



Programa de la asignatura:

Sistemas ópticos

U1 Fundamentos de la óptica geométrica





Índice

Presentación	3
Competencia específica	4
Propósitos	4
1.1. Introducción	5
1.1.1. Teoría corpuscular de la luz	5
1.1.2. Teoría ondulatoria de la luz	6
1.1.3. Principio de Fermat	6
1.2. Leyes de la reflexión y refracción	8
1.2.1. Reflexión	8
1.2.2. Refracción	9
1.2.3. Ángulo crítico	12
1.3. Formación de imágenes en superficies esféricas	13
1.3.1. Trazo de rayos	14
1.3.2. Fórmula de Gauss	18
1.3.3. Teorema del seno y de Lagrange	18
1.3.4. Amplificación lateral y longitudinal	20
1.3.5. Materiales ópticos	21
Cierre de la Unidad	23
Para saber más	24
Fuentes de consulta	25



Presentación



Edificios de espejo. Retomado de <http://www.inessman.com/>

Te has preguntado alguna vez, ¿cuál de tus cinco sentidos es el que te mantiene en contacto con el mundo exterior? Sin duda coincides en que el sentido de la vista es el que permite apreciar lo que te rodea. Tal vez por esta razón la óptica geométrica es la que explica la formación de las imágenes que observas y es una de las ciencias más antiguas de la física.

La óptica en general estudia a la luz, sus características y sus manifestaciones. La reflexión de la luz y la interferencia son dos fenómenos muy conocidos, sin embargo, cada uno se aborda con un tratamiento diferente. En el primero se considera que la luz son partículas, y en el segundo, la luz se compone de ondas. Para generalizar, se presentan las dos teorías de la luz y después se abordan fenómenos ópticos desde el punto de vista de la óptica geométrica y sus leyes. Esto permitirá comprender cómo y por qué se forman las imágenes que observas, por ejemplo, tu propia imagen reflejada en un espejo o la imagen doblada de un lápiz sumergido en un vaso con agua.

Después de haber comprendido la formación de imágenes en superficies reflectoras y el fenómeno de la refracción, estarás listo para analizar los sistemas ópticos simples y compuestos utilizando lentes y espejos.



Competencia específica



Unidad 1

Identificar el funcionamiento de los sistemas ópticos simples para generalizar fenómenos de la luz a través de las principales leyes que rigen la óptica geométrica.

Propósitos

Identificar las teorías de la luz aplicadas en la óptica geométrica, además de identificar el funcionamiento de los sistemas ópticos simples (espejos) y sus características.



1.1. Introducción

La naturaleza de la luz ha sido una cuestión muy atractiva e interesante para los hombres desde tiempos muy remotos. Los filósofos de la antigüedad tenían visiones muy diferentes sobre el origen y composición de la luz. Aristóteles, por ejemplo, pensaba que la visión era causada por partículas que emitía un cuerpo luminoso, que llegaban después al ojo. Sin embargo, Platón, Euclides y Claudio Tolomeo, creían lo contrario, que las partículas salían del ojo para llegar después al objeto a observar. A pesar de las diferentes perspectivas que tenían sobre la luz, no se podía hacer todavía ninguna conjetura sobre la naturaleza de estas emanaciones de las fuentes luminosas.

Fue hasta en la época de la edad media que se llegó a una suposición más razonada cuando se conceptualizó a la luz como un flujo de partículas de naturaleza desconocida. Isaac Newton (1642-1727) realizó varios experimentos relacionados con los fenómenos de la luz y los colores. Newton pensaba que la luz estaba formada por corpúsculos de diferentes tamaños y velocidades, y que se propagaba en un medio al cual llamaron éter. No obstante, los fenómenos de difracción y doble refracción no se podían explicar con los conceptos aceptados hasta entonces. La búsqueda de respuestas a estos fenómenos llevó a una teoría donde se reconoce que la luz se comporta como una partícula y también lo hace como una onda. En los siguientes subtemas se describe a detalle cada una de estas teorías.

1.1.1. Teoría corpuscular de la luz

René Descartes fue uno de los primeros en defender la teoría corpuscular de la luz. Descartes argumentaba que la luz se comportaba como un proyectil propulsado a velocidades infinitas, sin discutir nada sobre su naturaleza. Esta teoría supone que la luz está compuesta por una serie de partículas o corpúsculos que provienen de las fuentes luminosas; según Newton estas partículas se propagan en línea recta y se desplazan a gran velocidad. La fuente luminosa tendrá una intensidad proporcional a la cantidad de corpúsculos que emite el cuerpo en determinado tiempo.

Con la teoría corpuscular se puede concebir a la luz como constituida por pequeños corpúsculos que viajan en línea recta. Para que sea aceptada como una teoría física válida, debe poder explicar ciertos fenómenos de forma satisfactoria. La reflexión de la luz es un ejemplo de un fenómeno que se describe y explica con dicha teoría. La reflexión de la luz se entiende como la incidencia de estos corpúsculos con un ángulo de inclinación sobre una superficie lisa; cuando los corpúsculos llegan a dicha superficie, cambian la dirección de su movimiento, pero continúan desplazándose en el mismo medio. La refracción de la luz también es un fenómeno válido dentro de esta teoría: cerca de la



superficie que separa dos medios distintos, los corpúsculos luminosos experimentan un cambio en la dirección y velocidad de propagación, debido a unas fuerzas atractivas de corto alcance provenientes del medio más denso.

