

Fibra óptica: La fibra óptica es una tecnología que permite transmitir información utilizando luz en lugar de electricidad. Está formada por hilos muy delgados de vidrio o plástico por los que viaja la luz, reflejándose continuamente en el interior completamente cada vez, **reflexión total interna**.

Este fenómeno ocurre cuando la luz que viaja por un medio más denso (como el vidrio de la fibra) choca con la pared interna en un ángulo tal que, en vez de salir, rebota completamente hacia adentro. Esto permite que la señal de luz viaje grandes distancias sin perder intensidad. La fibra óptica se utiliza en telecomunicaciones, internet, medicina (como en endoscopios), y en algunos sensores industriales, por su gran velocidad y capacidad de transmitir datos con mucha precisión, (Figura 3-25).

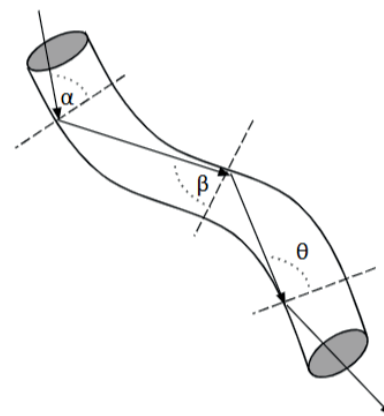


Figura 3-25: La luz queda atrapada, rebotando dentro de la varilla, ya que los ángulos de incidencia son mayores que el ángulo crítico.

3.5 LENTES DELGADAS

En este apunte vamos a estudiar la formación de imágenes a través de **lentes delgadas**, utilizando la **aproximación paraxial** (rayos cercanos al eje óptico y con pequeños ángulos), con el objetivo de comprender el funcionamiento de instrumentos ópticos y fenómenos cotidianos relacionados con la luz y la visión.

Aprenderemos a **diferenciar objetos e imágenes reales y virtuales**, a **trazar los rayos** principales en lentes convergentes y divergentes, y a **construir imágenes** gráficamente.

También veremos cómo **calcular la distancia focal** de una lente y a aplicar la **fórmula de las lentes delgadas** para determinar la posición y el tamaño de las imágenes formadas.

3.5.1 Sistema óptico

El sistema óptico más usado es una lente, o un conjunto de lentes, o un espejo o el conjunto de lentes y espejos, un prisma o varios, etc.

La función de un sistema óptico es recoger y remodelar una parte del frente de onda incidente, a menudo con la intención esencial de formar una imagen del objeto.

Una lente es un dispositivo refractor que reconfigura la distribución de la energía emitida. Una lente delgada es aquella cuyo espesor es despreciable frente a otras longitudes ópticas como radios de curvatura, distancias focales, etc.

El ojo humano funciona como un sistema óptico complejo que permite la visión al enfocar la luz en la retina. Este sistema, compuesto principalmente por la córnea y el cristalino, refracta los rayos de luz para formar una imagen invertida en la retina. Las células fotorreceptoras de la retina convierten esta imagen en señales nerviosas que son enviadas al cerebro para su interpretación, permitiendo la percepción visual.

Cuando nos referimos al objeto, nos referimos por ejemplo a la persona que estamos mirando, cuya imagen se forma en nuestra retina. Como vemos en este caso la imagen es invertida. Dependiendo



Figura 3-26: Sistema óptico, conjunto de elementos que se utilizan para manipulan la luz, como lentes y espejos, para controlar la forma en que la luz viaja y, por lo tanto, la imagen que se forma.

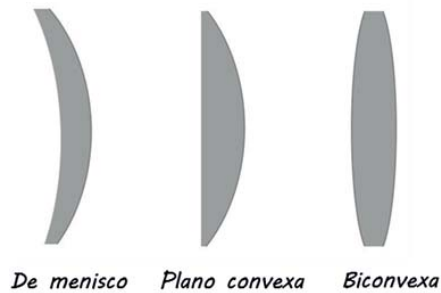


Figura 3-28: Lentes convergentes.

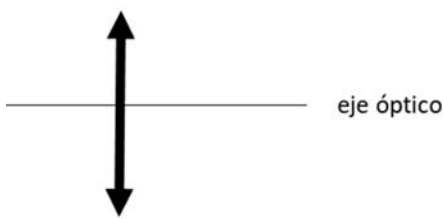


Figura 3-29: Representación esquemática de una lente convergente.

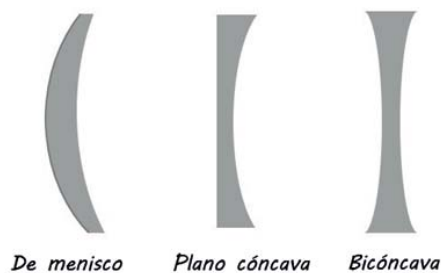


Figura 3-30: Lentes divergentes.

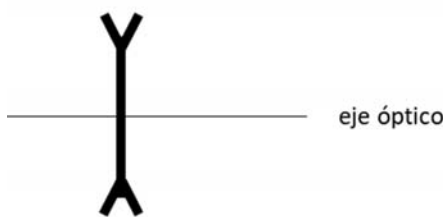


Figura 3-31: Representación esquemática de una lente divergente.

de la configuración del sistema, la imagen puede ser derecha o invertida (Figura 3-27). Más adelante estudiaremos al ojo con mayor profundidad.

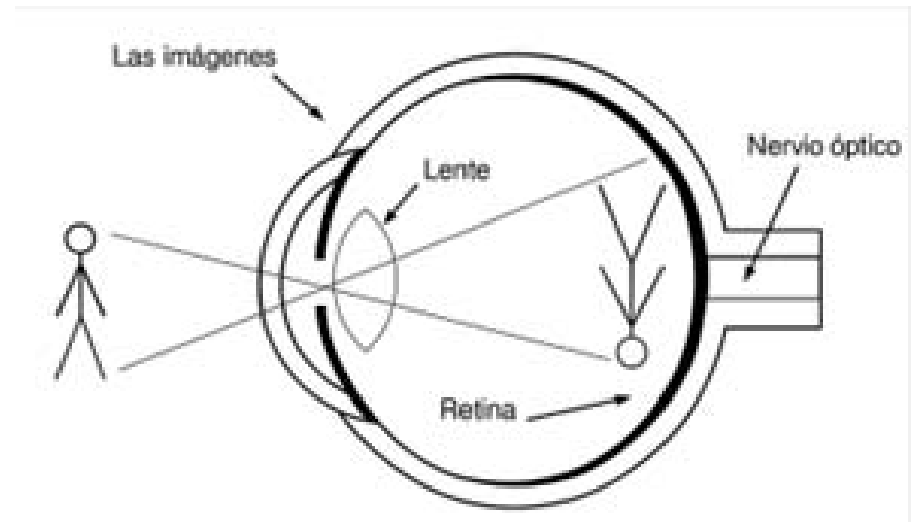


Figura 3-27: Sistema óptico, el ojo.

3.5.2 Lentes convergentes

Biconvexa: Son más gruesas por el centro y reúnen los rayos que atraviesan la lente. La imagen de los objetos situados dentro de su distancia focal es ampliada actuando como una lupa.

Planoconvexa: Denota una lente con una superficie plana en una cara y una superficie esférica y convexa en la otra cara.

Menisco convergente: La lente tiene una cara convexa y otra cóncava.

Vamos a usar solamente **lentes delgadas biconvexas**, que se representan como se muestra en la figura (Figura 3-29).

3.5.3 Lentes divergentes

Bicóncavas: Las lentes bicóncavas son más delgadas en el centro. Tienen la propiedad de alejar los rayos que llegan a ellas por lo que la imagen que da es más pequeña y a la vez más próxima.

Planocóncavas: Estas lentes se forman con una superficie plana y una superficie cóncava. Tienen una longitud focal negativa y se utilizan para divergir luz entrante, o aumentar longitud focal en un sistema óptico existente.

Menisco divergente: Tipo de lente que tiene una cara cóncava y otra convexa

Vamos a usar solamente **lentes delgadas bicóncavas**, que se representan como se muestra en la figura (Figura 3-31).

3.5.4 Focos y distancias focales

Toda lente delgada rodeada de aire tiene dos focos, uno a cada lado de ella y equidistante del centro (cualquiera sea el tipo de lente delgada).

El **foco objeto** F_1 es un punto axial sobre el eje óptico tal que cualquier rayo procedente de él o que se dirija hacia él se propaga paralelamente al eje una vez refractado (una vez que paso através el sistema óptico).

El **foco imagen** F_2 es un punto axial tal que cualquier rayo paralelo al eje, después de la refracción, se dirige a él o diverge de él.

La distancia entre cada uno de los focos y el centro de la lente se denomina **distancia focal** (f) que se mide en unidades de longitud: m, cm, etc., y además son en valor absoluto iguales $|f_1| = |f_2|$.

