

TEMA 4:

ÓPTICA

1. CONTROVERSIA SOBRE LA NATURALEZA DE LA LUZ: Modelos Corpuscular y Ondulatorio.	2
2. ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.	4
3. ESTUDIO DE LOS FENÓMENOS ONDULATORIOS DE LA LUZ.....	8
4. ÓPTICA GEOMÉTRICA: Espejos y Lentes	
Estudio cualitativo.....	12
Estudio cuantitativo.....	23

1. CONTROVERSIA SOBRE LA NATURALEZA DE LA LUZ: Modelos Corpuscular y Ondulatorio.

En la Antigüedad y en la Edad Media ya se habían realizado interpretaciones sobre el comportamiento de la luz, pero fue en el siglo XVII cuando se producen importantes aportaciones al desarrollo de la óptica. Veamos algunas especialmente significativas:

- Snell y Descartes descubren la ley de la refracción.
- Galileo usa el telescopio para la observación de la Luna e intenta medir, sin éxito, la velocidad de la luz.
- El astrónomo Röemer (1675) consigue calcular la velocidad de la luz, basándose en medidas sobre los eclipses de un satélite de Júpiter, obteniendo el valor

$$c = 327\,000 \text{ km/s.}$$

-Hooke (1675) afirma: El movimiento de la luz, cuando es producido en un medio homogéneo, se propaga por impulsiones u olas simples y de forma constante, perpendiculares a la línea de propagación”.

1.1.- Modelo corpuscular de Newton.

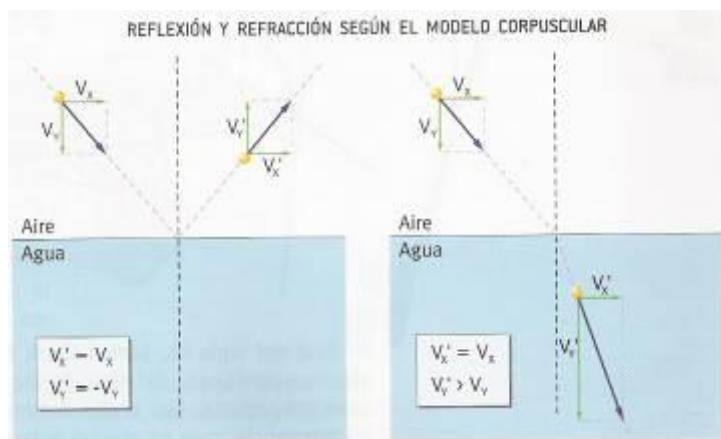
Isaac Newton dedicó especial atención al estudio de los fenómenos ópticos, descubriendo la dispersión de la luz por un prisma y observando por primera vez las interferencias (anillos de Newton).

Se apoyó en un modelo corpuscular (la luz estaría constituida por partículas) en el que consideraba que las partículas luminosas y la materia se atraían entre sí.

La difracción se explicaría aceptando que la atracción es mayor en los bordes de los cuerpos materiales.

Para explicar la reflexión se interpretaba el cambio de dirección en el choque de las partículas luminosas con la superficie reflectora, manteniéndose la velocidad de la luz por tratarse de un choque sin pérdida de energía.

La refracción se interpretaría suponiendo que el cambio de medio provocaría una fuerza sobre las partículas luminosas que, en el caso del cambio de propagación de la luz del aire al agua, acercaría dichas partículas a la normal. Pero esto conduce a un resultado erróneo, “la velocidad de la luz debería ser mayor en el agua que en el aire”.



1.2.- Modelo ondulatorio de Huygens.

Christian Huygens defendió un modelo diferente para la luz: consideraba que la luz era una vibración de la materia que hay entre el cuerpo luminoso y nuestros ojos. Definió las ondas luminosas, de forma similar a las ondas sonoras, como ondas longitudinales que se propagarían en la materia. Como ya era conocido que la luz se propagaba en el vacío, llegó a proponerse que el vacío estaría constituido por un medio material muy sutil y de gran elasticidad, el éter.

La teoría ondulatoria se sostenía en la observación de que dos haces de luz pueden cruzarse sin desviarse, lo cual no sería coherente con el modelo corpuscular. El principal error de Huygens fue atribuir carácter longitudinal a las ondas luminosas. Fue Hooke el primero en proponer que las ondas luminosas son transversales.

A finales del siglo XVII se contaba con dos modelos opuestos para interpretar la luz y ninguno predominaba claramente, si bien, el prestigio de Newton hizo que su modelo prevaleciera por algún tiempo.

Durante el siglo XIX se reafirmó la teoría ondulatoria con algunas aportaciones de interés en este sentido:

- Young (1802) demostró que, si un haz de luz atraviesa dos rendijas paralelas y muy próximas, se producen interferencias que pueden observarse sobre una pantalla.

Interpretó el fenómeno apoyándose en un modelo ondulatorio. Al explicar la polarización recientemente descubierta, concretó el carácter transversal de las ondas luminosas.

- A. Fresnel (1821) elaboró una teoría ondulatoria completa para la luz, demostrando que sólo son posibles las ondas transversales. Logró interpretar el fenómeno de la polarización, además de la difracción y las interferencias.

La obra de Fresnel permaneció en pie durante una buena parte del siglo XIX y fue completada y matizada por Maxwell con la predicción de las ondas electromagnéticas.

- Fizeau (1849) logró medir la velocidad de la luz y obtuvo un valor bastante cercano al real: $c = 313\,000$ km/s.

1.3.- Dualidad onda-corpúsculo

En el siglo XX, con el descubrimiento del efecto fotoeléctrico, se abrió la puerta a la interpretación más actual sobre la naturaleza de la luz: “la luz es de naturaleza dual, corpuscular y ondulatoria”.

1.4.- Resumen histórico sobre la naturaleza de la luz

En el siglo XVII se forman dos concepciones opuestas sobre la naturaleza de la luz, la teoría corpuscular, defendida por Newton y que supone que la luz está constituida por corpúsculos o partículas, y la teoría ondulatoria, enunciada por Huygens y más tarde desarrollada por Maxwell y que supone que la luz es un fenómeno ondulatorio de naturaleza electromagnética.