Según la explicación de Newton, la velocidad de la luz debía aumentar en los medios de mayor densidad. Por esta razón los cuerpos luminosos se acercan a la normal a la superficie de refracción, la componente de la velocidad perpendicular a la superficie debía aumentar. Sin embargo, los resultados experimentales para la doble refracción (birrefringencia) contradecían esta explicación, por lo tanto, se tuvo que descartar la teoría corpuscular de la luz para fenómenos diferentes a la reflexión y la doble refracción.

1.1.2. Teoría ondulatoria de la luz

La teoría ondulatoria formulada por Huygens en 1678 establece que la luz está constituida por ondas longitudinales, como esferas que surgen de la fuente luminosa, produciendo un movimiento paralelo a la dirección de propagación de la onda, y que se transmiten en un medio homogéneo ideal al que llamaron éter. La teoría corpuscular indica que la luz viaja en línea recta y que se puede propagar en el vacío; es válida para los fenómenos de reflexión y refracción, concordando hasta aquí con la teoría corpuscular. La principal diferencia entre ambas teorías es que la teoría corpuscular precisa que la luz adquiera mayor velocidad al recorrer medios más densos. Por el contrario, la teoría ondulatoria indica que entre más denso sea el medio, menor debe ser la rapidez con la que ésta se desplaza. Una noción de la velocidad de la luz en diferentes medios sería el indicativo para decidir cuál era la teoría correcta.

Debido a la gran autoridad de Newton, la mayoría de los científicos habían aceptado la teoría corpuscular, sin embargo, en 1860 se realizaron los primeros experimentos para obtener la velocidad de la luz en diferentes medios. Foucault logró medir la velocidad de la luz en el agua y descubrió que era mucho menor que la del aire, por lo tanto, contradecía a la teoría corpuscular. Experimentos anteriores como el de Tomas Young acerca de la interferencia luminosa, y Agustin Fresnel sobre la difracción, tampoco encontraron validez alguna con la teoría corpuscular, pero sí se explicaban correctamente con la teoría ondulatoria. Por todo lo anterior, se siguen aceptando las dos teorías como válidas, pero con sus limitaciones correspondientes, principalmente la teoría corpuscular.

1.1.3. Principio de Fermat

Este principio se considera muy importante, puesto que toda la óptica geométrica se basa en él. Inicialmente se estableció de la siguiente manera: "el camino entre dos puntos dados que recorre un rayo de luz es aquel para el cual el tiempo que tarda la luz en recorrerlo es mínimo". Posteriormente, se le realizó una corrección, dado que a veces la



luz sigue un camino óptico máximo. Por tanto, el principio se reformula diciendo que "el camino óptico recorrido por la luz para ir de un punto a otro es tal que sea estacionario respecto a las variaciones de los demás caminos ópticos posibles".

El tiempo t que tarda la luz en recorrer una distancia s es:

$$t = \frac{s}{v}$$

donde v es la velocidad que adquiere la luz en ese medio (suponiendo un medio isotrópico). Recordando que el índice de refracción está definido como $n = c/v$, donde c es la velocidad de la luz en el vacío, entonces:

$$t = \frac{sn}{c}$$

Supón ahora que el índice de refracción depende de la distancia o posición en el medio: $n(s)$, se puede calcular el tiempo que se recorre en una distancia diferencial ds :

$$dt = \frac{nds}{c}$$

Y el tiempo total que tarda el haz de luz en recorrer el camino desde P1 inicial a P2 final es:

$$t = \frac{1}{c} \int_{P1}^{P2} n(s) ds$$

Aplicando el principio de Fermat, el problema matemático radica en encontrar los máximos y mínimos de la función:

$$\delta \int_{P1}^{P2} n(s) ds = 0$$

Geoméricamente hablando, el camino más corto entre dos puntos es una recta que los une, por lo tanto, si consideras un medio isotrópico y homogéneo, la luz se propagará en línea recta mientras no encuentre en medio de dispersión.



1.2. Leyes de la reflexión y refracción

Aplicando el principio de Fermat, resulta muy sencillo deducir y entender los fenómenos de reflexión y refracción de la luz, tal como se aborda en los siguientes subtemas. Para abordar estos fenómenos se utiliza el tratamiento corpuscular de la luz, es decir, se considera a la luz como partículas (haces de luz) y no como ondas.

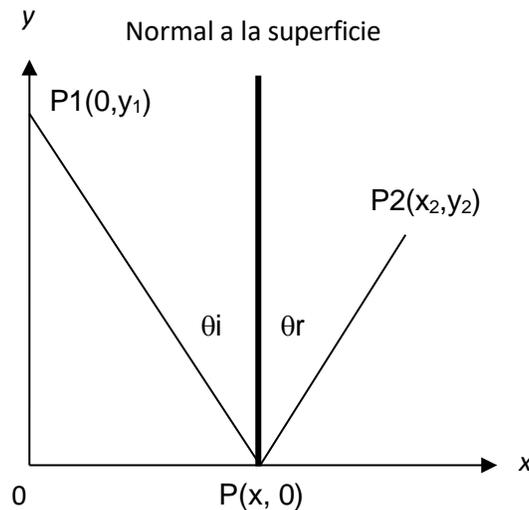
1.2.1. Reflexión

La reflexión es el fenómeno que ocurre cuando un haz de luz incide en una superficie que separa dos medios de distinta naturaleza (diferentes índices de refracción), y al hacerlo cambia su dirección de propagación, sin cambiar de medio. El fenómeno de la reflexión obedece a dos leyes:

- ✓ La primera ley de la reflexión dice que el rayo incidente, el reflejado y la normal a la superficie, se encuentran en el mismo plano. Esta ley es una consecuencia del principio de Fermat.
- ✓ La segunda ley dice que el ángulo de reflexión, que se forma con el haz reflejado y la normal, es de la misma magnitud que el ángulo incidente.

