

Módulo 19

Dinámica en la naturaleza: el movimiento

UNIDAD III

Movimiento ondulatorio
y trigonometría



CONTENIDO EN EXTENSO

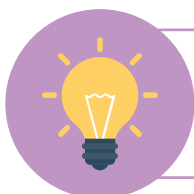


CONTENIDO

UNIDAD III. Movimiento ondulatorio y trigonometría	4
Presentación	4
Propósito	4
Aprendizajes esperados	4
Punto de partida	4
1. El movimiento en repetición	5
1.1 Ley de Hooke	5
1.2 El movimiento armónico	7
1.3 El péndulo	10
1.4 La amplitud, frecuencia, periodo y fase	11
1.4.1 Amplitud	11
1.4.2 Frecuencia angular	12
1.4.3 Periodo	13
1.4.4 Fase	14
2. Ondas mecánicas	14
2.1 Características de las ondas mecánicas	15
2.1.1 Magnitudes de una onda	15
2.1.2 Reflexión de una onda	16
2.2 Ondas longitudinales y transversales	16
2.3 Suma de ondas	17
2.4 Ondas periódicas y estacionarias en la naturaleza	17
3. Sonido	19
3.1 El sonido como onda mecánica	19
3.2. Conceptos y ejemplos de tono y timbre	20
3.3. Conceptos y ejemplos de intensidad del sonido	22
3.4. Ejemplos y aplicación de la transmisión del sonido en diferentes medios	23
Cierre	23

Guía de navegación

En este documento encontrarás gran cantidad de información, lo cual demanda generar estrategias de aprendizaje, para analizarla y que te apropiés de los conocimientos haciéndolos útiles para tu entorno. Por ello, te proporcionamos la siguiente guía de navegación para darle un mejor uso al contenido, describiendo los íconos que te permitirán relacionar cada uno de estos elementos.



Con esta figura identificarás algún **Tip de aprendizaje**, es decir, sugerencias para reforzar tu aprendizaje a partir de algunas actividades propuestas.



Cuando encuentres este signo de interrogación, distinguirás los **¿Sabías qué?**, mediante datos curiosos que te permitirán conocer información adicional sobre el contenido revisado.



Mediante este ícono encontrarás **Vocabulario**, que puede ir desde palabras nuevas y definiciones hasta datos biográficos de personajes importantes que son relevantes en el tema que revisas.



Cuando veas este signo de exclamación podrás conocer algo más, **Acerca de** lo que estás leyendo en ese momento, es decir, profundizarás sobre el contenido de tu lectura.



Para cuando quieres conocer más información sobre lo que lees, te encontrarás con este ícono **Para saber más**, que sugiere recursos de internet, que te ayudan a indagar e investigar sobre los temas propuestos.



Para encontrar algunos ejemplos, reflexiones o preguntas detonadoras sobre el contenido que estás revisando, podrás reconocerlos con el ícono **Mi mundo y yo**.

UNIDAD III. Movimiento ondulatorio y trigonometría

Presentación

En esta unidad revisarás todo lo relacionado con el movimiento armónico simple, conocerás los conceptos de amplitud, frecuencia y fase para relacionarlos con ondas mecánicas y explicar el sonido como una onda de este tipo y, a partir de ello, desarrollarás las competencias necesarias que plantea el perfil de egreso en la Educación Media Superior, es decir, que logres aplicar de manera efectiva tus conocimientos, habilidades y actitudes en situaciones o problemas concretos.

Propósito

Aplicar funciones trigonométricas y lugares geométricos para explicar fenómenos ondulatorios en el entorno.

Aprendizajes esperados

- Relaciona algebraicamente las variables que describen a las ondas mecánicas.
- Representa e interpreta el movimiento armónico con respecto al tiempo y a una fuerza aplicada.
- Expresa matemáticamente el movimiento de un objeto que corresponde al armónico simple.
- Compara ondas de luz y de sonido modelando el comportamiento de éstas como ondas y diferenciando entre las características de amplitud, periodo y fase.
- Identifica los fenómenos ondulatorios en uno o varios dispositivos experimentales y en la naturaleza (sismos y tsunamis).
- Parafrasea las expresiones algebraicas utilizadas en los modelos ondulatorios y analiza sus propiedades matemáticas como aditividad y homogeneidad.
- Describe las características de las ondas sonoras del entorno como frecuencia, longitud de onda, velocidad de transmisión en un medio, amplitud de onda y su relación con características audibles como volumen y timbre.
- Analiza la voz mediante aplicaciones de celular o de diferentes instrumentos con la misma nota.

Punto de partida

Te has detenido a preguntarte, ¿cómo hacen los murciélagos para volar en la noche? ¿Cómo el sonido generado por el vuelo de un mosquito no te deja dormir si es tan pequeño? ¿Por qué los terremotos afectan más en ciertas zonas que otras? Todas estas preguntas tienen respuesta en relación con un fenómeno de gran importancia en la física: las ondas mecánicas. Estas ondas se presentan cuando algo en un medio se perturba y esa perturbación se propaga a través de él. Dicha alteración del medio que viaja tiene la propiedad de que transporta únicamente energía.



1. El movimiento en repetición

En la unidad dos tuvimos un primer acercamiento a este concepto con el movimiento circular uniforme, pues se trata de un movimiento en repetición. En este tema observaremos a los otros tipos de movimientos en repetición, como la oscilación de un columpio, las olas del mar o las cuerdas de una guitarra. Este tipo de movimientos son llamados movimientos armónicos. Para comenzar hablaremos de una ley que es importante para ejemplificar este comportamiento.

1.1. Ley de Hooke

¿Alguna vez estiraste con tus manos un resorte? Si es así, habrás notado que entre más se requiera estirar se deberá aplicar una mayor fuerza. Este fenómeno fue planteado por primera vez por Robert Hooke, quien estableció la ley que lleva su nombre y relaciona que el valor de la fuerza necesaria para estirar un resorte será igual a multiplicar la constante elástica del resorte k (qué tan duro es el resorte) por la longitud de la deformación Δx . Es decir, lo que cambió la longitud del resorte (figura 1).



¿Sabías qué?

Robert Hooke fue un científico inglés, considerado uno de los científicos experimentales más importantes de la historia de la ciencia, polemista incansable con un genio creativo de primer orden.

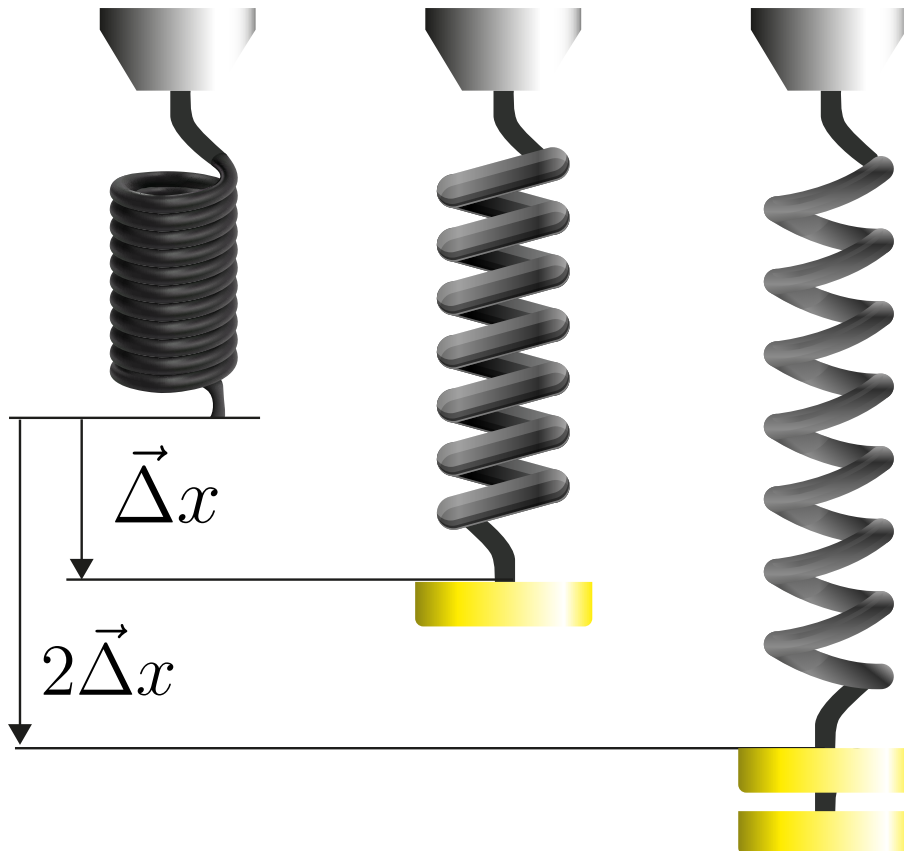
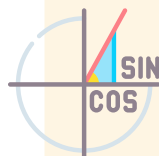
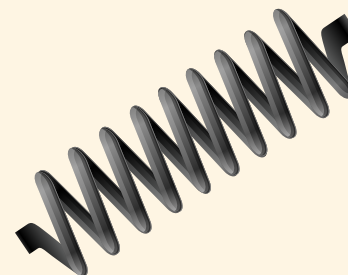


Figura 1. La ley de Hooke describe que la deformación en un resorte es proporcional a la fuerza aplicada.



Ejemplo 1.1

Un resorte de 10 cm requiere de una fuerza de 10 N para estirarse hasta los 12 cm. ¿Qué fuerza se requiere para estirarse hasta los 15 cm?



Solución

Para poder aplicar la ley de Hooke, requerimos primero conocer el valor de la constante k . Para ello la despejamos y sustituimos los valores de la deformación de 12 cm.

$$\vec{F} = k\Delta\vec{x}$$

$$k = \frac{\vec{F}}{\Delta\vec{x}} = \frac{+10N}{12cm - 10cm} = \frac{10N}{2cm} = 5\frac{N}{cm}$$

Con este valor de k , podemos calcular la fuerza necesaria en la deformación de 15 cm.

$$\vec{F} = k\Delta\vec{x}$$

$$F = +5\frac{N}{cm} (15\text{ cm} - 10\text{ cm}) = 5\frac{N}{cm} (5\text{ cm}) = 25\text{ N}$$

Comprimir o estirar un resorte requiere de la realización de un trabajo que será a la fuerza aplicada por la distancia, en este caso, la deformación $\Delta\vec{x}$.

$$W = |F||d|\cos\theta$$

$$\text{como } \theta = 0, \cos\theta = 1$$

$$W = |F||d| = k\Delta x \cdot \Delta x = k\Delta x^2$$

Este trabajo aumentará la energía del resorte, que mientras no se suelte, su energía estará en forma de energía potencial, la cual deberá ser igual al trabajo realizado:

$$E_p = W = k\Delta x^2$$

La ley de Hooke tiene abundantes usos en la vida diaria, pues se ocupa en la mayoría de las básculas, además es la base de los cálculos necesarios para estimar las deformaciones que tienen las vigas presentes en edificios y puentes ante la presencia de las fuerzas que deben soportar.



Para saber más...

Para reforzar el tema te recomendamos trabajar con el siguiente simulador para comprender mejor la ley de Hooke:

https://phet.colorado.edu/sims/html/hookes-law/latest/hookes-law_es.html

1.2. El movimiento armónico

¿Has observado que cuando deformas un objeto elástico como un resorte o la cuerda de una guitarra, éste se queda vibrando? A este comportamiento se le llama **movimiento armónico amortiguado**. Se le llama “armónico” porque tiene un periodo fijo, es decir, tarda el mismo tiempo por cada vibración siempre, y “amortiguado” porque va disipando energía hasta detenerse, debido principalmente a la fricción.

Para poder estudiar este comportamiento de manera simplificada tendremos que pasar primero al caso donde la fricción se puede despreciar o el tiempo es lo suficientemente corto para hacerlo (figura 2).

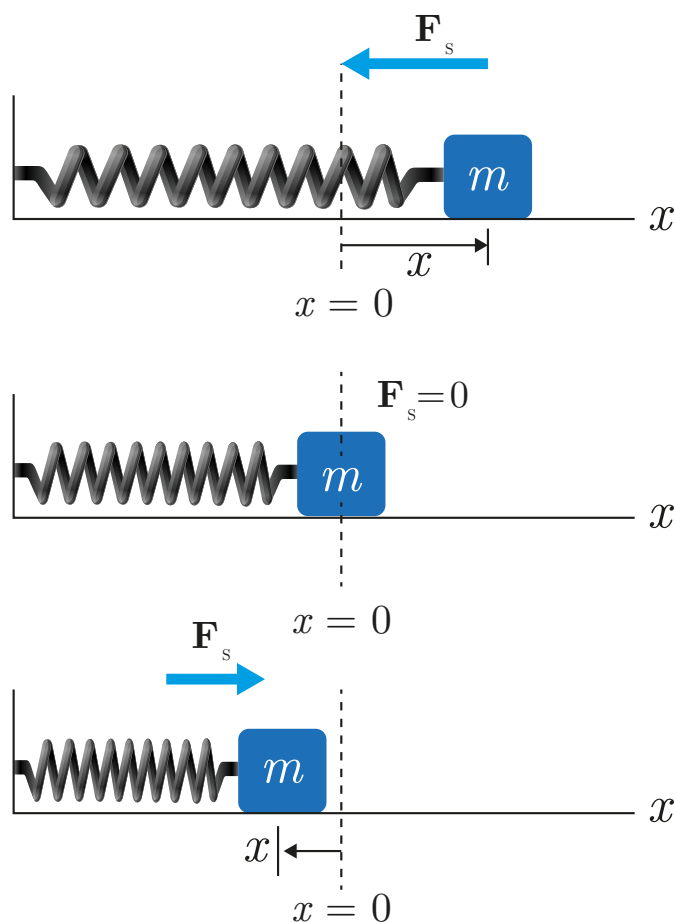


Figura 2. Para que haya un movimiento armónico debe de existir una fuerza de restitución que vaya en sentido contrario a la deformación.

En este caso, aplicamos la tercera ley de Newton, en donde la fuerza de acción sobre el resorte para deformarlo recibe en respuesta una fuerza de reacción por parte del resorte, de igual magnitud pero de sentido contrario.

$$\vec{F}_{acción} = -\vec{F}_{reacción}$$

Si relacionamos la fuerza de acción con

$$m\vec{a} = -k\Delta\vec{x}$$

Dado que la aceleración en el cambio de la velocidad con respecto al tiempo, la podemos expresar como la derivada de la velocidad respecto al tiempo.

$$m\vec{a} = -k\Delta\vec{x}$$

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -k\Delta\vec{x}$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{k}{m}\Delta\vec{x}$$

Haciendo $\frac{k}{m} = \omega^2$ nos queda :

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\omega^2\Delta\vec{x}$$

A su vez, la velocidad es la división del desplazamiento con respecto al tiempo. Por lo tanto, la aceleración es la segunda derivada de la posición x con respecto del tiempo. Donde a la letra griega omega ω se le conoce como la frecuencia angular.

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\omega^2\Delta\vec{x}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{d\Delta\vec{x}}{dt} \right) = -\omega^2\Delta\vec{x}$$

$$\frac{d^2\Delta\vec{x}}{dt^2} = -\omega^2\Delta\vec{x}$$

A esta ecuación se le conoce como una ecuación diferencial y su resolución implica conocimientos sobre cálculo por encima del alcance del cálculo de bachillerato. Su solución es:

$$\Delta x = A \text{ Sen}(\omega t + \phi)$$

Donde ϕ es la fase, es decir lo atrasado o adelantado que quedó la función seno. Podemos probar que se trata de una solución porque al sustituir en la ecuación se cumple con la igualdad.

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \vec{\Delta x}}{dt^2} &= -\omega^2 \vec{\Delta x} \\ \frac{d^2}{dt^2} (A \text{ Sen}(\omega t + \phi)) &= \frac{d}{dt} (A \omega \text{ Sen}(\omega t + \phi)) \\ &= \omega^2 \overbrace{A \text{ Sen}(\omega t + \phi)}^{\vec{\Delta x}} = \omega^2 \vec{\Delta x} \end{aligned}$$

Por lo tanto, el movimiento armónico simple se puede relacionar con una función cíclica, en este caso al seno.

Si ingresamos esta ecuación a la graficadora en línea GeoGebra y variamos un poco los términos de la amplitud A , la frecuencia angular ω y la fase ϕ , podemos observar lo siguiente:

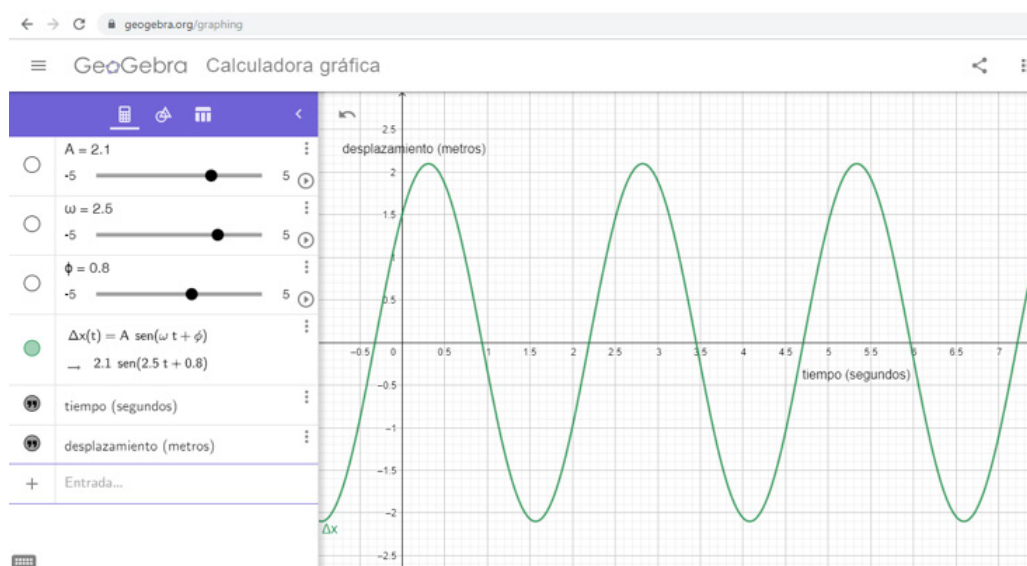
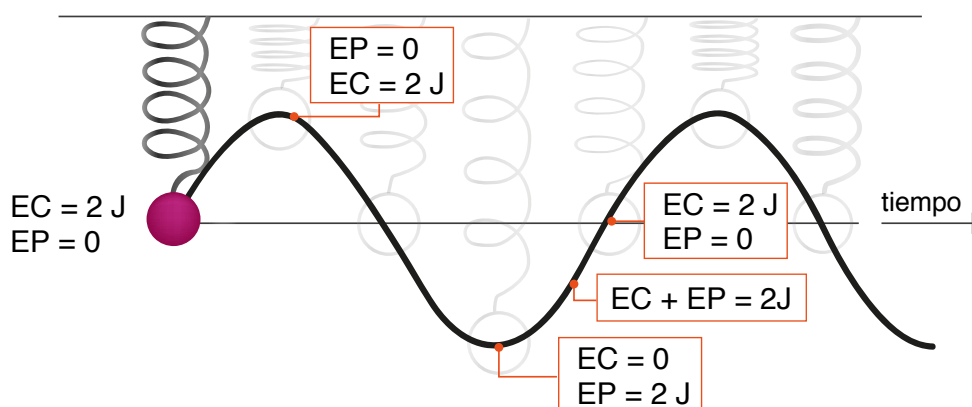


Figura 3. Gráfica de la amplitud en función del tiempo de un oscilador armónico.

El valor de A corresponderá al valor máximo del desplazamiento, a lo que se define como **amplitud** y la constante ϕ adelanta o retrasa el punto de comienzo de la función. Al aumentar la variable ω la función se compacta horizontalmente, lo que significa en un aumento de la frecuencia y viceversa. Dado que la variable ω es directamente proporcional del valor de la constante k e inversamente proporcional del valor de la masa m . Una mayor dureza del resorte se verá reflejada en una mayor frecuencia y una mayor masa la disminuirá.

La energía es una cantidad que se conserva y será la misma todo el tiempo en la oscilación. La energía potencial será máxima en los puntos de máxima deformación y la energía cinética lo será cuando la masa cruce por el punto de equilibrio.



Los números en el diagrama asumen que se gastaron en 2 joules para poner la masa en movimiento. La suma de las energías cinética y potencial deben dar siempre un total de 2 J, despreciando la disipación.

Figura 4. Energía cinética y potencial en el movimiento armónico.

Finalmente, dado que la frecuencia angular se mide en radianes sobre segundo y la frecuencia se mide en ciclos sobre segundos, podemos relacionar ambas variables de la siguiente manera:

$$\left(\frac{\cancel{\text{rad}}}{\text{s}}\right) \left(\frac{\text{ciclos}}{2\pi \cancel{\text{rad}}}\right) = \frac{1}{2\pi}$$

Por lo que ese será el factor por el cual se tiene que multiplicar la frecuencia angular para obtener la frecuencia ordinaria. De la definición de ω^2 , tenemos que:

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Por lo tanto, la frecuencia y la frecuencia angular se pueden relacionar de la siguiente manera:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Como el periodo es el inverso de la frecuencia:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}} = \frac{1}{\frac{1}{2\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{k}{m}}}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

1.3. El péndulo

Cuando vas al parque, uno de los juegos mecánicos que seguramente utilizas es el columpio, el cual en este caso se trata de un movimiento que se repite. La forma de usarlo es simple, te sientas en la silla, te agarras de las cadenas laterales mientras otra persona te impulsa.