La teoría corpuscular gozó de mayor aceptación debido al peso específico de la persona que lo avalaba, Newton.

Posteriormente los estudios de Young y Fresnel sobre la interferencia y difracción de la luz, utilizando la teoría ondulatoria de Huygens, supusieron un duro revés para la teoría corpuscular.

El golpe definitivo se lo dio Foucault, al determinar experimentalmente que la velocidad de la luz en medios más densos que el aire (como el agua) era menor, en contra de lo que se deducía de la teoría de Newton.

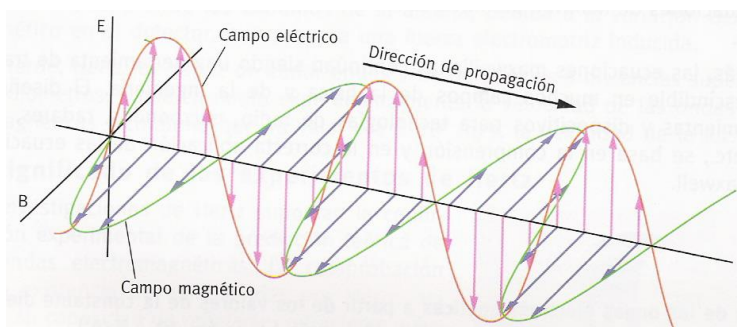
Cuando todo parecía aclarado, surge un fenómeno curioso relacionado con la luz, el efecto fotoeléctrico, por el que la luz que incide sobre una placa metálica arranca electrones y les comunica energía cinética. Einstein explicó este fenómeno basándose en la hipótesis de Planck, resucitando una nueva forma de teoría corpuscular en la que se hablaba de “cuantos” o paquetes de energía que posteriormente recibirían el nombre de fotones.

Llegamos de este modo a la actualidad en la que se adopta una postura sintética: La naturaleza de la luz es dual, la ondulatoria se pone de manifiesto con fenómenos como la interferencia y la difracción, y la corpuscular se evidencia al interactuar con la materia.

2. ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.

Como ya hemos estudiado, un campo eléctrico y otro magnético variables en el tiempo se inducen mutuamente, de modo que se presentan unidos inseparablemente formando un campo electromagnético. Si los campos eléctrico y magnético considerados son perpendiculares entre sí, dan lugar a una onda electromagnética que se propaga en dirección perpendicular a la de los dos campos indicados, con una velocidad de $3 \cdot 10^8$ m/s, en el vacío.

Las ondas electromagnéticas son transversales y fueron previstas por Maxwell con velocidad de propagación, c , que depende de la constante dieléctrica y de la permeabilidad magnética del medio en el que se propagan.



Si el medio de propagación es el vacío, medio no dispersivo, la velocidad de propagación no depende de la frecuencia, mientras que si el medio de propagación es un medio material (dispersivo), la velocidad de propagación sí depende de ésta.

En el vacío:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$$

En un medio material:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}} = \lambda \cdot f$$

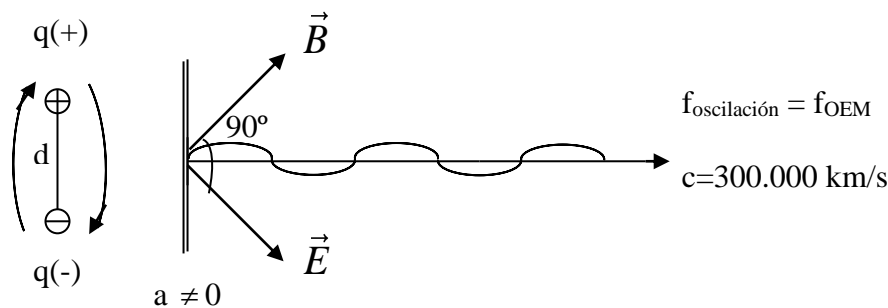
2.1.- Producción de ondas electromagnéticas: experiencias de Hertz.

La teoría de Maxwell fue confirmada experimentalmente por las experiencias en las que Hertz generó y demostró la propagación de ondas electromagnéticas.

Los dispositivos que generan ondas electromagnéticas (O.E.M.) son:

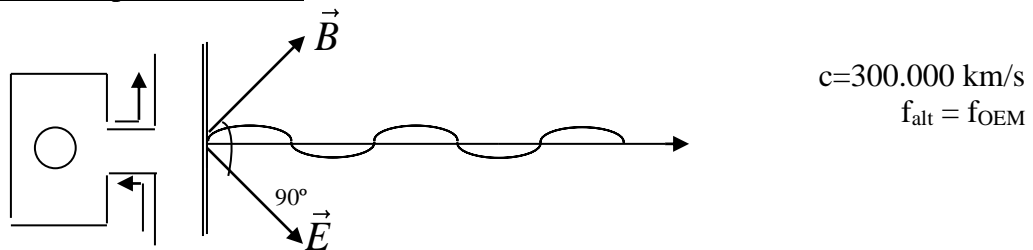
- 1) Dipolo oscilante
- 2) Circuito oscilante abierto
 - a) Antena dipolar eléctrica (\vec{E})
 - b) Antena dipolar magnética (\vec{B})

1) Dipolo oscilante como generador de ondas electromagnéticas (primera experiencia de Hertz)



2) Circuito oscilante como generador de ondas electromagnéticas.

