

Capítulo 2

Marco Teórico

La Óptica es la rama de la Física que estudia las propiedades de la luz; es decir su propagación e interacción con la materia. La luz visible designa a la región del espectro de radiación electromagnética que se extiende desde una longitud de onda $\lambda = 390\text{nm}$ hasta $\lambda = 780\text{nm}$; aunque actualmente es común incluir la radiación infrarroja que abarca desde los 780 nm hasta los 3000 nm y la ultravioleta que va desde los 15 nm hasta los 390 nm¹⁰.

La energía electromagnética tiene una naturaleza dual, y obedece leyes que pueden explicarse a partir de paquetes de energía, llamados fotones, o a partir de un tren de ondas transversales¹¹. El concepto de fotón se emplea para explicar las interacciones a nivel microscópico (es decir, en el dominio de la Física Cuántica) de la luz con la materia que producen un cambio en la forma de energía, como ocurre con el efecto fotoeléctrico o la luminiscencia. El efecto fotoeléctrico es el proceso por el cual los fotones de la radiación inciden sobre un material y liberan electrones.

El concepto de onda suele emplearse para explicar macroscópicamente (es decir, en el dominio de la Física Clásica) la propagación de la luz y algunos de los fenómenos de formación de imágenes a partir de espejos y lentes. En las ondas de luz, existen campos eléctricos y magnéticos en cada punto del espacio, que fluctúan con determinada rapidez. Estos campos tienen, además de una magnitud, una dirección determinada, por lo tanto son cantidades vectoriales. El periodo es el número de unidades de tiempo por onda; es decir, es el tiempo que tarda en recorrer un periodo espacial, cuyo inverso es la frecuencia temporal o el número de ondas por unidad de

tiempo. La longitud de onda es la distancia a lo largo de la dirección de propagación entre dos puntos con la misma fase. Por ejemplo, la longitud de onda es igual a la distancia que va de un máximo de la onda sinusoidal a otro (figura 2.1), o de un mínimo a otro, en la dirección de propagación.

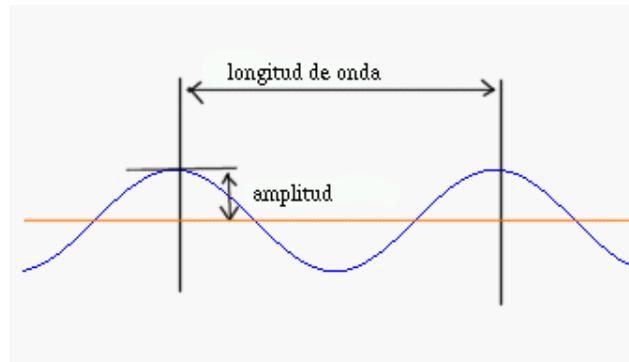


Figura 2.1. Longitud de onda

Se puede escribir la ecuación de una onda que se propaga con velocidad v en la dirección positiva de x , es decir, hacia la derecha como:

$$y = f(x - vt) \quad (2.1)$$

Tomando la derivada parcial de $y(x,t)$ con respecto a x , manteniendo t constante y utilizando la transformada de Galileo $x' = x - vt$, se obtiene:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x'} \frac{\partial x'}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x'} \quad (2.2)$$

ya que $\frac{\partial x'}{\partial x} = 1$

Ahora la derivada respecto al tiempo es:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial x'} \frac{\partial x'}{\partial t} = -v \frac{\partial y}{\partial x'} \quad (2.3)$$

Por lo tanto:

$$\frac{\partial \mathbf{y}}{\partial t} = \mp v \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial x} . \quad (2.4)$$

Las segundas derivadas quedan de la siguiente manera:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{y}}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} , \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{y}}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t} (\mp v \frac{\partial f}{\partial x}) = \mp v \frac{\partial}{\partial x} (\frac{\partial f}{\partial t}) . \quad (2.6)$$

Por último:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{y}}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} , \quad (2.7)$$

o lo que es lo mismo que:
$$\frac{\partial^2 \mathbf{y}}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \mathbf{y}}{\partial t^2} . \quad (2.8)$$

que es la llamada ecuación diferencial de onda unidimensional.

Esta ecuación se puede generalizar para un modelo de ondas tridimensionales como:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{y}(r,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{y}(r,t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{y}(r,t)}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \mathbf{y}}{\partial t^2} , \quad (2.9)$$

donde $v = v_x \hat{i} + v_y \hat{j} + v_z \hat{k}$.

En el espectro visible, las diferencias en longitud de onda se manifiestan como diferencias de color. El rango visible va desde 350 nanómetros (violeta) hasta 750 nanómetros (rojo). En el vacío, la velocidad de propagación de la luz es independiente de las longitudes de onda.

La relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de una longitud de onda determinada en una sustancia se conoce como índice de refracción de la sustancia para dicha longitud de onda. El índice de refracción del aire es 1.00029 y

apenas varía con la longitud de onda. En la mayoría de las aplicaciones resulta suficientemente preciso considerar que es igual a 1 para todas las longitudes de onda del espectro visible.

2.1 Óptica geométrica

Las leyes de reflexión y refracción de la luz suelen deducirse empleando la teoría ondulatoria de la luz introducida en el siglo XVII por el matemático, astrónomo y físico holandés Christian Huygens. El principio de Huygens afirma que cada punto en un frente de onda en propagación sirve como fuente de trenes de ondas esféricas secundarias de tal modo que, al cabo de cierto tiempo, el frente de onda será la envolvente de estos trenes de onda; como se puede observar en la figura 2.2⁰. Por otro lado la onda que se propaga tiene una frecuencia y se transmite a través el medio a una velocidad, entonces los trenes de ondas secundarios tendrán la misma frecuencia y velocidad. Como los rayos de luz se definen formando un ángulo recto con respecto a este frente de onda, el principio de Huygens puede emplearse para deducir los cambios de dirección de los rayos de luz.



Figura 2.2 Principio de Huygens

Cuando las ondas secundarias llegan a otro medio u objeto, cada punto del límite entre los medios se convierte en una fuente de dos conjuntos de ondas. El

Publicaciones

comportamiento de los rayos reflejados y refractados puede explicarse por el principio de Huygens. Es más sencillo representar la propagación de la luz mediante rayos en vez de ondas. El rayo es la línea de avance, o dirección de propagación, de la energía radiante y, por tanto, perpendicular al frente de onda. La trayectoria de los rayos a través de un sistema óptico se determina aplicando las leyes de la reflexión y la refracción.

Cuando un rayo incide sobre una superficie pulida y lisa puede entonces rebotar, si rebota hacia el mismo medio decimos que se refleja y cumple las llamadas "leyes de la reflexión":

- 1.- El rayo incidente forma con la normal un ángulo de incidencia que es igual al ángulo que forma el rayo reflejado y la normal, que se llama ángulo reflejado.
- 2.- El rayo incidente, el reflejado y la normal están en el mismo plano¹¹.

La luz se refleja también en las superficies que no son lisas pero lo hace originando rayos que no son paralelos entre sí. Cada rayo del haz cumple las leyes de la reflexión, pero los rayos reflejados no rebotan paralelos entre sí y por lo tanto la luz sale difusa.

Si la superficie entre dos medios es lisa, puede actuar como un espejo y producir una imagen reflejada (figura 2.3). En la figura 2.4, la fuente de luz es el objeto A . Los dos rayos que inciden sobre el espejo en B y C , por ejemplo, se reflejan como rayos BD y CE . Para un observador situado a la izquierda del espejo, esos rayos parecen venir del punto F que está detrás del espejo. De las leyes de reflexión se deduce que CF y BF forman el mismo ángulo con la superficie del espejo que AC y AB . En este caso, en el que el espejo es plano, la imagen del objeto parece situada detrás del espejo y separada de él por la misma distancia que hay entre éste y el objeto que está delante.

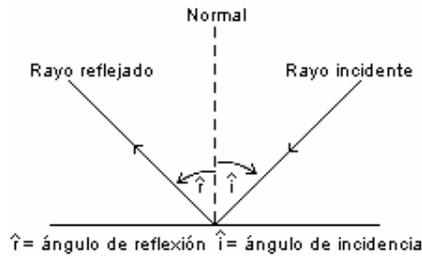


Figura 2.3. Ley de reflexión

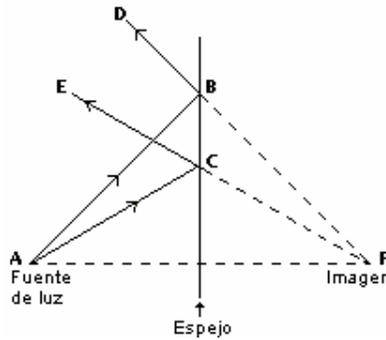


Figura 2.4. Reflexión en un espejo plano

Si la superficie entre dos medios es rugosa, las normales a los distintos puntos de la superficie se encuentran en direcciones aleatorias. En ese caso, los rayos que se encuentren en el mismo plano al salir de una fuente puntual de luz tendrán un plano de incidencia, y por tanto de reflexión, aleatorio. Esto hace que se dispersen y no puedan formar una imagen.

Antes de definir lo que es la refracción necesitamos conocer la tercera ley de la óptica geométrica; la ley de Snell la cual tiene su nombre en honor al matemático holandés Willebrord Van Roijen Snell y se refiere al cambio de dirección de los rayos luminosos al pasar de un medio a otro. Esta ley afirma que el producto del índice de refracción del primer medio y el seno del ángulo de incidencia de un rayo es igual al producto del índice de refracción del segundo medio y el seno del ángulo de refracción.