En las lentes convergentes el **foco objeto** se encuentra del lado donde ingresa la luz. Mientras que en la lente divergente el **foco objeto** se encuentra del lado donde sale la luz.

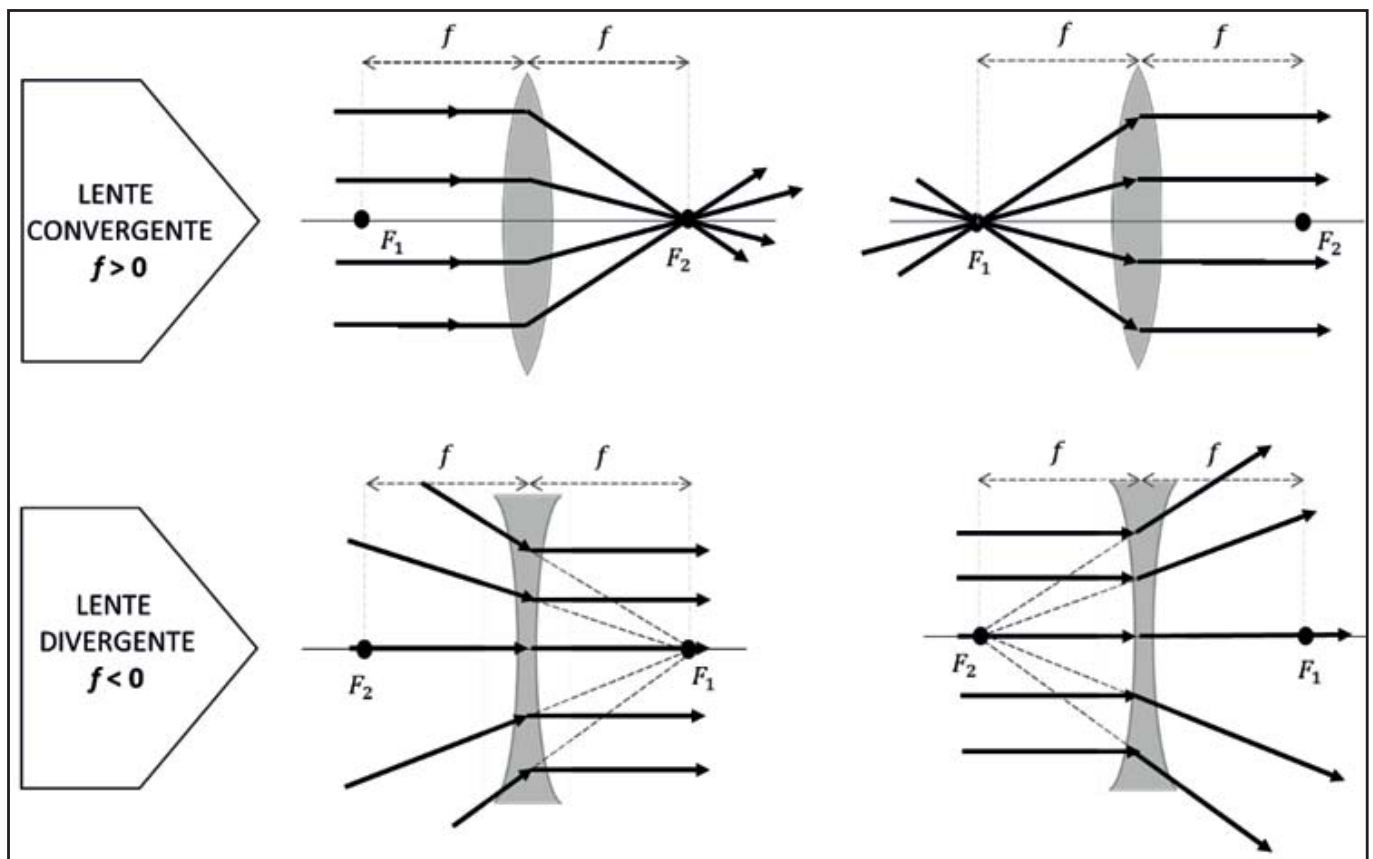


Figura 3-32: Trazado de rayos para una lente convergente y divergente respectivamente. En lentes convergentes, los rayos paralelos al eje se enfocan en el foco f_2 ; en lentes divergentes, parecen salir de él. Si los rayos inciden hacia el foco f_1 , emergen paralelos al eje tras atravesar la lente.

3.5.5 Potencia de la lente

Se llama potencia (P) de una lente a la inversa de la distancia focal (Ecuación 3-7):

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

Ecuación 3-7

La potencia de una lente, o de un sistema óptico, indica cuánto se desvían los rayos de luz, y se mide en dioptrías [P] = *dioptría* (D) = $1/m$.

Un valor mayor de dioptrías significa una distancia focal más corta, es decir, que la lente enfoca la luz más cerca, haciendo que los rayos paralelos se junten (o parezcan provenir) a menor distancia de la lente.

Por ejemplo, una lente de distancia focal 1 m tiene una potencia de 1 dioptría y una lente de distancia focal 0,5 m tiene una potencia de 2 dioptrías.

La potencia de una lente convergente es positiva y la potencia de una lente divergente es negativa. Cuando se sitúan dos lentes en contacto una con otra, la potencia del conjunto es la suma de las potencias de cada lente.

3.5.6 Objetos e imágenes

Denominamos:

Objeto real: a todo aquello desde donde “surgen” o se “irradian” rayos de luz.

Objeto virtual: No trabajaremos en nuestra cursada con un objeto virtual, particularmente porque se necesitan al menos dos lentes. Se llama objeto virtual cuando una segunda lente se interpone en el cono de rayos convergentes que sale de la primera lente. Si no existiera la segunda lente, la primera formaría una imagen real. Esa imagen (que ahora no se forma), es el objeto virtual para la segunda lente.

Imagen real: Es la imagen formada en un sistema óptico mediante intersección en un punto de los rayos **convergentes** procedentes del objeto puntual después de atravesar el sistema.

Imagen virtual: Es la imagen formada mediante intersección en un punto de las prolongaciones de los rayos **divergentes** formados después de atravesar el sistema óptico.

A vez la imagen puede ser DERECHA o INVERTIDA.

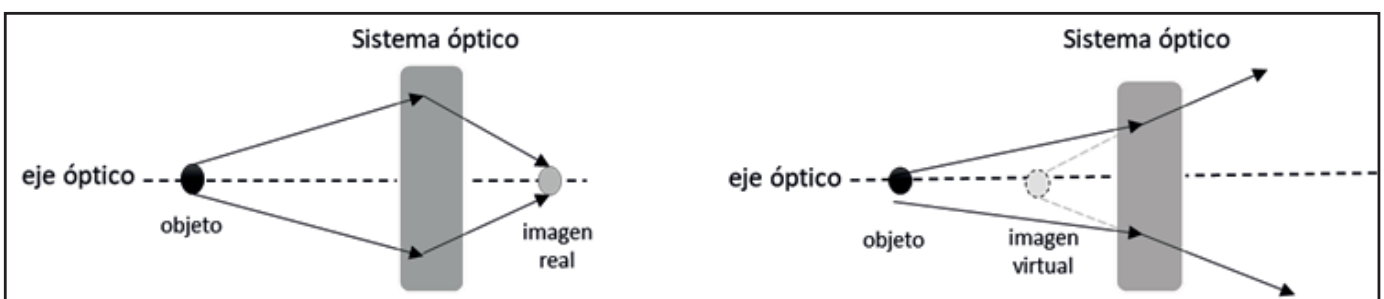


Figura 3-33: Imagen real e imagen virtual generada por un dado sistema óptico.

Regla de signos para la distancia de objeto: Cuando el objeto está del mismo lado de la superficie refractiva que la luz entrante, la distancia de objeto x_o es positiva; en caso contrario, es negativa.

Regla de signos para la distancia de imagen: Cuando la imagen está del mismo lado de la superficie refractiva que la luz saliente, la distancia de imagen x_i es positiva; en caso contrario, es negativa.