Observa en la siguiente imagen cómo actúa la gravedad para evitar que te caigas, representada por la flecha color rosa y sus componentes (recuerda que el peso es igual a la masa por la gravedad), así como la trayectoria curva que se forma con el movimiento.

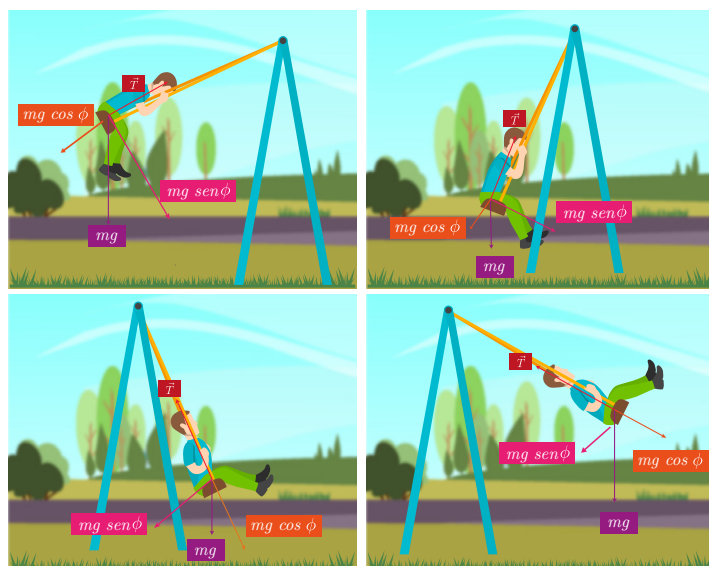
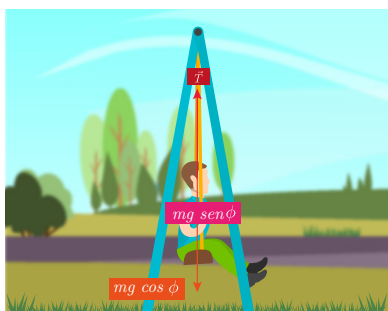


Figura 5. Fuerzas causantes de la oscilación de un columpio.

Un péndulo consta de un punto fijo, en el caso particular del columpio es donde se fija el par de cadenas, también de un hilo inextensible (las cadenas), es decir, que no se estira con la fuerza que ejerce la gravedad y la masa puntual situada en el extremo inferior (tú). Los columpios no chocan entre sí porque se mueven en un solo plano.

Con base en estos elementos podemos decir que un **péndulo** está constituido por un **hilo inextensible** de masa despreciable¹, sostenido por su extremo superior de un **punto fijo**, con una **masa puntual** sujeta en su **extremo inferior**, la cual **oscila libremente** en un **plano vertical fijo** (figura 6).

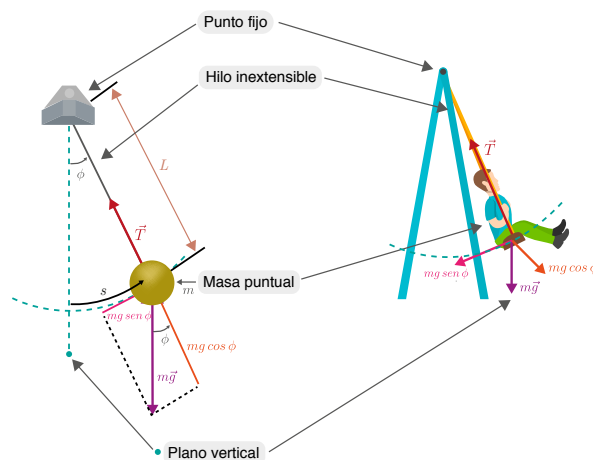


Figura 6. Componentes de fuerza en el movimiento de un columpio y que corresponden a un péndulo.

Otro ejemplo del péndulo es el péndulo de Foucault el cual visualiza la inclinación de la Catedral Metropolitana de la Ciudad de México y registra el esfuerzo que es hecho para invertir el hundimiento.



Un péndulo de Foucault es un péndulo esférico que puede oscilar libremente en cualquier plano vertical y capaz de realizarlo durante mucho tiempo (horas). Se utiliza para demostrar la rotación de la Tierra. Se llama así en honor de su inventor, Léon Foucault.



Figura 7. Péndulo de Foucault.

¹ El término despreciable se utiliza en la ciencia para indicar que algo no es un factor relevante.

1.4. La amplitud, frecuencia, periodo y fase

En todo movimiento armónico simple podemos distinguir los siguientes elementos:

- Qué tanto se alejan los valores medidos del punto de equilibrio (amplitud).
- Los ciclos que completa por unidad de tiempo (frecuencia).
- Los radianes por segundos que tiene una oscilación (frecuencia angular). Se relaciona con la frecuencia con la ecuación $\omega = 2\pi f$
- El tiempo que tarda en completar un ciclo (periodo). Es el inverso de la frecuencia.
- Qué tanto se adelanta la onda en el tiempo (la fase).

Toda esta información se ve reflejada en la ecuación como sigue:

$$\begin{array}{c} \text{Deformación} \\ \downarrow \\ \Delta x = A \operatorname{Sen} (\omega t + \phi) \\ \uparrow \qquad \qquad \qquad \uparrow \qquad \qquad \qquad \uparrow \\ \text{Amplitud} \qquad \qquad \text{Frecuencia angular} \qquad \text{Fase} \\ \text{(radianes/segundo)} \end{array}$$

Figura 8. Componentes de la ecuación del desplazamiento en función del tiempo en un movimiento armónico.

Recuerda que esta función relaciona a la deformación, por lo que las gráficas obtenidas tendrán al tiempo t en su eje horizontal y a la deformación Δx en su eje vertical.

Veamos por separado cada uno de los términos.

1.4.1 Amplitud

Si se tiene un oscilador armónico simple como el mostrado en la figura 9 observamos que se tiene un desplazamiento máximo. A ese desplazamiento se le llama **amplitud** y se representa por la letra mayúscula A .

En el caso de la gráfica del movimiento armónico simple podemos ver la diferencia entre dos oscilaciones, una de amplitud 1 y otra de amplitud 2. La amplitud nos dará el máximo valor del desplazamiento.

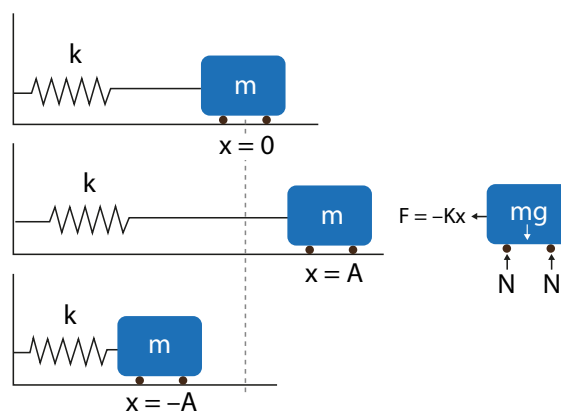


Figura 9. Amplitud de un movimiento armónico simple.

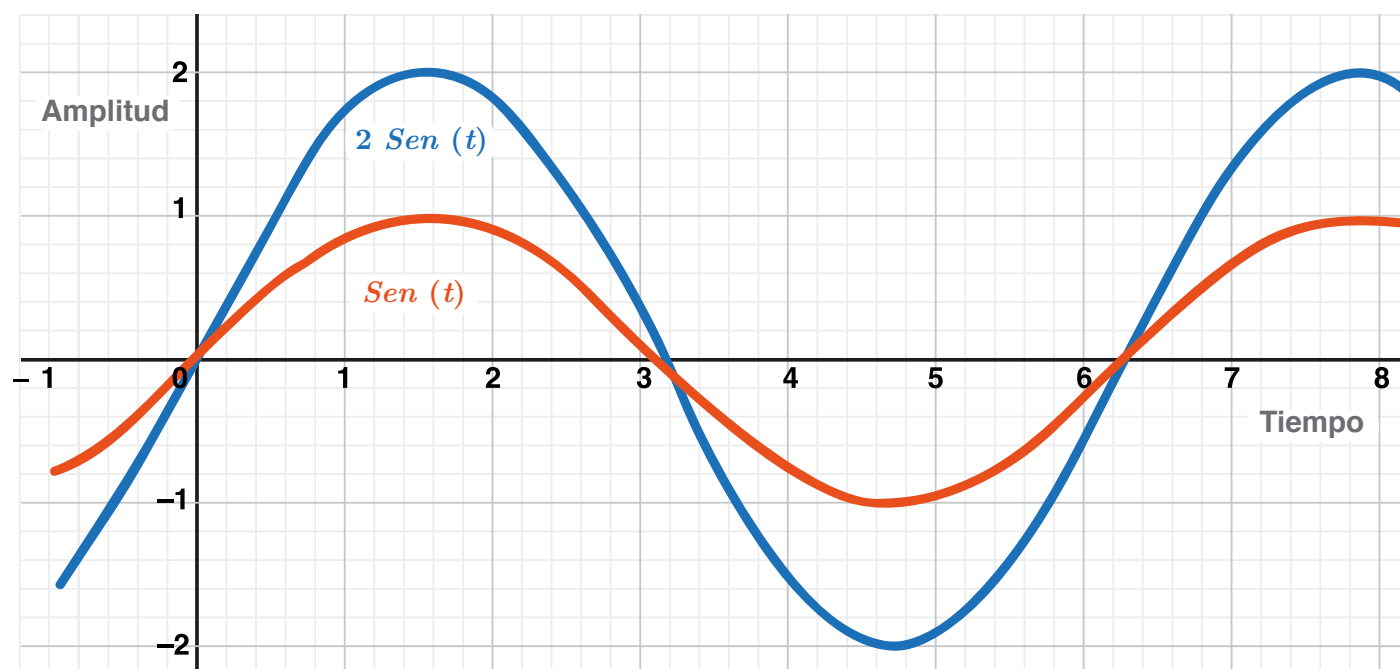


Figura 10. Efecto del cambio de la amplitud en la gráfica de posición contra tiempo en un movimiento armónico.

1.4.2 Frecuencia angular

La frecuencia angular ω está relacionada con la frecuencia de los ciclos en este movimiento. Podemos observar que aumentar su valor se verá reflejado en una función seno más compacta.

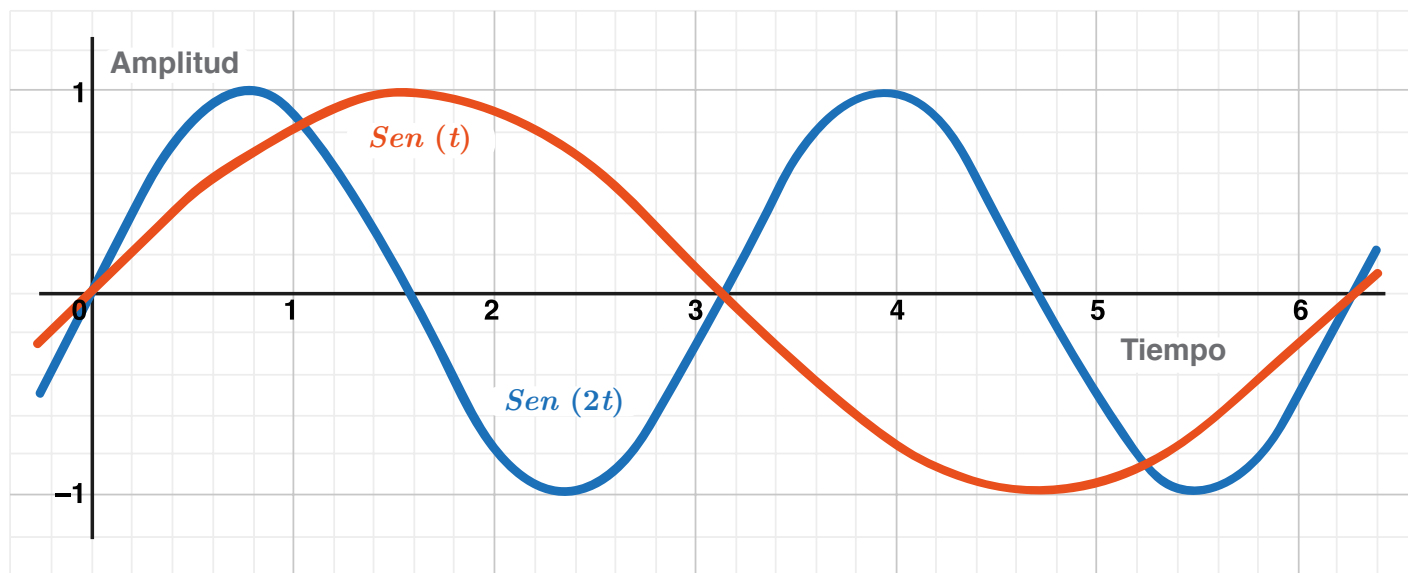


Figura 11. Efecto del cambio de la frecuencia angular en la gráfica de posición contra tiempo en un movimiento armónico.

1.4.3 Periodo

Su símbolo es la letra mayúscula T , y es el inverso de la frecuencia.

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

Como

$$\omega = 2\pi f \Rightarrow f = \frac{\omega}{2\pi}$$

Por lo tanto, se puede relacionar con la frecuencia angular por la siguiente ecuación:

$$T = \frac{1}{\frac{\omega}{2\pi}} = \frac{2\pi}{\omega}$$

En una gráfica de amplitud contra tiempo, podemos identificar al periodo como el tiempo en se completa un ciclo, que se puede medir como la distancia que hay entre cada dos intersecciones con el eje del tiempo. Por ejemplo, la siguiente gráfica corresponde a una oscilación con un periodo de 2 segundos.

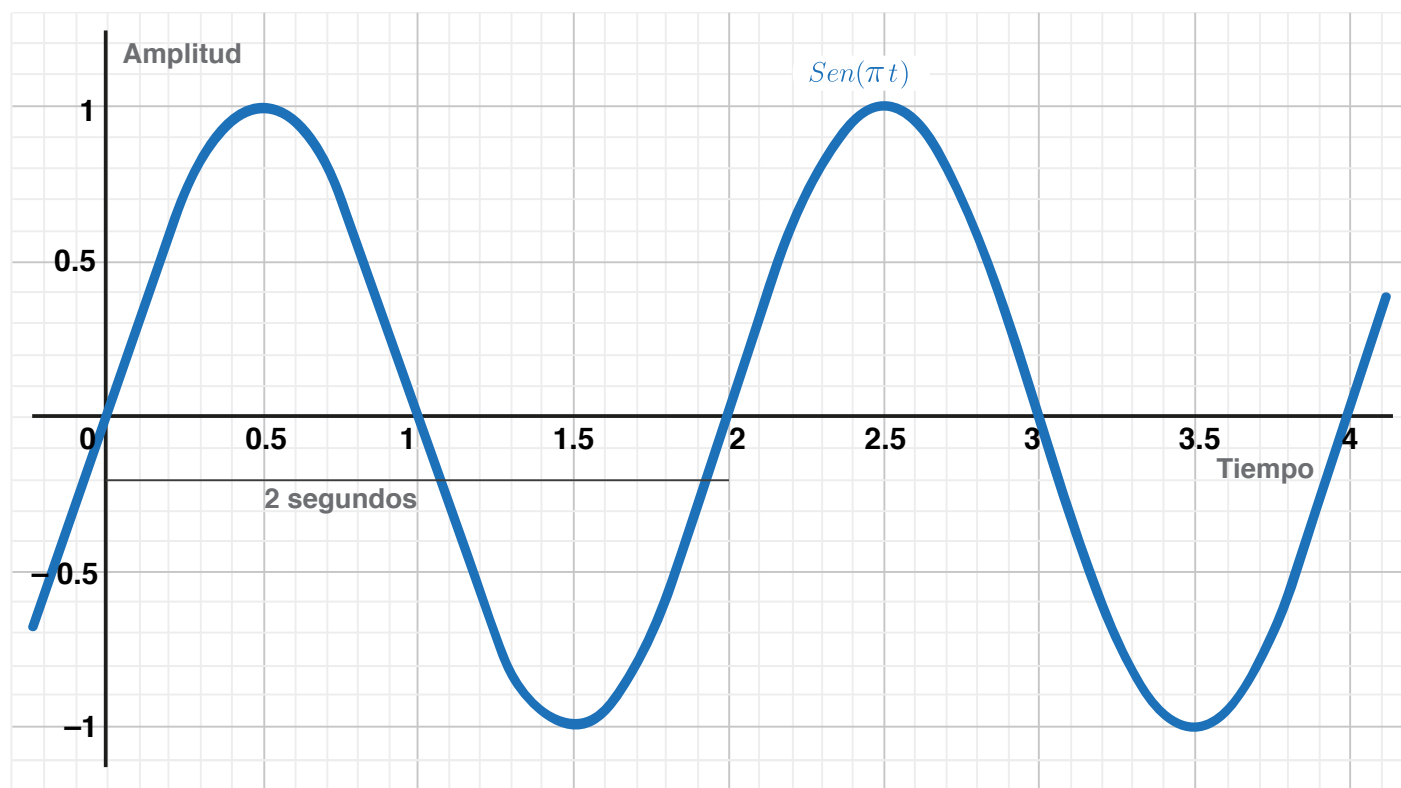


Figura 12. Medición del periodo en la gráfica de posición contra tiempo de un movimiento oscilatorio.

Una vez obtenido el periodo, podemos obtener la frecuencia con el inverso de ese valor. En la gráfica anterior su frecuencia sería.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2s} = 0.5Hz$$

1.4.4 Fase

La fase está representada en la ecuación por la letra griega ϕ (phi). Es el valor que se suma dentro del valor que obtenemos del seno. En la siguiente gráfica podemos observar que al sumar un valor de $\pi/2$ a la gráfica en azul se adelanta respecto a la gráfica en rojo.

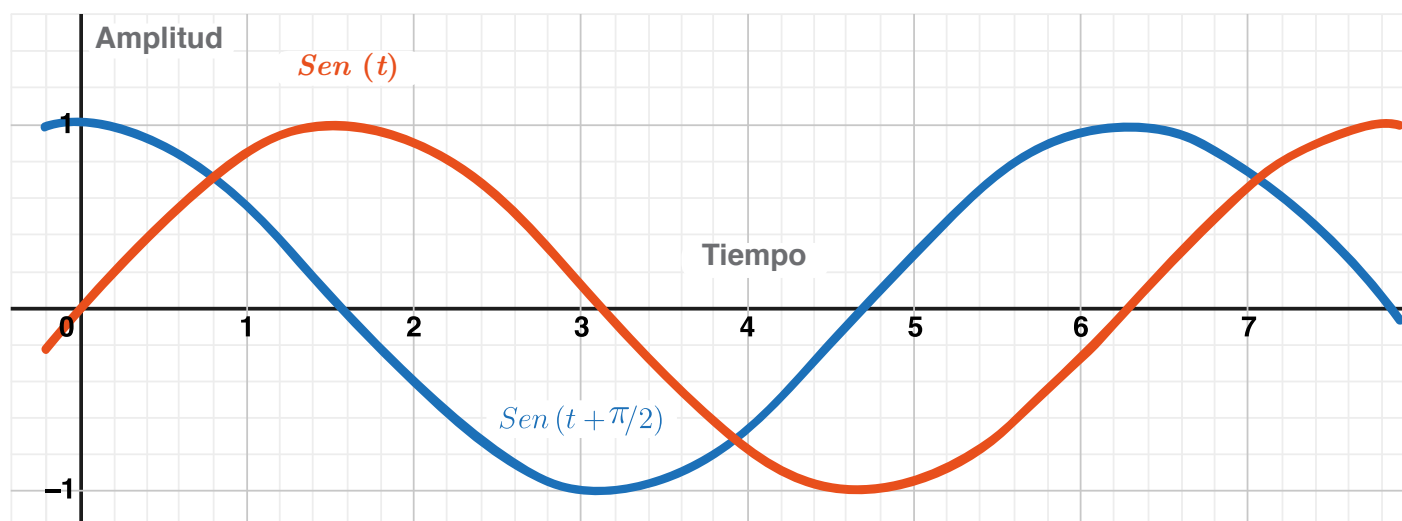


Figura 13. Efecto del cambio de la fase en la gráfica de posición contra tiempo en un movimiento armónico.



Para saber más...

Para comprender mejor el tema, visualiza el siguiente video desde el comienzo hasta el minuto 8, que te mostrará de manera clara cada uno de los componentes de esta ecuación. El resto del video tiene que ver con el tema 2: Ondas mecánicas.

<https://www.youtube.com/watch?v=rKf92Vgx2ag&t=206s>

2. Ondas mecánicas

En la naturaleza tenemos dos formas de transmitir energía: por **partículas** y por **ondas**. Las primeras consisten en transmitir energía a través de la energía cinética de las partículas que pasan de un lugar a otro, por ejemplo, si un jugador patea una pelota de fútbol y anota gol, la red recibirá esa energía que dependerá de la masa y la velocidad del balón. En el caso de las ondas, se transmite energía sin propagarse materia. Por ejemplo, yo escucho a otra persona que me habla, la energía pasa de sus cuerdas vocales al aire y del aire a mi tímpano, sin embargo, eso no implica que esté saliendo aire de su garganta y esté entrando por mi oído. En el primer caso la masa se transmite, en el caso de las ondas únicamente se transmitirá la energía.