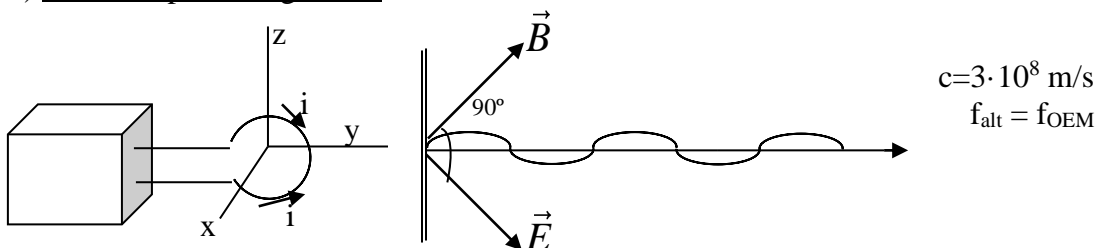
a) Antena dipolar eléctrica:



Fuente de corriente alterna

La antena dipolar eléctrica tiene un dispositivo de corriente alterna, el cual acelera las cargas en el interior de la antena, siendo estas cargas de distinto signo. La fuente de corriente alterna sitúa alternativamente cargas de distinto signo en las dos partes de la antena, con lo que se emite una onda electromagnética cuya frecuencia coincide con la frecuencia de la fuente de corriente alterna.

b) Antena dipolar magnética:



Fuente de corriente alterna

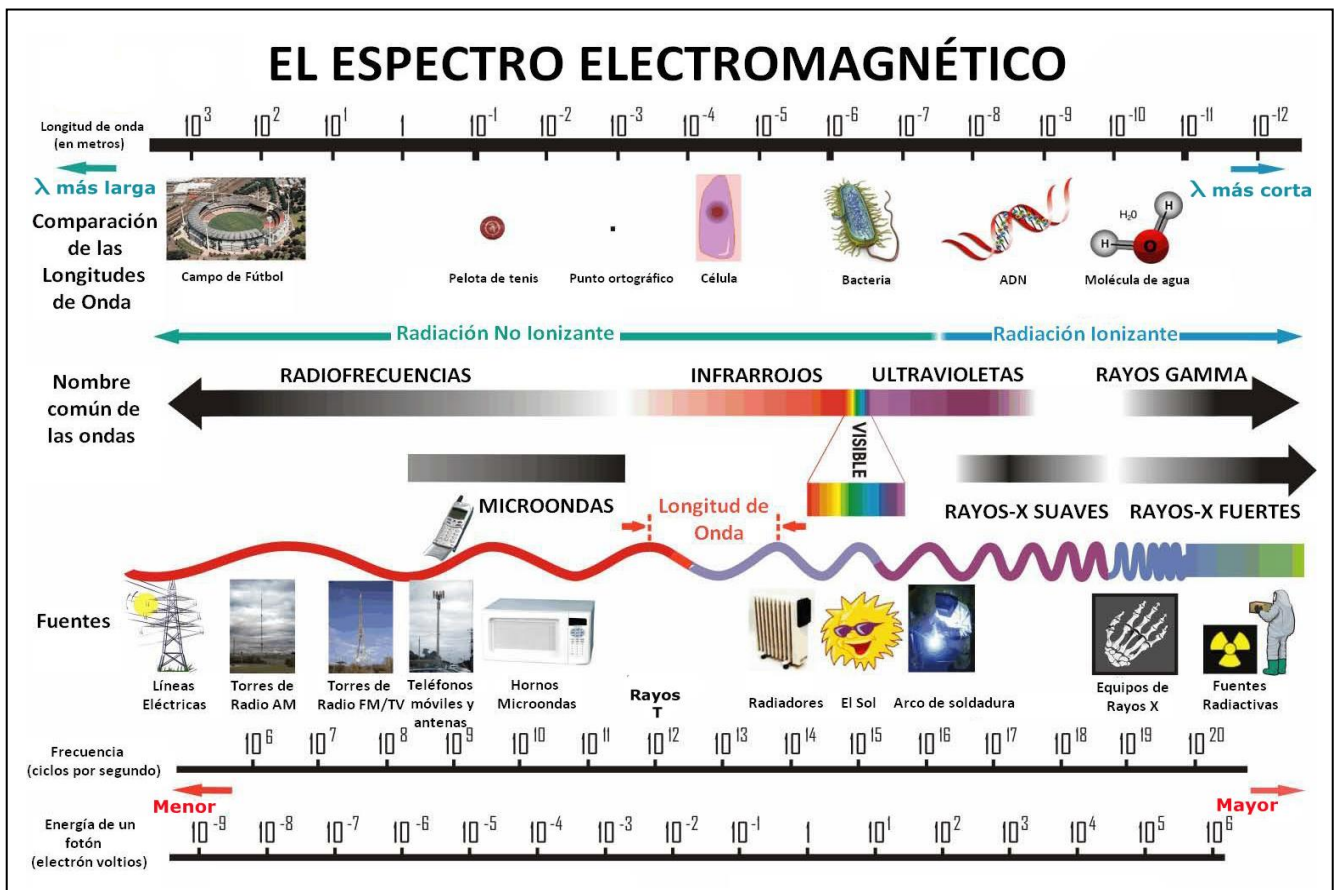
Consiste en una fuente de corriente alterna, la cual alimenta un circuito de corriente en forma de espira (lo que produce un campo magnético), primero en un sentido y luego en el sentido contrario. Esto hace que se genere una onda electromagnética de la misma frecuencia que la frecuencia de la corriente alterna.

2.2.- Espectro de las ondas electromagnéticas.

El conjunto de todas las ondas electromagnéticas que es posible producir o detectar se denomina espectro electromagnético. Suele representarse atendiendo a la frecuencia o a la longitud de onda. De acuerdo con los efectos producidos y los procedimientos de producción y detección, se reconocen diferentes regiones en el espectro de las ondas electromagnéticas.

Las ondas electromagnéticas poseen una enorme variedad de aplicaciones científicas y tecnológicas. Entre ellas destaca la transmisión de señales (radiocomunicación), en la cual juega un importante papel la atmósfera terrestre, que por efectos de reflexión selectiva en sus capas ionizadas de ondas de baja frecuencia (ondas de radio), permite la comunicación a largas distancias. Por el contrario, ondas de mayor frecuencia (VHF y UHF), no se reflejan en dichas capas atmosféricas y requieren de repetidores para poder llegar a distancias grandes.

Otro aspecto interesante es la absorción selectiva de determinadas bandas o intervalos de frecuencias del espectro por parte de la atmósfera (la capa de ozono impide el paso de radiaciones ultravioleta solares), o de algunos otros medios materiales (como los cristales de las gafas de sol).



