

Electro y Óptica: Resumen Guía 4

Tomás Ciccarella

Verano 2026

1. Introducción: Ley de Snell

Cuando uno tiene una onda que cambia de medio, ésta sufrirá una reflexión y una refracción, es decir, parte de la onda “rebotará” en la interfaz y parte pasará de largo cambiando el ángulo con el que entra en la interfaz (ver Figura 1). Ver cuánto de la onda de refleja y cuánto se refracta no será parte de nuestra materia, pero cualquier interesado puede investigar qué son los coeficientes de Fresnel y con ello entender qué parte de onda se va en cada uno de estos fenómenos.

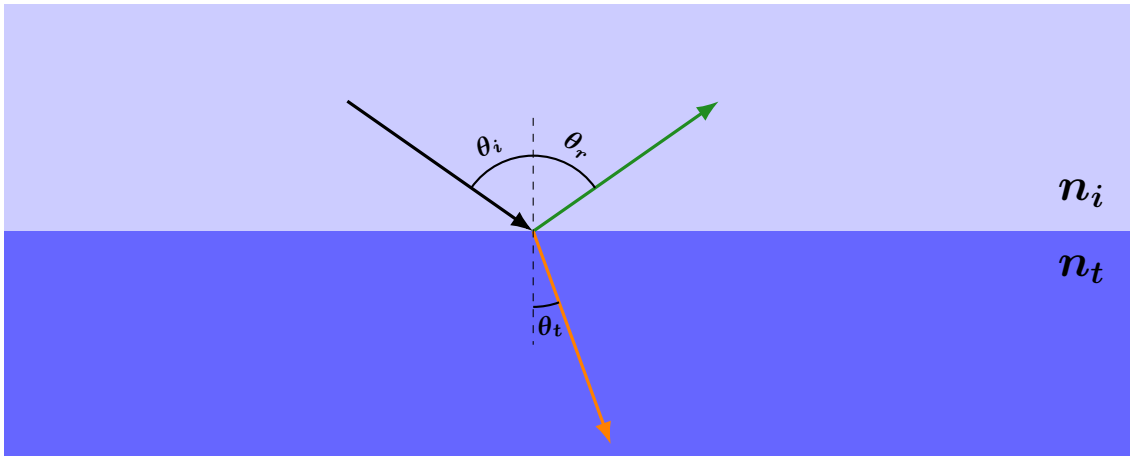


Figura 1: efecto de reflexión y refracción de una onda cuando se produce un cambio de medio. La flecha negra representa la onda incidente, la flecha verde representa la onda reflejada, mientras que la flecha naranja representa la onda refractada.

Podemos preguntarnos, ¿cómo se realiza este cambio de dirección de la onda? La respuesta a esta pregunta está en que cada medio que tengamos va a tener una velocidad permitida para la onda (piensen como cuando uno corre, es distinta la velocidad si corremos en asfalto, en pasto o arena, o misma es distinta la velocidad a la que nos movemos si nadamos), es velocidad permitida va a estar dada por el índice de refracción del medio (n), el cual se relaciona con la velocidad a partir de

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.1)$$

y se puede observar que como la velocidad de la onda no puede ser mayor que la velocidad de la luz en el vacío (c) entonces tendremos que $n \leq 1$ (pueden chusmear algunos valores típicos haciendo click acá). Lo importante es que este cambio de velocidades al cambiar el medio genera que la parte de la onda que penetra en el nuevo medio se curve en un ángulo que llamaremos θ_t (la t es de transmitido y usaremos esta notación para no confundirlo con r que usaremos de reflexión) a través de lo que conocemos como la ley de Snell (o pueden encontrarla también como ley de Descartes, de refracción, Ibn Sahl entre otros nombres):

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (1.2)$$

Junto con la ley de Snell, la óptica nos trae una segunda relación entre los ángulos de una interfaz que es la conocida como ley de reflexión y nos indica que el ángulo con el que incide la onda θ_i y el ángulo con el que ésta se refleja son iguales:

$$\theta_i = \theta_r \quad (1.3)$$

Nota

Pueden notar en la Figura 1 que los ángulos los medimos respecto a la normal a la superficie a diferencia de lo que uno habitúa que es medirlo con respecto a la horizontal.

