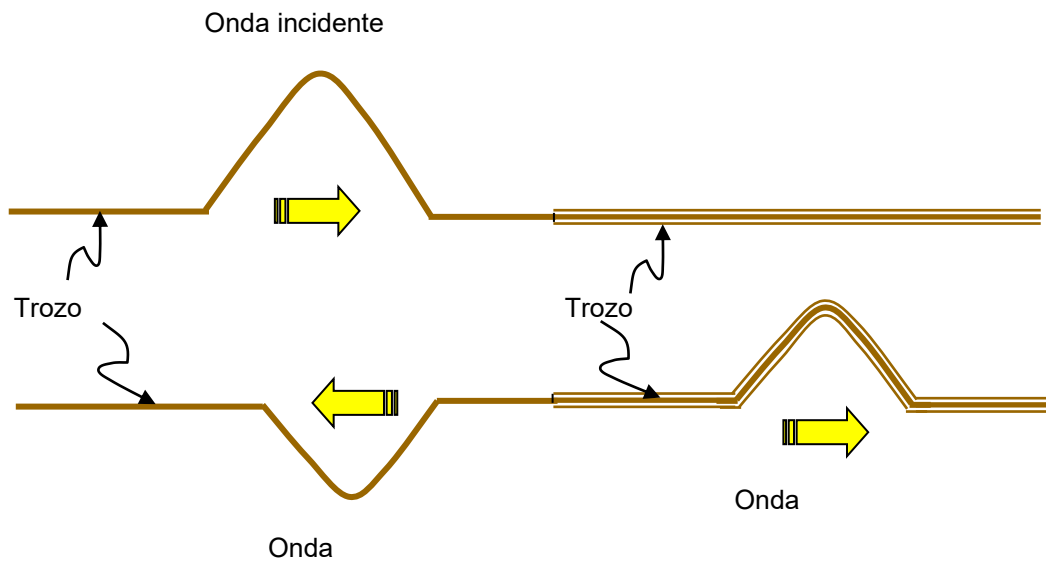


Figura N° 19: Reflexión y transmisión de una onda en una discontinuidad

REFLEXION Y REFRACCIÓN DE ONDAS PLANAS:

Para el caso de ondas tridimensionales y bidimensionales, se debe definir el llamado “**frente de onda**” el cual es una cresta de onda en toda su extensión, como por ejemplo, una ola de mar, mientras que una línea perpendicular al frente de onda trazada en la dirección de propagación se llama “**rayo**”. Estos conceptos serán de mucha utilidad para estudiar más adelante la propagación de las ondas luminosas, pero, igualmente se aplican a cualquier clase de onda.

Es interesante observar que cuando los frentes de onda están lo suficientemente lejos de la “**fente**” de la perturbación, independientemente de la forma que tenga el

frente de onda original (esférico, cilíndrico, etc.), comienzan a perder curvatura y se convierten prácticamente en un frente de **onda plana**.

La reflexión de este tipo de frentes de onda plana sigue una ley muy sencilla, conocida como la “**ley de reflexión**” que establece que *el ángulo que forma la onda incidente con la superficie reflectante es igual al ángulo que forma con ella la onda reflejada*.

Sin embargo, es más común expresarla en términos de los rayos incidente y reflejado, como muestra la figura N° 20, señalando que “**el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia**”, siendo estos, respectivamente, el ángulo que forma el rayo reflejado y el ángulo que forma el rayo incidente, con la perpendicular a la superficie reflectora.