Considera la siguiente figura donde un haz de luz parte del punto $P1(0,y_1)$ y se refleja en el punto $P(x_1,0)$ para llegar finalmente al punto $P2(x_2,y_2)$. Considerando que el primer medio es aire ($n=1$), el camino óptico (CO) que recorre el haz para llegar del punto P1 al punto P2 es:

$$CO = n \left(\sqrt{(x_2 + y_1)^2} + \sqrt{(x_2 - x)^2 + y_2^2} \right)$$



Condiciones para la reflexión de la luz.

Tomando en cuenta el principio de Fermat, el camino óptico tiene que ser un extremo, lo que impone la siguiente condición:

$$\frac{dCO}{dx} = n \left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y_1^2}} + \frac{(x_2 - x)}{\sqrt{(x_2 - x)^2 + y_2^2}} \right) = 0$$

De la ecuación anterior, es muy fácil deducir, por relaciones trigonométricas, que:

$$\text{sen}\theta_i = \text{sen}\theta_r$$

Y en consecuencia, $\theta_i = \theta_r$. Expresión matemática que corresponde a la segunda ley de la reflexión.

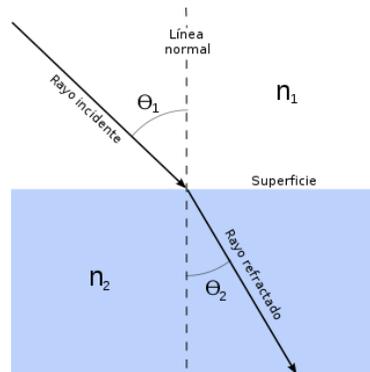
1.2.2. Refracción

Se conoce como refracción al fenómeno en el que un haz luminoso incide con un ángulo de inclinación en la superficie que separa dos medios con diferentes índices de refracción (por ejemplo, aire y agua); como consecuencia, el haz luminoso cambia de dirección y de velocidad.

Si un haz luminoso incide en la interfaz que separa dos medios, una parte del haz se reflejará, es decir, regresará al mismo medio de incidencia y otra parte del haz se refractará, propagándose en el segundo medio. Las condiciones de propagación cambian



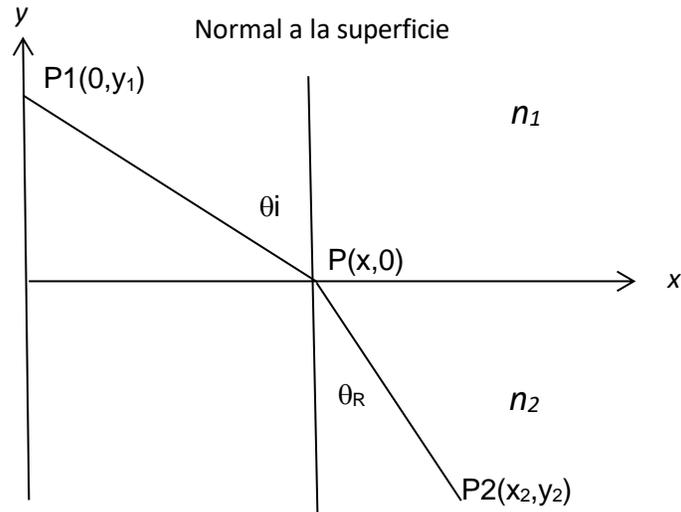
cuando el rayo pasa de un medio a otro. La velocidad de la luz cambia dependiendo del medio en el que se propaga. Por lo tanto, cuando la luz está recorriendo un medio menos denso con índice de refracción n_1 (por ejemplo, el aire) y pasa a otro más denso con índice de refracción n_2 (agua), el haz se refracta acercándose a la normal y formando un ángulo de refracción de menor magnitud que el ángulo de incidencia. Cuando la situación es contraria, la luz pasa de un medio más denso a uno menos denso, el haz será refractado separándose de la normal y formando un ángulo de refracción mayor que el ángulo de incidencia. En la siguiente figura se ilustra el fenómeno de la refracción.



Fenómeno de la refracción de la luz. Fuente: tomado de <http://fisica11c.wordpress.com/refraccion-de-la-luz/>

La primera ley de la refracción indica que: el haz incidente, el haz reflejado y la normal a superficie de refracción, se encuentran en el mismo plano. Al igual que en la ley de la reflexión, esta ley es una consecuencia directa del principio de Fermat.

La segunda ley de la refracción dice que: para dos medios con diferentes índices de refracción n_1 y n_2 , el seno del ángulo de incidencia es igual al seno del ángulo de refracción. Esto se puede deducir fácilmente a partir de las siguientes trayectorias de la luz que se indican en el siguiente esquema:



Condiciones para la refracción de la luz.

El camino óptico que recorre un haz de luz desde el punto P1 hasta llegar al punto P2 es:

$$CO = n_1 \left(\sqrt{x^2 + y_1^2} \right) + n_2 \left(\sqrt{(x_2 - x)^2 + y_2^2} \right)$$

Nuevamente, considerando la restricción que impone el principio de Fermat, se tiene la siguiente condición:

$$\frac{dCO}{dx} = n_1 \left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y_1^2}} \right) + n_2 \left(\frac{(x_2 - x)}{\sqrt{(x_2 - x)^2 + y_2^2}} \right) = 0$$

Con un análisis trigonométrico sencillo se puede deducir a partir de la ecuación anterior que:

$$n_1 \text{sen} \theta_i = n_2 \text{sen} \theta_R$$

La expresión anterior es lo que se conoce como ley de Snell.