Uno de los campos de estudio más importantes en física son los fenómenos ondulatorios. Estos fenómenos los podemos observar en la naturaleza, por ejemplo, en las olas del mar, en las ondas sonoras producidas al tocar algún instrumento, en los terremotos, etc. y lo más importante, es que todos los fenómenos de este tipo comparten una periodicidad, es decir, algún patrón repetitivo, el cual propaga energía y la materia del medio oscila en su posición de equilibrio. A la perturbación que se propaga se le conoce como onda.

2.1. Características de las ondas mecánicas

Las ondas mecánicas requieren de un medio material para propagarse, así como la elasticidad del medio, es decir, la propiedad que hace que regrese a su estado de equilibrio influirá en el modo y eficiencia con que se propaga la onda.



Figura 14. Direcciones de oscilación y propagación.

Además de esta elasticidad, influyen en la onda otros factores, por ejemplo, una cuerda atada a un poste de un extremo y por el otro, sostenida por una persona la cual le produce perturbaciones con el movimiento de la mano de arriba hacia abajo.

Si esas perturbaciones se propagan hacia la derecha (suponiendo que la cuerda está atada del lado izquierdo), podemos afirmar entonces que la dirección de propagación de la onda es a la derecha. Asimismo, la cuerda oscila de arriba hacia abajo, por lo que la dirección de oscilación de la cuerda es en ese mismo sentido.

2.1.1 Magnitudes de una onda

En general, las ondas tienen sus propios elementos que las caracterizan, los cuales se pueden observar en la siguiente figura:

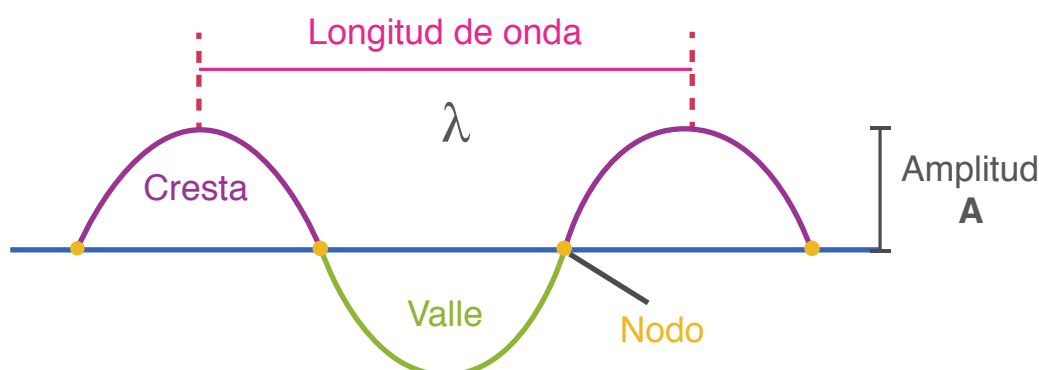


Figura 15. Elementos de una onda.

La parte más alta de una onda se le llama **cresta**, mientras que la **amplitud** es la distancia vertical entre una cresta y el punto medio de la onda.

Otro elemento importante de una onda es la **frecuencia**, la cual se define como el número de oscilaciones por unidad de tiempo que ocurren en una onda. Cuando esta unidad de tiempo es de un segundo, la unidad correspondiente de la frecuencia son los Hertz, y el tiempo en el cual se completa un ciclo se le llama **periodo**, el cual es el inverso de la frecuencia. Imagina, por ejemplo, una frecuencia de 10 Hertz, esto significa que cada ciclo tarda 1/10 de segundo.

Cuando se observa una onda en el espacio podemos ver un patrón que se repite puesto que diversos puntos

en el espacio se encuentran en la misma posición, moviéndose en la misma dirección, además de que estos puntos están separados entre sí a una distancia constante. Dicha distancia es llamada **longitud de onda**.

Finalmente, el **valle** es el punto más bajo de una onda, mientras que el **nodo** es el punto donde la onda cruza la línea de equilibrio.

La velocidad a la que los pulsos se propagan dependerá de características del medio como la densidad o elasticidad, a esta velocidad se le conoce como **velocidad de propagación** de la onda, la cual permanecerá constante si se propaga en un medio que no cambie sus propiedades.

Al ser constante la velocidad, la longitud de onda estará dada por lo que recorre la onda antes de completar un ciclo, es decir, la velocidad de propagación multiplicada por el periodo de la onda. Esto es:

$$\lambda = f \cdot T$$

Al despejar la velocidad, y considerando que $1/T$ es la frecuencia, tenemos que:

$$v = f \cdot \lambda$$

2.1.2 Reflexión de una onda

Si alguna vez has estado en un lugar aislado enfrente de un cerro o una gran pared quizá hayas presenciado el fenómeno del eco. Este fenómeno consiste en que cuando gritas un sonido o una palabra hacia dicha barrera, lo escucharás de regreso, esto sucede debido a que la energía de las ondas que no haya sido absorbida será rebotada y el mismo sonido que emitiste lo estarás escuchando de regreso.

Esta característica de las ondas tiene varias aplicaciones. En el caso de los barcos se le conoce como sonar (del inglés SONAR, acrónimo *Sound Navigation And Ranging*, 'navegación por sonido') y les permite navegar, comunicarse o detectar objetos sumergidos; consiste en emitir un sonido y medir el tiempo en que tarda en regresar. A partir del tiempo medido y la velocidad del sonido en el medio se puede calcular la distancia recorrida por el sonido y, por lo tanto, la distancia a la que se encuentran los objetos detectados. En el caso de los radares, fue una tecnología determinante para que la fuerza aérea británica pudiera derrotar la llamada "batalla de Inglaterra".



Figura 16. Elementos presentes en el eco.

En la naturaleza vemos también presente este fenómeno, los murciélagos son capaces de volar en la oscuridad, ya que de manera similar al radar de un barco emiten ondas de alta frecuencia y a partir de los tiempos que tarda en escuchar su eco se ubican en el espacio.

2.2. Ondas longitudinales y transversales

Si comparamos las direcciones de propagación y de oscilación, notaremos que son perpendiculares, y a las ondas que tienen este comportamiento se les llama **ondas transversales**, ya que la onda se propaga en dirección transversal a la dirección de oscilación.

Si ahora analizamos la onda de un resorte, en donde la perturbación se genera moviendo un resorte de atrás hacia adelante, podemos observar que la onda se propaga a la derecha mientras que la dirección de oscilación del medio es paralela a la dirección de propagación. A este tipo de ondas se les llama **ondas longitudinales**.

En la siguiente figura, podemos visualizar la diferencia entre estas ondas

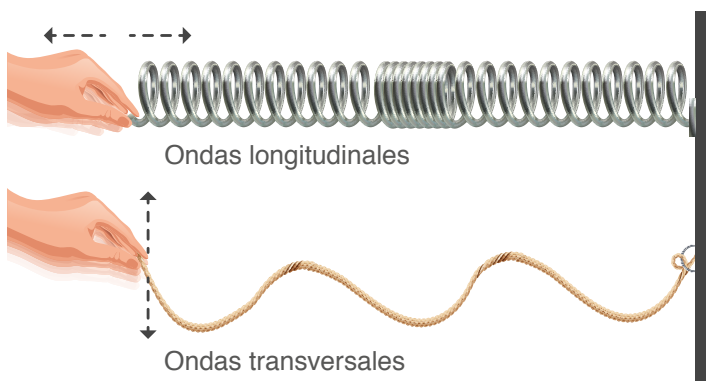


Figura 17. Ondas transversales y longitudinales.

2.3. Suma de ondas

Cuando dos ondas mecánicas ocupan el mismo espacio, éstas interfieren entre sí, es decir, suman sus amplitudes. De esta manera si ambas ondas en un punto presentan una perturbación del medio en el mismo sentido, a lo que se llama “estar en fase”, se obtendrá una interferencia constructiva. En caso contrario, si las perturbaciones van en sentidos opuestos en el mismo punto, que se llama “estar desfasadas”, la suma de ambas ondas creará una de menor amplitud, es decir una interferencia destructiva. Es importante distinguir que nos referimos al movimiento individual del medio, por ejemplo, una molécula de aire una sección de la cuerda, el cual no se desplaza, sólo está oscilando, no al movimiento de la onda que sí se desplaza.

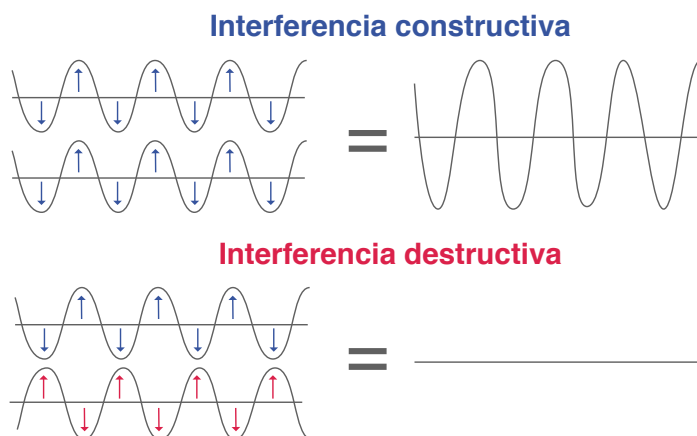


Figura 18. Interferencia constructiva y destructiva.

2.4. Ondas periódicas y estacionarias en la naturaleza

¿Por qué en ciertas zonas como en la Ciudad de México los terremotos parecen ser más destructivos? ¿Por qué las cuerdas de una guitarra requieren estar apretadas con cierta tensión para poder generar el tono correcto? ¿Por qué las guitarras requieren de ese espacio hueco? ¿Qué pasa si no lo tienen?

Este fenómeno se debe a un proceso llamado **resonancia** y consiste en una oscilación que se va retroalimentando y aumentando su amplitud. Para ejemplificar lo anterior veamos el caso de un columpio.

Si empujas a alguien en un columpio sabes que los impulsos que hagas para que la oscilación se incremente deben hacerse en periodos fijos. Dado que la frecuencia es el inverso del periodo, entonces la frecuencia de los impulsos también deberá ser constante. A esa frecuencia que hace que la oscilación se amplifique se le llama **frecuencia de resonancia**.



Frecuencia de resonancia: es aquella caracterizada de un cuerpo o un sistema que alcanza el grado máximo de oscilación.

Algo parecido pasa con las construcciones sobre el suelo de la Ciudad de México, dado que se encuentra sobre una base lodosa. La frecuencia de vibración del suelo coincide con la frecuencia de vibración que suelen tener los temblores, lo que hará, como en el caso del columpio, que la vibración se amplifique.

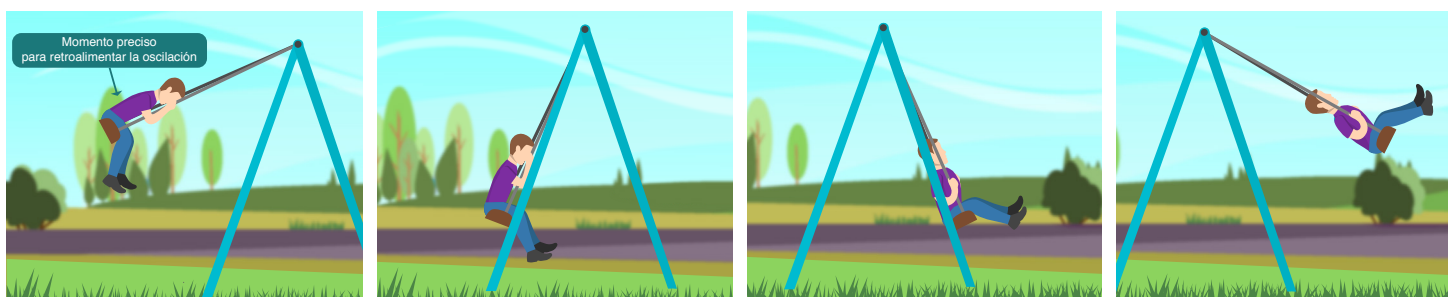


Figura 19. Resonancia en un columpio.

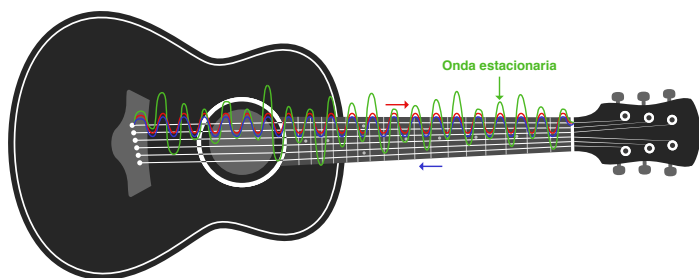


Figura 20. Cuerda de guitarra.

Para el caso de las cuerdas de guitarra y de la caja hueca que traen consigo debemos entender primero el concepto de **onda estacionaria**. Para una cuerda de guitarra que está atada por ambos extremos, cuando una onda llega al extremo y no tiene dónde disipar su energía, ésta rebota y al hacerlo dependerá de la fase en la que esté, con las ondas que siguen llegando para que produzcan interferencia constructiva o destructiva. En el caso de que no estén en fase (que ambas no se deformen en la misma dirección) la interferencia será destructiva y la onda se cancelará. De tal manera que si se encuentran en la misma fase, la interferencia será constructiva y la onda se amplificará.

Por este motivo en una guitarra sólo ciertas frecuencias producirán ondas estacionarias y éstas son las que quedarán, a ese tipo de frecuencias se les llama armónicos o sobretonos.

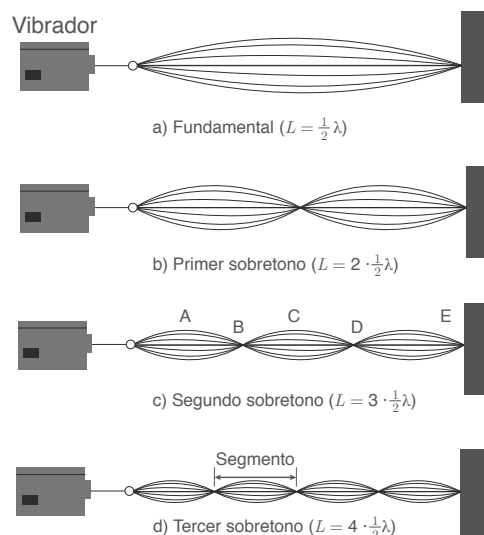


Figura 21. Sobretonos (armónicos) presentes en una onda estacionaria (Bueche, 2001).

Nota: Los puntos B y D, son llamados nodos; los puntos A, C y E son llamados antinodos.

La distancia entre nodos será la mitad de la longitud de onda.



Tip de aprendizaje

Puedes observar cómo la frecuencia de resonancia es distinta dependiendo de la masa y de la constante elástica del resorte con el siguiente simulador:

https://phet.colorado.edu/sims/resonance/resonance_es.html

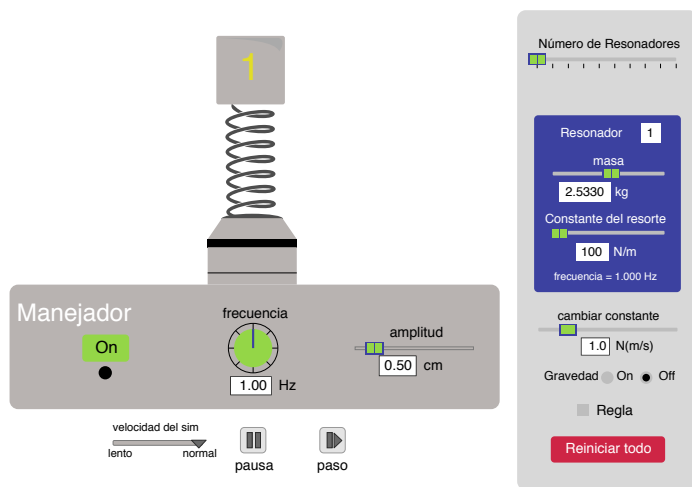


Figura 22. Simulador sobre resonancia.

Nota: Mueve el cursor que dice “Número de Resonadores” a 10 y la amplitud a 2 cm.

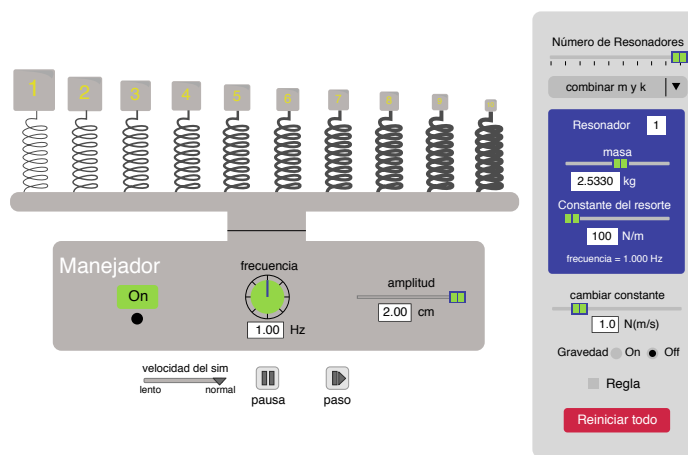


Figura 23. Simulador sobre resonancia con distintas combinaciones de masa y constantes elásticas de los resortes.

Nota: Haz clic en el botón que dice On y comienza a variar la frecuencia lentamente para que encuentres la frecuencia de resonancia de cada caso.

3. Sonido

¿Alguna vez has escuchado la frase “ondas de sonido”? ¿Qué relación tiene el sonido con las ondas? Si el sonido es una onda, ¿cómo se da el proceso de deformación y propagación? En este tema estudiaremos el sonido desde el punto de vista de una onda mecánica, conoceremos sus propiedades y la relación con éstas.

3.1. El sonido como onda mecánica

El estudio de las ondas comenzó con el estudio del sonido. Primeramente, Robert Boyle, en 1660, concluyó que el sonido requiere de un medio para propagarse, en este caso, el aire. Sin embargo, fue Isaac Newton quien, en 1687, realizó el primer tratamiento del sonido y demostró que la propagación del sonido en cualquier fluido sólo depende de propiedades físicas, además de que calculó teóricamente la velocidad del sonido. Posteriormente, en 1861, el físico inglés Robert Hooke demostró por primera vez la relación entre el tono de sonido escuchado y la frecuencia de vibración de la fuente.

¿Qué es lo que ocurre en el sonido? Esto es similar a lo que sucede en una onda transversal en un resorte, cuando se mandan “empujones” periódicos sobre el resorte hay zonas de donde se comprime (compresión) y zonas donde se expande (rarefacción).

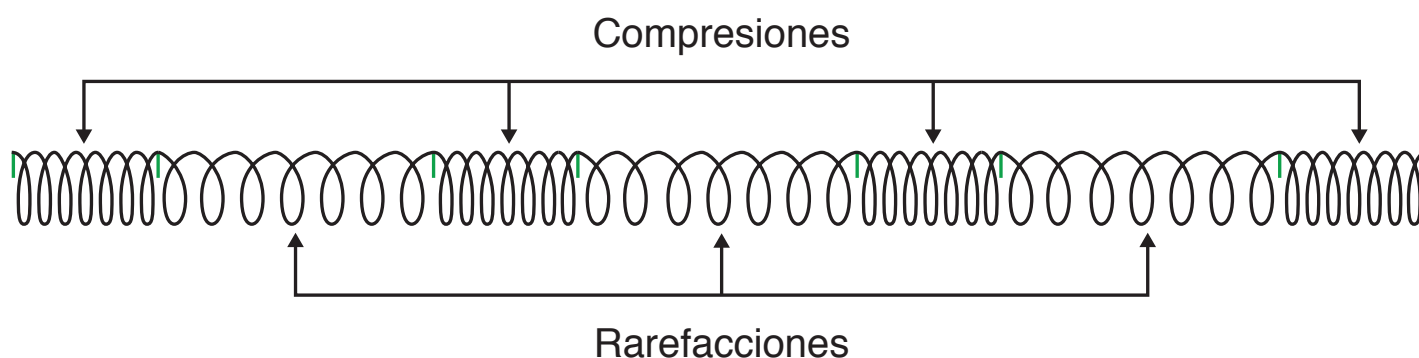


Figura 24. Zonas de compresión y rarefacción en un resorte.

En el aire sucede algo similar, se producen zonas de alta y baja presión que se van propagando por el mismo aire.