Ley de Snell: $n_1 \text{ sen } i = n_2 \text{ sen } r$ (figura 2.3)

Publicaciones

Se dice que un rayo se refracta (cambia de dirección) cuando pasa de un medio a otro en el que viaja con distinta velocidad. En la refracción se cumplen las siguientes leyes:

- 1.-El rayo incidente, el refractado y la normal están en el mismo plano.
- 2.-La ley de Snell.

La luz se refracta porque se propaga con distinta velocidad en el nuevo medio. Como la frecuencia de vibración no varía al pasar de un medio a otro, cambia la longitud de onda de la luz como consecuencia del cambio de velocidad.

La intensidad de luz, que se mide en lux (lumen/m^2), reflejada por un cuerpo depende de:

- La naturaleza de la superficie (composición, estructura, densidad, color, entre otras)
- La textura de la superficie (plana, rugosa, regular, irregular, opaca, pulida , etc.)
- La longitud de onda de la luz y de si está o no polarizada.
- El ángulo de incidencia de la luz sobre la superficie.

La reflexión de la luz se puede realizar de dos maneras: reflexión irregular o difusa y reflexión regular o especular.

Se llama índice de refracción absoluto, n de un medio transparente al cociente entre la velocidad de la luz en el vacío c y la velocidad v que tiene la luz en ese medio. El valor n es siempre adimensional y mayor que la unidad y es una constante característica de cada medio: $n=c/v$.

Se puede establecer una relación entre los índices de los dos medios n_2 y n_1 por medio de la Ley de Snell se puede despejar n_1 y n_2 , por lo tanto:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin r}{\sin i} \equiv n_{1,2} \quad (2.10)$$

En general, el índice de refracción de una sustancia transparente más densa es mayor que el de un material menos denso. Por tanto, si un rayo incide de forma oblicua sobre un medio con un índice de refracción mayor, se desviará hacia la normal, mientras que si incide sobre un medio con un índice de refracción menor, se desviará alejándose de ella. Los rayos que inciden en la dirección de la normal son reflejados y refractados en esa misma dirección.

En la figura 2.5 se muestra la trayectoria de un rayo de luz que atraviesa varios medios con superficies de separación paralelas. El índice de refracción del agua es menor que el del vidrio. Como el índice de refracción del primer y el último medio es el mismo, el rayo emerge en dirección paralela al rayo incidente AB , pero resulta desplazado¹².

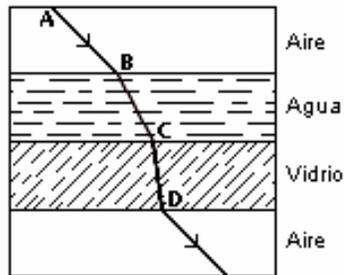


Figura 2.5 Rayo refractado que atraviesa tres medios diferentes.

2.1.1 Prismas

Un prisma es un objeto transparente con superficies planas y pulidas, no paralelas. Los prismas desempeñan funciones diferentes en la óptica: existen combinaciones de prismas que sirven como divisores de haces, sistemas polarizadores e

interferómetros. Cuando la luz atraviesa un prisma, el rayo de salida ya no es paralelo al rayo incidente. Como el índice de refracción de una sustancia varía según la longitud de onda, un prisma puede separar las diferentes longitudes de onda contenidas en un haz incidente y mostrar un espectro. En la figura 2.6, el ángulo CBD entre la trayectoria del rayo incidente y la trayectoria del rayo emergente es el ángulo de desviación.

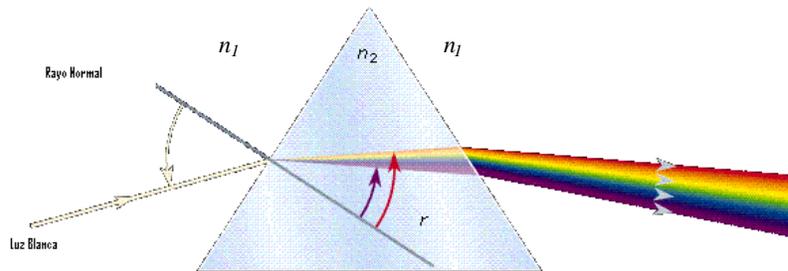


Figura 2.6. Refracción de la luz en un prisma

2.1.2 Superficies esféricas y asféricas

La mayor parte de la óptica geométrica se desarrolló en relación con superficies esféricas. Sin embargo, a veces es importante considerar también superficies no esféricas o asféricas.

Un espejo plano es una superficie plana muy pulimentada que puede reflejar la luz que le llega con una capacidad reflectora de la intensidad de la luz incidente del 95% o superior.

Una imagen en un espejo se ve como si el objeto estuviera detrás y no frente a éste ni en la superficie. (es un error frecuente el pensar que la imagen la vemos en la superficie del espejo).