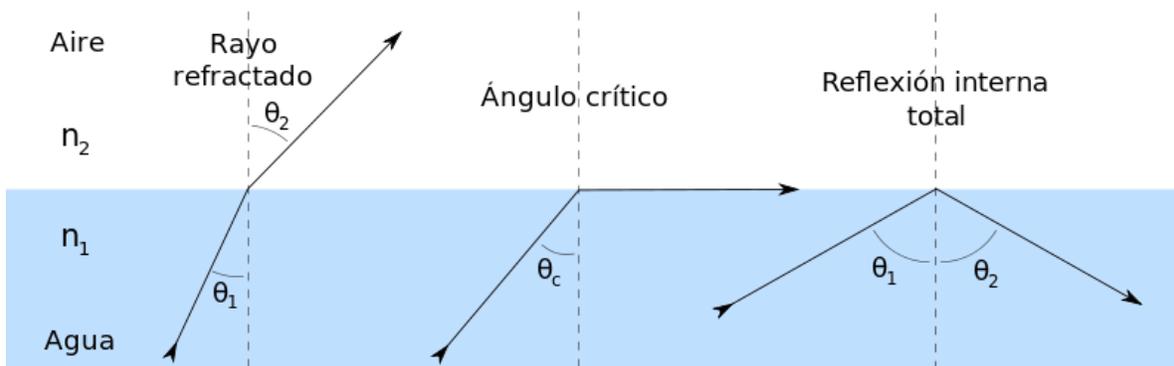


1.2.3. Ángulo crítico

Se denomina ángulo crítico o ángulo límite al ángulo a partir del cual el fenómeno de refracción de la luz no se lleva a cabo y toda la luz es reflejada. Esto se observa principalmente cuando el primer medio es más denso (índice de refracción mayor) que el segundo medio, donde se supone debería propagarse el haz refractado. A la reflexión que se produce bajo estas circunstancias se le conoce como reflexión total interna, debido a que toda la luz incidente se refleja en el mismo medio después de “rebotar” en la superficie reflectora. Un haz con un ángulo de incidencia de 90° se refractará con un ángulo de refracción θ_L que, de acuerdo a la ley de Snell, corresponde a:

$$\text{sen}\theta_L = \frac{n_1}{n_2}$$

Por lo tanto, θ_L es el ángulo crítico; se denomina así debido a que no existirán rayos refractados con una magnitud mayor al ángulo crítico. En la ecuación anterior se observa, que el ángulo crítico es función únicamente de los índices de refracción de los materiales en cuestión.



Formación del ángulo crítico y de la reflexión total interna. Fuente: tomado de http://es.wikipedia.org/wiki/Reflexi%C3%B3n_interna_total

En la figura de arriba se muestra, a manera gráfica, este fenómeno físico. Se puede observar en la parte izquierda, que el haz proviene de un medio más denso (agua) y se refracta en un medio menos denso (aire), por lo tanto, $n_1 > n_2$. A medida que se aumenta el ángulo de incidencia θ_1 , el ángulo de refracción θ_2 se alejará cada vez más de la normal a la superficie, hasta que en un determinado momento llegue a ser paralelo a esta superficie, es decir θ_2 tome el valor de 90° (parte media de la figura). Cuando el ángulo de incidencia supera este valor crítico, entonces toda la luz incidente regresará al mismo medio y el fenómeno de refracción ya no toma lugar, como se observa en la parte derecha de la figura. Este fenómeno, llamado reflexión total interna, es el principio con el que



operan muchos dispositivos ópticos como los prismas y las fibras ópticas.

1.3. Formación de imágenes en superficies esféricas

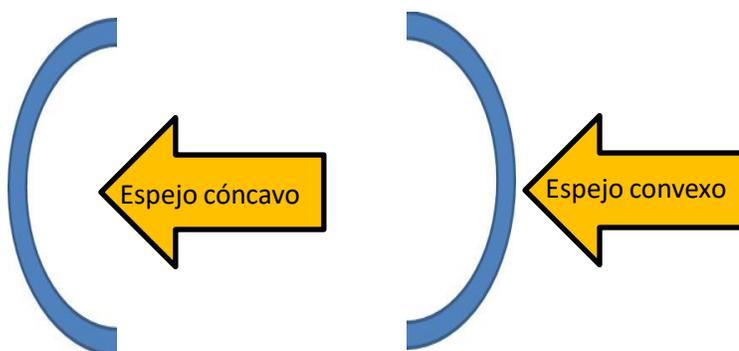
A lo largo de ese tema, cuando se hable de superficies esféricas se referirá específicamente a los espejos. Los espejos son dispositivos ópticos de superficie pulida capaces de reflejar la luz de manera especular y, en consecuencia, formar una imagen.

Aunque se centra la atención a los espejos con superficies esféricas, se recuerdan los dos tipos de espejos que existen:

- I. Espejos planos: son superficies planas y pulidas que pueden reflejar la luz de manera especular y formar una imagen con las siguientes características:
 - ✓ Son imágenes virtuales (se forman “detrás” del espejo).
 - ✓ La imagen virtual es del mismo tamaño que la del objeto real.
 - ✓ La imagen se forma invertida lateralmente.