1.1. Reflexión Total Interna (RTI)

A partir de la ley de Snell se puede observar que si el medio en el que la onda se refracta tiene mayor índice que el medio original, entonces tendremos que la onda transmitida tendrá un ángulo menor (estará más pegada a la normal); mientras que si el medio en el que la onda se refracta tiene menor índice que el medio original, entonces tendremos que la onda transmitida tendrá un ángulo mayor (estará más lejos de la normal). Este fenómeno se puede ver haciendo las cuentas y observando la Figura 2. Además este fenómeno dará lugar a lo conocido como reflexión total interna (RTI).

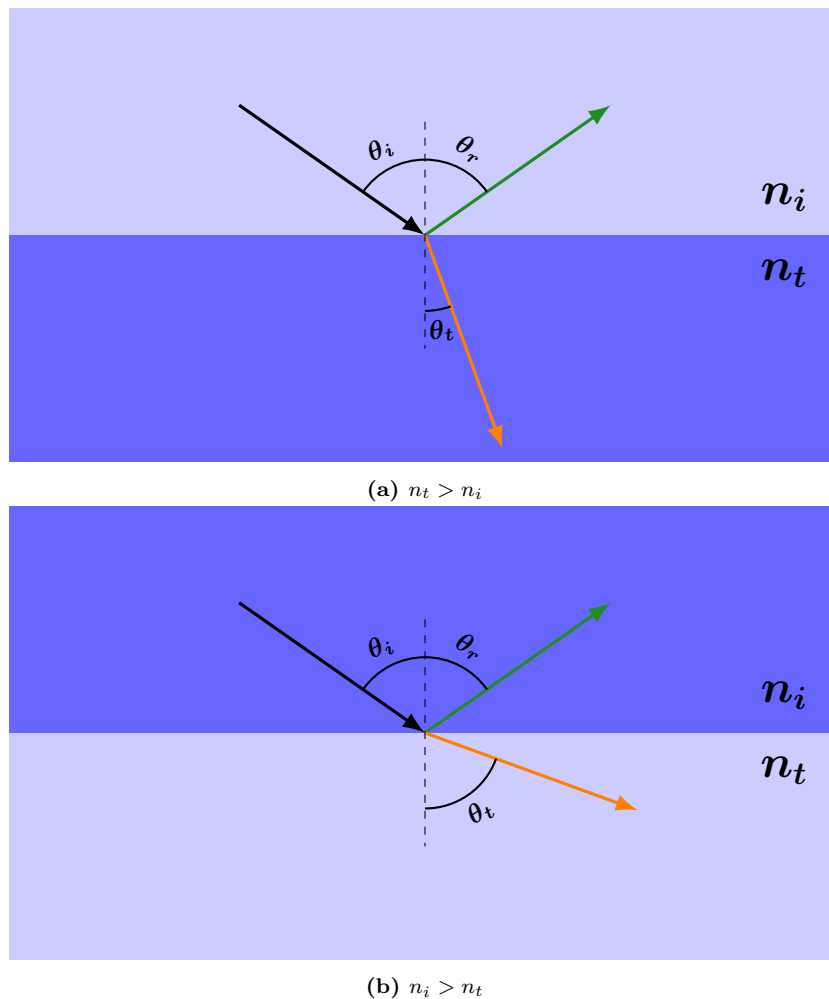


Figura 2: refracción de la onda según si el medio en que la onda se refracta tiene mayor índice que el original o al revés.

Como mencionamos previamente, y se puede notar de la 2 que si $n_i > n_t$ entonces la onda refractada se irá alejando de la normal y acercándose a la interfaz haciendo que en algún punto la onda transmitida esté totalmente horizontal lo que implica que para ángulos de incidencia mayores a ese la onda querá cada vez alejarse más de la normal pero ya no podrá hacerlo, haciendo entonces que la onda transmitida desaparezca y sólo se observe una onda reflejada. Este fenómeno es el que se conoce como Reflexión Total Interna ya que sólo se refleja la onda (pueden ver un video de este fenómeno haciendo click acá). De acá surge la pregunta, ¿cuál es el mínimo ángulo para el cual ocurre RTI? Este ángulo va a ser tal que cuando la onda incida tengamos que la refracción tenga $\theta_t = 90^\circ$, por tanto usando la ley de Snell tenemos:

$$n_i \sin \theta_c = n_t \underbrace{\sin 90^\circ}_{=1}$$

$$\sin \theta_c = \frac{n_t}{n_i} \quad \implies \quad \theta_c = \arcsin \left(\frac{n_t}{n_i} \right) \quad (1.4)$$

dónde llamé como θ_c al ángulo de incidencia porque a este ángulo especial dónde tenemos que $\theta_t = 90^\circ$ lo conocemos como ángulo crítico y es tal que si $\theta_i > \theta_c$ tendremos RTI pero si $\theta_i < \theta_c$ existirá una refracción (por eso lo conocemos como el ángulo mínimo para que haya RTI).

¿Cómo me convengo de que este ángulo existe?

Para convencerse que este ángulo existe podemos usar la ley de Snell para despejar cómo es el ángulo de transmisión respecto el ángulo de incidencia y los índices de refracción:

$$\theta_t = \arcsin \left(\frac{n_i}{n_t} \sin \theta_i \right) \quad (1.5)$$

ahora, pueden jugar con la calculadora y notar que si lo que está dentro del arcsin es mayor que 1 (o menor que -1 pero no tiene sentido físico que sea negativo) entonces tendremos un *math error*, es decir, no existe un valor de θ_t si lo que está dentro del arcsin es mayor que 1. Utilizando esta idea podemos pedir lo siguiente:

$$\frac{n_i}{n_t} \sin \theta_i \leq 1$$

$$\sin \theta_i \leq \frac{n_t}{n_i}$$

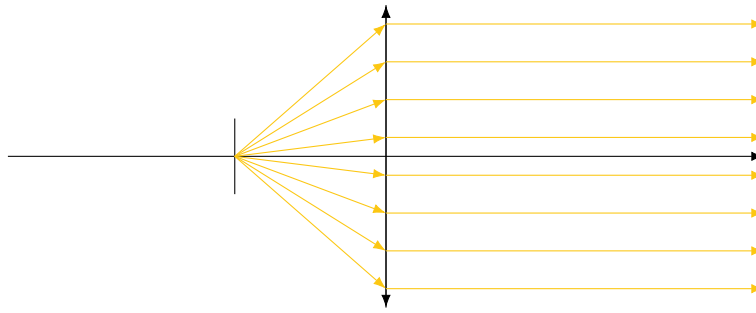
$$\theta_i \leq \arcsin \left(\frac{n_t}{n_i} \right) \quad \implies \quad \theta_i \leq \theta_c \quad (1.6)$$

en conclusión, llegamos a que para que haya una onda refractada necesitamos que el ángulo de incidencia sea menor al ángulo crítico. (En realidad hay un menor igual, les dejo para pensar ¿porqué está ese igual? ¿Qué significa?)

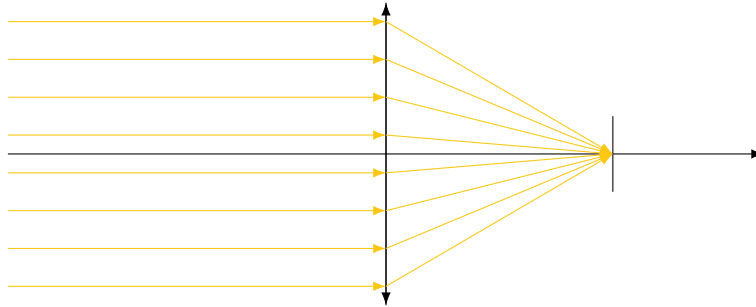
2. Lentes

Ahora que sabemos que cuando se produce un cambio de medio la luz se curva entonces uno puede usar esto a su favor para ir curvando la imagen y poder llevarla al lugar más conveniente; esa es la función básica de una lente, busca mover la luz a un punto particular para poder formar imágenes en lugares convenientes para uno. Para poder hacer esto, uno debe entender cómo funcionan estas para lo cual primero introduciremos algunas cosas que se suelen usar cuando trabajamos con óptica geométrica:

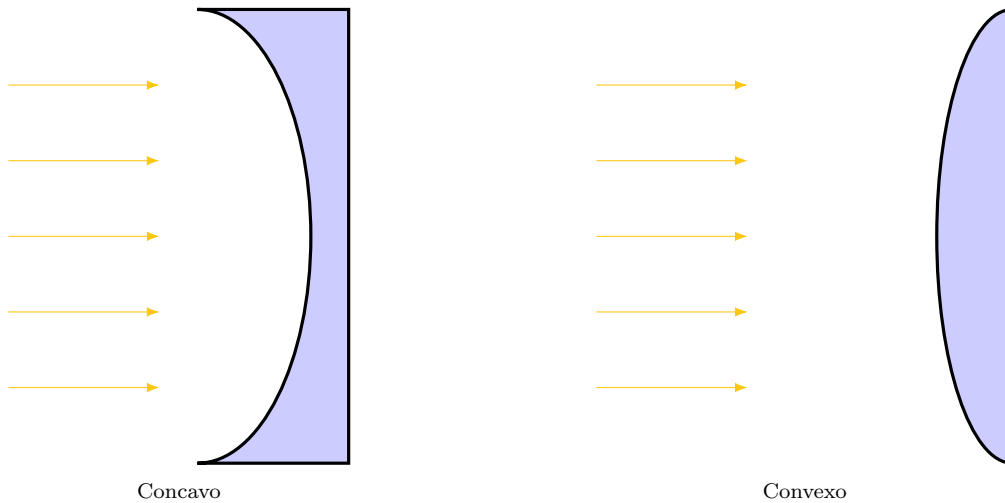
- Índice de refracción (n): tiene que ver con el material del cual va a estar hecha la lente. Es la que mencionamos cuando hablamos de la ley de Snell.
- Distancia objeto (s): la consideraremos positiva mientras esté a la izquierda de la lente (o del lado en que entra la luz). Y representa la distancia que hay entre la lente y el objeto.
- Distancia imagen (s'): la consideraremos positiva mientras esté a la derecha de la lente (o del lado en que sale la luz). Y representa la distancia que hay entre la lente y la imagen.
- Imagen real: se forma cuando la imagen requiere de una pantalla para poder verse, lo que implica que s' debe ser positivo, es decir, la imagen se debe formar después de la lente.
- Imagen virtual: se forma cuando la imagen no requiere de una pantalla para poder verse (de hecho si ponen una pantalla no van a ver nada, sólo una mancha de luz), lo que implica que s' debe ser negativo, es decir, la imagen se debe formar antes de la lente.
- Foco objeto: es una distancia a la lente dónde si pongo el objeto su imagen se formará en el infinito.



- Foco imagen: es una distancia a la lente dónde si tengo rayos paralelos (del infinito) los rayos convergen en ella.



- Radio de curvatura: nos indica qué tipo de curvatura tendrán las lentes, es decir si van a ser cóncavas o convexas, entonces si el objeto se curva hacia la derecha diremos que es cóncavo y si de curva a la izquierda diremos que es convexo



Para poder relacionar la distancia objeto, imagen, los índices de refracción, la curvatura de la dioptra y los focos se hace uso de la ecuación de la potencia de las dioptras que es la siguiente relación:

$$\Phi = \frac{n}{s} + \frac{n'}{s'} = \frac{n + n'}{R} = \frac{n}{f} = \frac{n'}{f'} \quad (2.1)$$

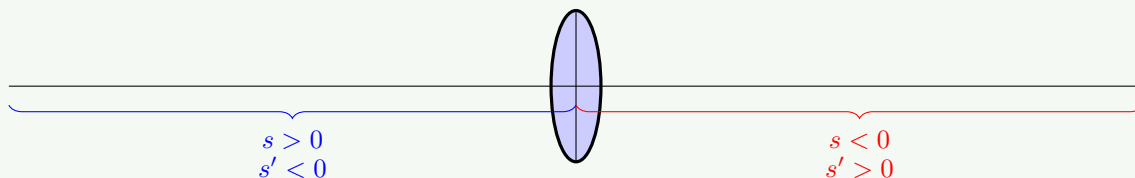
Comentario: signos

Dependiendo del apunte de óptica dónde lean las fórmulas que usamos y usaremos en este PDF tienen signos distintos y eso se debe a cómo se toma la convención de signos a la hora de escribir la distancia objeto y la distancia imagen. Nosotros, como mencionamos previamente, consideramos la siguiente convención:

- La luz va de izquierda a derecha, por tanto el lugar de luz entrante a la lente es el izquierdo y el lugar de luz saliente a la lente es el derecho.
- La distancia objeto s la consideraremos positiva si estamos del lado izquierdo de la lente, y la consi-

deraremos negativa si estamos del lado derecho de la lente.

- La distancia imagen s' la consideraremos negativa si estamos del lado izquierdo de la lente y la consideraremos positiva si estamos del lado derecho de la lente.
- Los focos los consideraremos positivos si el foco objeto está del lado izquierdo y el foco imagen está del lado derecho. Si los focos están al revés diremos que éstos son negativos y representarán a las lentes divergentes.



Ahora que conocemos a la potencia de la dioptra, podemos armarnos una lente como dos dioptras juntas (una va a representar el cambio de medio del aire al medio del vidrio que es la lente y la segunda de este vidrio hacia el aire nuevamente), pero nosotros consideraremos que la lente es muy delgada lo que se traduce en pensar como que la lente curvará la luz pero sin pensar en que tenemos dos cambios de medios. Al hacer esto vamos a pensar entonces que siempre tendremos el mismo valor de n lo que implica que la ecuación de la potencia de la lente se puede transformar en la ecuación de Gauss que nos indica lo siguiente:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} = \frac{1}{f'} \quad (2.2)$$

Otro uso típico que tenemos con las lentes es el de aumentar o disminuir el tamaño de objetos como puede ser el uso de una lupa, un microscopio o un telescopio. Para ello, debemos definir cómo ver el aumento de una imagen, y eso se hará a través de la siguiente fórmula:

$$m = -\frac{ns'}{n's} \quad (2.3)$$

pero hay que tener en cuenta que si tenemos varias lentes y queremos ver el aumento total, entonces debemos ver cómo nos queda el aumento realizado por cada lente, lo que significa que debemos multiplicar el aumento de cada lente por separado para obtener el aumento total:

$$M = m_1 \cdot m_2 \cdots m_n = \prod_{i=1}^n m_i \quad (2.4)$$

siendo m_i el aumento de la lente i -ésima.

3. Trazado de Rayos

El trazado de rayos consiste en pensar que de cada punto de la imagen salen rayos de luz en todas las direcciones, entonces en particular vamos a tener 3 rayos que son los más importantes:

- El rayo que viene horizontal (del infinito) al pasar por la lente, va hacia el foco imagen. Ver rayo **violeta** en las figuras de abajo.
- El rayo que pasa en dirección del foco objeto va a ir horizontal (hacia el infinito). Ver rayo **naranja** en las figuras de abajo.
- El rayo que pasa por el centro de la lente sigue recto. Ver rayo **verde** en las figuras de abajo.

En el punto en que se unen los tres rayos vamos a tener la imagen y según si se forma de un lado u otro tendremos un objeto real o virtual. Veamos entonces algunos ejemplos de cómo hacer el trazado de rayos (donde pondremos la lente como una flecha con dos puntas):