Rangos de frecuencia y de longitudes de onda en el espectro electromagnético

Rayos γ : Frecuencias del orden de $3 \cdot 10^{20}$ Hz. Longitudes de onda del orden de 10^{-12} m

Rayos X: Frecuencias del orden de $3 \cdot 10^{18}$ Hz. Longitudes de onda del orden de 10^{-10} m

UV: Frecuencias del orden de $3 \cdot 10^{15}$ Hz. Longitudes de onda del orden de 10^{-8} m

Visible: Frecuencias del orden de $3 \cdot 10^{14}$ Hz. Longitudes de onda del orden de 10^{-7} m

IR: Frecuencias del orden de $3 \cdot 10^{13}$ Hz. Longitudes de onda del orden de 10^{-5} m

Rayos T: Frecuencias del orden de los terahercios (10^{12} Hz), el nombre de los rayos lo toma de la T de terahercios. Longitudes de onda del orden de 10^{-4} m

Microondas: Frecuencias del orden de $3 \cdot 10^{10}$ Hz. Longitudes de onda del orden de 10^{-2} m

2.3.- Propagación de las ondas electromagnéticas.

La velocidad de la luz es la misma en el vacío para todas las policromías de que está constituida. Toda onda electromagnética viaja en el vacío a la misma velocidad (300.000 km/s). En otro medio distinto del vacío, la velocidad de la onda electromagnética depende de las características del medio material, siendo su velocidad menor que en el vacío (en el vacío es máxima). Como ya hemos visto, la velocidad de una onda electromagnética cuando atraviesa un medio material depende de la frecuencia de esta onda y de la longitud de onda, cosa que no sucede en el vacío.

* vacío : $c=300.000 \text{ km/s}$ (no depende de f ni de λ)

* otro medio: $v_{OEM} = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$ (v_{OEM} depende de f y de λ)

Índice de refracción absoluto.

Se define el índice de refracción absoluto de un medio como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en ese medio.

$$n = \frac{c}{v_{luz}}$$

Ej: $c= 300.000 \text{ km/s}$

$$v_{H_2O} = 225.000 \text{ km/s}$$

$$n = \frac{c}{v} = \frac{300000 \text{ km/s}}{225000 \text{ km/s}} = 1,3 \text{ (adimensional)}$$

$$n_{\text{vacío o aire}} = 1$$

En los demás medios materiales n es mayor que 1.

Índice de refracción relativo.

Se define el índice de refracción relativo como el cociente entre dos índices de refracción absolutos.

Medio 1	$n_1 = \frac{c}{v_1}$	}	<i>índice de refracción relativo del 2º medio respecto del 1º</i>
Medio 2	$n_2 = \frac{c}{v_2}$		

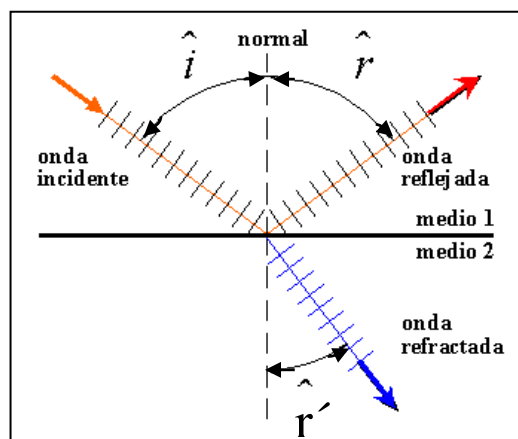
$$n_{2/1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\frac{c}{v_2}}{\frac{c}{v_1}} = \frac{v_1}{v_2}$$

3. ESTUDIO DE LOS FENÓMENOS ONDULATORIOS DE LA LUZ: Reflexión, Refracción, Interferencias, Difracción y Dispersión.

3.1.- Reflexión y refracción de la luz.

La reflexión y la refracción de la luz son fenómenos que se manifiestan simultáneamente. La reflexión corresponde a la desviación del rayo de luz que llega a la superficie de separación entre dos medios diferentes, de modo que el rayo reflejado se propaga en el mismo medio que el rayo incidente. En la refracción el rayo refractado pasa a propagarse en el segundo medio, lo hace en una dirección diferente a la del rayo incidente.

La cantidad de luz reflejada o refractada depende de las características de los dos medios implicados en los fenómenos de reflexión y de refracción.



Leyes de la reflexión

- 1) La onda incidente, la normal y la onda reflejada están en el mismo plano.
- 2) El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. $\hat{i} = \hat{r}$

Estas leyes las cumple solamente la llamada reflexión nítida o regular; la reflexión difusa o irregular no cumple estas leyes.

Leyes de la refracción

- 1) La onda incidente, la normal y la onda refractada están en el mismo plano.
- 2) El seno del ángulo de incidencia dividido por el seno del ángulo de refracción es una constante y es igual al cociente entre la velocidad en el primer medio y la velocidad en el 2º medio.

$$\frac{\text{sen } \hat{i}}{\text{sen } \hat{r}} = \frac{n_2}{n_1} ; n_1 \cdot \text{sen } \hat{i} = n_2 \cdot \text{sen } \hat{r} \quad (\text{donde } n_1 \text{ y } n_2 \text{ son los índices de refracción de los medios 1 y 2}).$$

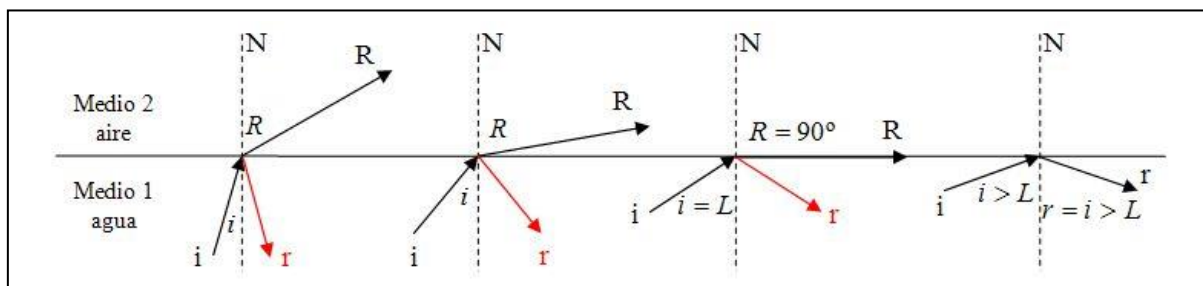
Cuando la onda pasa de un medio a otro tan pronto como llega un frente de onda incidente, surge uno refractado. Por tanto, en la refracción de una onda **la frecuencia no cambia**. La velocidad y la longitud de onda sí se modifican en la refracción.