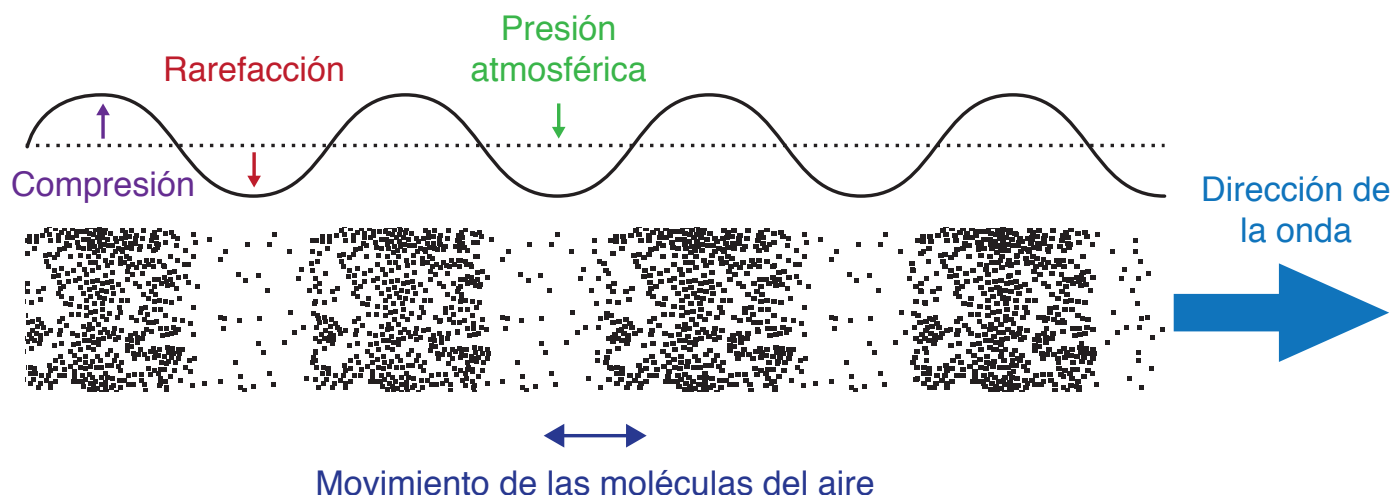


Figura 25. Zonas de compresión y rarefacción en una onda de sonido en aire.

El sonido, al igual que cualquier onda mecánica, requiere de un medio material para propagarse. Como cualquier onda mecánica, la velocidad del sonido depende del tipo de material en el cual se propaga, en los sólidos tiene mayor velocidad que en los líquidos, y en los líquidos es más veloz que en los gases, ya que las partículas en los sólidos están más cercanas. En el aire, el sonido tiene una velocidad de 331.5 m/s cuando la temperatura es de 0 °C. En el aire, la velocidad del sonido aumenta con la temperatura pues el aire se comporta de manera más elástica. Si la temperatura ambiente es de 15 °C, la velocidad de propagación del sonido es de **340 m/s**. A esta velocidad se le conoce como **1 match**.

3.2. Conceptos y ejemplos de tono y timbre

Tono

¿Has notado que en un instrumento musical como una guitarra se consiguen tonos más agudos, cuando la distancia entre el punto donde presionas la cuerda contra un traste y el punto donde se rasga es más pequeño? Lo mismo pasa con el arpa y con el resto de instrumentos, tonos más agudos requieren longitudes de vibración más cortas.

Lo que sucede en todos estos casos es que estamos reduciendo la longitud de la onda. Dado que la longitud de onda y la frecuencia son inversamente proporcionales, al disminuir la longitud de onda λ la frecuencia f aumentará.

$$\uparrow f = \frac{v}{\downarrow \lambda} \rightarrow \text{Constante}$$



Figura 26. En un instrumento de cuerdas, los tonos más agudos se obtienen con cuerdas más cortas y los tonos más graves con cuerdas más largas.

La velocidad de una onda depende sólo de las propiedades elásticas del medio, por lo que si el medio no cambia, es constante. La frecuencia por tanto será inversamente proporcional a la longitud de onda, es decir, las ondas de mayor frecuencia serán más cortas.

Esto significa que las ondas más cortas relacionadas con tonos más agudos corresponden a frecuencias más altas. De manera análoga, las longitudes de onda largas están relacionadas con los tonos graves y con frecuencias más bajas.

Los seres humanos sólo podemos escuchar sonidos en cierto rango de frecuencia (de 20 a 20,000 Hz en un humano con oído perfectamente sano). No todas las personas percibimos con la misma intensidad, siendo las frecuencias de los valores extremos a los que somos menos sensibles. El rango de frecuencias al cual somos sensibles depende de la edad, al pasar los años se deterioran las células capilares del órgano de Corti, lo que tiene como consecuencia que cada vez percibamos menos las frecuencias agudas. El exponerse a sonidos dañinos por tiempos prolongados puede acelerar esta pérdida.

El sonido audible se debe a que las oscilaciones de la presión del aire en una onda de sonido son transformadas por el tímpano en vibraciones mecánicas e interpretadas por el cerebro. El rango de sensibilidad explica por qué podemos escuchar a un mosquito cuando es tan pequeño, pero en el caso de un sonido muy grave sentimos más el golpe sobre el cuerpo que el sonido por sí mismo. Para el caso de frecuencias mayores o menores al rango audible, las vibraciones se producen, pero el cerebro ya no es capaz de interpretarlas.

Timbre

¿Por qué si dos instrumentos distintos tocan la misma nota, se puede distinguir uno de otro? Resulta que cuando tocamos un instrumento lo que escuchamos son las ondas estacionarias que se forman dentro del mismo. Del tema de las ondas estacionarias podemos recordar que no sólo puede prevalecer una sola frecuencia, sino que los sobretonos o armónicos también van a conservarse, pero no todos igual de intensos. El sonido que escuchamos lo percibimos como una sola onda, sin embargo, el timbre dependerá de la cantidad de armónicos que tenga un sonido y de la intensidad de cada uno de ellos.

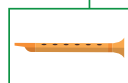
Por ejemplo, un *La* de 440 Hz emitido por una flauta es distinto al que emite una trompeta, aunque estén tocando la misma nota porque tienen distintos armónicos. En la flauta, los armónicos son pequeños en comparación con la trompeta, en ella los armónicos tienen una amplitud relativa mayor, por eso la flauta tiene un sonido suave, mientras que la trompeta tiene un sonido estridente.

Distintos timbres

Diapasón



Flauta



Voz



Violín

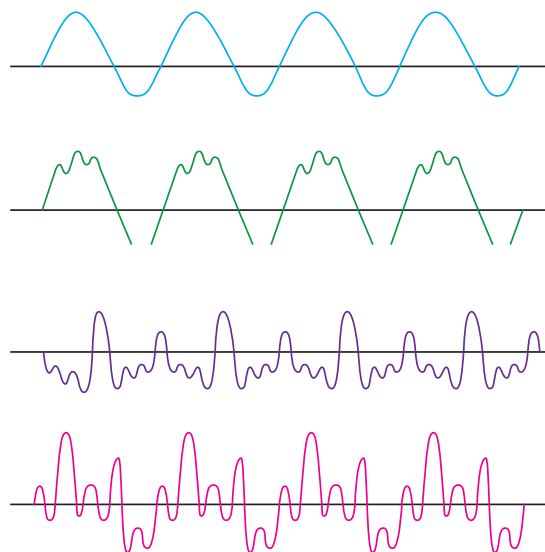


Figura 27. Distintas ondas pueden tener la misma frecuencia, sin embargo, las diferencias en la forma de la onda producirán que el sonido se escuche distinto.

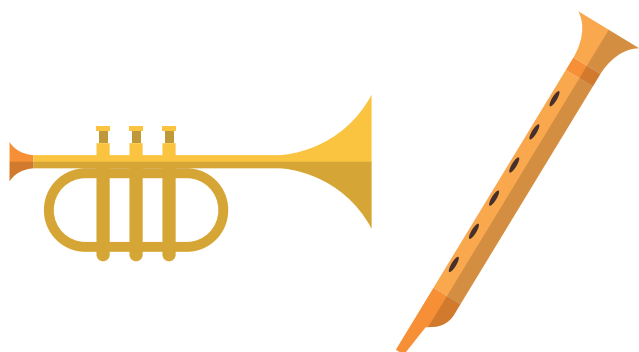


Figura 28. El timbre es la propiedad del sonido que hace que instrumentos distintos no se escuchen igual a pesar de estar tocando la misma nota.

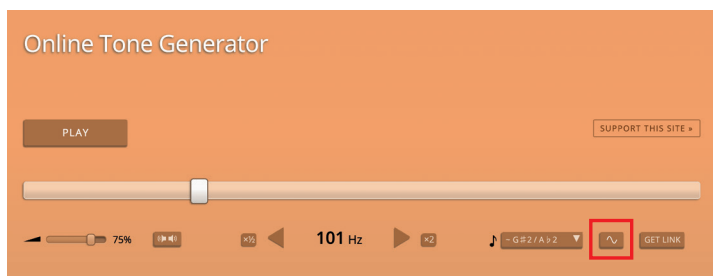


Figura 29. Generador de tonos. Entre más alta es la frecuencia más agudo es el tono y entre más baja, se escucha más grave.



Tip de aprendizaje

Para que te quede más claro la relación entre el tono, la frecuencia y el timbre te recomendamos usar el siguiente enlace. Debes tener bocinas o audífonos para poder usarlo. Para escuchar distintas frecuencias mueve el control horizontalmente, la frecuencia será el valor que aparece en la imagen como 101 Hz, pero lo puedes variar. Para cambiar el timbre bastará con cambiar la forma de la onda, para eso puedes seleccionar distintas ondas en el ícono que se encuentra encerrado en el recuadro rojo <https://www.szynalski.com/tone-generator/>



Para saber más...

Te recomendamos ver el siguiente video para comprender mejor sobre las propiedades del sonido:

<https://www.youtube.com/watch?v=xcHbm0vXFFE>

3.3. Conceptos y ejemplos de intensidad del sonido

Por lo visto en la unidad anterior, el sonido podemos entenderlo como una onda de presión que viaja a través del aire. Ahora compara estos dos casos: cuando se golpea un tambor y cuando explota un tanque de gas, ¿cuál de los dos crees que genere una mayor diferencia de presión en la onda que se propaga? En efecto, un sonido más estridente está relacionado con una mayor presión en la onda. En una onda de sonido la amplitud no está relacionada con la amplitud de la oscilación de las moléculas de aire, sino con la diferencia de presión entre la presión normal de la atmósfera y la presión existente en las zonas de compresión de la onda. **Una mayor amplitud producirá un sonido más intenso.**

La forma de medir esta amplitud, a diferencia de una onda en una cuerda o en un resorte que se mide en unidades de longitud, en el caso del sonido la unidad usada por el Sistema Internacional de Unidades (SI) es el watt sobre metro cuadrado $\frac{W}{m^2}$. El ser humano tiene la capacidad de escuchar sonidos a partir de $10^{-12} \frac{W}{m^2}$, en la frecuencia de máxima sensibilidad. Dado que el rango de intensidad que puede escuchar un humano sin sentir dolor es demasiado amplio, se usa una escala logarítmica que utiliza como referencia el umbral de audición humana, es decir, la intensidad mínima que puede percibir. La unidad más usada es el decibelio y su medida está dada por la siguiente fórmula:

$$B_{dB} = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$$

Donde B_{dB} es el volumen en decibelios, I es la intensidad registrada e I_0 es la mínima intensidad de sonido que puede percibir un ser humano. Los decibelios los podemos relacionar con las siguientes intensidades del sonido.

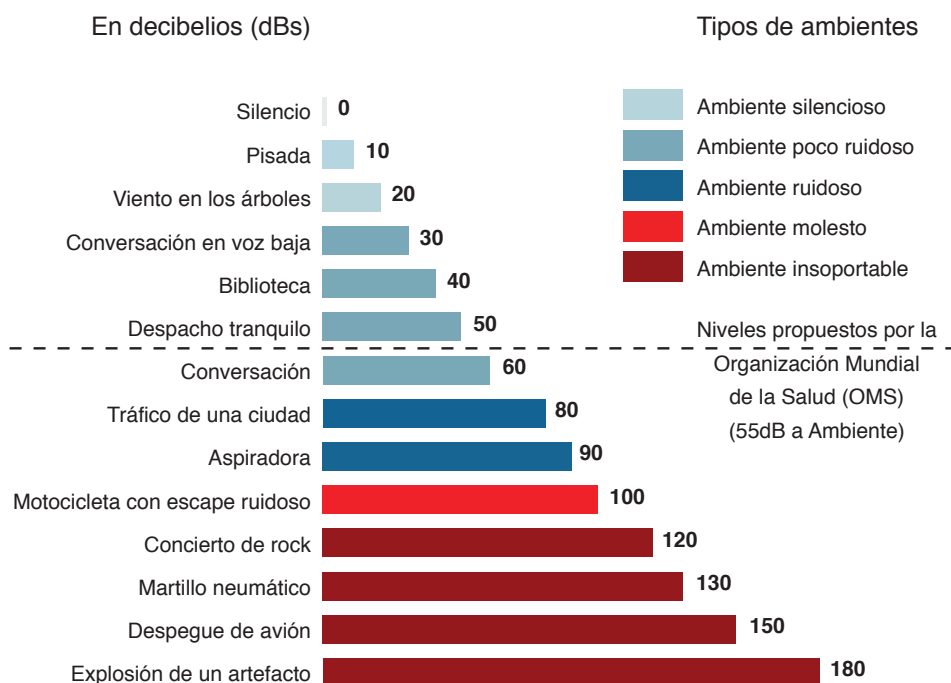


Figura 30. Gráfica que relaciona la intensidad del sonido en decibelios del sonido en distintas situaciones.

3.4. Ejemplos y aplicación de la transmisión del sonido en diferentes medios

La velocidad del sonido no depende del tono ni del timbre ni de la intensidad del sonido. El sonido de la explosión de una bomba viajará en el aire a la misma velocidad que el sonido emitido por una tecla de un piano, aunque la primera, al tener más energía llegará más lejos. Si la velocidad del sonido no fuera la misma para todos los sonidos, en un concierto las personas que se encuentran más alejadas terminarían escuchando una música desentonada, pues unos tonos llegarían antes que otros.

La velocidad de una onda mecánica es una característica única de las propiedades elásticas del medio, en el caso del audio, la elasticidad del aire se considera como 340 m/s a 15 °C. A esta velocidad se le conoce como **mach**. Algunas aeronaves alcanzan y superan esta velocidad, cuando sucede se produce una onda de choque debido a que la rapidez de la fuente de sonido es mayor que la rapidez de la propagación de las ondas en el medio, todos los frentes de onda quedan envueltos en un cono que acumula la presión de todas las ondas. Esta onda de choque tiene una potencia suficientemente alta como para romper algunos cristales. En el caso de un avión supersónico, cuando se supera la velocidad del sonido, el cambio de la presión ocasiona que el vapor de agua se condense en pequeñas gotitas y forme una pequeña nube alrededor de la aeronave.

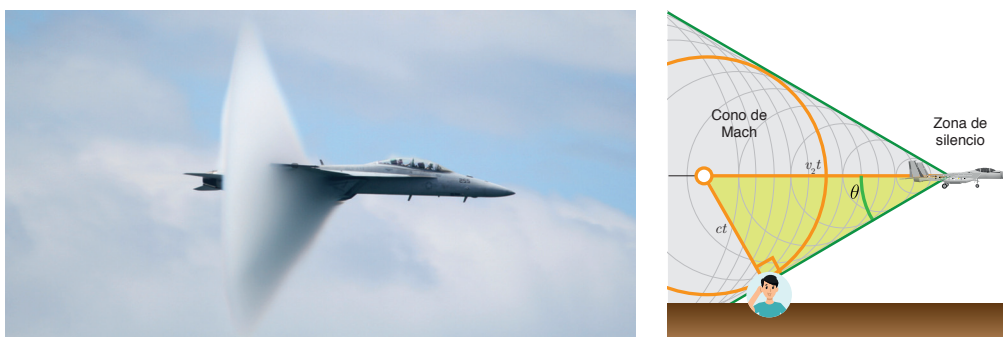


Figura 29. Onda de choque en un avión supersónico.

Para un medio más denso como el agua, la velocidad aumenta; para el agua dulce de 1,435 m/s y para el agua salada de 1,500 m/s. Esta gran velocidad en el agua les permite a cetáceos como las ballenas comunicarse a largas distancias, tanto como 180 km de distancia.

En el caso de los sólidos la velocidad es aún mayor, en el caso de los terremotos se calcula que la mayoría se propaga a unos 3 km/s, pero varía de acuerdo a las propiedades del suelo. En el caso de los metales alcanza 5,148 km/h para el acero.

Cierre

En esta unidad aprendiste sobre el movimiento armónico que sirve para describir fenómenos cíclicos en la naturaleza, así como las propiedades de este tipo de movimiento que explica fenómenos como la resonancia. Aprendiste además sobre las ondas mecánicas, que son las que requieren de un medio material para propagarse, y lo que caracteriza a estas ondas, como son la velocidad de propagación, frecuencia, amplitud y longitud de onda. Finalmente, estudiaste al sonido como una onda mecánica y aprendiste la relación que existe entre amplitud e intensidad, frecuencia y tono y forma de onda con timbre.



Para saber más...

Revisa el siguiente enlace sobre velocidades supersónicas:

http://laplace.us.es/wiki/index.php/N%C3%BAmero_de_Mach

Módulo 19

Dinámica en la naturaleza: el movimiento

UNIDAD IV

Ondas electromagnéticas



CONTENIDO EN EXTENSO



CONTENIDO

UNIDAD IV. Ondas electromagnéticas

Presentación	27
Propósito	27
Aprendizajes esperados	27
Punto de partida	27
1. Espectro electromagnético	28
1.1. Ondas electromagnéticas	29
1.2. Líneas espectrales y el modelo de Borh	30
1.3. El espectro electromagnético y la luz visible	32
1.3.1. Rayos cósmicos	32
1.3.2. Rayos gamma	33
1.3.3. Rayos X	33
1.3.4. Radiación ultravioleta	33
1.3.5. Luz visible	33
1.3.6. Radiación infrarroja	34
1.3.7. Microondas	34
1.3.8. Radio	34
1.4. Aplicaciones de las ondas EM con base en la longitud de onda	35
1.4.1. Rayos cósmicos	35
1.4.2. Rayos gamma	35
1.4.3. Rayos X	35
1.4.4. Radiación ultravioleta	35
1.4.5. Luz visible	36
1.4.6. Radiación infrarroja	36
1.4.7. Microondas	36
1.4.8. Radio	37

2. La óptica	37
2.1. La luz como parte del espectro electromagnético	37
2.2. Elementos necesarios para poder observar un objeto	38
2.3. Visión y color, sensación a ondas electromagnéticas de 400 a 700 nm	40
2.4. La reflexión y la refracción	41
2.4.1. Reflexión	41
2.4.1. Refracción	42
2.5. Espejos y lentes	43
2.5.1. Espejos	43
2.5.2. Lentes	47
Cierre	51
Fuentes	51



UNIDAD IV. Ondas electromagnéticas

Presentación

En esta unidad revisarás todo lo relacionado con las ondas electromagnéticas y mecánicas, a partir del análisis de las clasificaciones del espectro electromagnético y sus aplicaciones, en la luz visible, visión y su interacción al reflejarse o refractarse en espejos y lentes. A partir de ello, desarrollarás las competencias necesarias que plantea el perfil de egreso en la Educación Media Superior, es decir, que logres aplicar de manera efectiva tus conocimientos, habilidades y actitudes en situaciones o problemas concretos.

Propósito

Explicar los fenómenos electromagnéticos en la naturaleza.

Aprendizajes esperados

- Identifica a partir de los experimentos, que hay espectros continuos y discontinuos, así como el análisis de cada uno por medio de las restricciones algebraicas que implica el manejo de variables discretas y continuas.
- Compara ondas de luz y de sonido modelando el comportamiento de éstas como ondas y diferenciando entre las características de amplitud, periodo y fase.
- Clasifica diversas aplicaciones relacionadas con el espectro electromagnético con base en la longitud de onda o la frecuencia utilizada.
- Obtiene el espectro visible por dos procesos y lo relaciona con el funcionamiento del ojo humano de acuerdo con su geometría y al ángulo de incidencia de la luz a través de la pupila.
- Reconoce que el espectro visible es una pequeña parte del espectro electromagnético por medio del análisis de las longitudes de onda que pueden reconocer los conos y bastones del ojo humano.
- Relaciona la percepción del color con la sensibilidad de los conos al azul, verde y rojo de acuerdo con la longitud de onda de cada espectro luminoso.
- Comprende el modelo físico de visión y relaciona el ángulo de incidencia de un haz de luz con la trayectoria que éste sigue al pasar por los focos de las diferentes cónicas.

Punto de partida

¿Por qué primero se observa un rayo y después se escucha el relámpago? ¿Por qué el cielo es azul? ¿Por qué los colores claros son más convenientes para usarse en días soleados? Quizá alguna de estas preguntas haya pasado por tu mente. En esta unidad estudiaremos otro tipo de ondas: las ondas electromagnéticas. A diferencia de las ondas mecánicas que estudiamos en el capítulo anterior, las ondas electromagnéticas no requieren de un medio material para transmitirse, además su velocidad es mucho mayor, de hecho, en el universo nada se puede mover más rápido que estas ondas en el vacío.

1. Espectro electromagnético

A finales de la década de 1660 se realizaron experimentos con la luz, en ese entonces muchos contemporáneos creían que los colores surgían de la mezcla de luz y oscuridad y que los prismas de cristal coloreaban la luz. A diferencia de lo que había postulado Aristóteles, que decía que la luz blanca era una entidad simple, Newton pensaba que era la mezcla de los distintos colores. En 1704 se publicó el libro *Óptica* en el que detalla sus investigaciones sobre la luz y los colores.

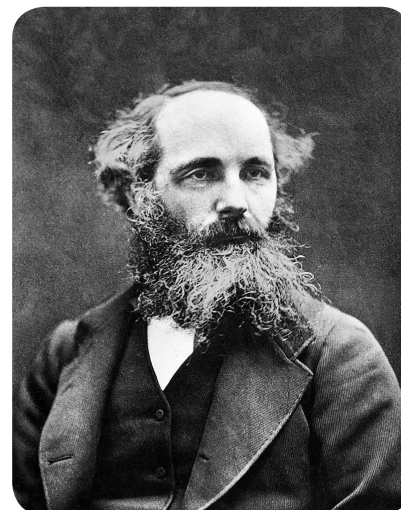
Para sus experimentos, Newton usó prismas triangulares de cristal, se dio cuenta que la luz al entrar en un cristal, se desvía su dirección y cada color se dispersa de manera distinta. Una vez separado, Newton usó un prisma en dirección inversa para de nuevo formar luz blanca. Finalmente, separó la luz roja, y la pasó por un prisma probando que éste no añadía más colores.