- II. Espejos esféricos: son superficies curvas, lisas y pulidas en donde se lleva a cabo el fenómeno de reflexión especular. Se clasifican en cóncavos y convexos, dependiendo del lado en el que se lleve a cabo la reflexión de la luz.
 - ✓ Espejo cóncavo: la superficie reflectora se encuentra en el interior de la semiesfera que forman.
 - ✓ Espejo convexo: Contrario al espejo cóncavo, en este caso los rayos de luz se reflejarán en la superficie externa de la semiesfera.

En la siguiente figura se puede apreciar la diferencia entre un espejo cóncavo y uno convexo. La formación de imágenes en este tipo de dispositivos es un poco más compleja que en un espejo plano y se tratará con más detalle en el siguiente apartado.



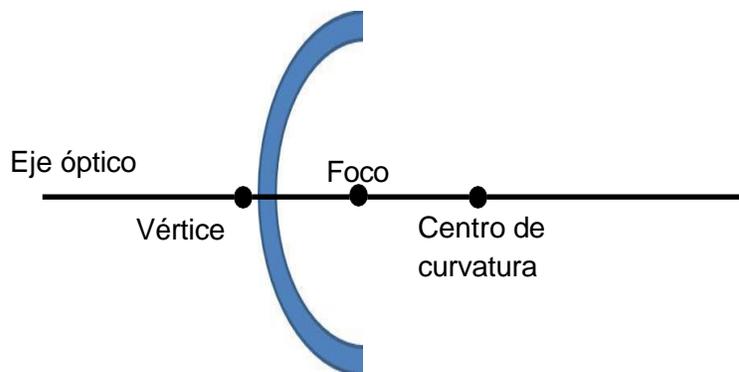
Representación de un espejo cóncavo y convexo.



1.3.1. Trazo de rayos

En una superficie esférica como la de la figura, se pueden identificar los siguientes parámetros:

- Centro de curvatura: considerando al espejo cóncavo como parte de una esfera, es el punto que corresponde al centro de una esfera.
- Radio de curvatura: Es la distancia que existe desde el centro de curvatura hasta la superficie refractora.
- Vértice: Es el punto de intersección entre el eje óptico y la superficie reflectora.
- Eje óptico: Es una línea imaginaria que pasa por el centro de la esfera e interseca al espejo perpendicularmente en el centro.
- Foco: Es la distancia media que existe entre el centro de curvatura y el vértice sobre el eje óptico.



Cualquier superficie reflectora, al formar la imagen de un objeto, establece una correspondencia uno a uno entre los puntos luminosos del objeto y de la imagen. La función de un espejo o de cualquier sistema formador de imágenes es desviar la luz por medio de la reflexión o de la refracción de un punto del objeto y enviarla a un solo punto en la imagen.

Se deben distinguir tres tipos de rayos para la construcción de la imagen:

- **Rayos paralelos:** son rayos que inician en la parte superior del objeto con una trayectoria paralela al eje óptico y después de refractarse pasan por el foco del espejo.
- **Rayos focales:** son rayos que salen de la parte superior del objeto pasando por el foco del espejo y después de refractarse en la superficie siguen una trayectoria paralela al eje óptico.



- **Rayos radiales:** parten de la parte superior del objeto, pasando por el centro de curvatura, sin experimentar reflexión, es decir, continúa en la misma dirección.

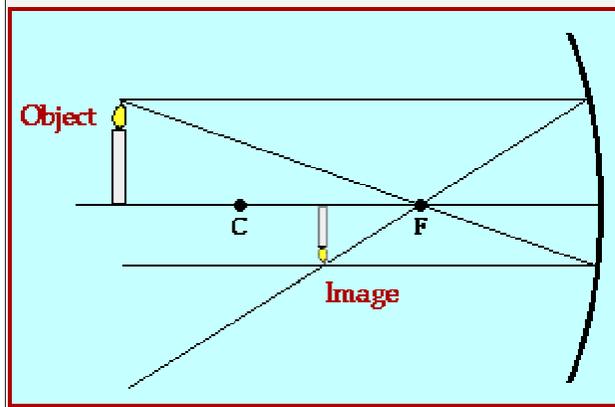
Dependiendo de la posición en donde se coloque el objeto, la imagen que se obtenga puede ser real o virtual:

- ✓ Imagen real: Es una imagen que se puede observar directamente con los ojos o colocando una pantalla en el lugar donde se forma la imagen.
- ✓ Imagen virtual: Esta imagen sólo puede observarse con los ojos, pero no con una pantalla debido a que los rayos que se reflejan no llegan a converger en ningún punto.

Espejos cóncavos

Para saber con exactitud el lugar en donde se forma la imagen, en la óptica geométrica se siguen unas reglas sencillas respetando el *trazado de los rayos paralelos y focales*, los cuales indicarán la posición y el tipo de imagen obtenida. Se pueden apreciar los siguientes casos para los espejos cóncavos:

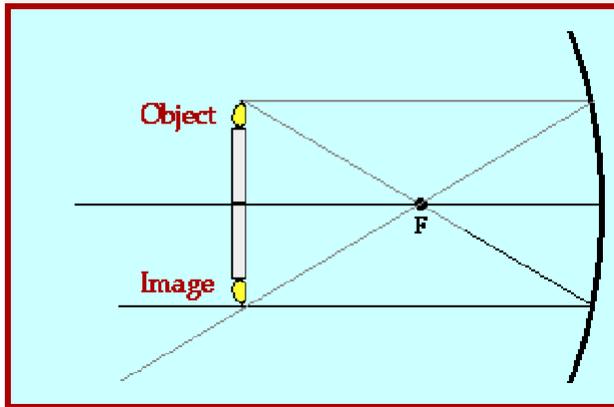
Caso I



Si el objeto se encuentra detrás del centro de curvatura o, más específicamente, entre el infinito y el centro de curvatura, se formará una imagen real invertida y de menor tamaño que el objeto.