3.2.- Ángulo límite

Es una consecuencia de la ley de Snell para la refracción. Ocurre al pasar de un medio de mayor índice de refracción a otro de menor índice, por ejemplo, del agua al aire o del interior de un trozo de vidrio al aire.

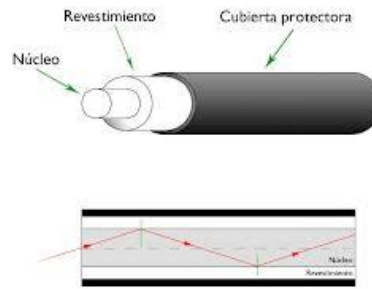
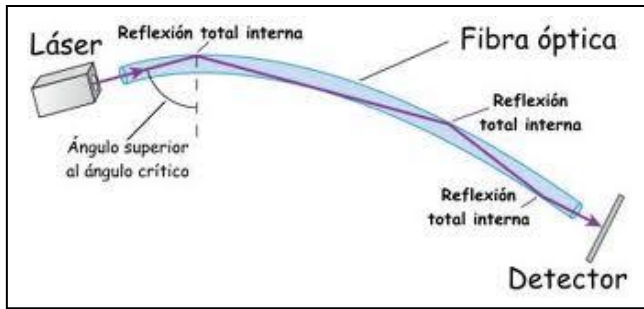
Al ir aumentando el ángulo de incidencia (\hat{i}), irá aumentando también el ángulo de refracción (\hat{r}), de tal forma que llegará un momento en que este ángulo llegue a ser de 90°. En dicho momento no se producirá refracción, sino que el rayo incidente seguirá por la superficie de separación de ambos medios. A partir de este ángulo (**ángulo límite**) ya no habrá refracción, sino que todo será reflexión (**reflexión total**). El cálculo del ángulo límite es como sigue:

$$\frac{\text{sen } \hat{i}}{1} = \frac{n_2}{n_1} ; \quad \hat{i} = \text{arcsen} \frac{n_2}{n_1}, \text{ es decir, aquel ángulo cuyo seno valga } n_2 / n_1.$$



Si n del primer medio es menor que n del segundo medio (del aire al agua, por ejemplo), entonces el cociente n_2 / n_1 siempre será mayor que 1, y no existe ningún ángulo de incidencia cuyo seno sea mayor que 1. Esto quiere decir que el fenómeno de la reflexión total no es posible.

Este fenómeno tiene múltiples aplicaciones, una de las más importantes es la transmisión de ondas electromagnéticas por el interior de la fibra óptica.

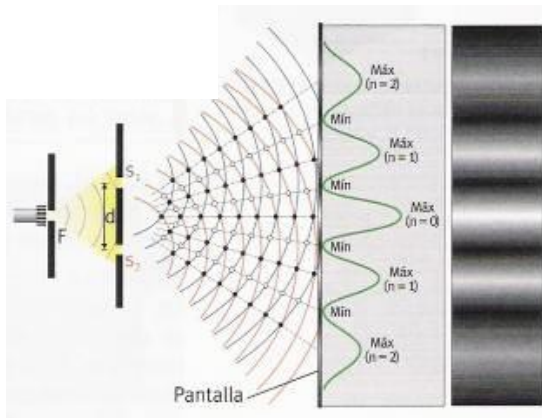


3.3 -Interferencias y difracción de la luz.

La interferencia y la difracción de la luz fueron dos fenómenos decisivos para probar la naturaleza ondulatoria de la luz.

Interferencia

Corresponde a la coincidencia de dos o más movimientos ondulatorios en un mismo punto. En 1802, Young demostró que, si un haz de luz atraviesa dos rendijas muy pequeñas, equidistantes del foco, se producen interferencias que pueden observarse sobre una pantalla.



Según el principio de Huygens, cada una de las dos rendijas se comporta como nuevos focos emisores de ondas en fase. En la pantalla alcanzada por los rayos de luz tras recorrer distintos caminos, se observaban franjas paralelas, claras y oscuras. Por primera vez se comprobó experimentalmente la posibilidad de obtener oscuridad por superposición de rayos luminosos.

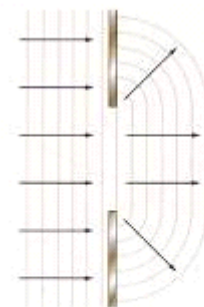
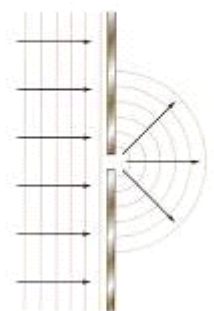
Las franjas iluminadas corresponden a ondas luminosas que llegan a la pantalla en fase, mientras que las franjas oscuras corresponden a ondas luminosas que llegan a la pantalla en oposición de fase.

Difracción

Corresponde al cambio de dirección de propagación que sufre una onda cuando encuentra un obstáculo u orificio en su camino. Para que suceda la difracción es necesario que el tamaño del objeto sea igual o menor que la longitud de onda.

El principio de Huygens permite explicar este fenómeno: los puntos del frente de onda se convierten en focos emisores de nuevas ondas elementales en fase al llegar al obstáculo u orificio. Las longitudes de onda de la luz visible son del orden de 10^{-7} m, por lo que para que tenga

DIFRACCIÓN EN RENDIJAS DE DISTINTO TAMAÑO



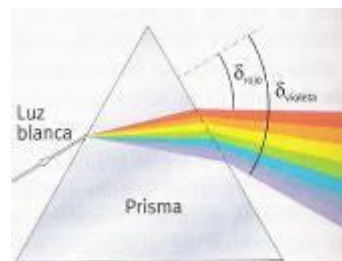
La forma del nuevo frente de ondas depende de la relación entre el tamaño del obstáculo y la longitud de onda.

lugar una difracción de la luz, son necesarios objetos u orificios muy pequeños.