Figura 1. Experimento del prisma de la descomposición de la luz blanca en sus colores.

En 1800 William Herschel, un astrónomo inglés quiso encontrar la temperatura de cada color. Para ello repitió el experimento de Isaac Newton de pasar luz a través de un prisma para que se descompusiera en sus colores componentes. Posteriormente, puso termómetros bajo la luz de cada color para marcar la temperatura de cada uno. Como medida de control colocó un termómetro fuera de la luz junto al color rojo.

Para su sorpresa, la medida más alta fue la del último termómetro. Herschel llegó a la conclusión que debía haber un tipo de “color” que era invisible y que transmitía el calor. Esa propiedad de ser invisible le dio el nombre de “espectro”. Y esta radiación que al día de hoy se conoce como radiación infrarroja le llamó en ese momento “rayos calóricos”. Para poder comprender al espectro electromagnético tendremos que conocer a las ondas electromagnéticas.



William Herschel

1.1. Ondas electromagnéticas

En el año 1860, James Clerk Maxwell predijo teóricamente la existencia de las ondas electromagnéticas, en la que una carga en aceleración emitirá una onda que consiste en la combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que por el principio de inducción de Faraday se sostienen entre sí, transportando energía.

En 1885 Heinrich Rudolf Hertz descubrió la forma de producir y detectar las ondas, donde probó que pueden viajar en el vacío. De la misma forma, calculó la velocidad de su desplazamiento en el aire y se acercó al valor establecido por Maxwell, de 300,000 km/s.



Heinrich Rudolf Hertz

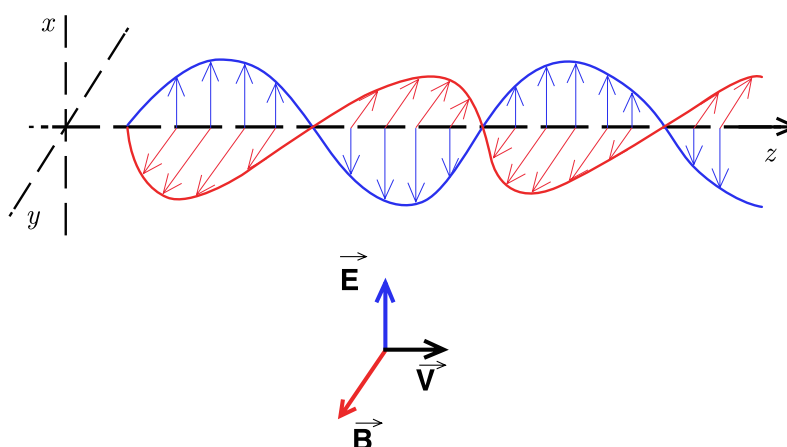


Figura 2. Las ondas electromagnéticas se pueden representar por campos eléctricos y magnéticos que se propagan oscilando de manera transversal.

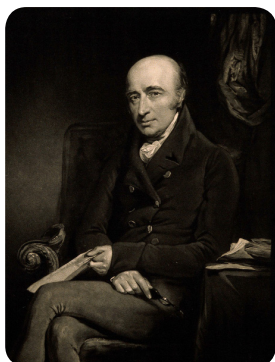
En el siglo XIX se pensaba que existía una sustancia indetectable, llamada éter, que ocupaba el vacío y servía de medio de propagación de las ondas electromagnéticas. Sin embargo, años después se probó mediante el experimento de Michelson-Morley que esta sustancia no existe y que la velocidad de una onda electromagnética será un valor constante independiente del marco de referencia del observador, lo cual vienen en los postulados de la Teoría de la relatividad de Albert Einstein.

La velocidad de las ondas electromagnéticas en el vacío es el límite de velocidad a la que se puede propagar cualquier tipo de información en el universo. Esta velocidad es tan alta que una onda electromagnética puede darle más de siete vueltas a la Tierra en un segundo. Éste es el motivo por el cual al caer un rayo primero observamos el relámpago y el trueno puede tardar algunos segundos en escucharse, pues el tiempo en que llega la luz es casi instantáneo, no así con el sonido que tarda más tiempo en llegar.



Figura 3. Un rayo se podrá observar antes de escucharse debido a la gran diferencia de velocidades entre la luz y el sonido.

1.2. Líneas espectrales y el modelo de Borh



En 1802, el químico inglés William Hyde Wollaston puso la luz del Sol a través de un prisma y observó por primera vez la cantidad de bandas oscuras en el espectro solar.

William Hyde Wollaston



En 1814, Joseph von Fraunhofer redescubrió las líneas espectrales de forma independiente y comenzó un estudio sistemático con medición cuidadosa de la longitud de onda de estas bandas. En total, describió alrededor de 570 líneas y asignó a las bandas principales las letras de la A a la K, y a las más delgadas con otras letras.

Robert Bunsen

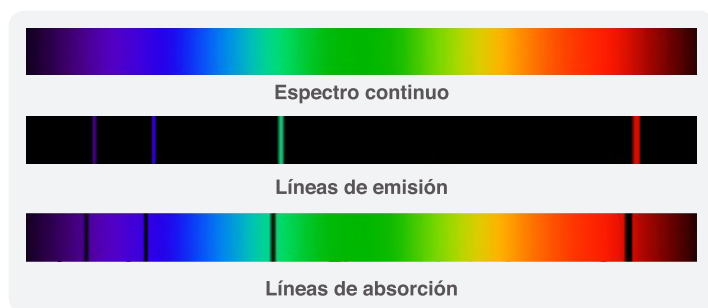


Figura 4. Espectro continuo, líneas de emisión y absorción de un elemento en específico.

Años más tarde Gustav Kirchhoff y Robert Bunsen descubrieron en 1859 que cada elemento químico tenía asociado un conjunto de líneas espectrales y propusieron que las líneas de absorción se debían a los elementos químicos presentes en la superficie del Sol.

Este método es el que nos permite conocer la composición química de un planeta o estrella lejana, pues estas líneas son la huella digital de cada elemento químico. En 1884, Johann Jakob Balmer encontró la relación matemática para predecir algunas de las líneas de emisión características del hidrógeno. Su fórmula es:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Donde:

$\lambda \equiv$ longitud de onda

$R \equiv$ constante de Rydberg

$n = 3, 4, 5, \dots$

Si λ se mide en metros, el valor de R es

$$R = 1.907 \times 10^7 m^{-1}$$

Si usamos esta ecuación para obtener la longitud de onda de las primeras líneas de emisión del hidrógeno nos daría:

$$n = 3$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) = (1.907 \times 10^7 m^{-1}) \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{9} \right) = 1.524 \times 10^6 m^{-1}$$

En donde

$$\lambda = 656.3 \text{ nm}$$

Sin embargo, la razón de la existencia de estas líneas no fue explicado hasta que llegó el modelo de Niels Bohr en 1913. El anterior modelo, el de Rutherford, plantea un modelo atómico similar al planetario, en el cual, en lugar de la fuerza de gravedad, era la fuerza de atracción eléctrica la que mantenía a los electrones negativos girando alrededor del núcleo. Sin embargo, hay un fallo en este modelo, pues el movimiento circular corresponde a un movimiento acelerado, por tal motivo, los electrones tendrían que emitir energía en forma de ondas electromagnéticas, con lo que perderían su energía cinética y terminarían cayendo al núcleo.

Para ello se basó en una propuesta hecha por el físico Louis De Broglie, quien dijo que las partículas elementales se comportan como partícula y onda, y dependiendo de su masa y su velocidad es su longitud de onda. Por tal motivo, sólo las órbitas que tuviesen un número entero de longitud de onda del electrón quedarían en forma de una onda estacionaria que por lo tanto no emitirá radiación. Estas órbitas estables que son los electrones con valores fijos de energía se conocen como orbitales.

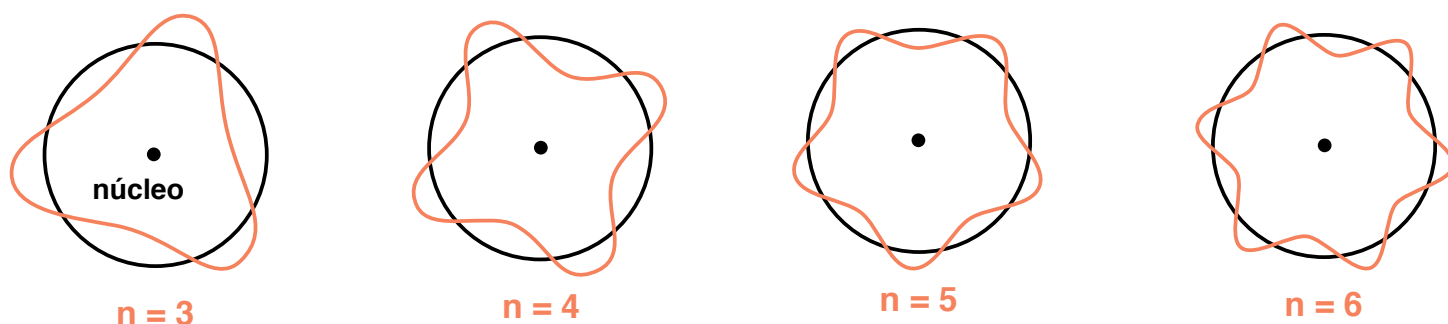


Figura 5. Los orbitales se forman cuando la longitud de onda de un electrón cabe de manera exacta en una órbita.

Cuando un electrón cae de un orbital de mayor energía a uno de menor, emite una onda electromagnética con una energía igual a la diferencia de ambas. De la misma manera, si llega una onda con la energía suficiente, el electrón la puede absorber y subir a un nivel de mayor energía. La energía de un pulso individual de esta onda, se le conoce como fotón, que es igual al producto de su frecuencia por una constante llamada **constante de Planck**.

$$E = h \cdot f$$

Donde el valor de h es: $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

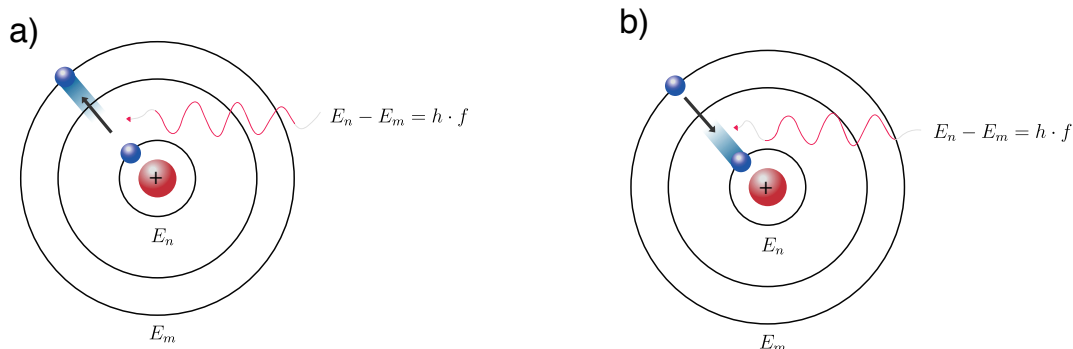


Figura 6. a) La absorción de un fotón de energía igual a la diferencia de energía entre un orbital y otro hace que el electrón salte a un nivel de mayor energía. b) Si un electrón cae a un orbital con un nivel de energía más bajo, emitirá un fotón cuya energía será igual a la diferencia de esas energías.

1.3. El espectro electromagnético y la luz visible

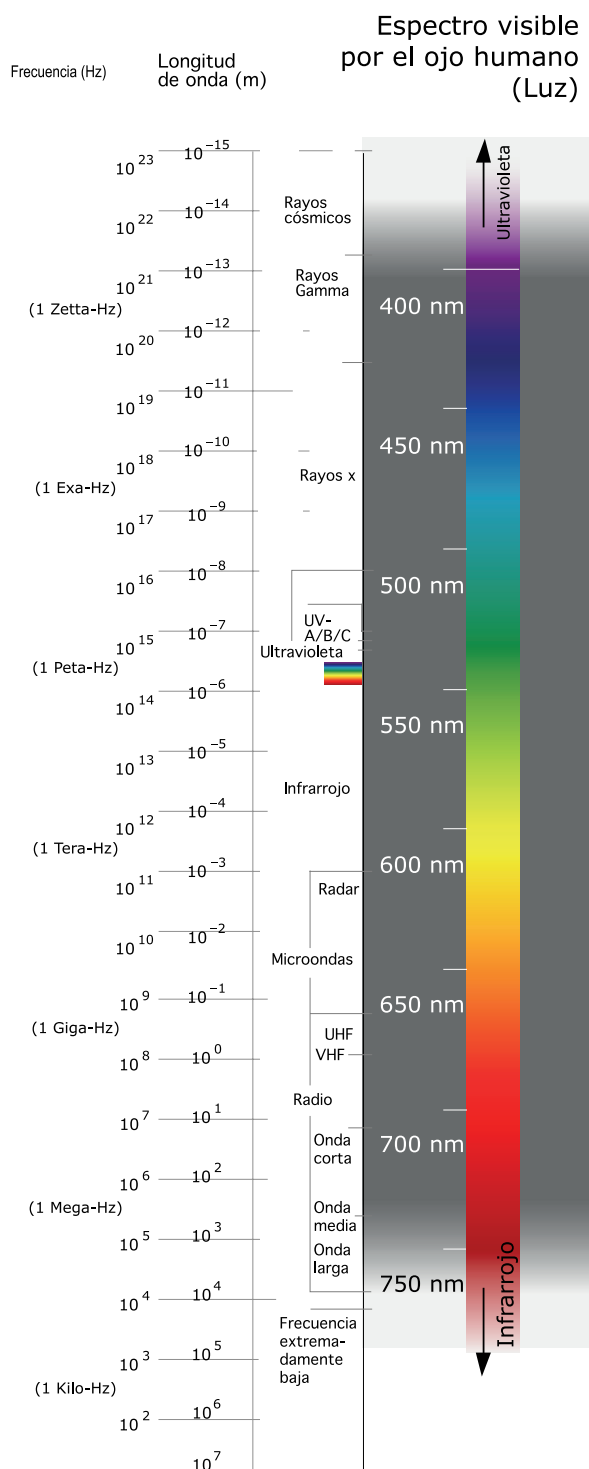


Figura 7. Espectro electromagnético ordenado de menor longitud de onda a mayor longitud de onda. Es decir, de mayor frecuencia (mayor energía) a las de menor frecuencia (menor energía).

Todas las ondas electromagnéticas comparten la característica de tratarse de la perturbación de un campo eléctrico y magnético y de viajar en el vacío a aproximadamente 300,000 km/s (299,792,458 m/s), aunque varía en otros medios. Sin embargo, el comportamiento de una onda electromagnética dependerá de su frecuencia y en consecuencia de su longitud de onda. A todo este conjunto de ondas electromagnéticas que se pueden generar se le conoce como **espectro electromagnético** y clasifica a las ondas de acuerdo a su longitud de onda.

Comencemos detallando las características de cada tipo de región del espectro electromagnético.

1.3.1. Rayos cósmicos

Son las ondas más energéticas del espectro electromagnético. Su origen aún no está claro, pero debido a las enormes energías de estas ondas se cree que deben de provenir fuera del sistema solar. Los últimos estudios apuntan a que proviene de materia cayendo en los agujeros negros supermasivos¹ del centro de su galaxia.



Figura 8. La energía de los rayos cósmicos es tan alta que no pueden provenir de una fuente en la Tierra ni del sistema solar.

¹ Un agujero negro es una región del espacio con una masa tan grande y concentrada que hace que en sus alrededores ni siquiera la luz pueda escapar. En el caso de los agujeros supermasivos su masa ronda el orden de millones o decenas de miles de millones de masas solares.

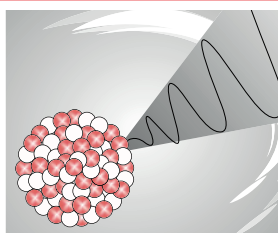


Figura 9. La energía de los rayos gamma es muy alta y se producen en los núcleos atómicos.

Derechos para reutilización
CC0.

1.3.2. Rayos gamma

Estas ondas electromagnéticas tienen longitudes de onda menores a 10^{-11} metros y a frecuencias superiores a 10^{19} Hz, por lo que siguen siendo de muy alta energía y, por lo tanto, peligrosas para el ser humano, pues pueden causar grave daño al núcleo de las células. Son producidas generalmente por elementos radiactivos² o por procesos del núcleo atómico.



Figura 10. Primera radiografía de la historia.

1.3.3. Rayos X

Los rayos X corresponden a longitudes de onda que oscilan entre 10^{-11} y 10^{-8} metros, por lo que su energía sigue siendo muy alta y posee la energía suficiente para provocar daños en el ADN; aunque el ADN se puede regenerar, si la exposición es prolongada se puede sobrepasar la habilidad del ADN para regenerarse y producir cáncer. Fueron descubiertos en 1895 por el físico alemán Wilhelm Conrad Röntgen.

Él, fue quien determinó que estos rayos creaban una radiación muy penetrante e invisible y usó placas fotográficas para demostrar que los objetos eran más o menos transparentes a los rayos X dependiendo de su espesor. Para probarlo realizó la primera radiografía humana usando la mano de su mujer. Los llamó "rayos incógnita" o "rayos X" porque no sabía qué eran.

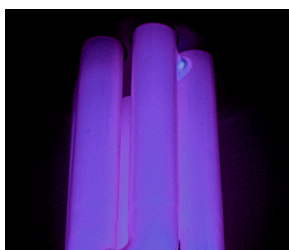


Figura 11. A las lámparas que emiten radiación ultravioleta se les conoce como "lámparas de luz negra".

Derechos para reutilización
CC0.

1.3.4. Radiación ultravioleta

Estas ondas electromagnéticas tienen longitudes de onda que van de los 4×10^{-7} m a los 10^{-8} m. Si bien no son tan energéticas como los rayos gamma y los rayos X, siguen teniendo energía suficiente para causar daño celular y es el motivo por el cual una prolongada exposición a la luz solar puede desembocar en cáncer de piel. Su nombre proviene de que su rango empieza desde longitudes de onda más cortas de lo que los humanos identificamos como el color violeta, por lo que es invisible para los seres humanos. Fueron descubiertos en 1801 por el físico alemán Johann Wilhelm Ritter, quien descubrió que eran especialmente efectivos oscureciendo el papel impregnado con cloruro de plata.



Figura 12. En el arcoíris podemos observar la descomposición de la luz en sus colores.

1.3.5. Luz visible

La luz visible corresponde a las ondas electromagnéticas con longitudes de onda de entre 380 a 750 nm (3.8×10^{-7} m y 7.5×10^{-7} m) las cuales podemos detectar con nuestros ojos (es decir, se pueden ver). Un ojo adaptado a la luz generalmente tiene como máxima sensibilidad un valor de 555 nm, en la región verde del espectro visible, por eso se suele usar este color para los chalecos de seguridad. Colores como el rosa o el magenta no se observan directamente en el espectro visible pues corresponden a la combinación de varios de ellos. El espectro visible lo podemos observar en un arcoíris, pues al igual que el prisma usado por Isaac Newton, descompone a la luz en sus colores.

² Son elementos inestables cuyo núcleo suele emitir partículas con mucha energía para decaer en otro elemento cuyo núcleo sea más estable.

1.3.6. Radiación infrarroja

Como se mencionó al comienzo de este tema, fue la primera de las radiaciones electromagnéticas no visibles en ser descubiertas. Su rango de longitudes de onda va desde unos 7×10^{-7} m hasta 1 mm. Su principal fuente de emisión es cualquier objeto con una temperatura mayor a 0 Kelvin. La materia tiene la propiedad de que emite radiación por el simple hecho de tener una temperatura distinta de 0 K. En general, la longitud de onda donde un cuerpo emite el máximo de radiación es inversamente proporcional a la temperatura, por lo que la mayoría de los objetos a una temperatura ambiente emite este tipo de radiación. La radiación infrarroja es la causa de que no sea necesario tocar un metal caliente para saber que está, simplemente con acercarse la mano podemos sentirlo. Un hierro, por ejemplo, al calentarse irá emitiendo radiación infrarroja principalmente y conforme aumenta su temperatura irá aumentando la cantidad de luz visible que emite hasta que puede ser detectada por nuestra vista, por este motivo conforme se vaya calentando tomará primero un color rojizo (el menos energético) a uno más naranja conforme aumenta su temperatura.