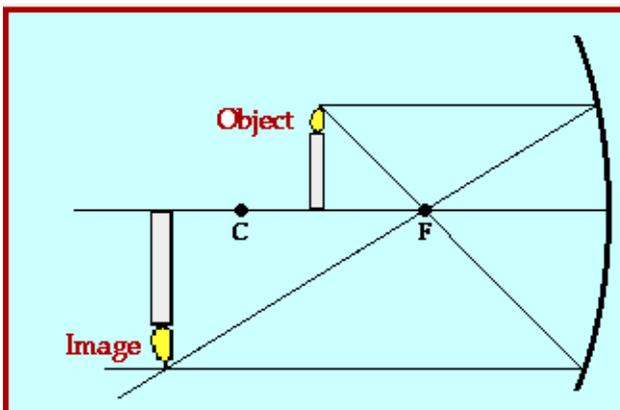


Caso II



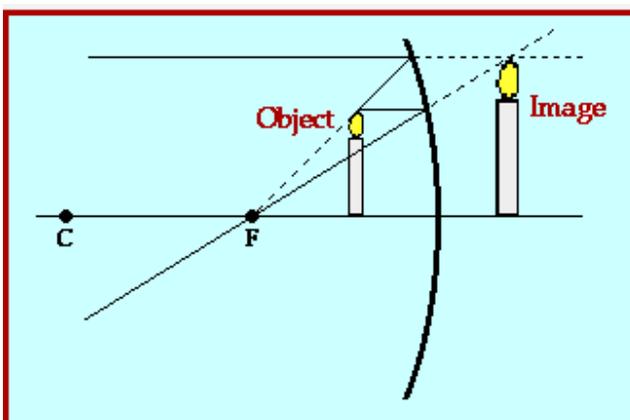
Si el objeto se encuentra ubicado en el centro de curvatura del espejo, siguiendo el trazado de rayos se observa que la imagen formada será real, invertida y del mismo tamaño que el objeto.

Caso III



Cuando el objeto se posiciona entre el foco y el centro de curvatura, la imagen obtenida será real, invertida y de mayor tamaño que el objeto.

Caso IV

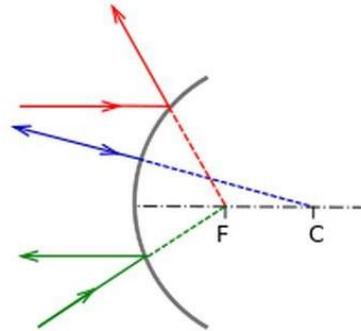


Si el objeto se localiza entre el foco y la superficie reflectora, la imagen formada será virtual, derecha y de mayor tamaño que el objeto; y se encuentra detrás del espejo.



Espejos convexos:

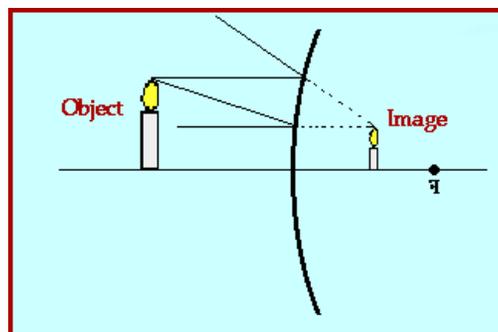
Cuando la superficie reflectora es un espejo convexo, los haces de luz seguirán las siguientes trayectorias como se indica en la siguiente figura:



Tipos de rayos que contribuyen a la formación de imágenes en un espejo convexo.

- Los rayos que lleguen a la superficie con una trayectoria paralela y cercana al eje óptico, se reflejarán como si provinieran del punto focal del espejo (rojos).
- Los rayos que incidan en la superficie del espejo como si procedieran del foco se reflejarán siguiendo una trayectoria paralela al eje óptico (verdes).
- Los rayos de luz que llegan a la superficie con dirección hacia el centro de curvatura se reflejan siguiendo la misma trayectoria con la que llegaron (azules).

La formación de imágenes en este tipo de espejos es independiente a la posición del objeto. La imagen formada siempre será virtual, de menor tamaño que el objeto y localizada detrás de la superficie reflectora, como se aprecia en la figura:



Formación de imágenes en espejos convexos.



1.3.2. Fórmula de Gauss

En la sección anterior aprendiste en qué lugar se formará la imagen de acuerdo a la posición del objeto, pero no se precisó en cuanto a la distancia exacta en la que se formará tal imagen. La distancia focal, la distancia del objeto al espejo y la distancia de la imagen al espejo se relacionan entre sí mediante una ecuación conocida como fórmula de Gauss:

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}$$

Donde d_o es la distancia que existe desde el vértice del espejo hasta el objeto; d_i es la distancia que hay desde el vértice del espejo hasta la imagen, y f es la distancia focal.

Ejemplo

Se tiene un espejo cóncavo con una distancia focal de 10cm. Un objeto de 4cm de longitud se encuentra situado a 15cm frente al espejo. Encuentre la posición de la imagen formada.