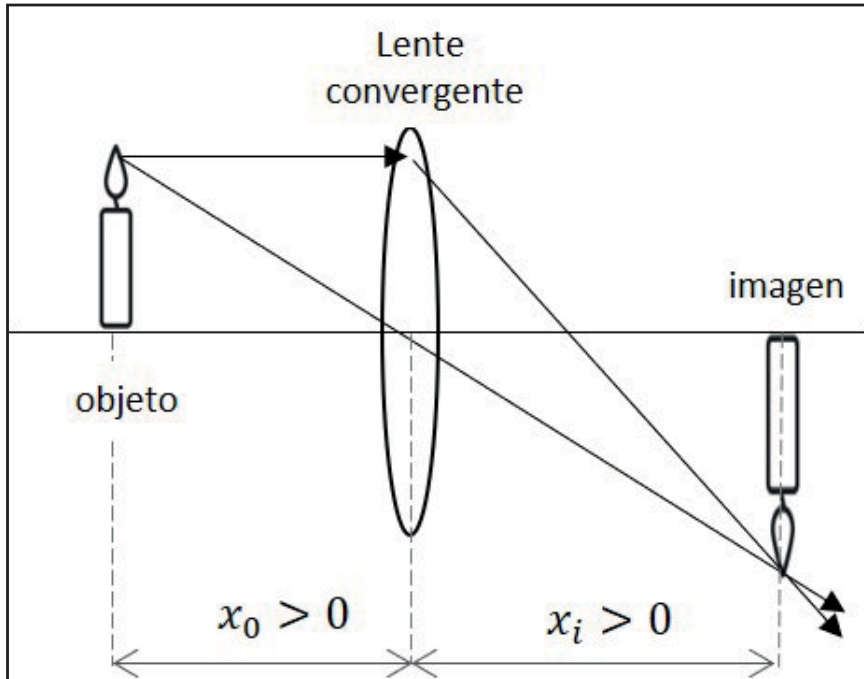


Figura 3-34: En este ejemplo el objeto y la imagen son reales. La imagen es invertida y aumentada.

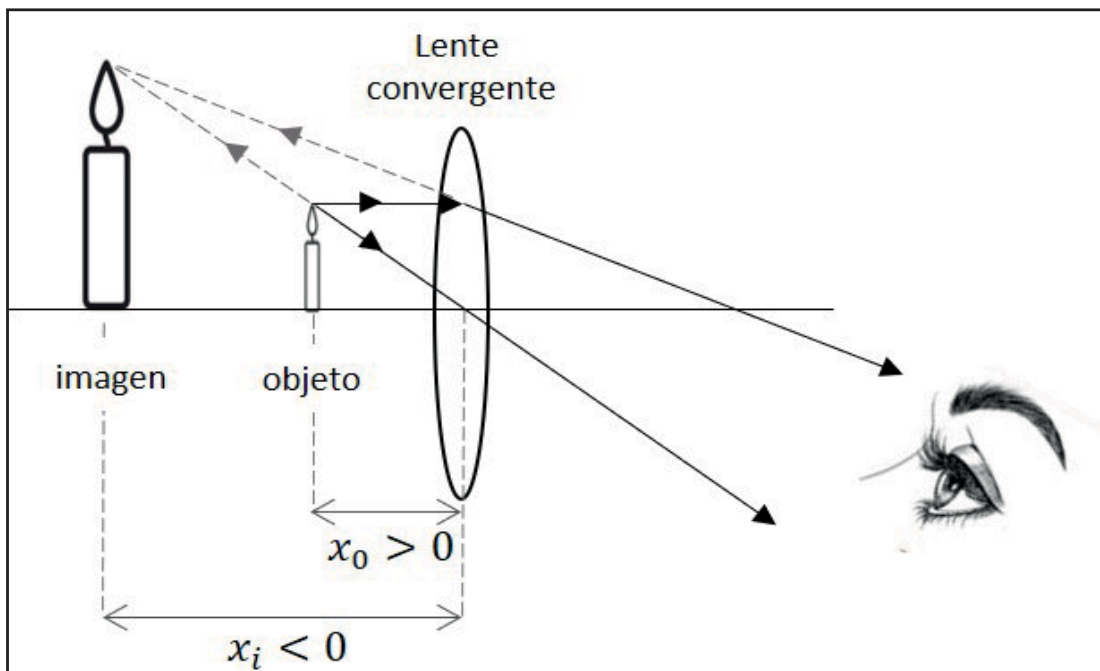


Figura 3-35: En este ejemplo el objeto es real y la imagen es virtual. La imagen es derecha y aumentada.

3.5.7 Rayos principales de una lente convergente

Sea P el objeto, (objeto real), busquemos mediante trazado de rayos ubicar la posición de su imagen a través de una lente convergente. Para ello nos vamos a valer de tres rayos principales que salen del objeto, del punto más alto respecto del eje óptico identificado con la letra Q .

Los tres rayos se intersecan en el punto Q' , generando una imagen del objeto P , de altura $P'Q'$ como se muestra en la Figura 3-36

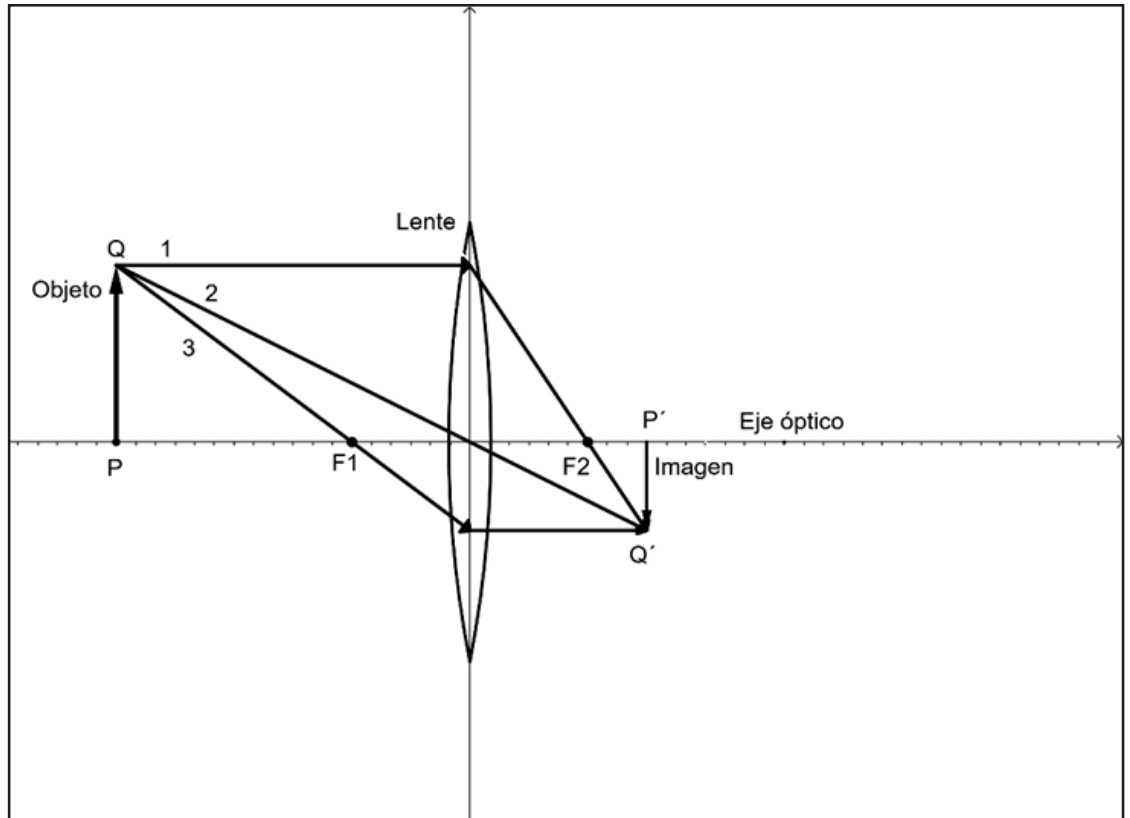


Figura 3-36: Trazado de rayos principales en una lente convergente.

El **rayo 1** sale paralelo al eje óptico y al pasar por la lente, se refracta para pasar por el punto focal F_2 .

El **rayo 2** sale en dirección al centro de la lente y no se desvía (considerablemente).

El **rayo 3** sale con dirección al punto focal F_1 y emerge a través del lente paralelo al eje óptico.

3.5.8 Rayos principales de una lente divergente

Sea P el objeto, (objeto real), buscamos mediante trazado de rayos ubicar la posición de su imagen a través de una lente divergente. Para ello nos vamos a valer de tres rayos principales que salen del objeto, del punto más alto respecto del eje óptico identificado con la letra Q .

Los tres rayos se intersecan en el punto Q' , generando una imagen del objeto P , de altura $P'Q'$ como se muestra en la Figura 3-37.