El ojo identifica la posición que ocupa un objeto como el lugar donde convergen las prolongaciones del haz de rayos divergentes que le llegan. En un espejo plano esas prolongaciones no coinciden con la posición real del objeto. Es decir, los rayos que llegan al espejo, se reflejan cumpliendo las leyes de reflexión y siguen su camino al ojo con cierta divergencia entonces el ojo percibe estos rayos como si vinieran de un punto situado atrás del espejo; cuando en realidad los rayos luminosos no están viniendo de este punto. Es por esto que la imagen obtenida en un espejo plano no se puede proyectar sobre una pantalla, colocando una pantalla donde parece estar la imagen no recogería nada. Es, por lo tanto virtual, una copia del objeto "que parece estar" detrás del espejo.

La imagen formada es: simétrica, porque aparentemente está a la misma distancia del espejo; virtual, porque se ve como si estuviera dentro del espejo, no se puede formar sobre una pantalla pero puede ser vista cuando la enfocamos con los ojos y del mismo tamaño que el objeto; derecha, porque conserva la misma orientación que el objeto.

Cuando los rayos del haz están lejos del foco se puede considerar que son paralelos entre sí, como se observa en la figura 2.7, y para pequeños recorridos, a una distancia cercana del foco, la separación entre el principio y el fin de ese trazo de rayo es "inapreciable".

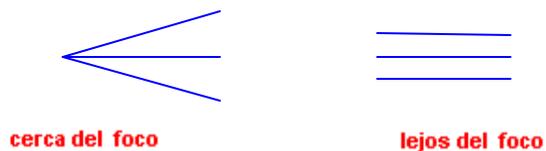


Figura 2.7. Rayos cerca y lejos del foco

2.1.3 Longitud de Camino Óptico

La longitud de camino óptico u OPL por sus siglas en inglés (Optical Path Length) se puede definir con ayuda de la figura 2.8, en la cual se muestra una onda que es emitida por el punto S. El punto V se llama vértice y es útil para definir la distancia del objeto $s_o = \overline{SV}$ y la distancia imagen $s_i = \overline{VP}$.

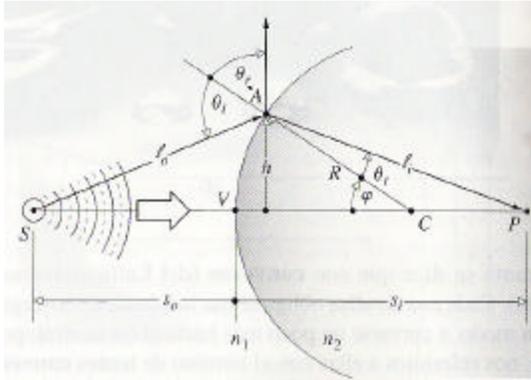


Figura 2.8. Refracción en superficies esféricas

El enunciado original del principio de Fermat establece que: "el camino entre dos puntos dados que recorre un rayo de luz es tal que para ese camino el tiempo que tarda la luz en recorrerlo es mínimo"¹⁰.

En términos más modernos, dado que los rayos de luz son sólo un modelo de la óptica, el principio de Fermat se expresaría diciendo que "la luz, al ir de un punto a otro, sigue una trayectoria tal que el camino óptico recorrido es mínimo". Lo que matemáticamente se puede escribir como:

$$OPL = n_1 l_o + n_2 l_i \quad (2.11)$$

Podemos utilizar la ley de cosenos en los triángulos y la identidad trigonométrica $\cos \mathbf{j} = -\cos(\mathbf{p} - \mathbf{j})$ y entonces podemos escribir que:

$$l_o = \left[R^2 + (s_o + R)^2 - 2R(s_o + R) \cos \mathbf{j} \right]^{1/2} \text{ y } l_i = \left[R^2 + (s_i - R)^2 - 2R(s_i - R) \cos \mathbf{j} \right]^{1/2} .$$

Sustituyendo esto en la ecuación 2.11 tenemos:

$$OPL = n_1 \left[R^2 + (s_o + R)^2 - 2R(s_o + R) \cos \mathbf{j} \right]^{1/2} + n_2 \left[R^2 + (s_i - R)^2 - 2R(s_i - R) \cos \mathbf{j} \right]^{1/2} . \quad (2.12)$$

Todas las cantidades de la ecuación 2.12 son números positivos que forman parte del convenio de signos (ver tabla 2.1), de la figura 2.8 se puede observar que el punto A se mueve sobre una esfera de radio igual a una constante, f es la variable de posición y por medio del principio de Fermat ($d(OPL)/df = 0$) se obtiene:

$$\frac{n_1(R + s_o) \text{sen} \mathbf{j}}{2l_o} - \frac{n_2(s_i - R) \text{sen} \mathbf{j}}{2l_i} = 0, \quad (2.13)$$

es decir:

$$\frac{n_1}{l_o} + \frac{n_2}{l_i} = \frac{1}{R} \left(\frac{n_2 s_i}{l_i} - \frac{n_1 s_o}{l_o} \right), \quad (2.14)$$

