

## Introducción: óptica, ley de Snell y lentes delgadas

La óptica es la rama de la física que estudia el comportamiento de la luz. En particular, la óptica geométrica describe su propagación mediante rayos luminosos, que representan la dirección en la que viaja la luz. Aunque la luz tiene una naturaleza más compleja, este modelo permite explicar fenómenos cotidianos como la formación de imágenes en espejos, lentes, lupas, anteojos, cámaras fotográficas y en el ojo humano.

Cuando la luz se propaga en un mismo medio, como el aire, lo hace en línea recta. Al llegar a la superficie que separa dos medios distintos, por ejemplo, aire y agua, se producen dos fenómenos: reflexión y refracción. La reflexión ocurre cuando la luz rebota en una superficie; la refracción ocurre cuando la luz atraviesa la superficie y cambia de dirección al pasar de un medio a otro.



*Ejemplo cotidiano de refracción: un objeto sumergido parece cambiar de posición.*

## Índice de refracción y longitud de onda

La refracción se debe a que la luz se propaga con distinta velocidad en distintos medios. Para describir esa diferencia usamos el índice de refracción  $n$ :

$$n = c / v$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $v$  es la velocidad de la luz en el medio considerado. Cuanto mayor es  $n$ , menor es la velocidad de la luz en ese medio. Por eso decimos que un medio con mayor índice de refracción es más refringente.

La luz también puede describirse como una onda. Como toda onda, su velocidad, frecuencia y longitud de onda se relacionan mediante:

$$v = \lambda f$$

Cuando la luz pasa de un medio a otro, su frecuencia no cambia, porque queda determinada por la fuente que emite la luz. En cambio, sí cambian su velocidad y su longitud de onda. Si la luz entra en un medio más refringente, su velocidad disminuye y su longitud de onda se acorta.

Con lo cual, también puede expresarse el índice de refracción a partir de la longitud de onda:

$$n = \lambda_0 / \lambda$$

donde  $\lambda_0$  es la longitud de onda en el vacío y  $\lambda$  es la longitud de onda en el medio. Por ejemplo, la luz roja tiene en el vacío una longitud de onda aproximada entre 620 nm y 750 nm. Al entrar en un vidrio, su longitud de onda disminuye, con un valor que depende del índice de refracción del vidrio.

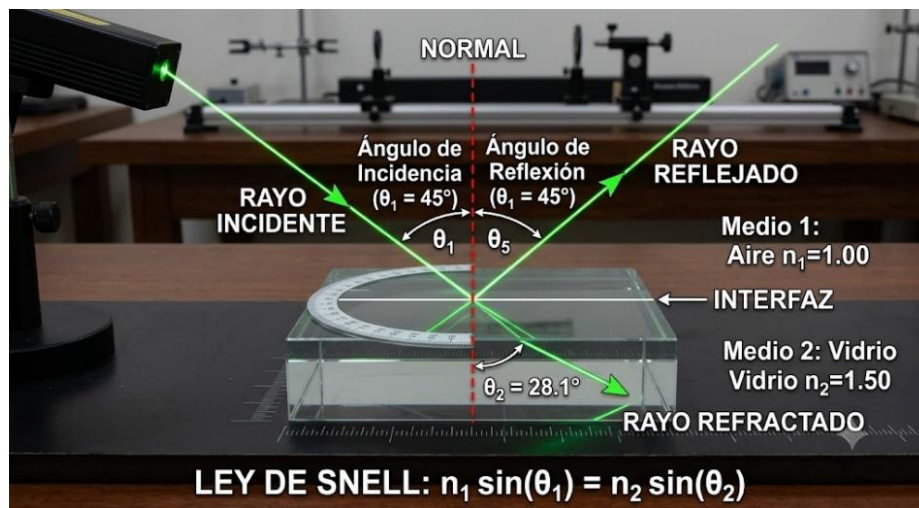
## Ley de Snell

La ley de Snell describe cuantitativamente el cambio de dirección que experimenta un rayo al pasar de un medio a otro. Relaciona los índices de refracción de ambos medios con los ángulos que forma el rayo antes y después de atravesar la superficie de separación:

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

- $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción de los medios 1 y 2.
- $\theta_1$  es el ángulo de incidencia.
- $\theta_2$  es el ángulo de refracción.