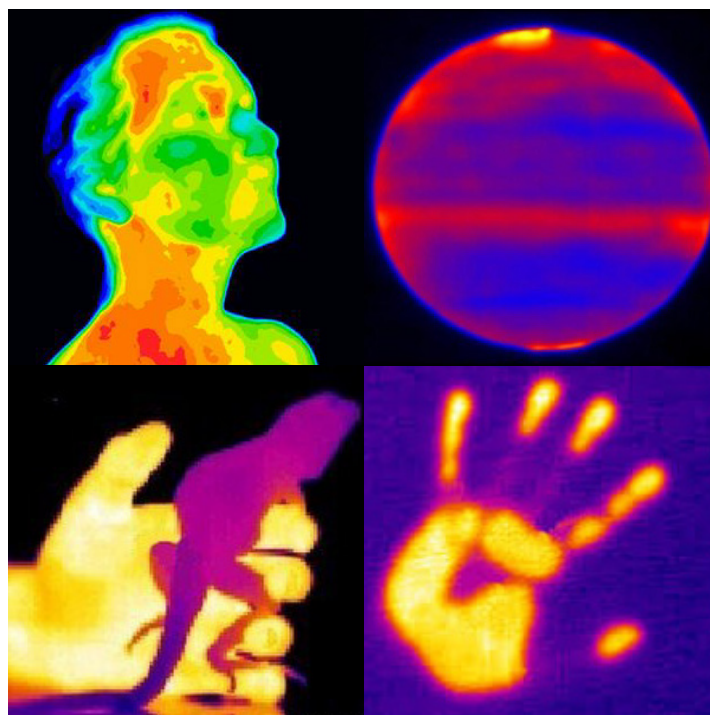


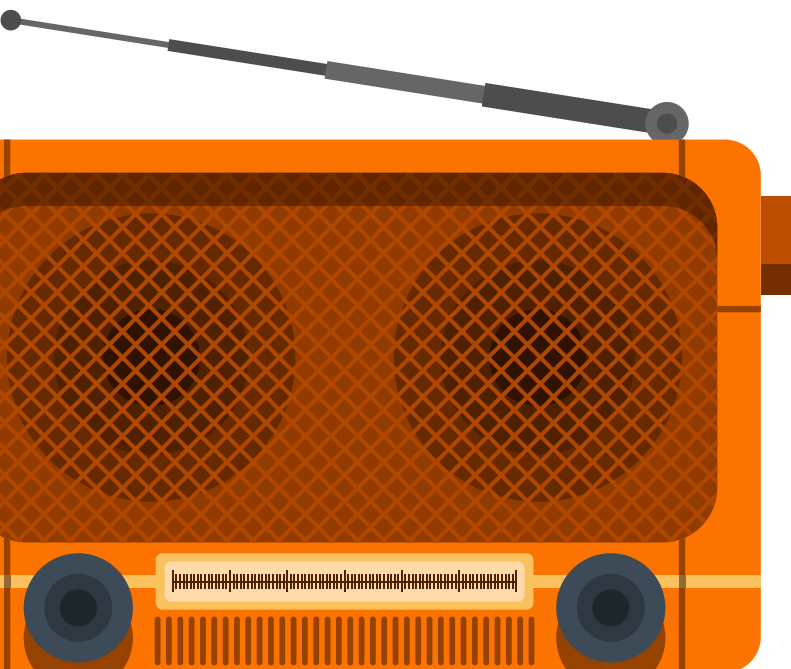
Figura 13. Los cuerpos emiten radiación infrarroja dependiendo de su temperatura.

1.3.7. Microondas

Estas ondas comprenden longitudes de onda de 1 m a 10 mm. Las microondas pueden ser generadas de varias maneras, generalmente divididas en dos categorías: dispositivos de estado sólido y dispositivos basados en tubos de vacío. Estas ondas son inofensivas para el ser humano debido a sus bajas frecuencias.

1.3.8. Radio

Son el tipo de radiación electromagnética menos energética y, por lo tanto, de longitud de onda más larga. Las ondas radio pueden ser creadas de manera natural por fenómenos naturales tales como relámpagos o por objetos astronómicos. También pueden ser generadas de manera artificial y son utilizadas para comunicaciones. Pueden viajar distancias muy largas pues debido a su gran longitud de onda pueden rodear obstáculos como montañas.



1.4. Aplicaciones de las ondas EM con base en la longitud de onda

Debido a la gran variedad de frecuencias posibles (y por tanto, energía) que puede tener una onda electromagnética, la variedad de aplicaciones es muy amplia y depende de las características de la energía de las ondas. A continuación veremos una por una.



Figura 14. Fresas irradiadas y no irradiadas.

1.4.1. Rayos cósmicos

Por su enorme energía no se generan artificialmente y no cuentan por el momento con alguna aplicación más allá de observaciones astronómicas.

1.4.2. Rayos gamma

Debido a su alta energía se usan para esterilizar alimentos, pues al irradiarlos elimina a las bacterias que se encuentran presentes sin dejar residuos y los alimentos duran más tiempo. Otra de sus aplicaciones es que puede esterilizar equipos médicos para usarlos en tratamientos contra el cáncer, pues tiene la capacidad de destruir los tumores.



Figura 15. El uso de rayos X es de gran importancia para la medicina.

1.4.3. Rayos X

Debido a su capacidad de atravesar la mayoría de los materiales, los rayos X son usados principalmente en la medicina para poder visualizar los huesos de un paciente. Tienen otras aplicaciones en ciencias como la difracción de rayos X, en el cual se lanzan rayos X sobre un material a distintos ángulos y dependiendo de los patrones generados al atravesar el material se puede conocer su estructura y en algunos casos su composición.

1.4.4. Radiación ultravioleta

Debido a su alta energía que puede matar a microorganismos, es utilizada en la esterilización de agua y alimentos sin dejar ningún residuo en ellos. Otra aplicación son las lámparas fluorescentes de mercurio, las cuales producen radiación UV mediante la ionización de gas de mercurio a baja presión. El recubrimiento fluorescente al interior de la lámpara absorbe esta radiación y la reemite en forma de luz visible. En estructuras metálicas, se suelen aplicar líquidos fluorescentes para después iluminarlas con una luz negra, y así detectar grietas y otros defectos.



Figura 16. Las lámparas de mercurio generan luz ultravioleta en su interior que es convertida en luz visible por la pintura de cobertura aprovechando el fenómeno de fluorescencia.

1.4.5. Luz visible

La luz visible es la que nos permite ver a los objetos. Para poder ver un objeto, debe incidir sobre él, luz visible y al rebotar del objeto e incidir sobre los ojos el cerebro, se forma una imagen.

1.4.6. Radiación infrarroja

Entre sus aplicaciones se encuentran los equipos de visión nocturna los cuales aprovechan la emisión de este tipo de radiación por los objetos debido a su temperatura. También se usan en los controles remoto, pues al tener una longitud de onda diferente a las ondas de radio no interfiere con ellas.

1.4.7. Microondas

Quizá la aplicación más conocida de las ondas en esta región del espectro es la de los hornos de microondas que se usan para calentar la comida. En este caso la frecuencia del horno de microondas coincide con la frecuencia de resonancia del agua que está presente en los alimentos. Dado que la temperatura de un cuerpo tiene una estrecha relación con la energía cinética promedio de sus moléculas, al incrementar la vibración de las moléculas en el agua aumenta su temperatura y termina calentando al resto de la comida. Por este motivo los alimentos con un bajo porcentaje de agua, como el pan, se calientan menos que otros como el queso.



Figura 17. Los seres vivos de sangre caliente emitimos por lo general una mayor radiación infrarroja que el ambiente durante la noche debido a nuestra temperatura, ello se puede observar con un equipo de visión que detecte esta radiación.

Además del uso en la cocina, las ondas de microondas fueron determinantes para la construcción de radares con mayor resolución. El desarrollo de este tipo de radar fue determinante en la victoria de Gran Bretaña sobre la Alemania nazi en la batalla del Atlántico pues permitió detectar a los submarinos alemanes con mayor precisión.



Figura 18. El horno de microondas es la más conocida de la radiación de microondas, sin embargo, no es la única.

1.4.8. Radio

Debido a su larga longitud de onda que le da la capacidad de rodear casi cualquier obstáculo, estas ondas electromagnéticas tienen su principal aplicación en las telecomunicaciones, como la telefonía, la televisión y la radio. Además, se suelen utilizar para observaciones astronómicas en donde el polvo estelar no deja pasar a la luz visible. La famosa imagen obtenida de un agujero fue obtenida mediante el uso de radiotelescopios.

2. La óptica

La luz juega un papel de suma importancia prácticamente en todas las actividades que realiza el ser humano. Es necesaria para diversas tareas, tales como leer un libro, controlar el tráfico por medio de los semáforos, orientar a los barcos empleando faros, e inclusive observar astros muy lejanos de la Tierra con ayuda de los telescopios. El saber los fenómenos que ocurren con la luz permite dar explicación a diversos eventos en la naturaleza, tales como la formación del arcoíris, los espejismos en zonas desérticas y el proceso de visión a través del ojo. Además, es posible diseñar mejores herramientas e instrumentos, como anteojos, telescopios y fibra óptica.

2.1. La luz como parte del espectro electromagnético

Dentro del espectro electromagnético hay un intervalo de ondas electromagnéticas (cuya longitud de onda se encuentra entre 400 y 750 nm), la cual se llama **espectro visible** o **luz visible**. Se denomina de esta forma porque este intervalo engloba a las ondas electromagnéticas que el ser humano puede percibir y procesar por medio del ojo.

De esta forma, cada color que se puede observar le corresponde una longitud de onda específica que entra dentro del espectro visible. Hay colores (o tonalidades) que resultan de sumar varias ondas visibles de distinta longitud de onda. Cuando se suman ondas de todo el espectro visible se consigue la luz blanca (figura 20).



Figura 19. Primera imagen de un agujero negro supermasivo tomada por el Telescopio del Horizonte de Sucesos en 2019.

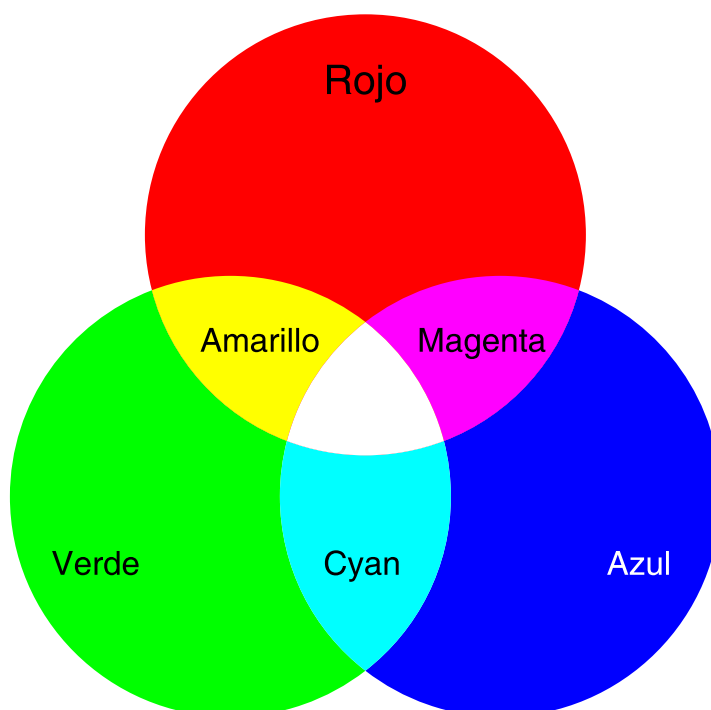


Figura 20. Suma de colores. Al sumar ondas de todo el espectro visible se consigue una luz de color blanco, tal como se representa en el centro de la figura.

Se puede realizar el efecto contrario a la suma de las ondas del espectro visible. Es decir, a partir de luz blanca poderla descomponer en las distintas ondas (colores) que la componen. Uno de los primeros científicos en estudiar este fenómeno fue Isaac Newton. Él hizo pasar un rayo de luz blanca a través de un prisma de cristal, como ya vimos en el tema 1. Al otro lado del prisma, logró observar los distintos colores en lo que se descompone la luz (figura 21). A este fenómeno se le conoce como **dispersión de la luz** y es el mismo que sucede en la formación del arcoíris, donde las gotas de lluvia funcionan como pequeños prismas que dispersan la luz proveniente del Sol y la descomponen en los diversos colores que se observan en el arcoíris.

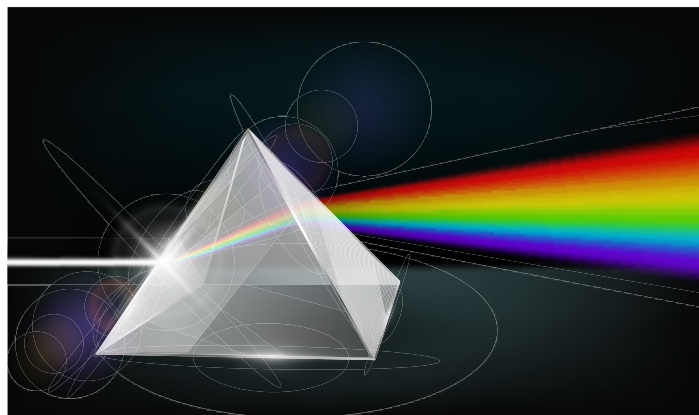
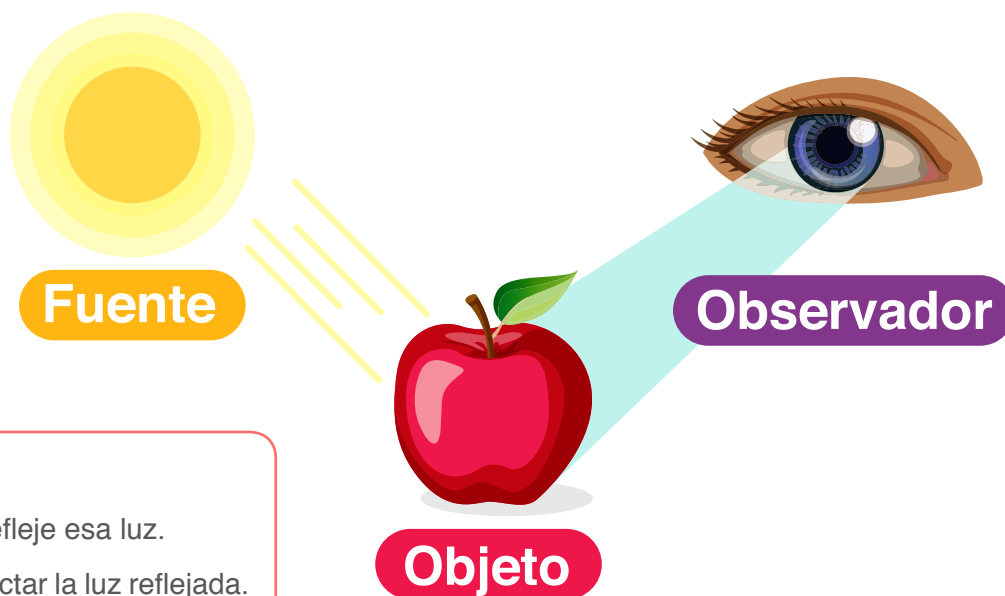


Figura 21. Experimento de dispersión de la luz por medio de un prisma.

2.2. Elementos necesarios para poder observar un objeto

Aristóteles fue el primer autor griego en tratar de explicar los defectos ópticos de la visión. Para Aristóteles la miopía, falta de agudeza de visión lejana, es debida a una proporción inadecuada de humedad en el ojo o a una morfología ocular anómala. Con el paso del tiempo se fue estudiando y comprendiendo con mayor profundidad el fenómeno de la visión.

Para que podamos ver un objeto requerimos de cuatro partes principales.



1. Luz visible.
2. Un objeto que refleje esa luz.
3. Un ojo para detectar la luz reflejada.
4. Un cerebro que interprete esa luz y la transforme en una imagen.

Figura 22. Elementos necesarios para la visión.

Si percibimos un color rojo, por ejemplo, significa que ese objeto absorbe el resto de colores y refleja principalmente la luz roja. Si observamos un color negro significa que ese objeto está absorbiendo la luz de todos los colores y un color blanco significa que se refleja luz de todas las longitudes de onda. Por este motivo la ropa negra se calienta mucho antes que la ropa clara en un día soleado, pues está absorbiendo la mayoría de la luz que le llega.

La detección de la luz está a cargo del ojo, su función consiste básicamente en transformar la energía lumínica en señales eléctricas que son enviadas al cerebro a través del nervio óptico. Para su funcionamiento se requieren varios elementos, comenzando con el cristalino que funciona como una lente que es ajustable según la distancia. También tenemos una pupila que funciona como un "diafragma", cuyo diámetro está regulado por el iris para regular la cantidad de luz que entra; por este motivo cuando se pasa de un lugar iluminado a un oscuro tardamos unos segundos en comenzar a poder ver, pues las pupilas aumentan su tamaño para poder dejar entrar más luz. En caso contrario, la luz suele lastimarnos los primeros segundos en lo que la pupila se cierra.

Finalmente, al fondo del ojo se encuentra la retina, que es un tejido sensible a la luz. Ésta penetra a través de la pupila, atraviesa el cristalino y se proyecta sobre la retina, donde se transforma gracias a unas células llamadas fotorreceptoras en impulsos nerviosos que se trasladan, a través del nervio óptico, al cerebro.

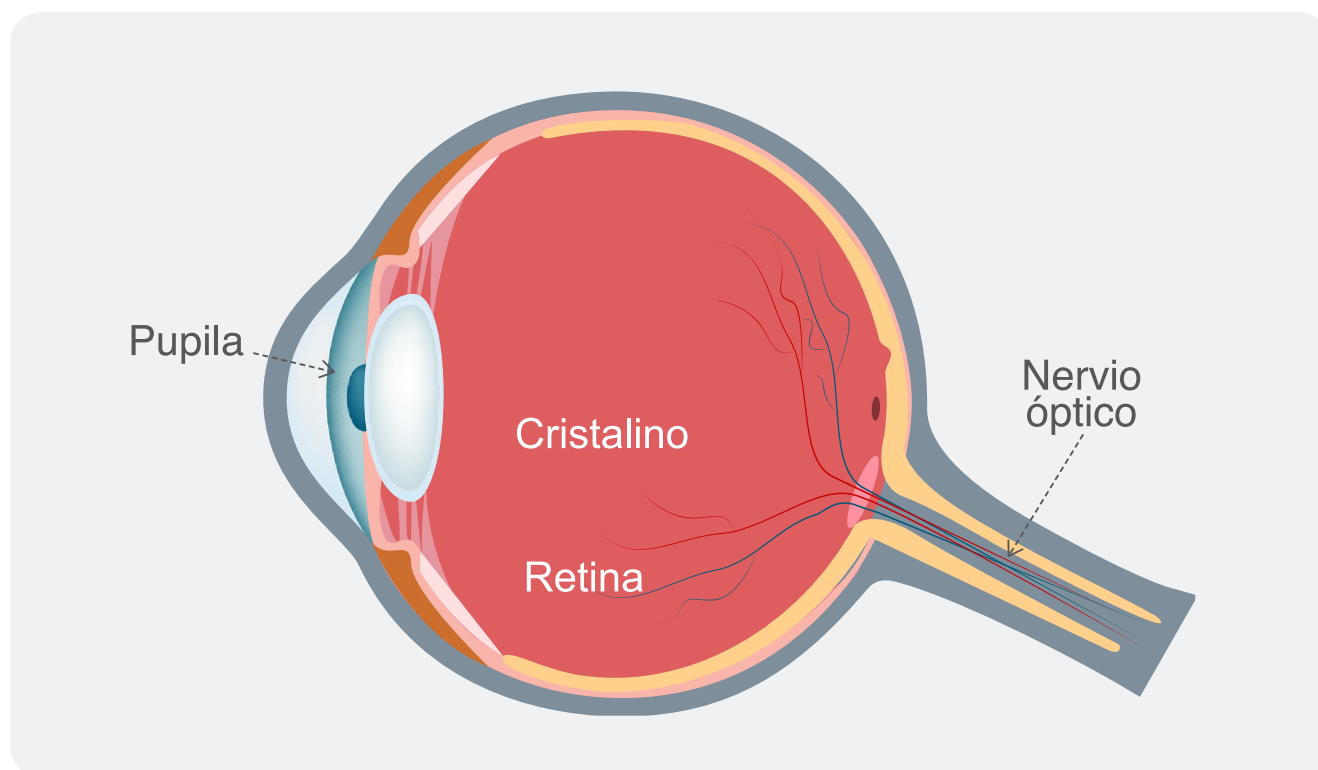


Figura 23. Elementos del ojo humano.

2.3. Visión y color, sensación a ondas electromagnéticas de 400 a 700 nm

La retina está formada por dos tipos de células fotosensibles. Los bastones y los conos. Los bastones son las células fotorreceptoras que se encargan de la visión en bajos niveles de luz. Estas células presentan una alta sensibilidad a la luz y se saturan cuando hay mucha luz, pero no detectan colores. Por este motivo es complicado distinguir los colores con poca luz.