Haciendo uso de la aproximación que para ángulos pequeños $\cos f \sim 1$ y $\text{sen} f \sim f$, se obtiene que $l_o \sim s_o$ y $l_i \sim s_i$. Y la ecuación 2.14 se puede reescribir como:

$$\frac{n_1}{l_o} + \frac{n_2}{l_i} = \frac{1}{R} (n_2 - n_1). \quad (2.15)$$

Tabla 2.1 Convenio de signos para superficie refractoras y lentes delgadas¹⁰

s_o, f_o	+ izquierda de V
x_o	+ izquierda de F_o
s_i, f_i	+ derecha de V
x_i	+ derecha de F_i
R	+ si C está a la derecha de V
y_o, y_i	+ encima del eje óptico

2.1.4 Lentes

La lente delgada es el dispositivo óptico simple más importante. El desarrollo de dispositivos ópticos usando lentes data de los siglos XVI y XVII, aunque el primer registro sobre anteojos se remonta al siglo XIII. Una lente delgada es usualmente circular en su sección transversal y sus dos caras son porciones de una esfera. Las dos caras pueden ser cóncavas, convexas o planas.

Según su forma, las lentes delgadas pueden ser convergentes o divergentes. Las lentes convergentes son más gruesas en el centro que en los extremos. Se representan esquemáticamente con una línea con dos puntas de flecha en los extremos. (Figura 2.9)

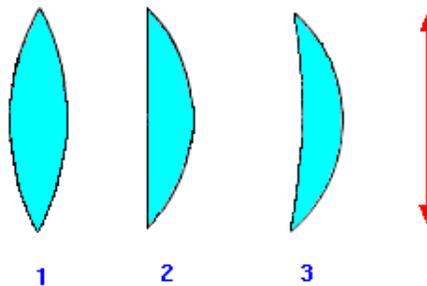


Figura 2.9. Lentes convergentes

Publicaciones

Según el valor de los radios de las caras pueden ser: biconvexas (1), plano convexas (2) y menisco convergente (3).

Las lentes divergentes son más delgadas en la parte central que en los extremos. Se representan esquemáticamente por una línea recta acabada en dos puntas de flecha invertidas. (Figura 2.10)

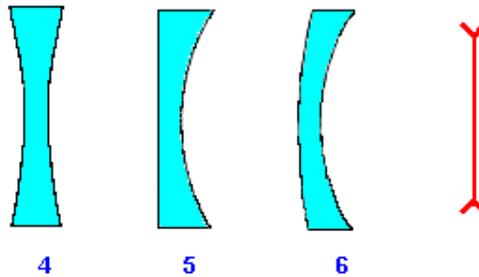


Figura 2.10. Lentes divergentes

Según el valor de los radios de las caras pueden ser: bicóncavas (4), plano cóncavas (5) y menisco divergente (6).

La lente está compuesta por dos superficies esféricas, cada una con su centro de curvatura; los cuales son los centros de las superficies que forman sus caras, como se muestra en la figura 2.11. La línea que une los centros de curvatura se llama eje principal y todas las otras rectas que pasan por el centro óptico (O) se llaman ejes secundarios.

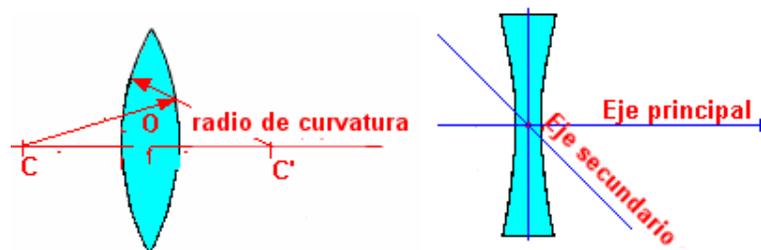


Figura 2.11 Partes de una lente.

En las lentes convergentes todos los rayos que viajan paralelos al eje principal convergen en el foco (ver figura 2.12); en cambio en las lentes divergentes los rayos que vienen del infinito salen dispersados después de atravesar esta lente (figura 2.13).

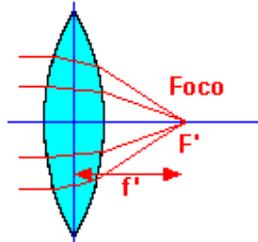


Figura 2.12 Rayos en una lente convergente

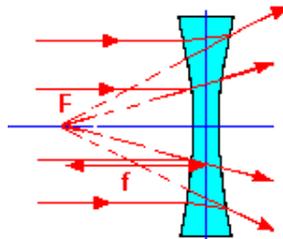


Figura 2.13 Rayos en una lente divergente.