Solución

De la fórmula de Gauss observa que se conoce la distancia focal f , y la distancia del objeto d_o . Por lo tanto, se puede hallar la distancia de la imagen d_i :

$$d_i = \frac{fd_o}{d_o - f}$$

Sustituyendo los valores correspondientes:

$$d_i = \frac{10 \times 15}{15 - 10} = 30cm$$

Por lo tanto, la imagen invertida se encuentra a 30cm del vértice del espejo.

1.3.3. Teorema del seno y de Lagrange

El teorema del seno óptico indica que existe una dependencia entre el tamaño de la imagen y el grado de convergencia o divergencia de los rayos de luz en el plano donde se forma la imagen. Sea una lente convergente como la que se muestra en la figura:

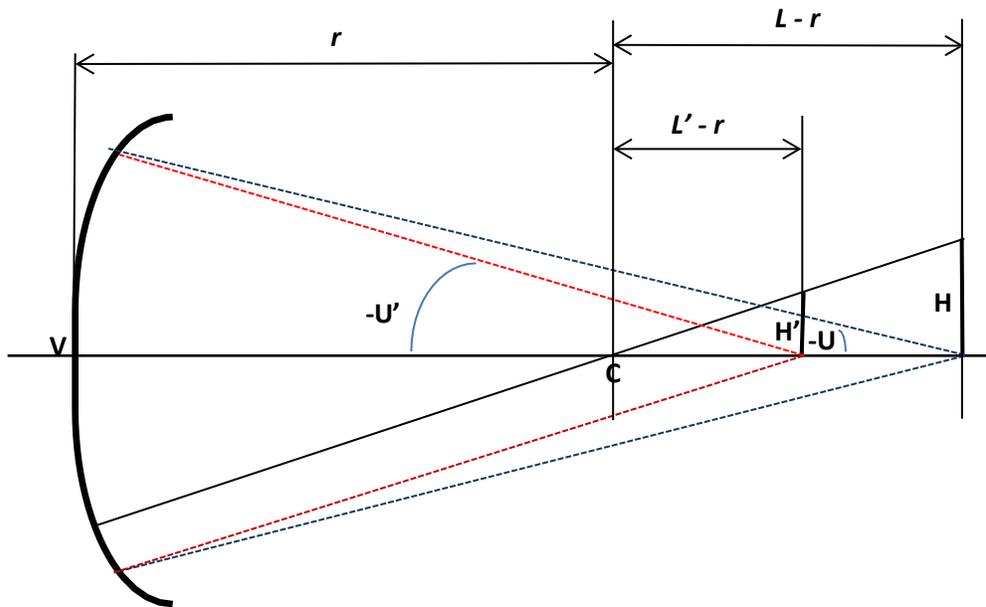


Diagrama para deducir la ley del seno.

Suponiendo que H es mucho menor que L, se tiene que:

$$\frac{H'}{H} = \frac{L-r}{L-r}$$

Aplicando la ley trigonométrica del seno, la ecuación anterior equivale a:

$$nH \operatorname{sen} U = n' H' \operatorname{sen} U'$$

La expresión anterior es la formulación matemática del teorema óptico del seno. El producto de los tres parámetros. n, H y $\operatorname{sen} U$ se considera un invariante óptico porque se mantiene constante todas las superficies ópticas reflectoras en cualquier objeto localizado sobre el eje óptico.

Si se supone que los rayos son de apertura muy pequeña (paraxiales), entonces $\operatorname{sen} U \approx U$; esta aproximación da lugar a lo que se conoce como teorema de Lagrange:

$$nHU = n'H'U'$$



1.3.4. Amplificación lateral y longitudinal

La amplificación lateral de un sistema óptico se define con la siguiente expresión:

$$m = \frac{H'}{H} = -\frac{d_i}{d_o}$$

Donde m se refiere a la amplificación lateral, H' es la amplitud o altura de la imagen, y H es la altura del objeto. Utilizando el teorema óptico del seno la ecuación anterior es equivalente a:

$$m = \frac{H'}{H} = \frac{n \operatorname{sen} U}{n' \operatorname{sen} U'}$$

La expresión anterior indica que la amplificación lateral de un sistema óptico está directamente relacionada a su grado de convergencia, de manera que no se puede modificar m , sin alterar los parámetros de convergencia del espejo.

Cuando $|m| > 1$, la altura de la imagen es mayor que la del objeto, si $|m| < 1$ la imagen es de menor tamaño que el objeto. Si $m > 0$, la imagen es derecha, si $m < 0$, la imagen es invertida.

Ejemplo

Un espejo convexo tiene una distancia focal de -12cm . A una distancia de 20cm del vértice del espejo se encuentra un objeto de 5cm de altura. Determina la posición y altura de la imagen y discute sus características.

Solución:

La primera parte del problema se aborda muy fácilmente con la fórmula de Gauss de manera similar al ejemplo del subtema 1.3.2. Fórmula de Gauss. Sin embargo, en este caso la distancia focal es negativa por tratarse de un espejo convexo. Despejando d_i de la fórmula de Gauss:

$$d_i = \frac{fd_o}{d_o - f} = \frac{-12 \times 20}{20 + 12} = -7.5\text{cm}$$

Calculando la amplificación lateral:



$$m = -\frac{d_i}{d_o} = -\frac{-7.5}{20} = 0.375 \text{ cm}$$

De manera que: $H' = mH = (0.375)(5\text{cm}) = 1.875 \text{ cm}$. Se puede concluir entonces que la imagen formada tiene las siguientes características: se localiza a 7.5 cm detrás del espejo, tiene una altura de 1.875 cm, por tanto, es menor que el objeto. El valor de m es mayor que cero, por lo tanto, la imagen no está invertida, y por tratarse de un espejo convexo, la imagen es virtual.