En el experimento de Young para producir interferencias con luz visible, sucede en cada rendija una difracción previa a la interferencia observada posteriormente en la pantalla.

3.4.- Dispersión de la luz.

En el siglo XVII Newton había observado que, cuando se hace pasar un rayo de luz solar a través de un prisma triangular de vidrio, se descomponía en un conjunto de colores al que denominó espectro. La luz solar (luz blanca) es una composición de ondas de distinta frecuencia.



La luz blanca es policromática y, si cada uno de los colores obtenidos en su descomposición se hace pasar por un nuevo prisma, no se obtienen nuevas descomposiciones. La luz de cada color es monocromática.

La dispersión de la luz blanca para originar el espectro se debe a la separación de los colores de un rayo policromático como consecuencia del diferente índice de refracción que para cada color (frecuencia) tiene el prisma.

La variación del índice de refracción para cada onda con diferente frecuencia implica que a frecuencias (colores) diferentes corresponderán velocidades de propagación distintas, y, por consiguiente, longitudes de onda diferentes: “cuando una onda de determinada frecuencia penetra en un medio transparente, cambia su longitud de onda sin que lo haga su frecuencia”.

Fenómenos relacionados con la dispersión de la luz

El arco iris: Se produce cuando llueve o justo después de la lluvia, cuando hay un gran número de gotitas de agua dispersas en la atmósfera, que actúan como pequeños prismas descomponiendo la luz que les llega del sol en los diferentes colores que apreciamos.

El color del cielo: Normalmente es azul, ya que es la luz azul la que más dispersión sufre al entrar en la atmósfera, y lo que nosotros vemos es la luz que se refleja en los puntos de la atmósfera. Si la luz no sufriera dispersión, no veríamos ningún color en el cielo, sólo negro, como en el espacio exterior donde no hay atmósfera.

En el atardecer y en el amanecer, cuando el sol está más bajo y la luz tiene que atravesar más atmósfera para llegar hasta nosotros, vemos el cielo anaranjado. Esto es debido a que es tanta la dispersión que la sufren todos los colores menos el rojo, que es el que vemos.

4. ÓPTICA GEOMÉTRICA: Espejos y Lentes

La **óptica geométrica** estudia la trayectoria de la luz sin tener en cuenta las propiedades ondulatorias ni corpusculares y supone que los rayos de luz pueden sufrir refracciones y reflexiones, pero no considera las difracciones de los mismos.

Un **sistema óptico** es un conjunto de medios materiales por los que se propagan los rayos de luz. Si los rayos de luz parten de un punto y se juntan en otro, diremos que el sistema óptico es **estigmático**.

Las imágenes formadas por un sistema estigmático pueden clasificarse...

Según su naturaleza:

- **Reales:** obtenidas al juntarse los rayos procedentes de un objeto en un punto. Deben proyectarse en un plano para ser visibles.
- **Virtuales:** los rayos procedentes de un objeto divergen y su prolongación es la que se junta en un punto. No pueden proyectarse en un plano.

Según su posición:

- **Derechas:** están en la misma posición que el objeto.
- **Invertidas:** están en posición contraria a la del objeto.

Según su tamaño:

- **Mayores:** son más grandes que el objeto.
- **Menores:** son más pequeñas que el objeto.

En óptica geométrica las magnitudes de la imagen tienen la misma denominación que las del objeto, pero se les añade el signo “prima”. Siempre se considera que la luz se propaga de izquierda a derecha.

4.1.- Imágenes con espejos.

Los espejos reflejan parte de los rayos luminosos procedentes de los objetos que están situados delante de ellos. El observador percibe la imagen del objeto como si estuviese en un sitio distinto del que ocupa en realidad.

Construcción geométrica de imágenes con espejos planos

Según las leyes de la reflexión, el rayo incidente y el reflejado forman ángulos iguales con la normal y las líneas que los representan están en un mismo plano.

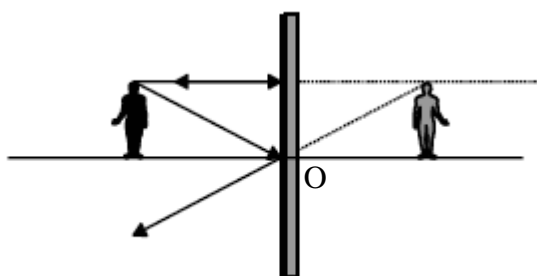


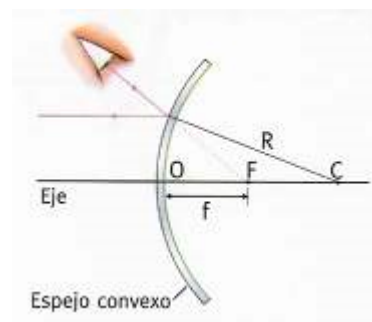
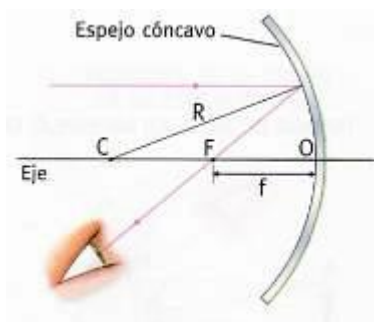
Imagen **virtual** (formada por la intersección de las prolongaciones de los rayos), **derecha** y de **igual** tamaño a la original.

Construcción geométrica de imágenes con espejos esféricos

Los espejos esféricos son aquellos cuya superficie está constituida por un casquete esférico. Si la superficie reflectora es la interior se denominan espejos cóncavos y si la superficie reflectora es la exterior se denominan espejos convexos.