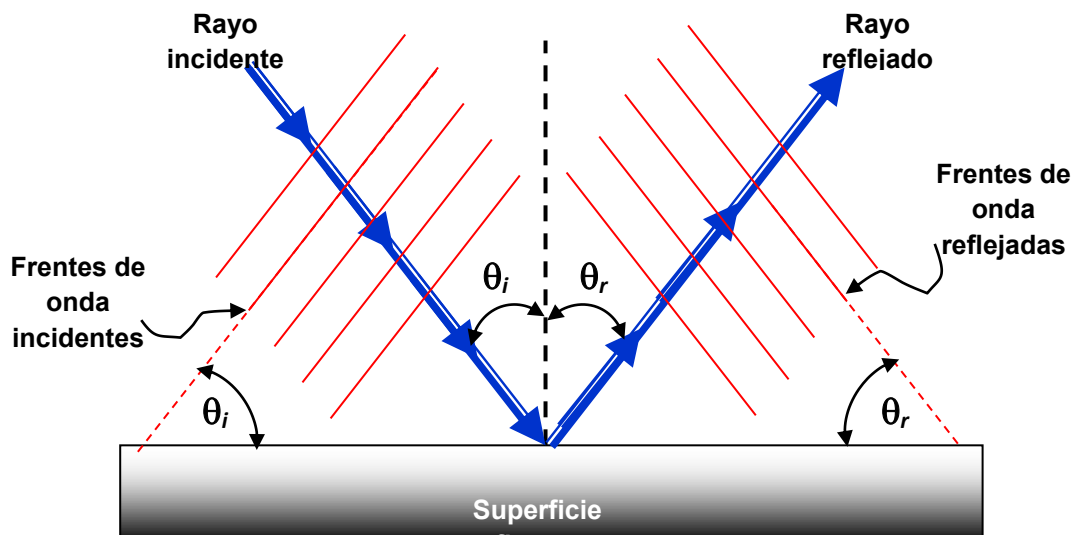


Figura N° 20: Ley de Reflexión, $\theta_i = \theta_r$

Es este caso, también se pierde energía por lo que, a menos que se trate de una superficie reflectante ideal, la onda reflejada será menos “intensa” o de menor energía que la onda incidente.⁷

⁷ Sobre los fenómenos de refracción y difracción de ondas en general, que no tratamos en estos apuntes, recomendamos la lectura de “Física. Principios con Aplicaciones” (GIANCOLI, D., 1997: 323-325)

La refracción de las ondas, como en la transmisión, implica un cambio de velocidad de fase por lo cual, dado que la frecuencia permanece inalterada, se modificará naturalmente la longitud de onda.

DIFRACCIÓN DE ONDAS CIRCULARES

La difracción es la desviación que sufren las ondas alrededor de los bordes y esquinas que se produce cuando una porción de un frente de ondas se ve cortado o interrumpido por una barrera u obstáculo. El esquema de la onda resultante puede calcularse considerando cada punto del frente de onda original como una fuente puntual de acuerdo con el principio de Huygens y calculando el diagrama de interferencia que resulta de todas estas fuentes.

Consideremos una rendija rectangular estrecha, de anchura b , y larga, de modo que podamos ignorar los efectos de los bordes, sobre la que inciden ondas normales al plano de la rendija de longitud de onda λ . De acuerdo con el principio de Huygens, cuando la onda incide sobre la rendija todos los puntos de su plano se convierten en fuentes de ondas secundarias emitiendo nuevas ondas que en este caso reciben el nombre de ondas difractadas. Observando las ondas difractadas a diferentes ángulos θ respecto a la dirección de incidencia, en la figura siguiente, encontramos que para ciertas direcciones su intensidad es nula.