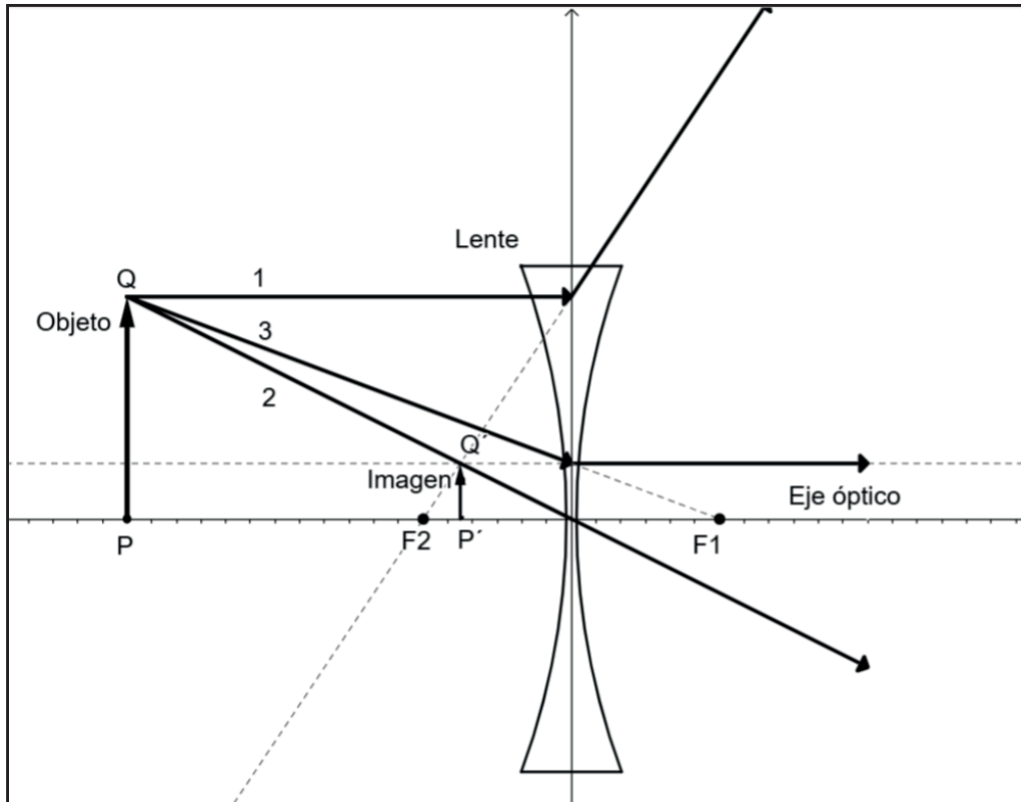


Figura 3-37: Trazado de rayos principales en una lente divergente

El **rayo 1** sale paralelo al eje óptico y al pasar por la lente, se refracta con dirección proveniente del punto focal F_2 .

El **rayo 2** sale en dirección al centro de la lente y no se desvía (considerablemente).

El **rayo 3** sale con dirección al punto focal F_1 hacia la lente y emerge a través de este paralelo al eje óptico.

3.5.9 Fórmula de las lentes (Fórmula de Gauss)

La fórmula de Gauss, conocida también como fórmula de lentes delgadas permite calcular la posición de la imagen formada por una lente, a partir de la distancia objeto x_o y la distancia focal de la lente.

En la Figura 3-38 hemos ubicado el objeto a distancia x_o de la lente, (flecha PQ). Aplicando trazado de rayos obtenemos su imagen en posición x_i , (flecha invertida de altura $P'Q'$). El ejemplo es para el caso de una lente convergente ($f > 0$), donde el foco objeto (F_1) está del lado que incide la luz, y el foco imagen (F_2) del otro lado. Recordemos que en valor absoluto estas distancias son iguales. Llamamos y_o la altura del objeto, e y_i la altura de la imagen.

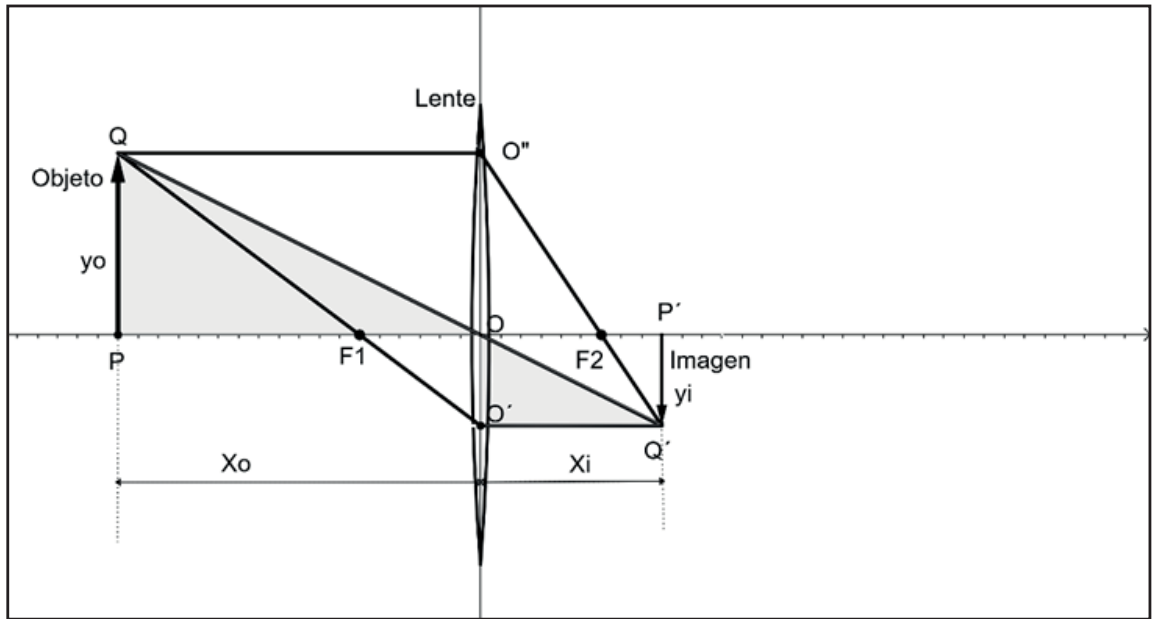


Figura 3-38: Deducción de la ecuación de lentes delgadas. Observemos dos triángulos sombreados son semejantes.

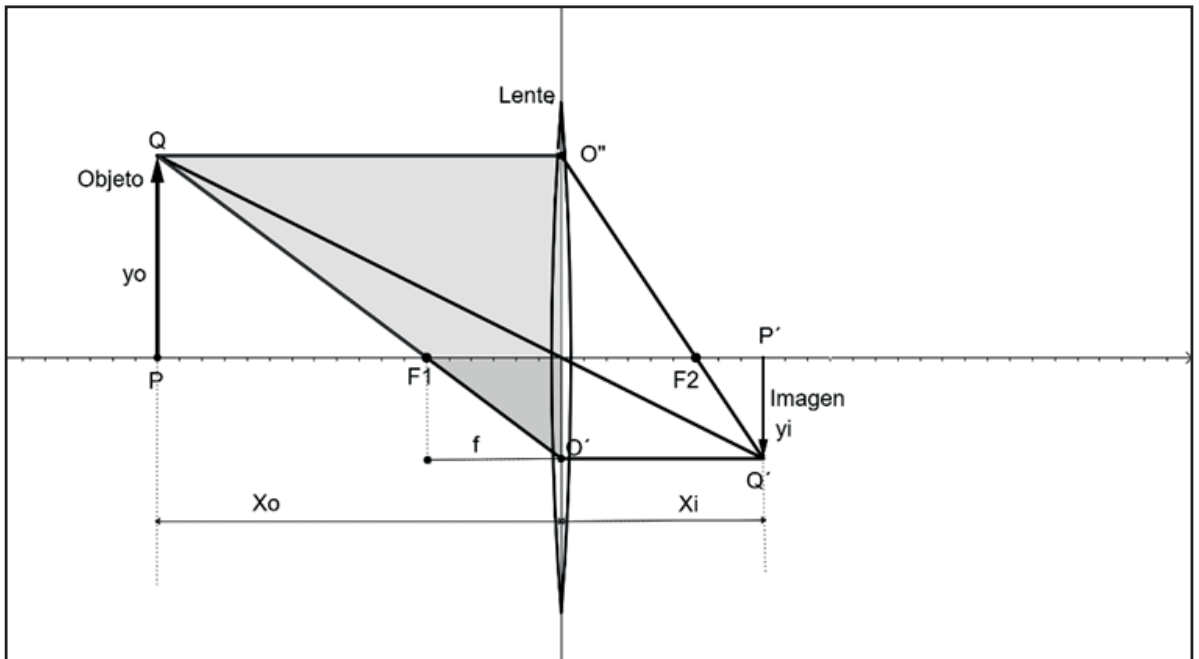


Figura 3-39: Deducción de la ecuación de lentes delgadas. Observemos dos triángulos sombreados son semejantes.

Observemos en la Figura 3-38 que los triángulos **OPQ** y **OP'Q'** (que es igual a **OO'Q'**) son semejantes, es decir $\frac{y_o}{x_o} = \frac{y_i}{x_i}$. En la Figura 3-39 también los triángulos **QO''O'** y **F1O''O'** son semejantes, entonces $\frac{y_o + y_i}{x_o} = \frac{y_i}{f}$.