En los espejos esféricos se distinguen los siguientes elementos:

- Centro de curvatura (C): centro de la superficie esférica que constituye el espejo.
- Radio de curvatura: Distancia entre el centro de curvatura y la superficie del espejo.
- Centro del espejo (O): origen del sistema de coordenadas.
- Eje óptico: recta que pasa por C y por O.
- Foco (F): en espejos cóncavos, los rayos de luz paralelos al eje óptico se reflejan y cortan a dicho eje en el foco. En espejos convexos los rayos de luz paralelos al eje óptico se reflejan y sus prolongaciones cortan a dicho eje en el foco.
- Distancia focal (f): distancia entre O y F. Corresponde a la mitad del radio de curvatura.



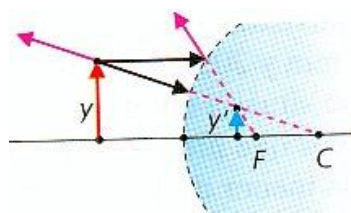
La imagen de objetos situados sobre el eje óptico estará situada sobre dicho eje.

De los infinitos rayos que parten de un punto del objeto nos fijaremos sólo en los siguientes:

- Rayo paralelo al eje óptico: el rayo reflejado (o su prolongación) pasa por F.
- Rayo que pasa por F, se refleja paralelo al eje óptico.
- Rayo perpendicular a la superficie del espejo: se refleja y su prolongación pasa por C.

Espejos convexos:

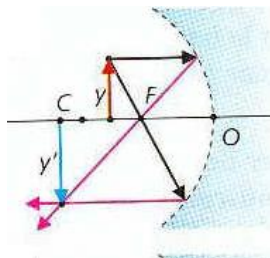
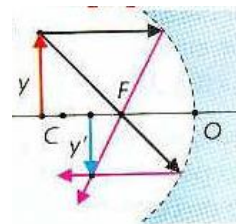
La imagen de los espejos convexos es **virtual**, **derecha** y de **menor** tamaño que el objeto.



Espejos cóncavos:

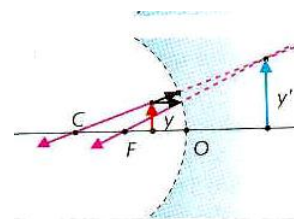
Con este tipo de espejos hay varias posibilidades:

a) Si el objeto está entre el infinito y el centro de curvatura, la imagen es **real, invertida** y **menor** que el objeto.



b) Si el objeto está entre el centro de curvatura y el foco, la imagen es **real, invertida** y **mayor** que el objeto.

c) Si el objeto está entre el foco y el espejo, la imagen es **virtual, derecha** y **mayor** que el objeto.



4.2.- Imágenes con lentes.

Una lente es un material transparente limitado por dos superficies esféricas o por una esférica y una plana. Cuando la luz atraviesa una lente sufre desviaciones (refracciones) y produce imágenes que dependen del tipo de lente utilizada.

Si el espesor de la lente en el eje óptico es despreciable frente a los radios de curvatura de sus caras, la lente se denomina lente delgada. En las lentes delgadas podremos considerar dos focos (F y F').

Las lentes delgadas se clasifican en lentes convergentes y lentes divergentes.

Lentes convergentes

Lentes divergentes



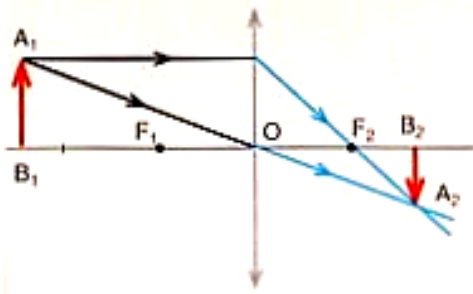
El comportamiento de las lentes delgadas depende de que sean convergentes o divergentes y de la situación del objeto respecto a ellas. Para construir imágenes podemos proceder de forma análoga a lo que hacíamos en los espejos. De los infinitos rayos que pasan por un punto A del objeto, tomaremos los siguientes:

- Rayo que incide paralelo al eje y pasa por el foco F'. Si la lente es divergente, por F' pasará la prolongación de dicho rayo.
- Rayo que pasa por el foco F y que sale paralelo al eje.
- Rayo que pasa por el centro de la lente y que no sufre desviación.

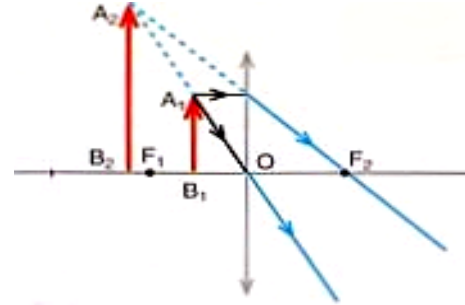
La convergencia de dos de estos rayos nos da la imagen A' del punto A.

Construcción geométrica de imágenes con lentes convergentes

Las características de la imagen obtenida dependen de la distancia del objeto a la lente. Pueden darse los casos siguientes:



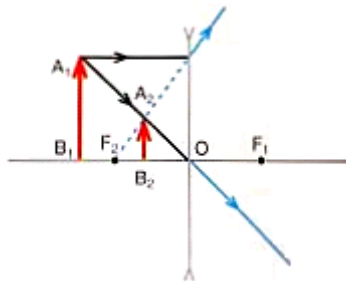
Objeto lejano: la imagen es **real** e **invertida**. Su tamaño **depende** de la distancia al objeto.



Objeto entre el foco y la lente: la imagen es **virtual**, **derecha** y de **mayor** tamaño. La lente actúa como lupa.

Construcción geométrica de imágenes con lentes divergentes

Con estas lentes se obtiene siempre el mismo tipo de imágenes, independientemente de la posición del objeto. El rayo paralelo al eje, al llegar a la lente, se desvía y su prolongación pasa por F_2 . El rayo que pasa por O no se desvía. Ambos se cortan en A_2 . La imagen es **virtual**, **derecha** y de **menor** tamaño que el objeto.