Los ángulos de la ley de Snell siempre se miden respecto de la normal. La normal es una recta imaginaria perpendicular a la superficie de separación entre los dos medios. Por lo tanto, el ángulo de incidencia es el ángulo entre el rayo incidente y la normal; el ángulo de refracción es el ángulo entre el rayo refractado y la normal. No se miden respecto de la superficie.



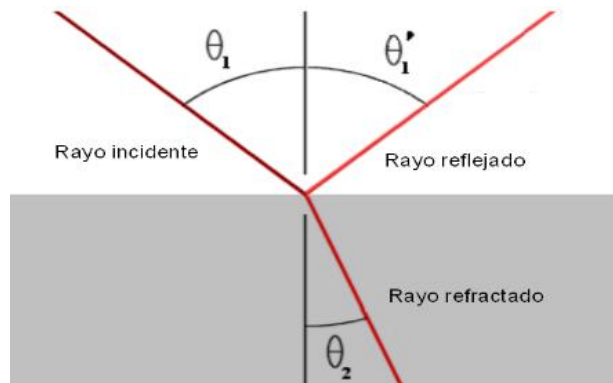
*Ángulos de incidencia, reflexión y refracción medidos respecto de la normal.*

Ejemplo: si un rayo incide desde el aire ( $n_1 = 1,00$ ) hacia el vidrio ( $n_2 = 1,50$ ) con un ángulo de incidencia de  $45^\circ$ , entonces:

$$1,00 \cdot \sin(45^\circ) = 1,50 \cdot \sin(\theta_2)$$

De allí se obtiene  $\theta_2 \approx 28,1^\circ$ . Como el rayo entra en un medio más refringente, se acerca a la normal.

¿Qué sucede con el rayo reflejado? Como se propaga en el mismo medio que el incidente, éste no cambia su dirección, por lo que el ángulo incidente y reflejado son el mismo,  $\theta_1 = \theta'_1$

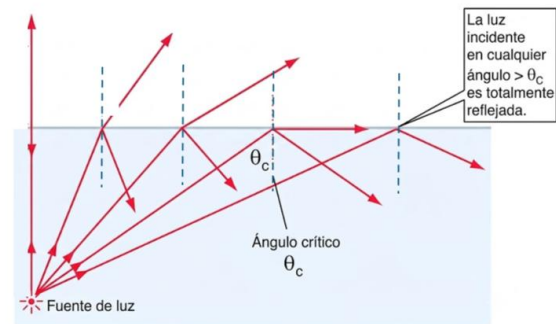


La **reflexión total interna** ocurre cuando la luz pasa de un medio más refringente a otro menos refringente, es decir, cuando  $n_1 > n_2$ . Existe un ángulo límite o crítico  $\theta_c$  para el cual el rayo refractado sale rasante a la superficie, formando un ángulo de  $90^\circ$  con la normal. A partir de la ley de Snell se obtiene:

$$n_1 \text{ seno}(\theta_c) = n_2 \text{ seno}(90^\circ)$$

$$\theta_c = \text{arcseno}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

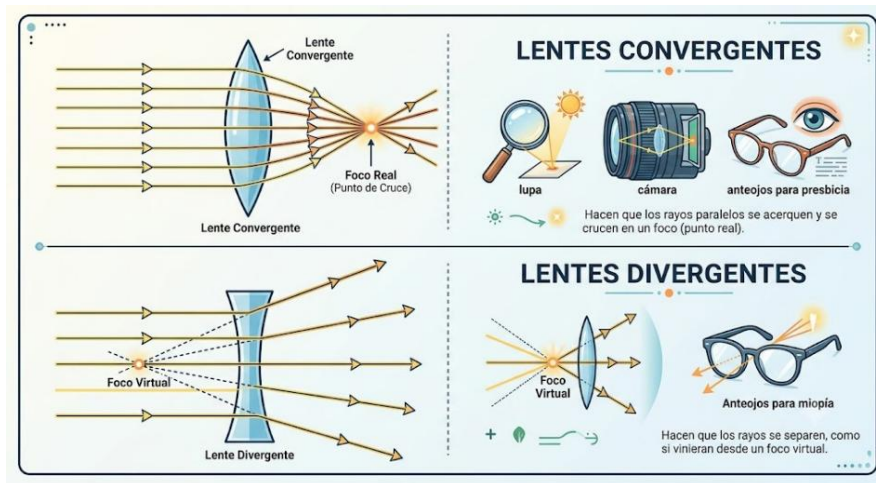
Para ángulos de incidencia mayores que  $\theta_c$ , el rayo no se refracta y se refleja totalmente dentro del primer medio.



## Formación de imágenes: lentes delgadas

A partir del estudio de la refracción podemos comprender el funcionamiento de las lentes. Una lente es un objeto transparente, generalmente de vidrio o plástico, que modifica la dirección de los rayos luminosos que la atraviesan. Según su forma, puede hacer que los rayos se junten o se separen.

- Una lente convergente hace que rayos paralelos al eje principal se acerquen entre sí.
- Una lente divergente hace que rayos paralelos al eje principal se separen entre sí.



*Lentes convergentes y divergentes.*

## Foco objeto y foco imagen

Para describir el comportamiento de una lente delgada, distinguimos dos focos: el foco objeto  $F$  y el foco imagen  $F'$ . El foco imagen  $F'$  se define a partir de rayos que llegan paralelos al eje principal: al atravesar la lente, esos rayos pasan por  $F'$  o se separan como si provinieran de  $F'$ . El foco objeto  $F$  se define a partir de rayos que, al llegar a la lente pasando por  $F$  o dirigidos hacia  $F$ , salen paralelos al eje principal.

En una lente convergente, el foco objeto está del lado desde donde llega la luz y el foco imagen del lado hacia donde sale. En una lente divergente ocurre lo contrario: el foco imagen queda del lado desde donde llega la luz y el foco objeto del lado hacia donde saldría la luz. Si el medio es el mismo a ambos lados de la lente, ambos focos están a la misma distancia del centro óptico.

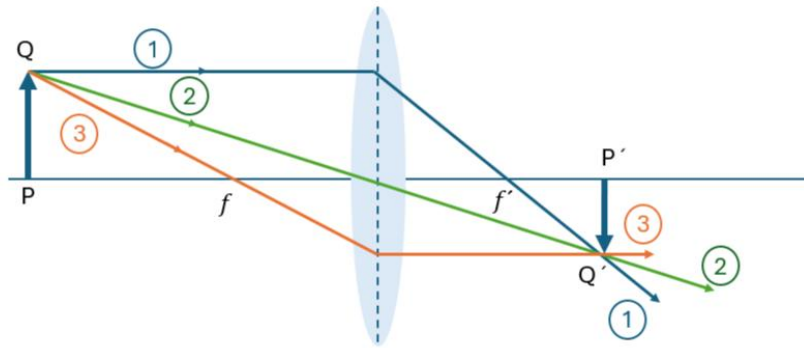
## Sistema de referencia

Para realizar el trazado de rayos y aplicar la ecuación de lentes delgadas, ubicamos la lente en el origen y consideramos que la luz viaja de izquierda a derecha. El eje principal es la recta que pasa por el centro óptico de la lente. En el modelo de lente delgada, un rayo que atraviesa el centro óptico no se desvía apreciablemente.