Si colocamos dos superficies esféricas como las de la figura 2.8 se obtiene la figura 2.14

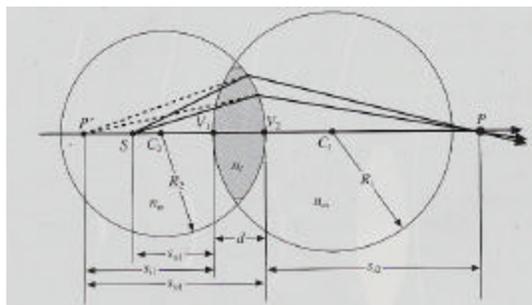


Figura 2.14. Lente esférica

En base a esta figura 2.14 la ecuación 2.15 se convierte en:

$$\frac{n_m}{s_{o1}} + \frac{n_l}{s_{i1}} = \frac{n_l - n_m}{R_1}, \quad (2.16)$$

con la figura 2.14 y la tabla 2.1 se deduce que:

$$s_{o2} = -s_{i1} + d. \quad (2.17)$$

Ahora aplicando la ecuación 2.15 para la segunda superficie se obtiene:

$$\frac{n_l}{(-s_{i1} + d)} + \frac{n_m}{s_{i2}} = \frac{n_m - n_l}{R_2}. \quad (2.18)$$

Sumando las ecuaciones 2.16 y 2.18 resulta:

$$\frac{n_m}{s_{o1}} + \frac{n_m}{s_{i2}} = \frac{n_m - n_l}{R_1} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{n_l d}{(s_{i1} - d)s_{i1}}; \quad (2.19)$$

como estamos tratando el caso de lentes delgadas d es aproximadamente igual a 0 y también se puede hacer la aproximación de que el medio circundante sea aire para que de esta manera n_m sea 1. Por lo tanto se obtiene la ecuación de lentes delgadas:

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = (n_l - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right). \quad (2.20)$$

Para superficies esféricas el $\lim_{s_o \rightarrow \infty} s_i = f_i$ de la misma manera $\lim_{s_i \rightarrow \infty} s_o = f_o$;

además para una lente delgada $f_i = f_o$ por lo tanto:

$$\frac{1}{f} = (n_l - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right), \quad (2.21)$$

Publicaciones

donde $\frac{1}{f} = \frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i}$; f es llamada la distancia focal.

Como dos distancias focales son iguales a un radio:

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{2}{r}. \quad (2.22)$$

Esta fórmula se cumple para todos los rayos paraxiales y predice resultados fiables y verdaderos si aplicamos correctamente el convenio de signos.

Si llamamos y_o al tamaño del objeto e y_i al de la imagen, entonces para el agrandamiento la expresión será la siguiente:

$$M_i = \frac{y_i}{y_o} = -\frac{s_i}{s_o}. \quad (2.23)$$

La descripción de la visión humana, la cual será estudiada en los capítulos posteriores, hace uso de los conceptos de la Óptica Física presentados en esta sección he aquí la importancia de este capítulo.

2.2 El Ojo Como Sistema Óptico

El ojo humano es un sistema óptico formado por una superficie aproximadamente esférica llamada córnea y una lente que recibe el nombre de cristalino, ambas son capaces de formar una imagen de los objetos sobre la superficie interna del ojo, en la

zona posterior del ojo, denominada retina, que es sensible a la luz. En la figura 2.15 podemos observar las partes del ojo.

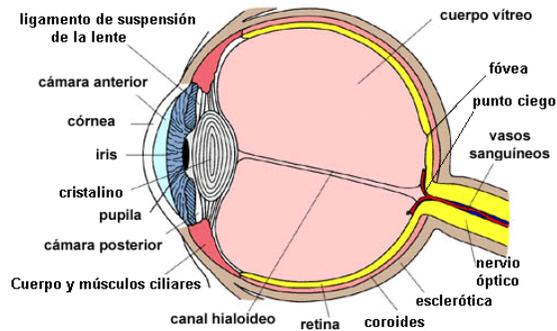


Figura 2.15 El ojo humano

El ojo tiene forma aproximadamente esférica y está rodeado por una membrana llamada esclerótica. Tras la córnea hay un diafragma, *el iris*, que posee una abertura, la pupila, por la que pasa la luz hacia el interior del ojo. El iris es el que define el color de nuestros ojos y el que controla automáticamente el diámetro de la pupila para regular la intensidad luminosa que entra al ojo.

El cristalino está unido por ligamentos al músculo ciliar. De esta manera el ojo queda dividido en dos partes: la posterior que contiene humor vítreo y la anterior que contiene humor acuoso. El índice de refracción del cristalino es 1437 y el del humor acuoso así como el del humor vítreo son similares al índice de refracción del agua.