1.3.5. Materiales ópticos

En la fabricación de componentes ópticos se utilizan diversos materiales con determinadas propiedades físicas que dependen de su aplicación. Los materiales ópticos más comunes se describen a continuación:

a) Vidrio óptico: se fabrica a partir del óxido de silicio o cuarzo que se extrae de las arenas. La diferencia que existe entre el vidrio óptico y un vidrio normal es que los primeros tienen mayor homogeneidad y transparencia. Un mayor grado de homogeneidad está relacionado con el proceso de fabricación; controlando la velocidad de la mezcla de los componentes a la temperatura adecuada es como se llega a obtener un material homogéneo. La transparencia es una característica que también depende de los parámetros de fabricación; la arena de sílice u óxido de silicio contiene muchos minerales que deben ser removidos antes de fundir el material para obtener un vidrio transparente y con alto grado de pureza.

Cualquier material óptico se caracteriza por dos parámetros: su índice de refracción (n) y su número de Abbe (V). El índice de refracción es función de longitud de onda; a longitudes de ondas menores, el índice de refracción es mayor. A esta variación del índice de refracción con respecto a la longitud de onda se le conoce como dispersión cromática, y una manera de cuantificar la calidad o transparencia de un material óptico es mediante el número de Abbe que se define como:

$$V = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$$

Donde n_D , n_F y n_C corresponden a los índices de refracción del material a las longitudes de onda de 587.6nm, 486.1nm y 656.3nm, respectivamente. Un número de Abbe grande significa que el material tiene poca dispersión; cuanto mayor sea el número de Abbe, mejor será la calidad del material óptico. Un valor de V de 20 corresponde a vidrios Flint, los cuales son muy densos, y un valor de 30 es típico de un policarbonato. El vidrio Crown tiene un valor de V mayor de 50.



b) Vidrios con baja expansión térmica: Un espejo óptico consiste en un vidrio óptico con una capa metálica reflectora en la superficie frontal. En este caso, las propiedades de transparencia y homogeneidad no son tan importantes como el coeficiente de expansión térmica a fin de evitar una deformación con los cambios de temperatura. Para los espejos se requiere de un vidrio con baja expansión térmica, como los que se muestran en la siguiente tabla:

Nombre comercial	n_D	V	Coefficiente de expansión térmica
Pyrex (Corning)	1.4740	73.8	$33 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Cervit	Ámbar opalino		$1.5 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Cuarzo fundido	1.4584	67.8	$5 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
U.L.E. (Corning)	1.4836	53.2	$1 \times 10^{-9} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

c) Plásticos: también se fabrican dispositivos ópticos de bajos costos, aunque sus características son muy diferentes a las del vidrio. La transparencia, la homogeneidad y la calidad de la superficie no son comparables con las de los materiales ópticos basados en vidrios, tampoco poseen alta resistencia a la abrasión y a las altas temperaturas, sin embargo, pueden ser de útil aplicación para sistemas ópticos de prueba. Los plásticos más comunes utilizados en la fabricación de componentes ópticos son: el metilmetacrilato, el policarbonato, el poliestireno y el carbonato de allil diglicol.



Cierre de la unidad

La óptica es una rama de física que estudia el comportamiento de la luz, sus propiedades y sus manifestaciones. Debido a que el campo de estudio es muy diverso, se divide en dos grandes ramas: la óptica geométrica y la óptica física, también conocida como óptica ondulatoria. Estas subdivisiones surgieron cuando se descubrieron fenómenos luminosos que no encontraron explicación alguna con la óptica geométrica y se llegó a la conclusión que la luz tiene un comportamiento dual: es una partícula y también es una onda. La óptica geométrica analiza a la luz como si fuera un conjunto de rayos que viajan en línea recta obedeciendo al principio de Fermat, y bajo esta teoría se tienen las explicaciones necesarias para comprender los fenómenos de reflexión y refracción.

En esta unidad, y a lo largo de todo el contenido de la materia, se trabajará principalmente con el concepto de la luz como una partícula, debido a que el interés principal es conocer los dispositivos que captan y guían las partículas de luz para concentrarlas hacia una zona en especial. Por lo tanto, es de gran importancia comprender el comportamiento de los dispositivos que reflejan la luz de manera especular, como lo hacen los espejos. En la siguiente unidad se complementará con el material necesario para entender el fenómeno de refracción por medio de lentes y de otros sistemas compuestos, con el objetivo de entender la función que tienen estos dispositivos ópticos integrados en un sistema para generar energía alterna, principalmente en sistemas fotovoltaicos y fototérmicos.



Para saber más



Se recomienda revisar la siguiente tesis doctoral que parte de la premisa de la unidad, es decir, el uso de sistemas ópticos empleada para las energías renovables, la cual se encuentra en el siguiente sitio:

<http://eprints.ucm.es/15359/1/T33478.pdf>



Fuentes de consulta



1. Hecht, E. y Zajac A. (2004) *Óptica*. Buenos Aires: Addison-Wesley Iberoamericana.
2. Malacara D. (2004). *Óptica básica*. México: Fondo de Cultura Económica.
3. Mejías P.M. Martínez R. Herrero. (1999) *Óptica Geométrica*. España: Síntesis editores.
4. Millán S. Soteras J.E. y Cabré E. (2004) *Óptica Geométrica*. España: Ariel.
5. Serway Ry Jewett, J. (2008). *Física para Ciencias e Ingeniería*. Vol. 2. Latinoamérica: Cengage Learning Editores.