## Rayos principales

Para una lente convergente se usan tres rayos principales:

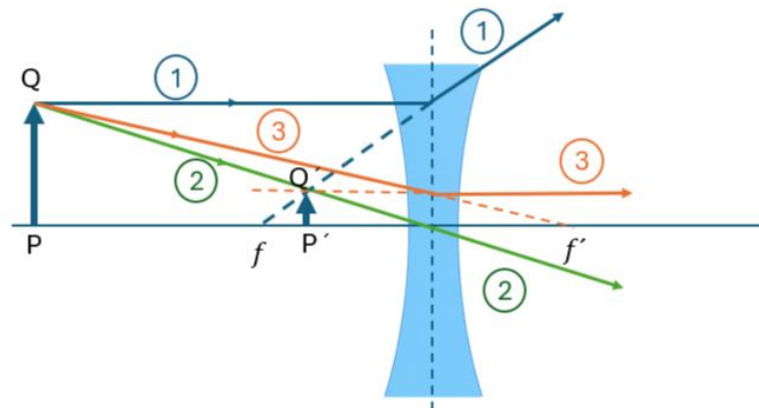
1. Un rayo que llega paralelo al eje principal y, al atravesar la lente, pasa por el foco imagen  $F'$ .
2. Un rayo que pasa por el centro óptico y no se desvía.
3. Un rayo que pasa por el foco objeto  $F$  y, al atravesar la lente, sale paralelo al eje principal.



*Trazado de rayos en una lente convergente.*

Para una lente divergente se usan reglas análogas:

1. Un rayo que llega paralelo al eje principal y, al atravesar la lente, se separa como si proviniera del foco imagen  $F'$ .
2. Un rayo que pasa por el centro óptico y no se desvía.
3. Un rayo que se dirige hacia el foco objeto  $F$  y, al atravesar la lente, sale paralelo al eje principal.



*Trazado de rayos en una lente divergente.*

Video sugerido para repasar el trazado de rayos: [youtube.com/watch?v=r1pUipwSEsg](https://www.youtube.com/watch?v=r1pUipwSEsg)

## Ecuación de lentes delgadas y convención de signos

Para resolver analíticamente los problemas utilizaremos la ecuación de lentes delgadas:

$$\frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{f}$$

donde  $S$  es la posición del objeto,  $S'$  es la posición de la imagen y  $f$  es la distancia focal. Con la luz viajando de izquierda a derecha, usamos la siguiente convención de signos:

| Magnitud | Signo positivo | Signo negativo |
|----------|----------------|----------------|
|----------|----------------|----------------|

|                       |                   |                  |
|-----------------------|-------------------|------------------|
| Distancia objeto $s$  | Objeto real       | Objeto virtual   |
| Distancia imagen $s'$ | Imagen real       | Imagen virtual   |
| Distancia focal $f$   | Lente convergente | Lente divergente |

Así, un objeto real tiene distancia objeto positiva. Una imagen real se forma del lado hacia donde salen los rayos y tiene distancia imagen positiva; una imagen virtual se forma del mismo lado que el objeto y tiene distancia imagen negativa.

## Potencia de una lente

Cuando se indican anteojos, no suele darse la distancia focal de la lente, sino su potencia, medida en dioptrías. La potencia  $P$  se define como:

$$P = 1 / f$$

con  $f$  medida en metros. Una lente convergente tiene potencia positiva y una lente divergente tiene potencia negativa. Las dioptrías son útiles porque expresan directamente la potencia óptica necesaria para corregir el ojo.

## Aumento lateral

Además de conocer la posición de la imagen, interesa saber si queda derecha o invertida y si es más grande o pequeña que el objeto. Para eso usamos el aumento lateral  $A$ :

$$m = y' / y = - S' / S$$

- Si  $m > 0$ , la imagen es derecha.
- Si  $m < 0$ , la imagen es invertida.
- Si  $|m| > 1$ , la imagen es más grande que el objeto.
- Si  $|m| < 1$ , la imagen es más pequeña que el objeto.
- Si  $|m| = 1$ , la imagen tiene el mismo tamaño que el objeto.