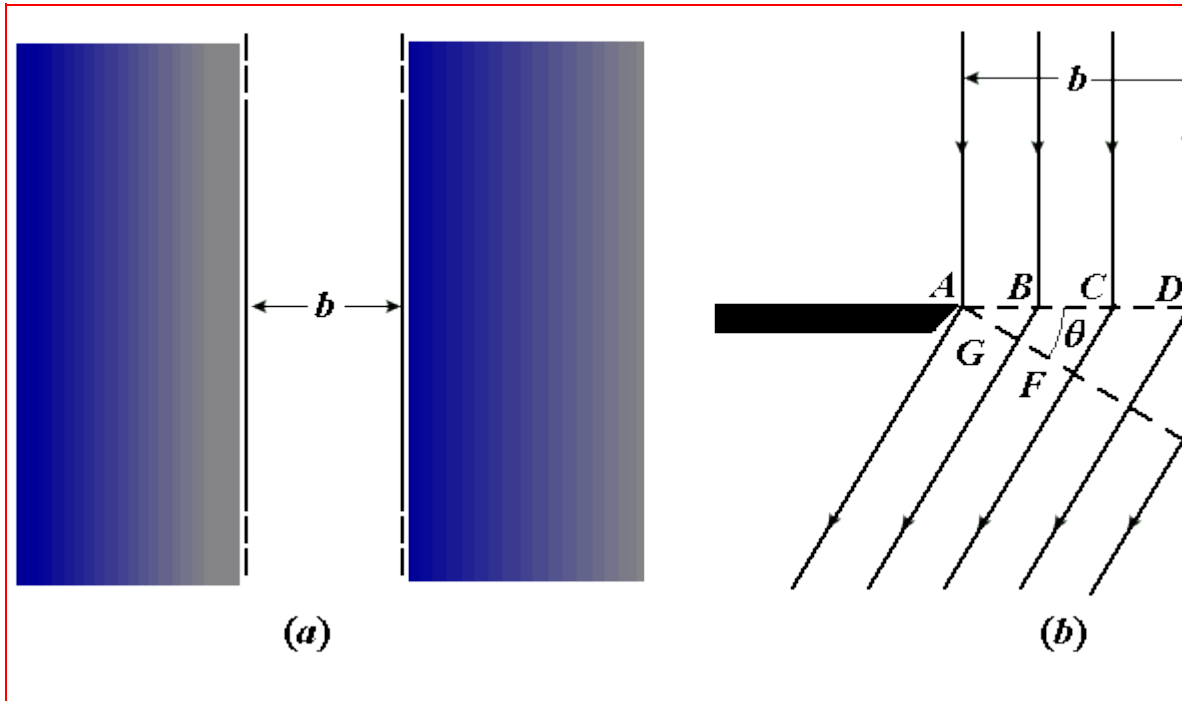


Figura N° 21: Difracción en una rendija

Estas direcciones de intensidad nula están dadas por la relación:

$$b \sin \theta = n \lambda \quad [20]$$

$$\sin \theta = \frac{n \lambda}{b} \quad n \neq 0 \quad [21]$$

Esta es la fórmula que describe el fenómeno de la difracción Fraunhofer producido por una rendija estrecha. Como las intensidades son proporcionales a los cuadrados de las amplitudes

$$I = I_0 \left(\frac{\sin x}{x} \right)^2 \quad x = \frac{\pi b \sin \theta}{\lambda} \quad [22]$$



Figura N° 22: Patrón de difracción en una rendija

El máximo de la difracción se produce cuando el argumento del seno es cero, ya que

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\text{sen } x}{x} = 1$$

Para que dicho argumento sea cero, el ángulo θ debe ser cero. Tenemos un máximo de intensidad en el origen, en la dirección perpendicular al plano de la rendija.

Los máximos y mínimos se calculan derivando la fórmula de la intensidad respecto de $x = \pi b \text{ sen } \theta / \lambda$

$$I = I_0 \left(\frac{\text{sen } x}{x} \right)^2$$

$$\frac{dI}{dx} = 2I_0 \left(\frac{\text{sen } x}{x} \right) \left(\frac{x \cos x - \text{sen } x}{x^2} \right)$$

- Cuando $\sin x / x = 0$ tenemos un mínimo de intensidad, pues $I = 0$
- Cuando $x \cos x - \sin x = 0$ o bien, cuando $x = \tan x$ tenemos un máximo de intensidad

Por ejemplo cuando $x = 0$, pero también para otros valores de x que son las raíces de la ecuación trascendente $x = \tan x$. Estas raíces se pueden calcular numéricamente o gráficamente