Deducción de la ecuación fórmula de lentes:

De la primera relación tenemos que:

$$\frac{y_o}{x_o} = \frac{y_i}{x_i} \Rightarrow y_i = \frac{x_i}{x_o} y_o$$

Reemplazando en la segunda relación:

$$\frac{y_o + y_i}{x_o} = \frac{y_i}{f} \Rightarrow \frac{y_o + \left(\frac{x_i}{x_o}\right) y_o}{x_o} = \frac{\left(\frac{x_i}{x_o}\right) y_o}{f}$$

$$\frac{1 + \left(\frac{x_i}{x_o}\right)}{x_o} = \frac{\left(\frac{x_i}{x_o}\right)}{f} \Rightarrow \frac{\left(\frac{x_o}{x_o}\right) + \left(\frac{x_i}{x_o}\right)}{x_o} = \frac{\left(\frac{x_i}{x_o}\right)}{f}$$

$$\frac{x_o + x_i}{x_o} = \frac{x_i}{f} \Rightarrow 1 + \frac{x_i}{x_o} = \frac{x_i}{f} \Rightarrow \frac{x_i}{x_i} + \frac{x_i}{x_o} = \frac{x_i}{f}$$

$$\frac{1}{x_i} + \frac{1}{x_o} = \frac{1}{f}$$

Ecuación 3-8

La Ecuación 3-8 es la fórmula de las lentes que fuera elaborada por Gauss, donde x_o es la posición del objeto medida respecto de la posición de la lente, sobre el eje óptico, x_i es la posición de la imagen medida respecto de la posición de la lente, y f es la distancia focal de la lente. Recordar la regla de los signos para ambas posiciones y el signo de la distancia focal según sea la lente convergente o divergente.

3.5.10 Aumento lateral (m)

El aumento lateral de una lente, (m) es el cociente entre la altura de la imagen y la altura del objeto. Es decir, $m = \frac{y_i}{y_o}$. Aplicando las mismas relaciones geométricas que en el apartado anterior, podemos ver que $m = \frac{y_i}{y_o} = \frac{x_i}{x_o}$.

Sin embargo, debemos notar que esta última ecuación solo es válida en módulo ya que la obtuvimos a partir de relaciones geométricas, y eso no nos sirve, ya que el signo del aumento lateral nos advierte si la imagen esta derecha (aumento positivo) o invertida (aumento negativo).

En la primera parte de esa ecuación es claro que si la imagen esta invertida y_i será negativo y entonces m será negativa. Pero para la segunda parte, como se puede observar en las figuras 3-36 y 3-37 a partir del trazado de los rayos principales, se requiere colocar un signo negativo en la segunda parte para adecuarla al signo de la primera parte.

Entonces el aumento estará dado por la Ecuación 3-9

$$m = \frac{y_i}{y_o} = -\frac{x_i}{x_o}$$

Ecuación 3-9

Recordemos nuevamente la regla de los signos: $x_o > 0$ si el objeto es real, $x_o < 0$ si el objeto es virtual y x_i es la posición de la imagen medida respecto de la posición de la lente, sobre el eje óptico. Si la imagen es real, $x_i > 0$ mientras que, si la imagen es virtual, $x_i < 0$.

Ejemplo: Si una lente convergente tiene una distancia focal de 10 cm (lente convergente, entonces $f = +10$ cm) y se coloca un objeto a 50 cm de distancia, (imagen real $x_o = +50$ cm) la imagen, aplicando la fórmula de lentes delgadas, se formará a 12.5 cm de la lente. ¿La imagen será real, invertida? ¿Aumentada, disminuida? ¿Cuál será el aumento?

Resolución

Partimos de la ecuación de lentes

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x_o} + \frac{1}{x_i} \Rightarrow \frac{1}{10 \text{ cm}} = \frac{1}{50 \text{ cm}} + \frac{1}{x_i} \Rightarrow x_i = 12,5 \text{ cm}$$

Como obtuve $x_i > 0$, la imagen es real. Se encuentra a 12,5 cm de la lente (a la derecha de ésta). ¿Cuál es el aumento lateral de la imagen?

$$m = \frac{y_i}{y_o} = -\frac{x_i}{x_o} = -\frac{12,5 \text{ cm}}{50 \text{ cm}} = -\frac{1}{4} \Rightarrow \frac{y_i}{y_o} = -\frac{1}{4} \Rightarrow y_i = -\frac{1}{4}y_o$$

El aumento es de -0.25. Esto significa que la imagen es real, invertida y más pequeña que el objeto (4 veces más pequeña). La potencia de esta lente es

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{10 \text{ cm}} = \frac{1}{0,1 \text{ m}} = 10 \text{ m}^{-1} = 10 \text{ D}$$

Resumen:

Potencia de la lente (Ecuación 3-7 distancia focal en metros):

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

Fórmula de las lentes (Ecuación 3-8):

$$\frac{1}{x_o} + \frac{1}{x_i} = \frac{1}{f}$$

Aumento lateral (Ecuación 3-9):

$$m = \frac{y_i}{y_o} = -\frac{x_i}{x_o}$$

Signos

Resumen de signos	
Lente convergente	$f > 0$
Lente divergente	$f < 0$
Objeto real (delante de la lente)	$x_o > 0$
Imagen real (detrás de la lente)	$x_i > 0$
Imagen virtual (delante de la lente)	$x_i < 0$
Imagen derecha	$m > 0$
Imagen invertida	$m < 0$

Tabla 3-4: Convención de signos, lentes delgadas.

3.5.11 Combinación de lentes

En sistemas ópticos, las combinaciones de lentes son arreglos de dos o más lentes que trabajan juntas para manipular la luz y formar imágenes. Estas combinaciones pueden ser simples, como en un microscopio con un objetivo y un ocular, o complejas, como en telescopios y sistemas de lentes fotográficas. El propósito de combinar lentes es lograr efectos deseados como mayor aumento, corrección de aberraciones o adaptación a diferentes distancias focales.

Si se combinan varias lentes, con alguna separación entre ellas, debemos tener en cuenta que la imagen del objeto que se forma a partir del primer lente será el objeto de la segunda lente. La potencia del conjunto será igual a la suma de las potencias de cada lente, y el aumento lateral el producto de estos.

Por ejemplo, dadas dos lentes de aumentos laterales, m_2 y m_1 , el aumento neto resulta: $m_{neto} = m_2 \cdot m_1 = \frac{y_2}{y_0}$.

En los siguientes ejemplos, los sistemas combinados están compuestos en ambos casos por dos lentes convergentes.

Ejemplo: si una lente tiene un aumento lateral de -2 (imagen invertida y dos veces más grande) y otra lente tiene un aumento lateral de -4 (imagen invertida y cuatro veces más grande), el aumento lateral total del sistema será de 8 (el producto de -2 y -4). Esto significa que la imagen final será ocho veces más grande que el objeto original y estará derecha con respecto a la orientación del objeto inicia.