El cristalino enfoca las imágenes sobre la envoltura posterior interna del ojo, la retina. Esta envoltura contiene fibras nerviosas (prolongaciones del nervio óptico) que terminan en pequeñas estructuras denominadas conos y bastones que son muy sensibles a la luz. Existe un punto en la retina, llamado fovea, alrededor del cual hay una zona que sólo tiene conos (para percibir el color). Durante el día la fovea es la parte más sensible de la retina y sobre ella se forma la imagen del objeto que miramos.

Los millones de nervios que van al cerebro se combinan para formar *el nervio óptico* que sale de la retina por un punto que no contiene células receptoras. Es el llamado *punto ciego*¹³.

La córnea refracta los rayos luminosos y el cristalino actúa como ajuste para enfocar objetos situados a diferentes distancias. De esto se encargan los músculos ciliares que modifican la curvatura de la lente y cambian su potencia. Para enfocar un objeto que está próximo, es decir, para que la imagen se forme en la retina, los músculos ciliares se contraen, y el grosor del cristalino aumenta, acortando la distancia focal. Por el contrario si el objeto está distante los músculos ciliares se relajan y la lente adelgaza aumentando así la distancia focal. Este ajuste se denomina acomodación o adaptación.

El ojo sano y normal ve los objetos situados en el infinito sin acomodación enfocados en la retina, como se muestra en la figura 2.16. Esto quiere decir que el foco del sistema de lentes está en la retina y el llamado punto remoto está en el infinito. Se llama punto remoto a la distancia máxima a la que puede estar situado un objeto para que una persona lo distinga claramente y punto próximo a la distancia mínima. Un ojo normal será el que tiene un punto próximo a una distancia de 25 cm, (para un niño puede ser de 10 cm) y un punto remoto situado en el infinito. Si no cumple estos requisitos el ojo tiene algún defecto.

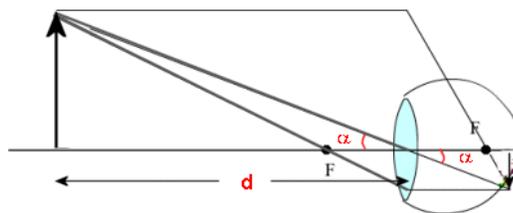


Figura 2.16 Acomodación de una imagen.

Defectos de la Visión

MIOPIA

El ojo miope tiene un sistema óptico con un exceso de convergencia. El foco está delante de la retina cuando el ojo está relajado, sin efectuar acomodación y al alcanzar la máxima acomodación está más cerca del cristalino que en el ojo normal.

La persona miope no ve bien de lejos. Al estar el punto focal del ojo más cerca de la córnea que en un ojo normal, los objetos situados en el infinito forman la imagen delante de la retina (figura 2.17) y se ven borrosos. Empiezan a verse bien cuando están cerca (en el punto próximo).

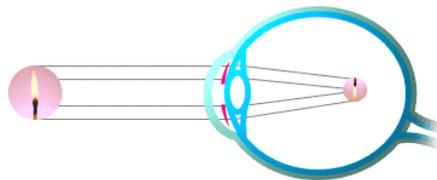


Figura 2.17 Ojo miope

Para corregir la miopía, figura 2.18, se necesitan lentes divergentes o negativas que hagan que los rayos diverjan y formen foco en la retina. El foco de las lentes divergentes empleadas para corregir la miopía debe estar en el punto remoto para que los rayos que salen de ellas se enfoquen en la retina.

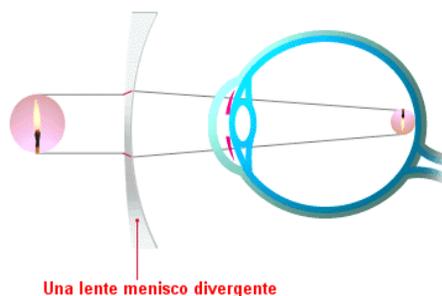


Figura 2.18. Corrección de ojo miope.

HIPERMETROPIA

Es un defecto de convergencia del sistema óptico del ojo. El foco imagen del ojo está detrás de la retina cuando el ojo está en actitud de descanso sin emplear la acomodación (figura 2.19). El foco está fuera del globo ocular. El ojo hipermetrope cuando está en reposo (sin efectuar la acomodación), tiene la lente del cristalino muy plana.

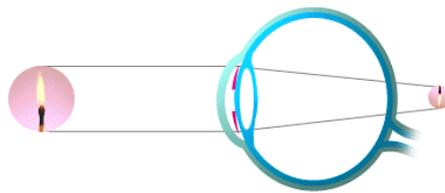


Figura 2.19 Ojo hipermetrope

El punto remoto es virtual y está detrás del ojo. Como se puede observar en la figura 2.20 para corregir la hipermetropía es necesario colocar una lente convergente. En algunos casos se corrige al crecer la persona y agrandarse el globo ocular.