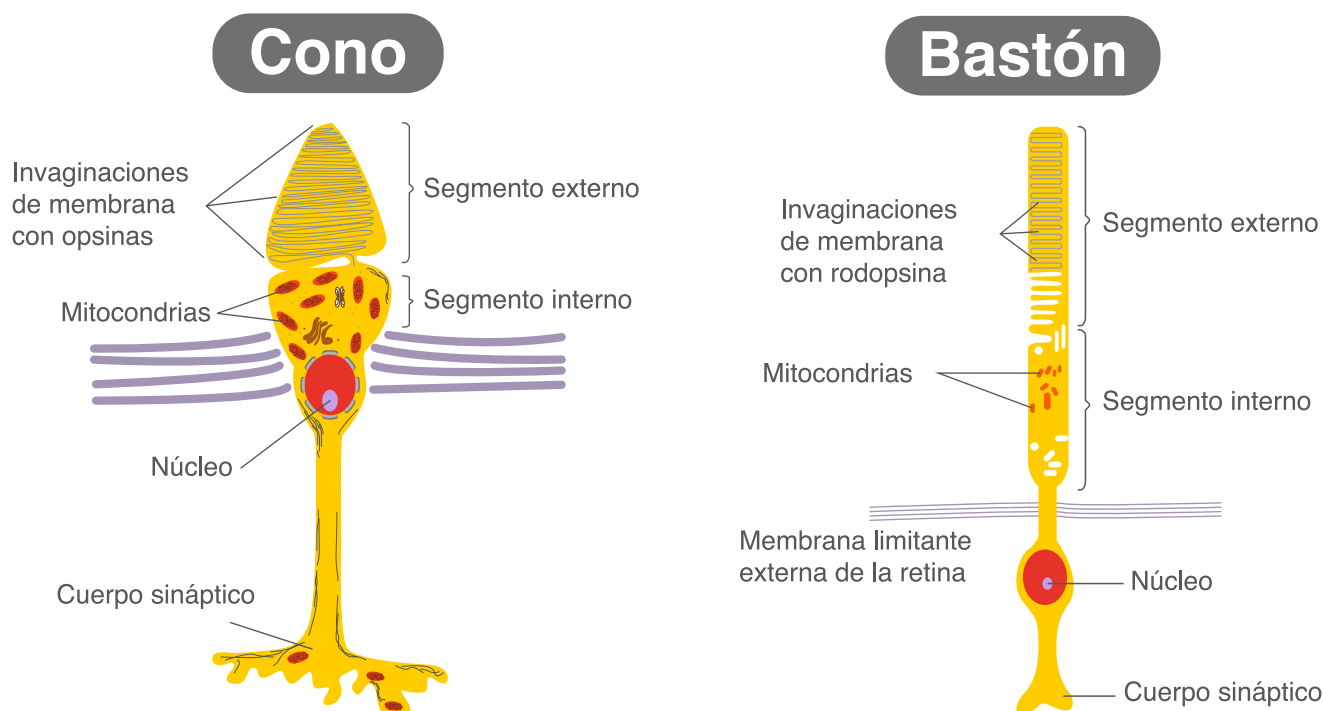


Figura 24. Partes de las células bastón y células cono.

Los conos reciben su nombre debido a su forma cónica y son las responsables de percibir el color. En la especie humana y en muchos otros primates se distinguen tres tipos de conos: sensibles a la luz roja (Tipo L), sensibles a la luz verde (Tipo M) y sensibles a la luz azul (Tipo S). Esta sensibilidad específica se debe a la presencia de tres sustancias llamadas opsinas:

- La eritropsina tiene mayor sensibilidad para las longitudes de onda largas de alrededor de 700 nanómetros (luz roja).
- La cloropsina para longitudes de onda medias de unos 530 nanómetros (luz verde).
- La cianopsina con mayor sensibilidad para las longitudes de onda pequeñas de unos 430 nanómetros (luz azul).

El cerebro se encarga de interpretar los colores de acuerdo a la estimulación recibida por estas células. Los seres humanos como el resto de los primates tenemos una alta percepción de color, el cual fue muy útil para detectar cuando un fruto estaba maduro, por ejemplo.

2.4. La reflexión y la refracción

Cuando la luz incide sobre un material pueden suceder dos cosas. La luz atraviesa el material o la luz es reflejada. A veces se pueden dar ambos fenómenos y parte de la luz será reflejada y parte de la luz atravesará el material. Cómo lo hace en cada caso lo describiremos a continuación.

2.4.1. Reflexión

Cuando la luz viaja y se encuentra con una frontera o límite entre dos medios, pueden ocurrir dos fenómenos. El primero de ellos consiste en que la luz sufre una especie de “rebote”, lo que ocasiona que la luz cambie su dirección de propagación, pero sigue viajando en el mismo medio que donde se originó. A este fenómeno se le llama **reflexión**.

Se puede designar la forma en que un rayo de luz tiene contacto con la frontera entre los dos medios si se mide el ángulo que forma respecto a una línea recta llamada **normal**, la cual es perpendicular a la frontera entre los medios (figura 25). A ese ángulo se le denomina **ángulo incidente**. De la misma forma se puede medir el ángulo que forma el rayo reflejado con la normal. Siempre se cumple la siguiente relación:

$$\theta_i = \theta_r$$

Donde θ_i es el ángulo del rayo incidente y θ_r es el que corresponde al rayo reflejado. La ecuación anterior se conoce como la **ley de la reflexión**, la cual muestra que, en todo caso, los ángulos incidente y reflejado son iguales.

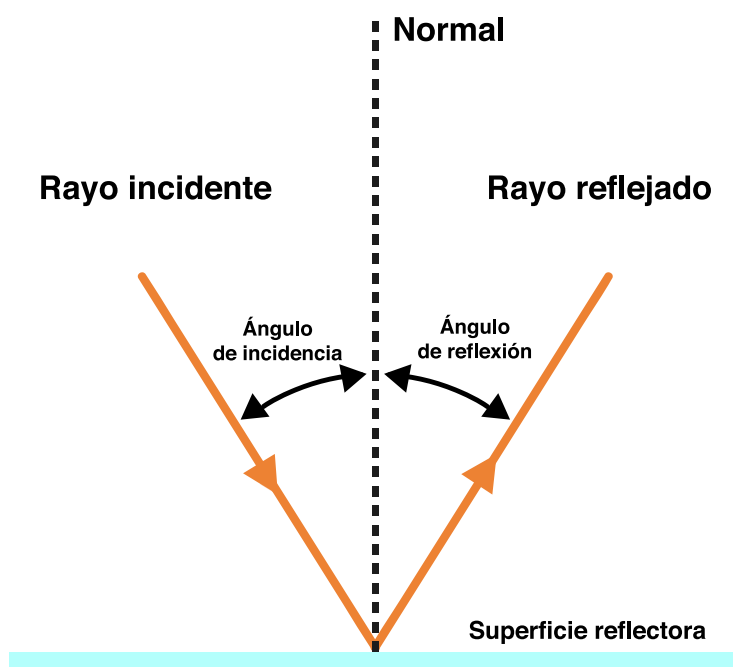


Figura 25. Esquema de la reflexión de un rayo de luz.
Los ángulos de incidencia y reflejado se miden respecto a la normal (línea punteada).

2.4.1. Refracción

Un segundo fenómeno que puede ocurrir cuando un rayo de luz llega a la frontera entre dos medios es que comience a viajar dentro del segundo medio. La velocidad de la luz depende del medio donde se propague. Por ejemplo, en el vacío es de 2.997×10^8 m/s, pero a través del diamante es de 1.238×10^8 m/s. Si se calcula la razón de estas velocidades de propagación (en el diamante entre la del vacío) se obtiene un valor de 2.42:

$$n_{\text{diamante}} = \frac{c}{v_{\text{diamante}}} = \frac{2.997 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1.238 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 2.42$$

Donde la variable v_{diamante} representa la velocidad de la luz en el diamante, y n_{diamante} se denomina índice de refracción. De manera general, para cualquier otro material o medio “i”, se puede expresar el índice de refracción como:

$$n_i = \frac{c}{v_i}$$

Dado que siempre la velocidad de la luz en el vacío es superior a la que presenta en cualquier otro medio, los valores de índice de refracción son siempre mayores a 1.0.

Al cambiar de medio, la luz modifica su velocidad y la trayectoria del rayo también cambia. Ésta es la descripción del fenómeno conocido como **refracción**. Cuando un rayo de luz incide en una frontera entre dos medios distintos y se refracta, se genera un rayo en el segundo medio el cual tiene una desviación respecto al primero tal como se muestra en la figura 26. Al igual que en la reflexión, los ángulos involucrados se miden respecto a la normal. Aquí θ_1 se denomina rayo incidente y θ_2 al rayo refractado. La relación entre estos ángulos depende de los índices de refracción donde viaja la luz y se establece de acuerdo con la siguiente ecuación que se le conoce como la ley de Snell.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

La ley de Snell modela el fenómeno de la refracción entre dos medios. Dicha ecuación se puede emplear para determinar el índice de refracción para un material, del cual no se conozca. Simplemente se deben medir los ángulos de incidencia y refracción y conocer el índice de refracción del primer medio.

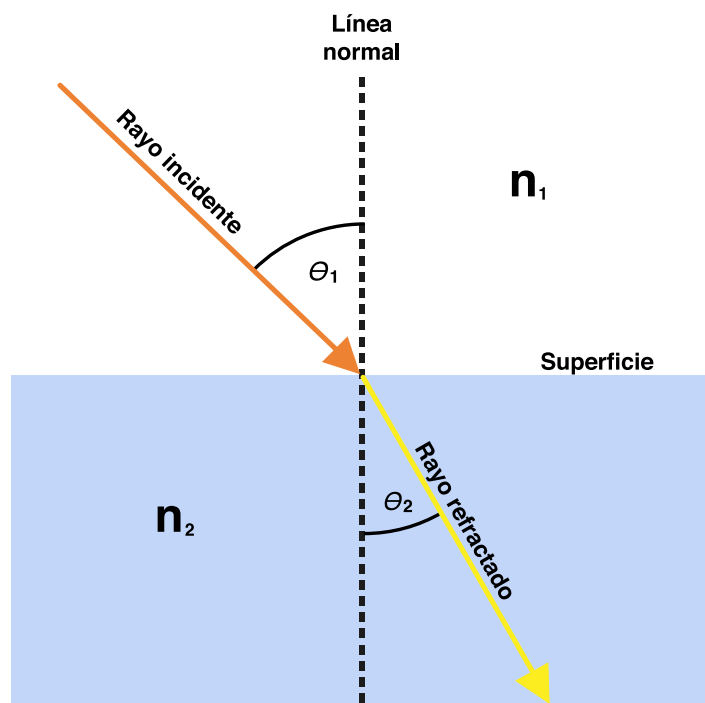


Figura 26. Representación de la refracción de un rayo de luz.

2.5. Espejos y lentes

Para aprovechar las propiedades y fenómenos de la luz se pueden emplear diversos instrumentos. Dos de ellos, muy importantes y útiles son los espejos y las lentes. Los primeros son dispositivos que permiten aprovechar las propiedades de reflexión de la luz. En los segundos se manifiesta en mayor medida la refracción.

2.5.1. Espejos

Un espejo se puede fabricar al pulir mucho alguna superficie. Esto permitirá que todos los rayos de luz que lleguen a él se reflejen siguiendo la ley de la reflexión. Existen varios tipos de espejos, como son:

- 1) Espejos planos, donde la superficie reflejante tiene dicha geometría.
- 2) Espejos esféricos, donde la superficie presenta curvatura. Si la superficie reflejante se encuentra de en la parte interna de la curvatura, se denomina espejo cóncavo. En cambio, si la superficie reflejante se encuentra en la parte externa de la curvatura se trata de un espejo convexo (figura 27).

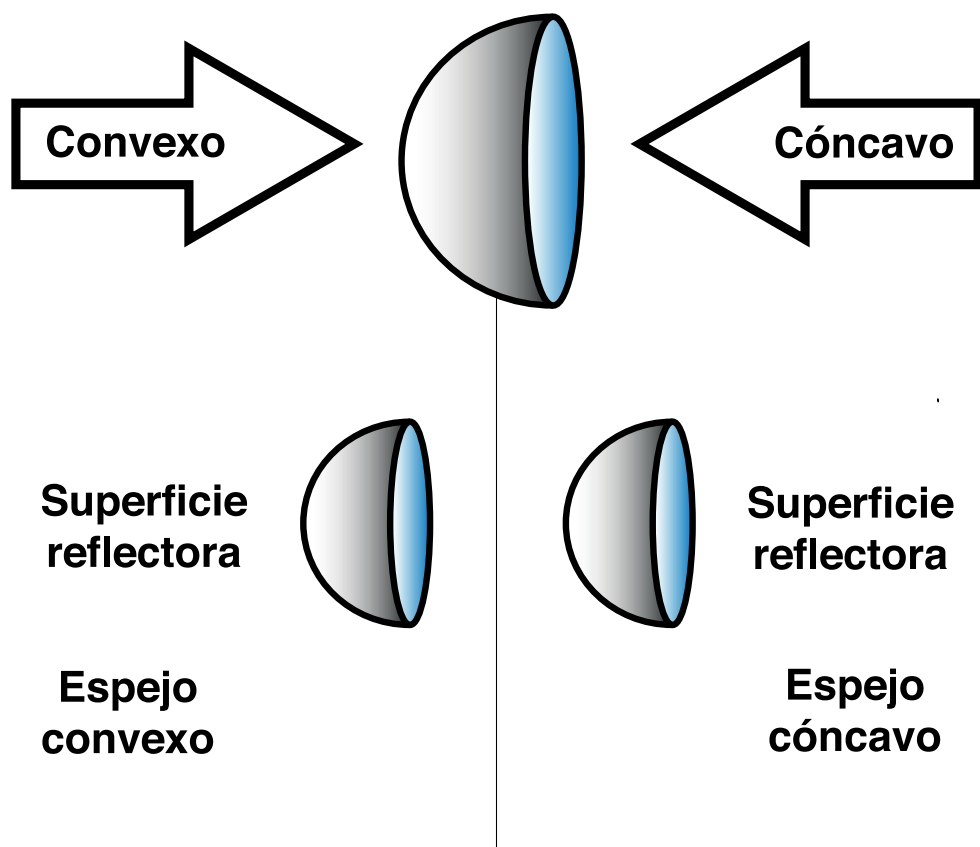


Figura 27. Espejos cóncavo y convexo.

Para los espejos curvos se distinguen dos puntos principales:

- 1) **El centro de curvatura.** Si un rayo de luz se dirige hacia el espejo y pasa por el centro de curvatura, se reflejará siguiendo la misma trayectoria de incidencia. En otras palabras, al pasar un rayo por dicho punto, el ángulo de incidencia es igual a 0 (y también el reflejado). Geométricamente el centro de curvatura es el punto de intersección de todas las rectas perpendiculares a las tangentes de la curva.
- 2) **El foco,** que es el punto donde convergen (o se intersecan) todos los rayos de luz originados desde un punto en el objeto observado.

En la figura 28 se muestran el centro de curvatura y el foco para ambos tipos de espejos.

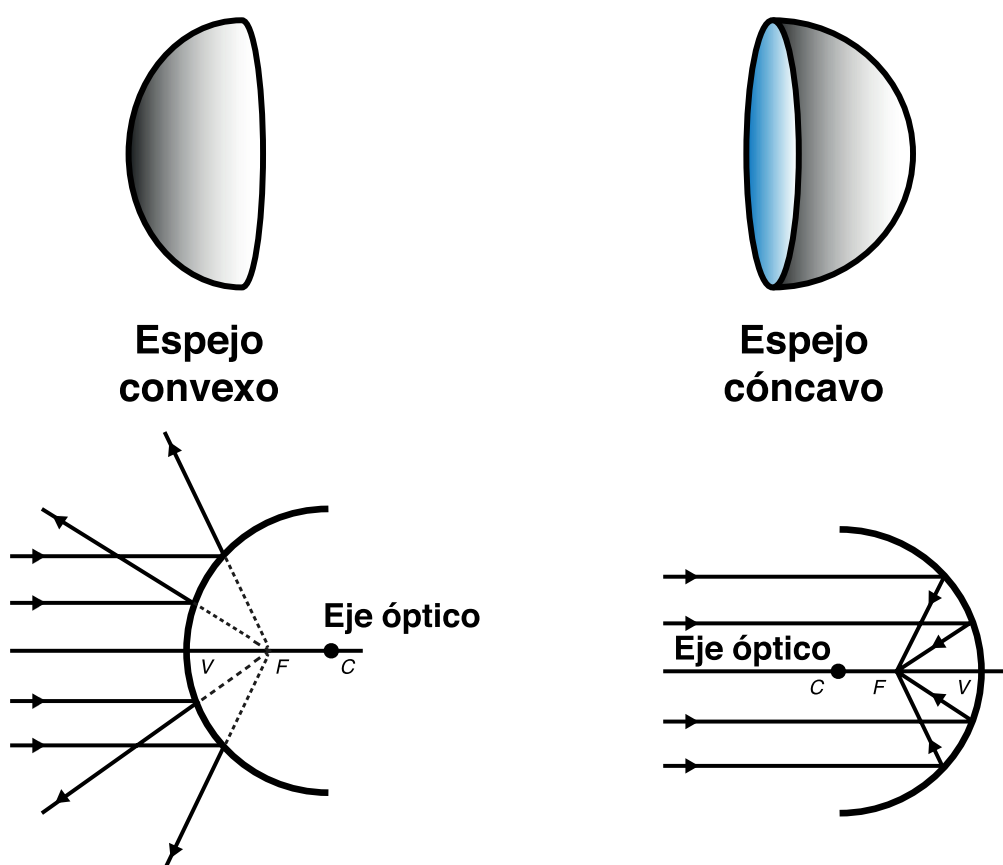


Figura 28. Ubicación del centro de curvatura y foco para los espejos cóncavo y convexo.

Conociendo el tipo de espejo y sus puntos importantes es posible predecir la forma en que se observará una imagen reflejada en dicho espejo. Para ello se debe seguir la siguiente estrategia de **construcción de imágenes ópticas** (figuras 29 y 30).

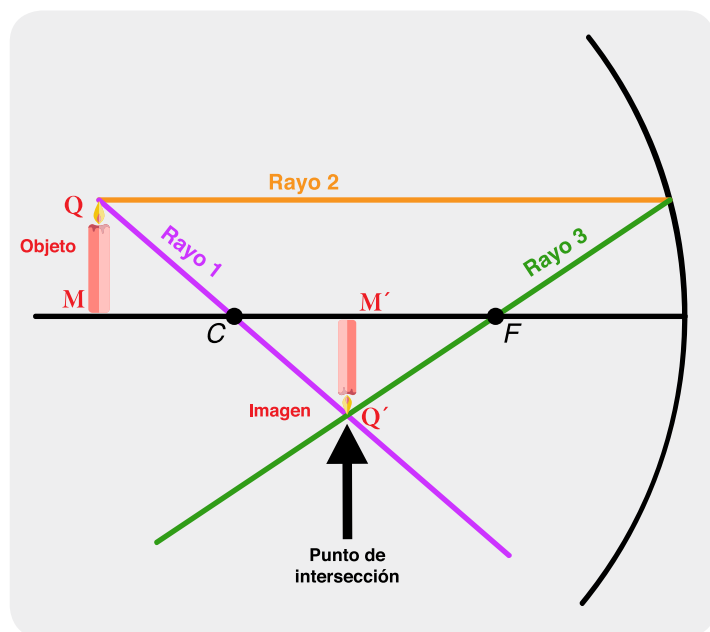


Figura 29. Construcción de imágenes ópticas en espejos. El ejemplo mostrado en la imagen se presenta para un espejo cóncavo.

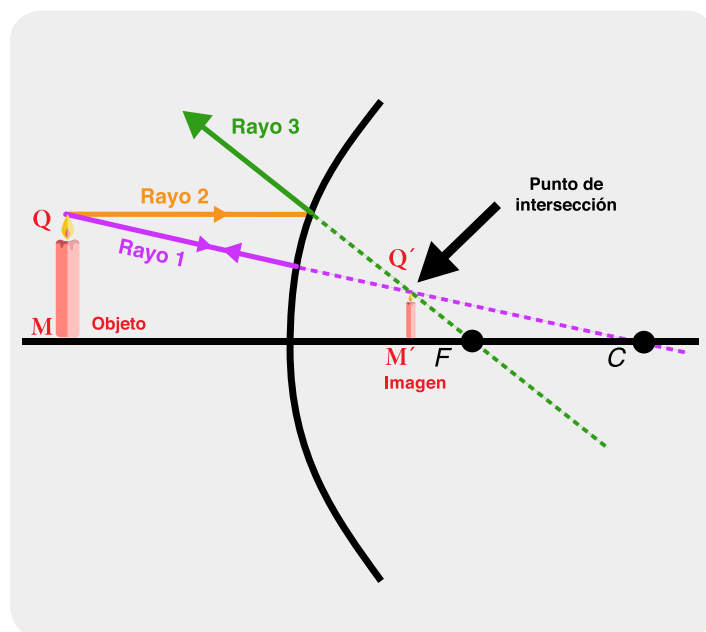
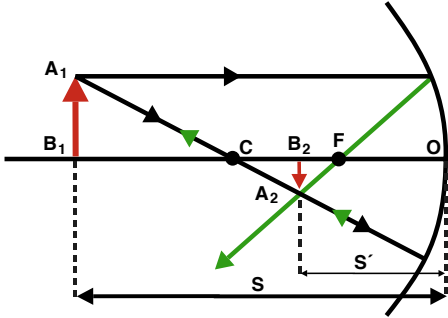
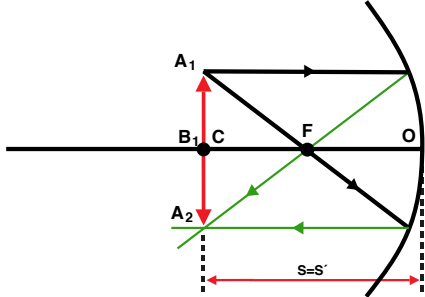
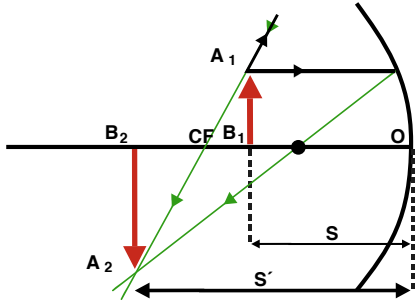
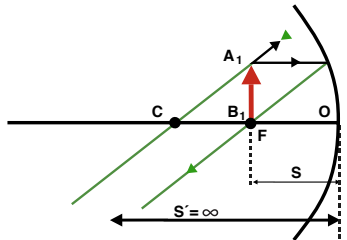
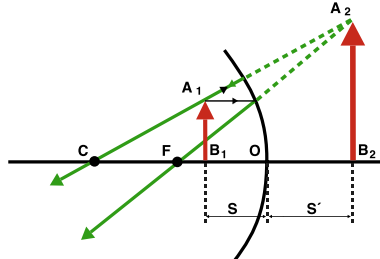


Figura 30. Construcción de imágenes ópticas en espejos. El ejemplo mostrado en la imagen se presenta para un espejo convexo.