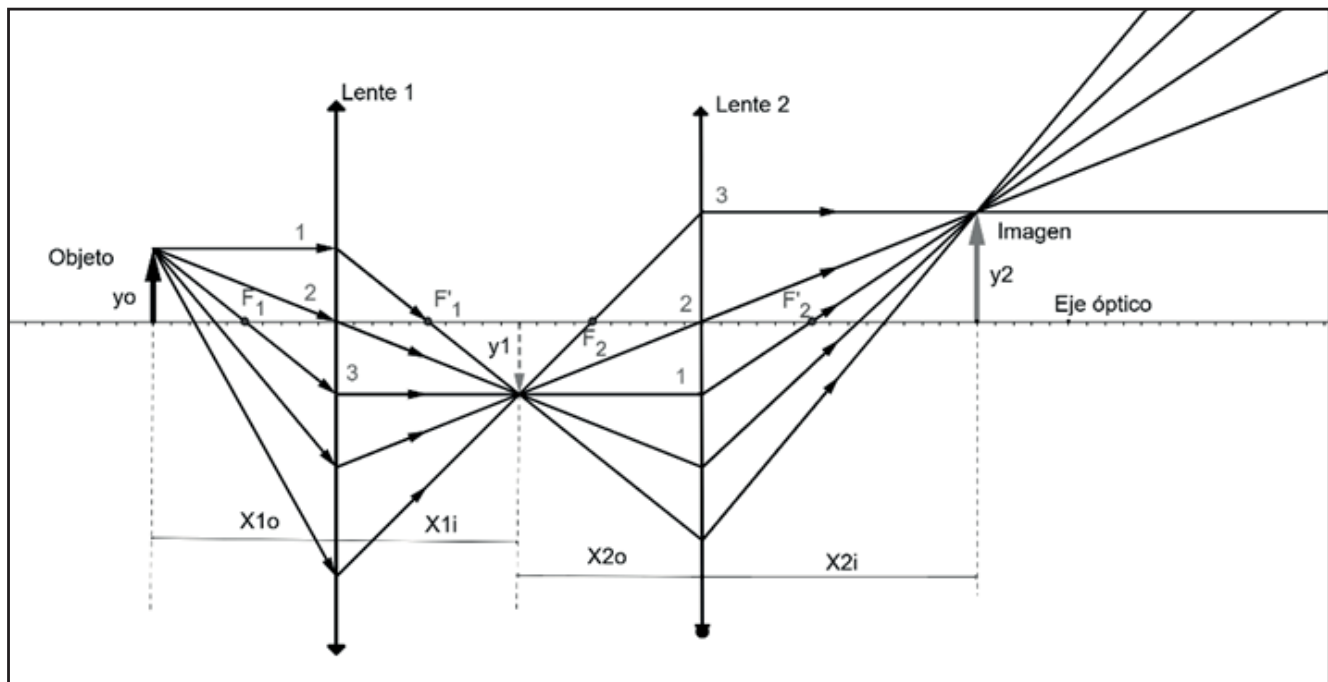


Figura 3-40: Trazado de rayos para un sistema de dos lentes convergentes. Notemos que los índices 1,2 y 3 indican el tipo de rayo principal (ver Figura 3-36). En este caso obtiene una imagen real aumentada.

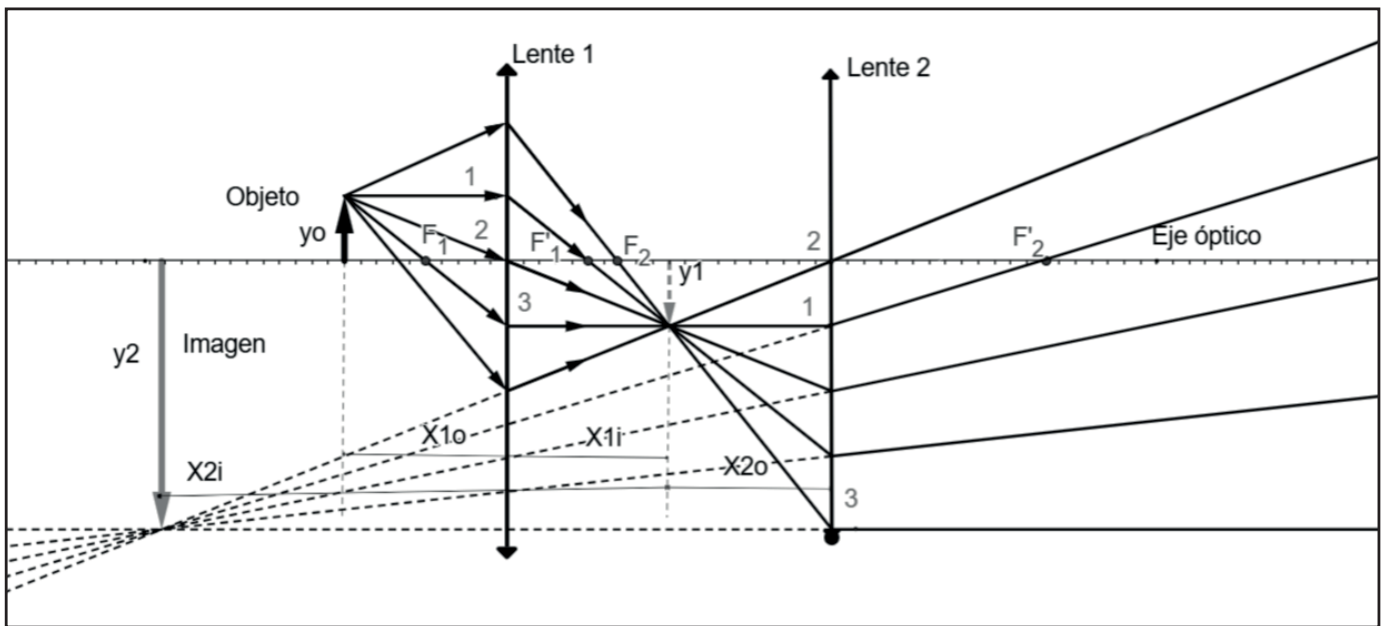


Figura 3-41: Trazado de rayos para un sistema de dos lentes convergentes. Notemos que los índices 1,2 y 3 indican el tipo de rayo principal (ver figura 3-36). En este caso se obtiene una imagen virtual aumentada.

En ambos casos representamos con y_1 la imagen del objeto y_o a través de la lente 1, que es a su vez es “el objeto” que dará lugar a la imagen y_2 a través de la lente 2.

Observemos que en el primer caso obtuvimos una imagen real, y en el segundo caso una imagen virtual.

3.5.12 Instrumentos Ópticos

El objeto fundamental de la óptica geométrica es el diseño de instrumentos ópticos eficientes que nos permitan una visión mejor, desde objetos muy pequeños hasta objetos muy lejanos.

Son ejemplos de ellos, además de nuestros ojos, las lupas, los objetivos fotográficos, microscopios, oculares, anteojos, telescopios, etc.

3.5.12.1 El OJO

El globo ocular es una cámara casi esférica. Tiene un diámetro interior aproximado de 1.5 cm, y está lleno de una sustancia llamada *humor vítreo*. Tiene una cubierta externa blanca, llamada *esclerótica*, parte de la cual es visible y forma el “blanco” del ojo. La luz entra en el ojo a través de un tejido curvo y transparente llamado *córnea*, y pasa a un fluido transparente llamado *humor acuoso*. Detrás de la *córnea* hay un diafragma circular, el *iris*, cuya abertura central se llama *pupila*. El iris contiene el pigmento que determina el color del ojo. Mediante acción muscular, el iris puede cambiar el área de la pupila (de 2 a 8 mm de diámetro) controlando así la cantidad de luz que entra al ojo.

Detrás del iris está el *crystalino*, que es una **lente convergente** formada por fibras vítreas microscópicas. Cuando los músculos fijos al cristalino ejercen tensión sobre éste, las fibras vítreas se deslizan una sobre la otra, modificando la forma de la lente y, por consiguiente, su distancia focal; de esta forma, ayudan a enfocar la imagen sobre la retina adecuadamente, formando una imagen invertida que, sin embargo, la vemos derecha porque el cerebro reinterpreta esta imagen.

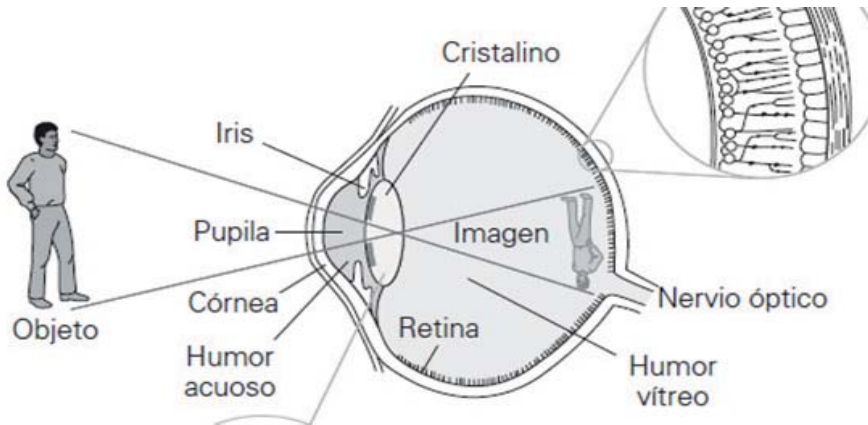


Figura 3-42: El ojo como instrumento óptico formador de imagen.

En la pared interna trasera del globo ocular hay una superficie sensible a la luz, llamada **retina**, desde donde el nervio óptico transmite señales al cerebro.

- Cuando el ojo está enfocado en objetos distantes, los músculos están relajados y el cristalino tiene una potencia aproximada de 20 D (dioptrías) y esto corresponde a una distancia focal de $f = \frac{1}{20D} = 0,05 \text{ m} = 5 \text{ cm}$.
- Cuando el ojo está enfocado en objetos más cercanos, el cristalino es más grueso y disminuyen el radio de curvatura y la distancia focal. El poder de la lente puede aumentar hasta 30 D, $f = \frac{1}{30D} = 0,033 \text{ m}$.
- El ajuste de la distancia focal del cristalino se llama **acomodamiento**.

Los extremos del intervalo en el que es posible tener una visión clara (enfoque agudo) se llaman **punto lejano** y **punto próximo**. El punto lejano es el **infinito** para el ojo normal. El punto próximo va a depender de la edad, pero tomaremos en promedio unos **25 cm**.