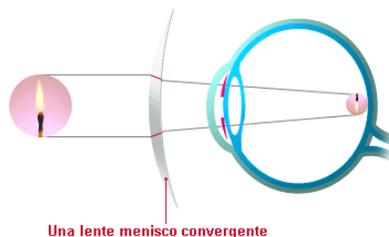


Figura 2.20 Corrección de ojo hipermetrope

PRESBICIA O VISTA CANSADA

Con el paso de los años se reduce la capacidad de adaptación del cristalino (pierde flexibilidad) y aumenta la distancia a la que se encuentra el punto próximo. Este defecto se llama presbicia y se corrige con lentes convergentes.

ASTIGMATISMO

Si el ojo tiene una córnea deformada (como si la córnea fuese esférica con una superficie cilíndrica superpuesta) los objetos puntuales dan como imágenes líneas cortas en alguna dirección. Este defecto se llama astigmatismo y para corregirlo es necesaria una lente cilíndrica compensadora (figuras 2.21, 2.22).

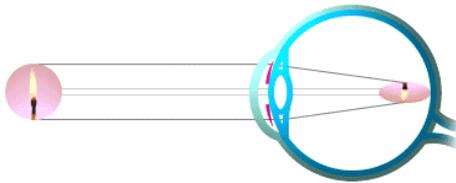


Figura 2.21 Ojo astigmático



Figura 2.22 Corrección del ojo astigmático

CATARATAS

Es muy frecuente que al envejecer el cristalino se vuelva opaco y no permita el paso de la luz. En esto consiste la catarata. Actualmente se puede corregir extirpando el cristalino e instalando en su lugar una lente plástica intraocular que hace sus funciones y que no necesita ser sustituida en el resto de la vida.

2.3 Aberraciones Geométricas O De Seidel

Una lente perfecta va a producir una imagen perfecta, sin embargo las lentes no son siempre perfectas. A los defectos que presenta una lente se les llaman aberraciones. Los instrumentos ópticos causan en las imágenes ciertos defectos o aberraciones. Las aberraciones no se deben a defectos de construcción, sino que son una consecuencia de las leyes de la refracción-reflexión de la luz.

En la óptica geométrica presentada hasta ahora se introdujeron varias simplificaciones: las lentes son siempre delgadas, los rayos son paraxiales, la luz es monocromática. En la práctica no se cumplen estas condiciones, por lo que la formación de las imágenes no se ajusta totalmente a la teoría paraxial.

Existen dos tipos de aberraciones:

1. Aberraciones cromáticas, las cuales dependen de la frecuencia o el color de la luz.
2. Aberraciones monocromáticas las cuales se dividen a su vez en aberración esférica, coma y astigmatismo, la aberración esférica afecta a toda la imagen mientras que coma y astigmatismo afectan únicamente al contorno y las esquinas de la imagen¹⁰.

También se encuentran las aberraciones que deforman la imagen como curvatura de campo de Petzval y la distorsión. La primera resulta de una imagen que es formada como superficie curva, no plana, por lo tanto cuando el centro de la imagen está en foco los bordes no y viceversa. En cambio la distorsión afecta a la forma de la imagen pero no la agudeza.

Publicaciones

La aberración esférica tiene lugar en las lentes y en los espejos esféricos. Es una aberración astigmática debido a que no se cumple la aproximación paraxial ya que no todos los rayos van próximos al eje. Los rayos paralelos al eje óptico reflejados o refractados se concentran en el foco, pero ese punto focal es diferente para los rayos que son paraxiales que para los que van alejados del eje de la lente.

La aberración esférica se evita con un diafragma (disco opaco centrado en el eje con un orificio central) que elimina los rayos no paraxiales. Estos rayos llamados marginales convergen a menor distancia de la lente si ésta es convergente, y a mayor distancia si es divergente. Asociando adecuadamente una lente convergente con otra divergente también se elimina este tipo de aberraciones ².

La aberración cromática se origina debido a que la luz no es monocromática. Los distintos colores de la luz tienen distintas velocidades dentro del material de las lentes y por lo tanto distinto índice de refracción. La distancia focal depende del índice de refracción. Cada color experimenta una desviación distinta y tiene un foco diferente. Esto hace que la imagen no se forme en un único punto y aparece una distorsión. Este efecto se corrige combinando adecuadamente una lente convergente con otra divergente de distinto índice de refracción.

La distorsión se debe a que el aumento lateral del sistema óptico depende de la distancia del objeto al eje óptico, resultando que la imagen de un objeto, que tiene largo y alto, se ve con sus dimensiones amplificadas de distinta manera. No se mantiene la semejanza entre el objeto y la imagen.

Publicaciones

En este capítulo se presentaron los conceptos básicos de la Óptica Física los cuales serán utilizados en capítulos posteriores para establecer la caracterización de l ojo humano; ya que éste puede se estudiado como un sistema de una lente delgada .