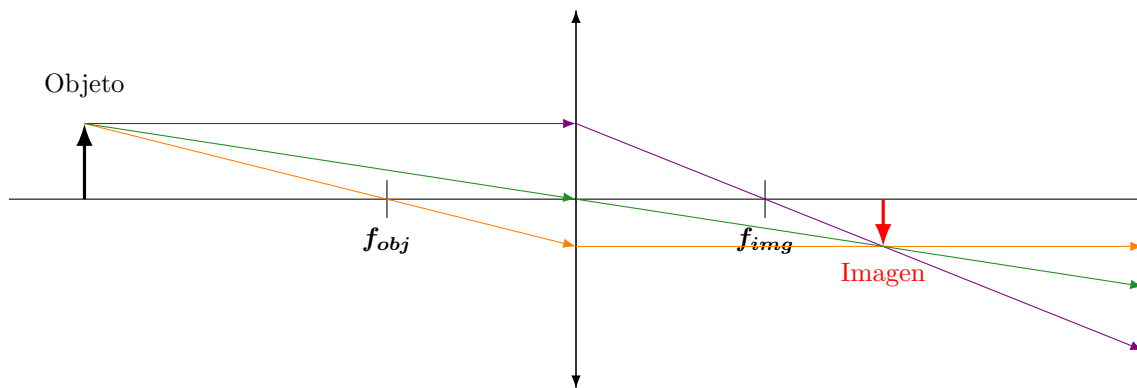


Figura 4: podemos ver que la imagen está invertida (al revés) y disminuida (más chica). Además, como la imagen está a la derecha de la lente (por tanto $s' > 0$), ésta será real.

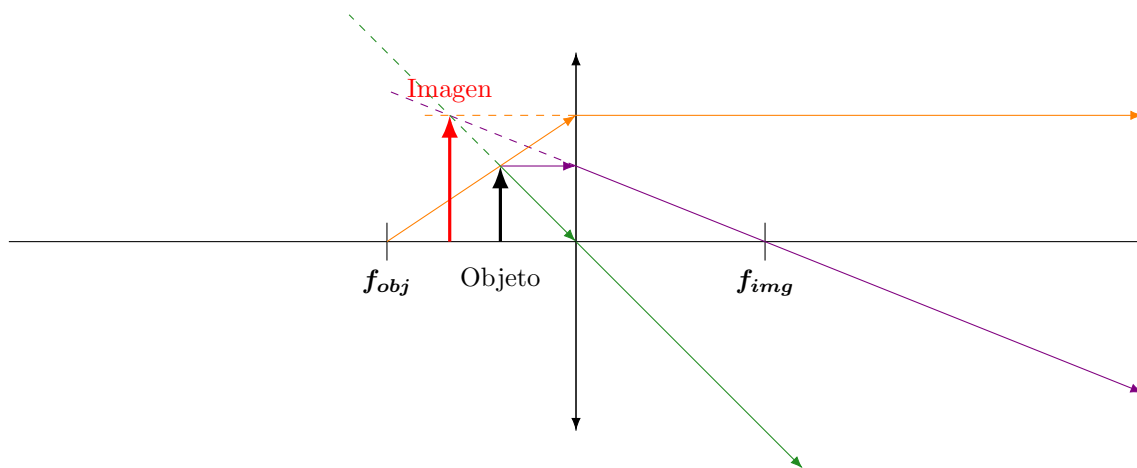


Figura 5: como vemos que la imagen no se forma del lado derecho, entonces continuamos las flechas hacia atrás (manteniendo la dirección que tienen luego de pasar por la lente) para ver dónde se juntan estas flechas, hacemos esto con líneas entrecortadas. Vemos entonces que la imagen nos queda directa (sin invertir), aumentada y es virtual ya que está del lado izquierdo (por tanto $s' < 0$).