Un ojo normal (figura 3-43-a) forma imagen en la retina. En ojo miope (figura 3-43-b) es aquel que la imagen se forma antes de la retina y se corrige a partir de una lente divergente. Un ojo hipermetrope (figura 3-43c) es aquel que forma imagen detrás de la retina, y se corrige con una lente convergente.

Ejemplo: Una persona joven ve bien un objeto si lo aleja 60 cm de sus ojos (no ve bien de cerca), esto indicaría que tiene hipermetropía. Para corregir su vista ¿qué tipo de lente debe usar y cuál sería su potencia (en dioptrías)?

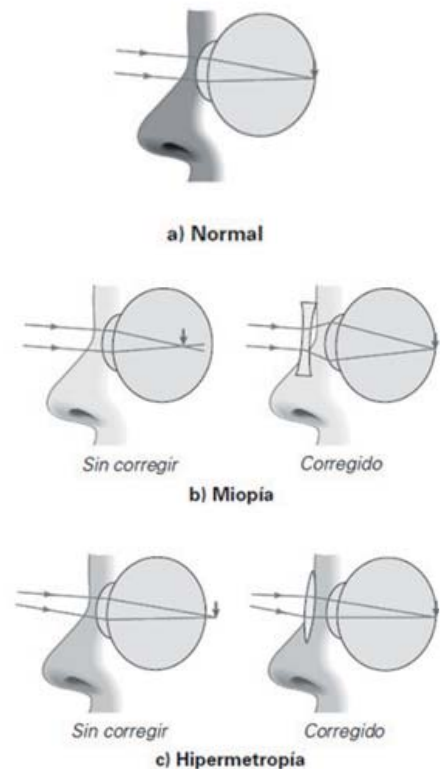


Figura 3-43: Poder de acomodamiento. Dos errores refractivos comunes que afectan la visión son la miopía, o visión corta, que dificulta la visión de objetos lejanos, mientras que la hipermetropía, o visión larga, dificulta la visión de objetos cercanos.

Resolución:

Para corregir la hipermetropía se debe usar lentes convergentes. Para calcular la distancia focal de la lente se debe considerar el punto próximo. El punto próximo de la joven está más alejado que el de las personas con buena visión. El lente debe corregir haciendo converger rayos, cuya imagen (virtual y derecha) se forma en el punto próximo, (para que la imagen de la imagen se forme en la retina). El ojo con anteojos debería ver bien un objeto que se coloque a 25 cm del ojo. Entonces:

$$x_o = 25 \text{ cm} \quad \text{y} \quad x_i = -60 \text{ cm} \text{ (negativa porque es una imagen virtual)}$$

$$\frac{1}{x_o} + \frac{1}{x_i} = \frac{1}{f} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{25\text{cm}} + \frac{1}{(-60\text{cm})} = 0,02333 = \frac{1}{f}$$

$$f = 42,86 \text{ cm} = 0,4286 \text{ m}$$

$$P = \frac{1}{0,4286\text{m}} = 2,33 \text{ D}$$

3.5.12.2 LUPA (microscopio simple)

La lupa es una lente convergente destinada a ampliar la imagen que se forma en nuestra retina por encima de la que se formaría a ojo desnudo, a distancias menores que las de nuestro *punto próximo* (cercano al ojo).

La imagen de un objeto presenta un ángulo mayor y, en consecuencia, parece mayor o aumentada. La lente produce una imagen virtual más allá del punto cercano que enfoca el ojo.

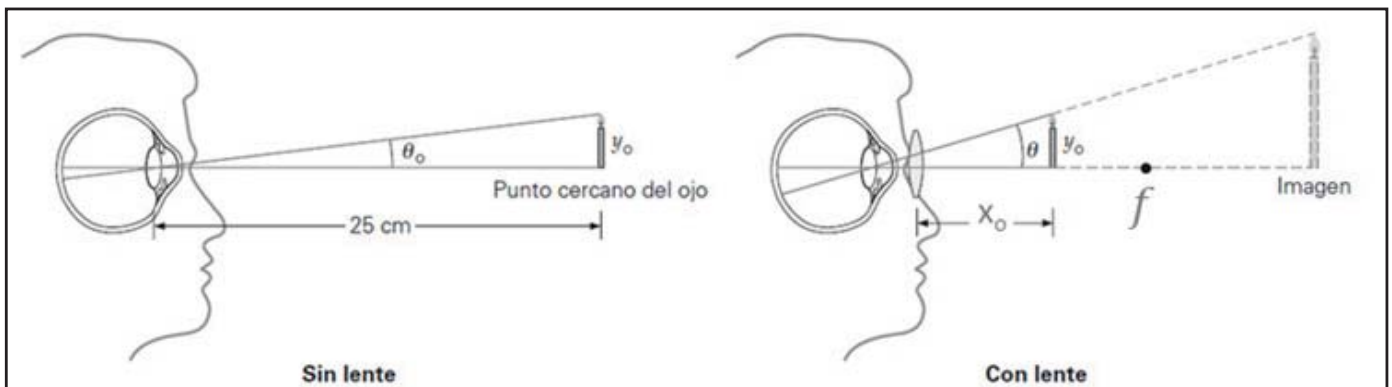


Figura 3-44: La imagen de un objeto cercano presenta un ángulo mayor y, en consecuencia, parece mayor o aumentada.

El aumento de un objeto *visto a través de una lupa* se expresa en función de este ángulo. Este **aumento angular** o **poder de aumento**, se representa con la letra $m = \frac{\theta}{\theta_o}$.

En particular, el aumento angular con la imagen en el infinito (ojo relajado), ocurrirá cuando el objeto esté situado en el foco de la lente, $x_o = f$ en ese caso:

$$m = \frac{\theta}{\theta_o} = \frac{25 \text{ cm}}{f}$$

Ecuación 3-10

Una lente de menor distancia focal producirá un mayor aumento.

3.5.12.3 MICROSCOPIO

Un **microscopio compuesto** básico consiste en un par de lentes convergentes. La lente cercana al objeto se llama **objetivo**, de distancia focal (f_{ob}) más corta que produce una *imagen real, invertida y agrandada* de un objeto colocado un poco más allá de su foco. La otra lente, llamada **ocular**, tiene mayor distancia focal (f_{oc}) y se coloca de manera que la imagen que forma el objetivo cae justo *dentro* de su foco, es decir, un poco más cerca que su foco (o entre el foco del ocular y la lente ocular).

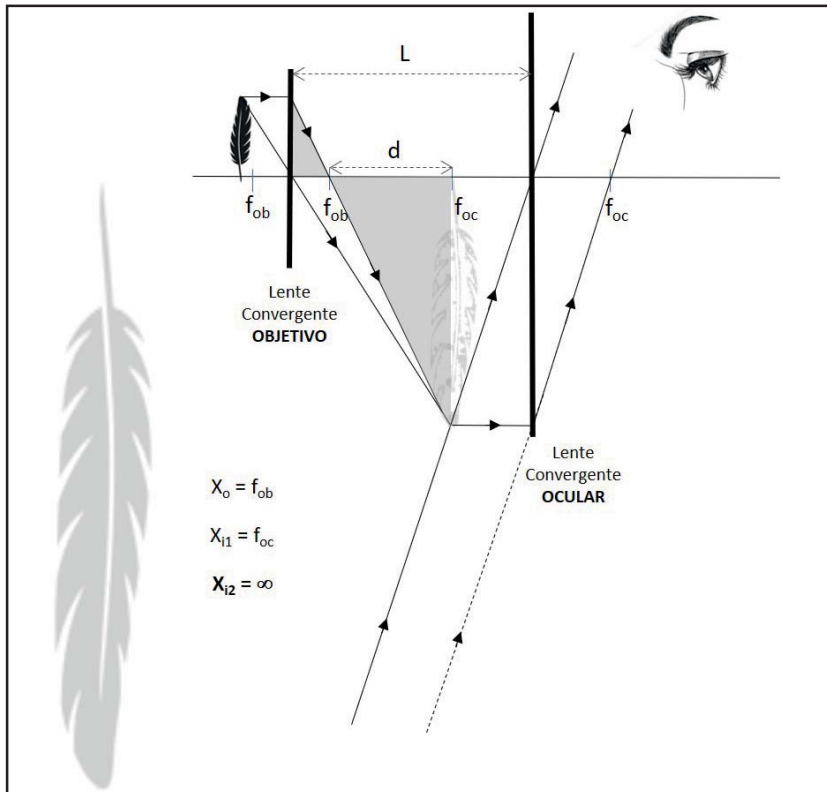


Figura 3-45: Trazado de rayos para un microscopio.

Esta lente forma una **imagen virtual, aumentada e invertida**, que ve el observador. Es decir, el **objetivo** produce una imagen real, y el **ocular** actúa como una lupa.