- 1) Se debe dibujar un **rayo (1)** desde la parte superior del objeto que será reflejado que pase por el centro de curvatura.
- 2) Se debe dibujar un segundo **rayo (2)** horizontal desde la parte superior del objeto hasta el espejo.
- 3) Posteriormente se traza el rayo **reflejado (3)** desde el punto donde toca el **rayo 2** al espejo hacia el foco.
- 4) La intersección entre los **rayos 1** y **3** representa la ubicación de la parte superior de la imagen reflejada del objeto.

Dependiendo de la ubicación del objeto respecto al espejo, será la imagen que se obtenga. En la tabla 1 se resumen los diferentes casos que se pueden presentar.

Tabla 1. Ejemplos de la imagen obtenida por distintos ángulos.

Ubicación del objeto	Ubicación y características de la imagen	Ejemplo visual Espejo cóncavo
El objeto se encuentra más alejado que el centro de curvatura.	La imagen se ubica entre el centro de curvatura y el foco. Está invertida y de menor tamaño. La imagen es real.	
El objeto se encuentra en el centro de curvatura.	La imagen se ubica también en el centro de curvatura. Está invertida y es del mismo tamaño que el objeto. Es una imagen real.	
El objeto está entre el centro de curvatura y el foco.	La imagen se encuentra más alejada que el centro de curvatura. Está invertida y es de mayor tamaño. Es una imagen real.	
El objeto está en el foco.	No se genera ninguna imagen. Nota que los rayos 1 y 3 no se intersecan (son paralelos).	
El objeto está entre el foco y el espejo.	La imagen se encuentra detrás del espejo. No está invertida y es de mayor tamaño. Es una imagen virtual.	

2.5.2 Lentes

Una lente es un dispositivo que altera la forma de los rayos de luz que pasan a través de él debido al fenómeno de refracción. Los ejemplos más comunes se pueden encontrar en lupas y anteojos. Aplicaciones más especializadas abarcan telescopios, microscopios, cámaras fotográficas y binoculares. La mayoría de las lentes empleadas en todos los dispositivos antes mencionados entran en alguna de las siguientes categorías y subcategorías (figura 31):

1) Lentes convexas o convergentes:

- a. Biconvexa
- b. Plano convexa
- c. Menisco convexo

2) Lentes cóncavas o divergentes:

- a. Bicóncava
- b. Plano cóncava
- c. Menisco cóncavo

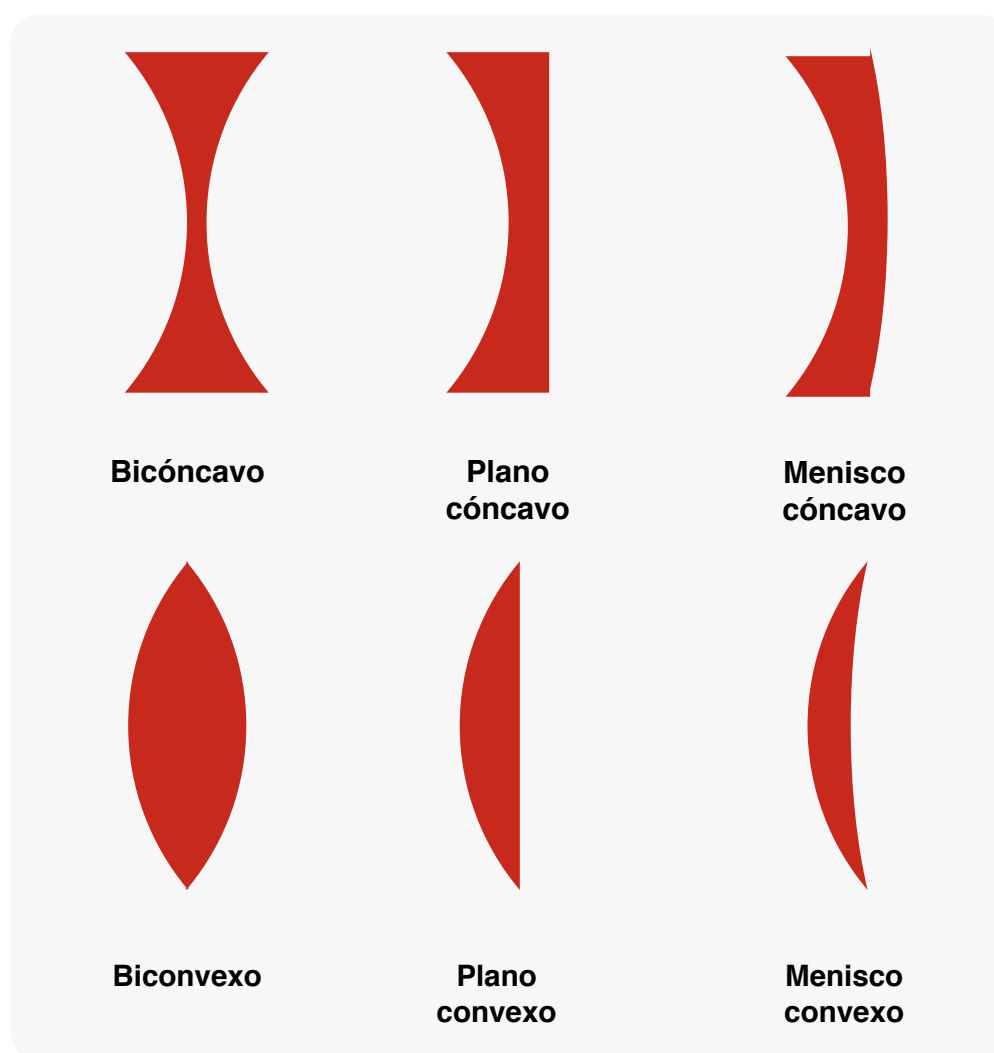


Figura 31. Clasificación de lentes curvas representativas.

Para el caso de las lentes se deben distinguir los siguientes elementos (figuras 32 y 33):

- 1) El **foco**, que es el punto donde convergen todos los rayos de luz que son refractados. Como en este caso los rayos de luz pueden pasar desde ambos lados de la lente, se tienen dos focos.

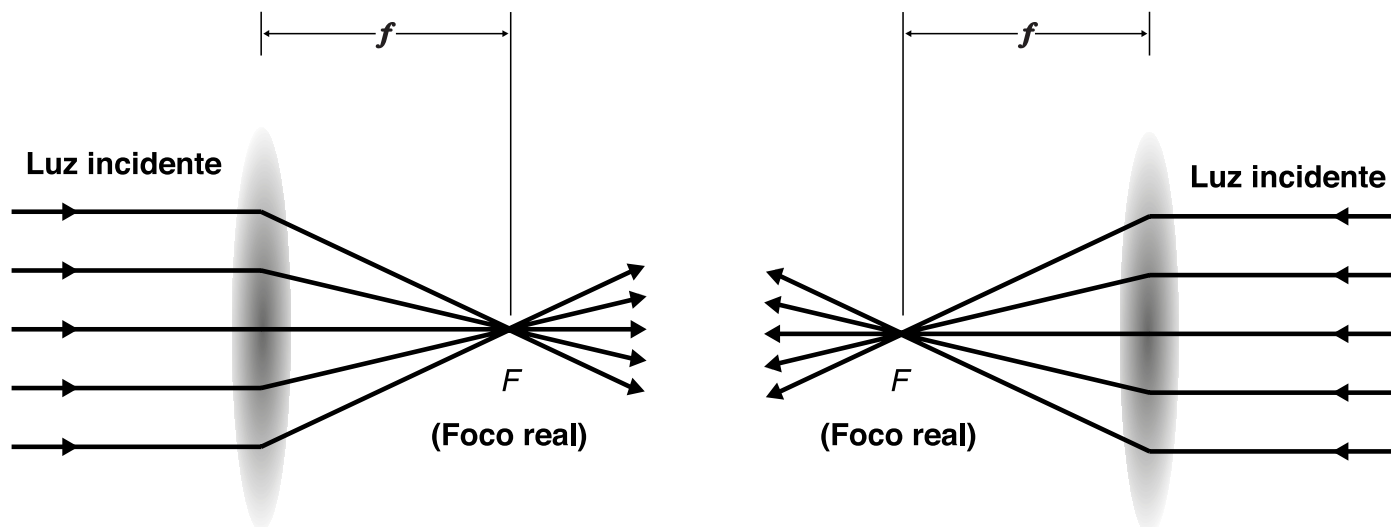


Figura 32. Focos y distancia focal para una lente biconvexa.

- 2) La **distancia focal**, es la distancia del foco a la lente.

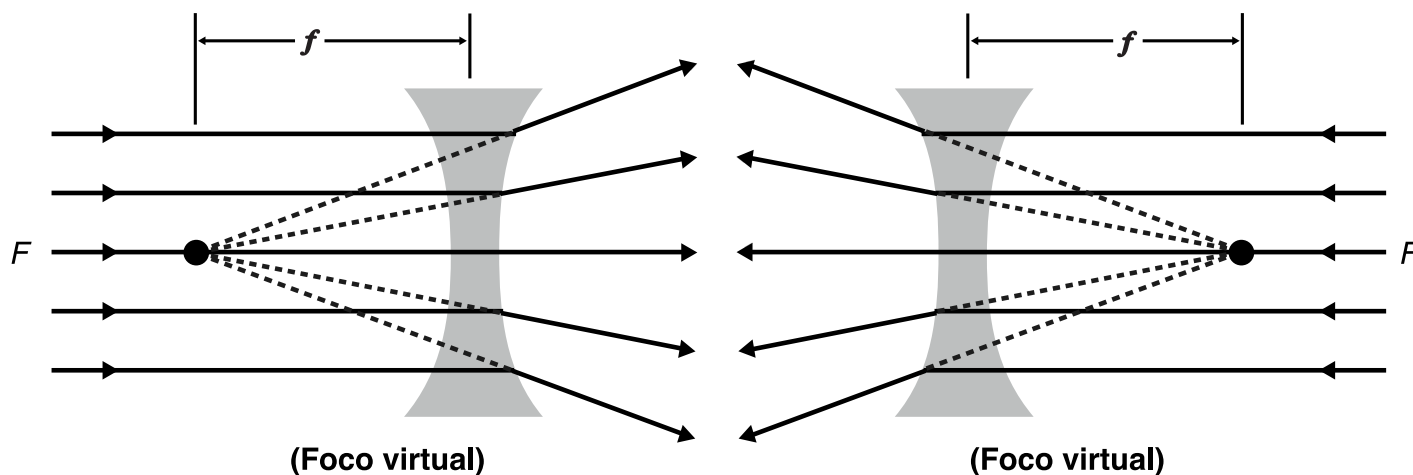


Figura 33. Focos y distancia focal para una lente biconcava.

Otro punto importante es aquel ubicado a una distancia igual al doble de la distancia focal ($2f$). Con estos puntos se puede seguir una guía, análoga a los espejos, para predecir las imágenes que se forman en las lentes. La **construcción de imágenes ópticas en lentes** se hace siguiendo los siguientes pasos (figura 34):

- 1) Se debe dibujar un **rayo (1)** desde la parte superior del objeto que será refractado, que pase por la lente y se dirija al segundo foco (para una lente convexa) o al primer foco (la prolongación del rayo, si es una lente cóncava).
- 2) Se debe dibujar un segundo **rayo (2)** horizontal desde la parte superior del objeto que pase por el primer foco (lentes convexas) y que se dirija al segundo foco (para lentes cóncavas).
- 3) Posteriormente, se traza el **rayo (3)** que pase por el centro geométrico de la lente, el cual la atravesará, pero sin sufrir ninguna modificación o desviación debida a la refracción.
- 4) La intersección entre los rayos **1**, **2** y **3** representa la ubicación de la parte superior de la imagen observada del objeto a través de la lente.

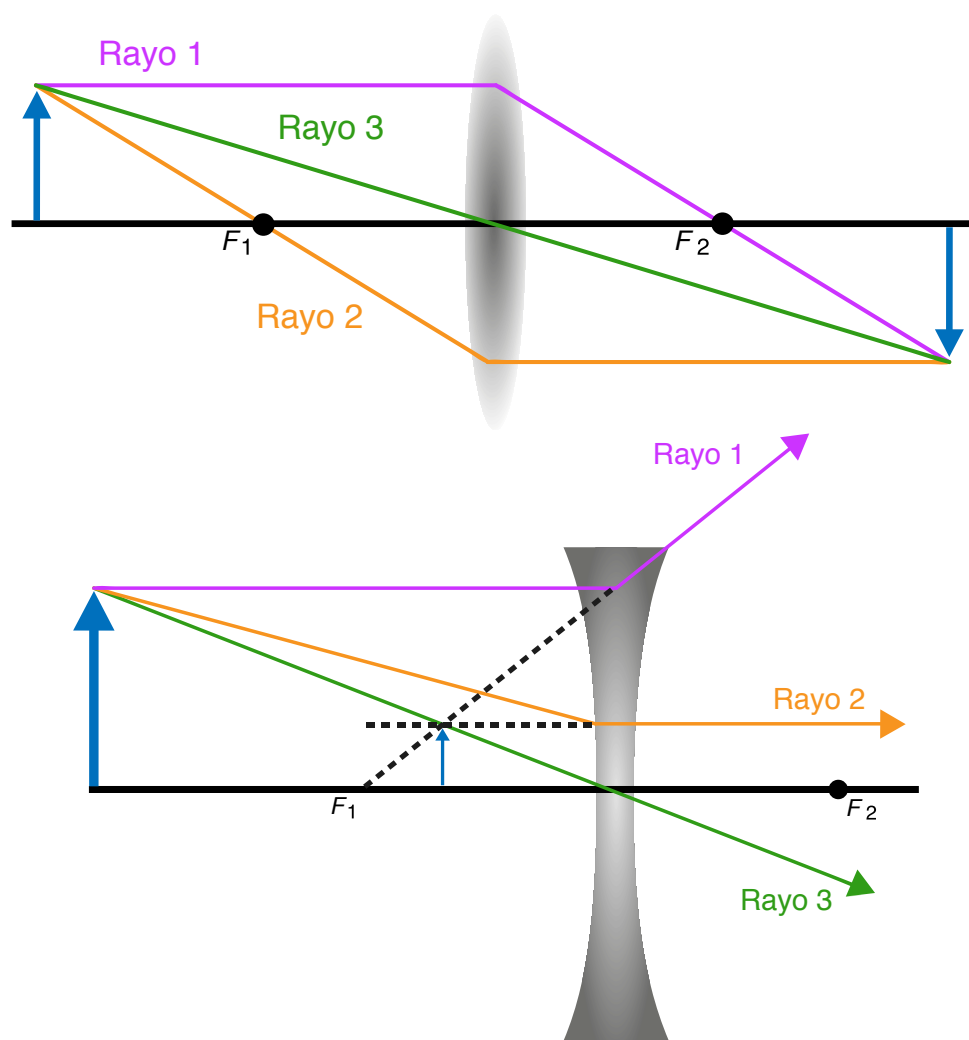


Figura 34. Construcción de imágenes en lentes biconvexas (arriba) y biconcavas (abajo).

Al igual que con los espejos, la imagen que se obtenga en las lentes dependerá de la distancia que tenga el objeto observado de la lente. En la tabla 2 se muestra el resumen de las distintas imágenes que se pueden formar en diversas situaciones para lentes biconvexas y bicóncavas.

Tabla 2. Imágenes formadas para lentes biconvexas y bicóncavas.

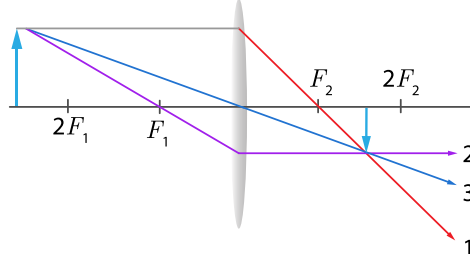
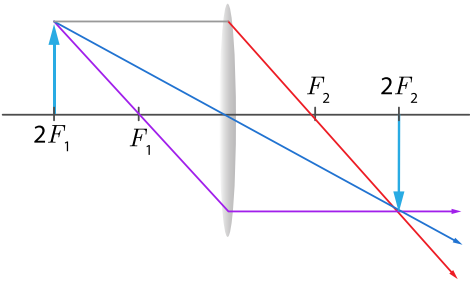
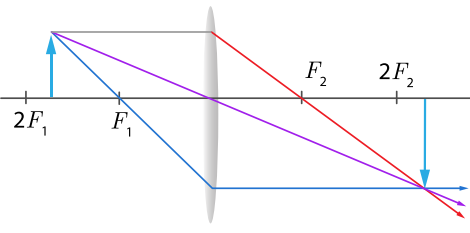
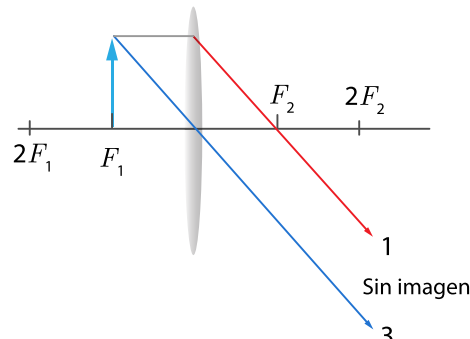
Ubicación del objeto	Ubicación y características de la imagen	Ejemplo visual
El objeto se encuentra más alejado que el doble de la distancia focal.	La imagen se ubica entre el foco y el doble de la distancia focal. Está invertida y es de menor tamaño. Es una imagen real.	
El objeto se encuentra en el doble de la distancia focal.	La imagen se ubica también en el doble de la distancia focal. Está invertida y es del mismo tamaño que el objeto. Es una imagen real.	
El objeto está entre el foco y el doble de la distancia focal.	La imagen se encuentra más alejada que el doble de la distancia focal. Está invertida y es de mayor tamaño. Es una imagen real.	
El objeto está en el foco.	No se genera ninguna imagen. Nota que los rayos 1 y 3 no se intersecan (son paralelos).	

Tabla 2. Imágenes formadas para lentes biconvexas y bicóncavas.

Ubicación del objeto	Ubicación y características de la imagen	Ejemplo visual
El objeto está entre el foco y la lente.	La imagen se encuentra detrás de la lente. No está invertida y es de mayor tamaño. Es una imagen virtual.	
Lente bicóncava (único caso)	Todas las imágenes formadas en lentes bicóncavas son virtuales, no están invertidas y son más pequeñas.	

Cierre

En esta unidad aprendiste sobre las ondas electromagnéticas, sus propiedades y sus aplicaciones en la tecnología actual. Además, aprendiste que la luz corresponde a una pequeña parte de este espectro y los elementos que nos permiten observar los objetos. Esperamos que el comprender estos temas te sirva en tu vida para tener una mejor comprensión del mundo que te rodea y aplicar ese conocimiento a tu favor.

Fuentes

Bueche, Frederick J., *Física general* [en línea], http://www.itya.unam.mx/~g.bruzual/Mecanica_Clasica/Fisica%20General%20-%20J.%20Bueche,%20E.%20Hetch%20.pdf, 10ª ed., Colección Schaum, México, McGrawHill, 2007.

Conrad Röntgen Wilhelm, The Nobel Prize, [en línea], <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1901/rontgen/facts/> (consultado el 28 de septiembre de 2019).

Khan, Academy, *Matemáticas: Trigonometría* [en línea], <https://es.khanacademy.org/math/trigonometry>, (consultado el 17 de septiembre de 2019).

Oyetza, Elena, *Conocimientos fundamentales de matemáticas: trigonometría y geometría analítica*, México, Pearson, 2007.

Resnick, Robert, Halliday, David y Krane Kenneth, *Física*, [en línea] https://www.academia.edu/27086444/Fisica_1_-_Resnick_4ta_Edici%C3%B3n, 4ª ed., CECSA, México, 1997, (consultado el 3 de octubre de 2019).

Serway, Raymond, *Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna*, vol. 2, 7ª ed., Cengage Learning, 2009.

Starr, Cecie y Taggart, Ralph, *Biología. La unidad y diversidad de la vida*, Cengage Learning, 2018.

Tipler, Paul, *Física*, México, Reverté, 1994.

Tippens, Paul, *Física, conceptos y aplicaciones* [en línea], https://www.academia.edu/18166499/Fisica_Conceptos_y_Aplicaciones_-_Paul_Tippens_-_Septima_Edicion, 7ª ed., México, McGrawHill, 2011, (consultado el 17 de septiembre de 2019).