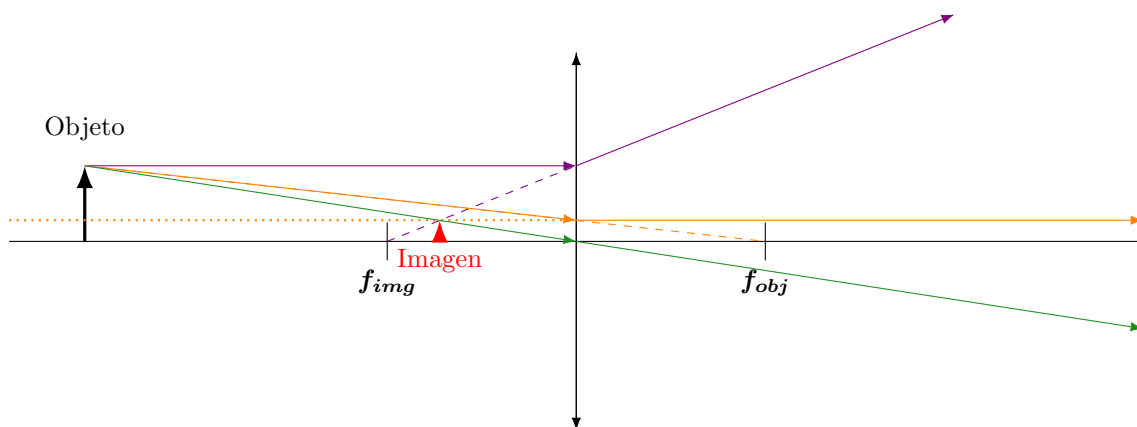


Figura 6: como vemos que la imagen no se forma del lado derecho, entonces continuamos las flechas hacia atrás (manteniendo la dirección que tienen luego de pasar por la lente) para ver dónde se juntan estas flechas, hacemos esto con líneas punteadas. Vemos entonces que la imagen nos queda directa (sin invertir), disminuida y es virtual ya que está del lado izquierdo (por tanto $s' < 0$)

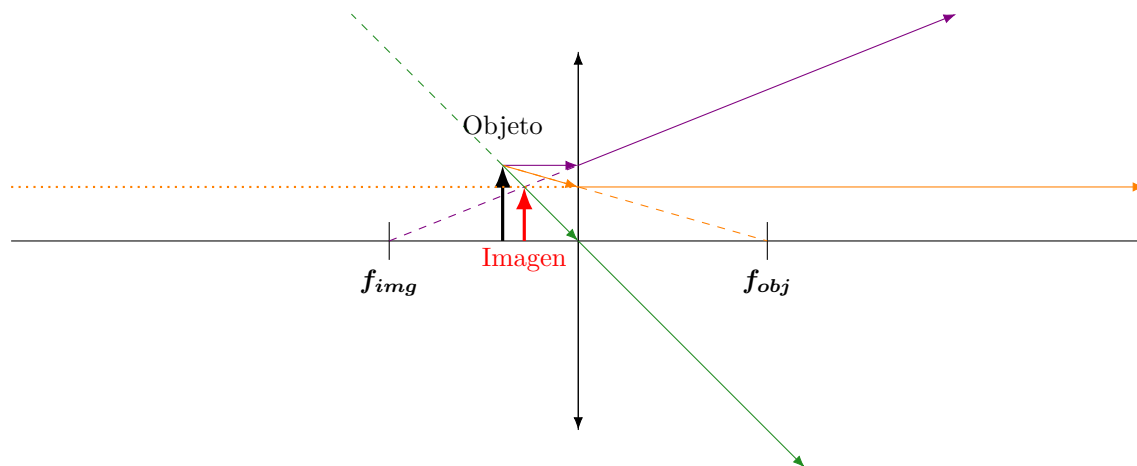


Figura 7: como vemos que la imagen no se forma del lado derecho, entonces continuamos las flechas hacia atrás (manteniendo la dirección que tienen luego de pasar por la lente) para ver dónde se juntan estas flechas, hacemos esto con líneas punteadas. Vemos entonces que la imagen nos queda directa (sin invertir), disminuida y es virtual ya que está del lado izquierdo (por tanto $s' < 0$)

La Figura 6 y 7 representan una lente divergente, estas lentes tienen los focos ubicados al revés a lo que veníamos tomando habitualmente, es decir, nuestros focos serán negativos (el foco objeto estará a la derecha y el foco imagen a la izquierda), eso implica que los haces de luz que llegan a la lente no formarán una imagen a la derecha ya que como su nombre indica divergerán los haces no juntándose post-lente (salvo que pongamos una segunda lente que converja los haces). Noten que para armar el trazado de rayos de estas lentes seguimos usando las reglas de los rayos fundamentales del trazado de rayos que mencionamos previamente.

Juega y aprende

Para terminar de ver los trazados de rayos, les recomiendo jugar un rato con la simulación del siguiente link: <https://phet.colorado.edu/es/simulations/geometric-optics>. En él van a poder cambiar los tipos de objetos, los tipos de lente y ver cómo se hace el trazado de rayos, así que les propongo jugar y ver qué pasa si están de un lado y del otro del foco para cada tipo de lente, también pueden usar la regla para ver las distancias y probar la ecuación de Gauss, o ver qué pasa con los espejos.