Si la primera imagen (real e invertida) cae justo en el foco ocular se puede entonces considerar los aumentos de cada lente y el aumento total del microscopio.

Para el **objetivo** se observa que ambos triángulos son semejantes y entonces

$$m_{ob} = -\frac{y_i}{y_o} = -\frac{d}{f_{ob}}$$

Para el **ocular**, como funciona como una lupa, para ojo relajado, resulta: entonces

$$m_{oc} = \frac{25\text{ cm}}{f_{oc}}$$

El **aumento total** de una combinación de lentes es igual al *producto* de los aumentos que produce cada una:

$$m_{total} = m_{ob} \cdot m_{oc} = -\frac{d \cdot 25\text{ cm}}{f_{ob} \cdot f_{oc}}$$

Ecuación 3-11

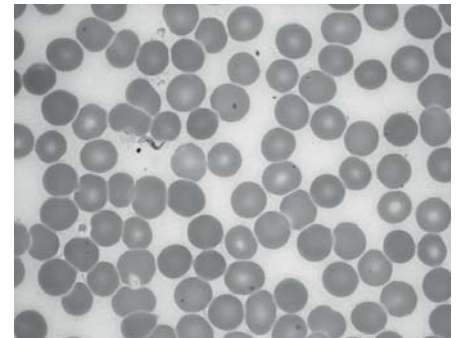


Figura 3-46: Muestra de sangre humana observada con 1000 aumentos. Los círculos son glóbulos rojos. Un parásito tripanosoma (*Trypanosoma cruzi*) es visible en la parte superior izquierda de la imagen (organismo teñido que parece un pequeño gusano). El punto oscuro distintivo es muy probablemente el cinetoplasto. Estos parásitos causan la enfermedad de Chagas (tripanosomiasis).

¿Sabías que?

El primer microscopio compuesto fue desarrollado a finales del siglo XVI (alrededor del año 1590) por Zacharias Janssen, un fabricante de lentes neerlandés. Sin embargo, fue Anton van Leeuwenhoek en el siglo XVII quien perfeccionó los microscopios simples y realizó las primeras observaciones de microorganismos, células sanguíneas y espermatozoides. Desde entonces, el microscopio ha evolucionado enormemente, dando origen a la microscopía electrónica y otras técnicas modernas que permiten explorar el mundo microscópico con gran detalle.



Figura 3-47: Telescopio.

3.5.12.4 TELESCOPIO

En los telescopios se aplican los principios ópticos de los espejos y las lentes para mejorar nuestra capacidad de ver objetos lejanos. Se utilizan para hacer observaciones terrestres y astronómicas, para ver algunos objetos con mayor detalle, o simplemente para distinguir otros objetos más distantes. Hay dos clases de telescopios: **los refractores y los reflectores**, que se caracterizan por usar lentes o espejos, respectivamente, para reunir la luz y hacerla converger.

El telescopio refractor tipo Kepler está conformado por dos lentes convergentes: objetivo y ocular. El objetivo es una lente con gran distancia focal, y el ocular móvil tiene una distancia focal relativamente corta.

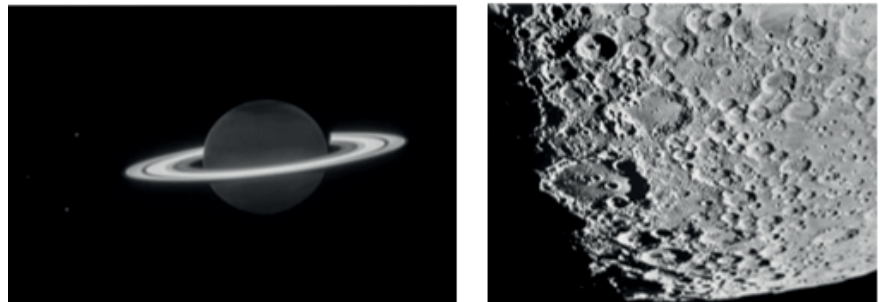


Figura 3-48: Imágenes tomadas con un telescopio, de Saturno y la superficie lunar.

Los rayos procedentes de un objeto lejano llegan **paralelos**, y forman una imagen (y_{ob}) en el foco del objetivo, (f_{ob}). Esta imagen funciona como objeto para el ocular, que se mueve hasta que la imagen esta justo dentro de su foco, (f_{oc}).

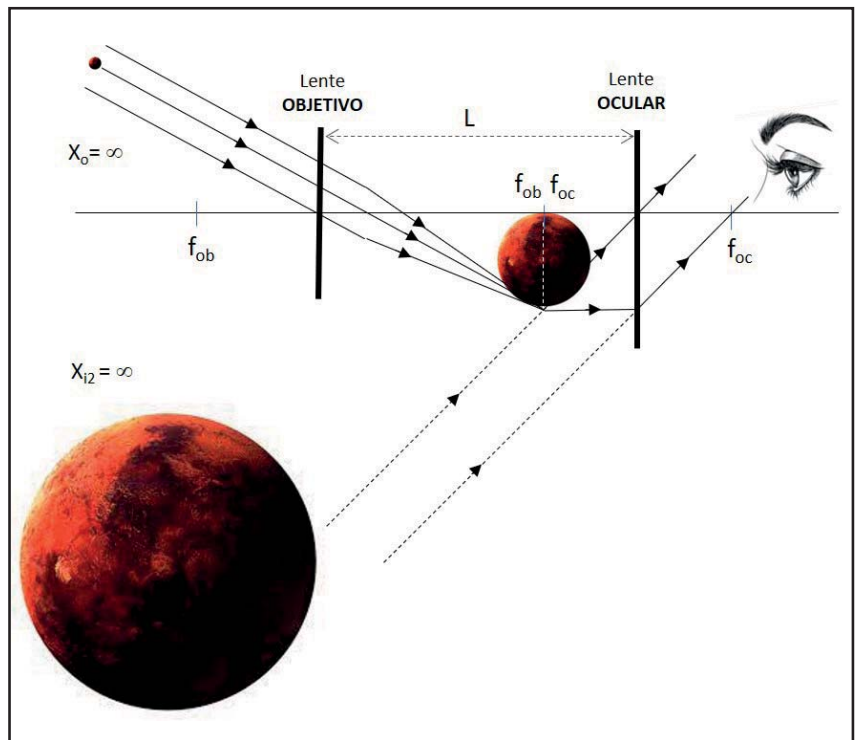


Figura 3-49: Trazado de rayos para un sistema telescópico, donde el largo del tubo, la separación entre las dos lentes convergentes es la suma de la distancia focal del objetivo y del ocular.

El observador ve una imagen aumentada, invertida y virtual, (y_{oc}).

Para tener una visión relajada, el ocular se ajusta de tal forma que su imagen, (y_{oc}), este en el infinito, lo que significa que la imagen del objetivo, (y_{ob}) está en el foco del ocular, f_{oc} . La distancia entre las lentes es entonces la suma de las distancias focales, $L = f_{ob} + f_{oc}$ que es la longitud del tubo del telescopio.

El **poder de aumento de un telescopio refractor** enfocado para que la imagen final esté en el infinito es:

$$m = -\frac{f_{ob}}{f_{oc}}$$

Ecuación 3-12

Para alcanzar el aumento máximo, la distancia focal del objetivo debe ser la mayor posible, y la distancia focal del ocular la menor posible. En un telescopio se puede usar un espejo cóncavo para reunir la luz y formar una imagen de un objeto lejano.

Para ver el Sol, la Luna y los planetas cercanos es importante tener muchos aumentos para apreciar los detalles. Sin embargo, aun con el aumento máximo posible, las estrellas aparecen en el cielo solo como débiles puntos de luz. Para observar las estrellas y las galaxias distantes, es más importante reunir la luz suficiente, que tener un mayor aumento y es por ello por lo que los grandes telescopios terrestres y en órbita usan espejos.

Los instrumentos ópticos enfrentan dos límites principales. Por un lado, la falla de la aproximación de lentes delgadas produce aberraciones ópticas (esférica, cromática, astigmatismo, coma, distorsión) que degradan la imagen y se corrigen con combinaciones de lentes. Por otro lado, la difracción (consecuencia de la naturaleza ondulatoria de la luz) impone un límite físico de resolución que no puede eliminarse, solo reducirse usando aperturas mayores o longitudes de onda menores.

¿Sabías que?

El primer telescopio funcional se desarrolló en 1608 en los Países Bajos. Su invención se atribuye generalmente a Hans Lippershey, un fabricante de lentes holandés, aunque otros como Jacob Metius y Zacharias Janssen también reclamaron haberlo creado.

En 1609, Galileo Galilei construyó su propio telescopio mejorado y lo usó por primera vez para observar el cielo. Con él, descubrió: Los cráteres de la Luna, Las lunas de Júpiter, las fases de Venus.