## Actividades y simulaciones

En la simulación de PhET se pueden explorar lentes convergentes y divergentes, modificar la posición del objeto y observar cómo cambian la posición, el tamaño y la orientación de la imagen:

[https://phet.colorado.edu/sims/html/geometric-optics/latest/geometric-optics\\_all.html?locale=es](https://phet.colorado.edu/sims/html/geometric-optics/latest/geometric-optics_all.html?locale=es)

En la simulación, los objetos son reales, pero las imágenes pueden ser reales o virtuales. También pueden quedar derechas o invertidas, aumentadas o reducidas. Probá modificar la distancia focal, la posición del objeto y los rayos principales para comparar los distintos casos.

Imágenes virtuales y reales ¿Cómo se ven?



*Ejemplos de imagen virtual y real con una lente convergente.*

Las imágenes virtuales están del mismo lado que el objeto, como en el ejemplo de la lupa), mientras que las reales ocurren del otro lado, como la proyección sobre una pantalla en la parte derecha de la imagen.

Para ver más ejemplos: <https://www.youtube.com/watch?v=fyYaDeTonVQ> el video está en inglés, pero se pueden activar subtítulos en español.

## Miopía, hipermetropía y presbicia: el ojo humano

### Acomodación del ojo

El ojo no enfoca siempre de la misma manera. Para ver objetos ubicados a distintas distancias, el cristalino cambia ligeramente su forma. A este proceso se lo llama acomodación.

Cuando observamos un objeto lejano, los rayos de luz llegan al ojo prácticamente paralelos. En un ojo sano en reposo, esos rayos se enfocan directamente sobre la retina. Por eso se dice que el ojo normal, relajado, está enfocado al infinito.

En cambio, cuando miramos un objeto cercano, los rayos llegan más divergentes. Para poder formar la imagen sobre la retina, el cristalino debe aumentar su curvatura, es decir, debe hacerse más convergente. Ese esfuerzo del ojo es la acomodación.

Existe una distancia mínima a la que un ojo sano puede enfocar con nitidez sin dificultad excesiva. Esa distancia se llama punto próximo y, para un ojo normal joven, se toma aproximadamente como:

25 cm

Por eso, en muchos ejercicios de óptica se considera que la distancia mínima de visión distinta es de 25 cm. Es decir, un objeto colocado a unos 25 cm del ojo puede verse claramente con acomodación máxima.

Cuando el ojo no logra formar la imagen exactamente sobre la retina, aparecen los defectos de la visión. Los más comunes son:

### Miopía

En la **miopía**, la persona ve bien de cerca, pero ve borrosos los objetos lejanos. Esto ocurre porque, para objetos lejanos, la imagen se forma **antes de la retina**.

Es decir, el ojo miope tiene un exceso de convergencia, o bien es demasiado largo respecto de su poder óptico.

La miopía se corrige con una **lente divergente**, que separa los rayos antes de que entren al ojo. De esta manera, el sistema ojo-lente logra formar la imagen sobre la retina.

### **Hipermetropía**

En la **hipermetropía**, la persona tiene dificultad para ver objetos cercanos. En este caso, la imagen se formaría **detrás de la retina** si el ojo no acomodara lo suficiente.

El ojo hipermetrope tiene poca convergencia, o bien es demasiado corto respecto de su poder óptico.

La hipermetropía se corrige con una **lente convergente**, que ayuda a juntar los rayos antes de que ingresen al ojo, permitiendo que la imagen se forme sobre la retina.

### **Presbicia**

La **presbicia** aparece generalmente con la edad. Se debe a que el cristalino pierde elasticidad y ya no puede aumentar suficientemente su curvatura para enfocar objetos cercanos.

Por eso, una persona con presbicia aleja los objetos para poder verlos mejor.

La presbicia se corrige con **lentes convergentes** para visión cercana.

En el siguiente enlace podés visualizar lo detallado, <https://www.youtube.com/watch?v=mii5hMBdFgY>