Potencia de una lente

La potencia de una lente es la capacidad de la lente para hacer converger o divergir un haz de luz incidente. Se calcula como la inversa de la distancia focal medida en metros y se expresa en dioptrías. Se asignan valores positivos para la potencia de lentes convergentes y valores negativos para la potencia de lentes divergentes. (1 dioptría = 1 metro^{-1})

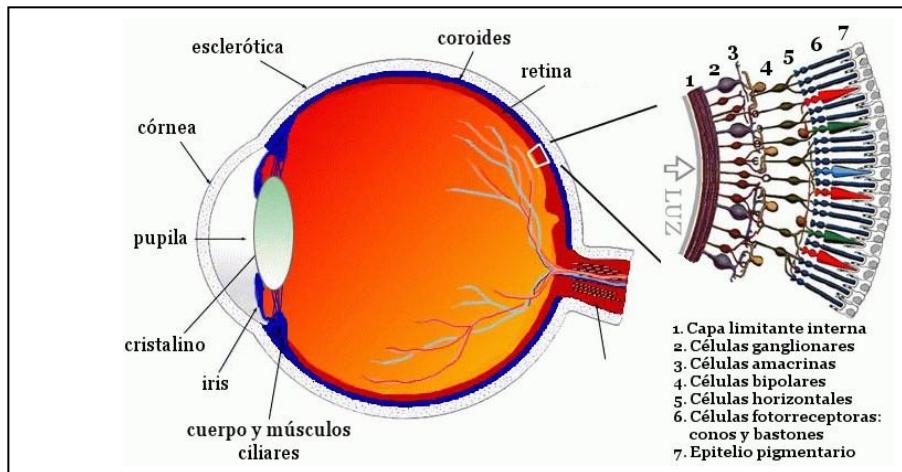
Instrumentos ópticos

Se basan en lentes, espejos, o combinaciones de éstos. Están la lupa, lente convergente en la que el objeto se sitúa entre el foco y la lente (lo acabamos de ver), la cámara fotográfica, que es fundamentalmente una cámara oscura con una lente convergente móvil (objetivo) que se mueve hasta que la imagen se forme en la película, o el microscopio, combinación de lentes convergentes denominadas objetivo y ocular (la separación entre ellas es tal que la imagen formada por la primera se sitúa entre la

segunda y su foco, de tal forma que el aumento total es el cociente entre el tamaño de la imagen final y el del objeto).

4.3.- Óptica de la visión.

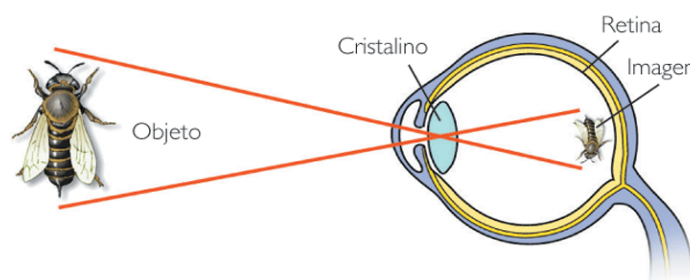
El ojo humano es el órgano encargado de la visión. Tiene una forma aproximadamente esférica, con un diámetro de 2,5 cm en los adultos. Su interior está formado por una serie de medios transparentes a la luz donde pueden aplicarse las leyes de la óptica geométrica.



El humor acuoso, limitado por la córnea, es el primer medio que atraviesa la luz. Es una disolución salina y posee un índice de refracción de $n = 1,34$. Tras él se encuentra el cristalino, que tiene forma de lente biconvexa y un índice de refracción aproximado de $n = 1,44$. Por último se encuentra el humor vítreo, que es el líquido que rellena el globo ocular y cuyo índice de refracción es aproximadamente igual que el del humor acuoso.

El globo ocular está limitado por tres capas concéntricas:

- La **esclerótica**. Es la membrana más externa, muy dura, para proteger al ojo; de color blanco y opaca al paso de la luz por todas sus partes menos por un abombamiento en la parte anterior del ojo, que constituye la córnea.
- La **coroides** es la segunda capa, de aspecto oscuro; su importancia reside en que en ella se encuentra el iris, lo que se conoce como «color de los ojos», que controla el paso de la luz al interior mediante la apertura o cierre de la pupila.
- La **retina** es la capa más interna. Está formada por células nerviosas sensibles a la luz, los conos y los bastones, que son las encargadas de recibir las imágenes y transmitirlas por el nervio óptico al cerebro. los conos son los que permiten la visión en color. Pueden ser de tres tipos, cada uno de los cuales es sensible a uno de los colores primarios, rojo, azul o verde. Estas células necesitan mucha luz para poder enviar información sobre el color que les llega; por eso, en ambientes oscuros solo se aprecia una escala de grises.



Acomodación del ojo

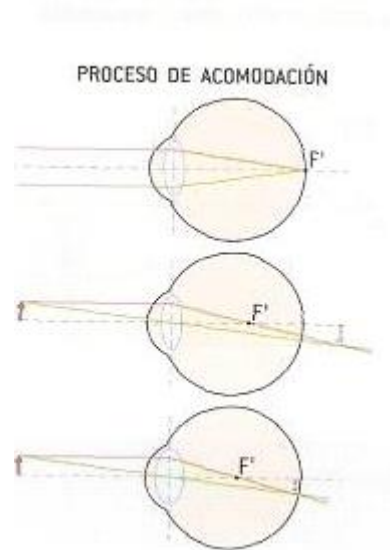
La visión a distintas distancias es posible gracias al **crystalino**, que es una lente deformable. Cuando el objeto que se pretende ver se encuentra en el infinito, el cristalino se encuentra en reposo.

Al ir acercándose el objeto, los **músculos ciliares** comprimen el cristalino aumentando su curvatura y reduciendo su distancia focal, lo que permite que se formen siempre las imágenes a la misma distancia, en la retina.

Este proceso, completamente involuntario, se denomina acomodación y está limitado por la elasticidad del cristalino:

El **punto próximo** es el punto más cercano al ojo en el que puede colocarse un objeto y ser visto con nitidez. La distancia de este punto al ojo es de unos 25 cm y se denomina **distancia mínima de visión distinta**.

El **punto remoto** es el punto más alejado donde puede observarse con nitidez un objeto. Su distancia al ojo es la **distancia máxima de visión distinta**.



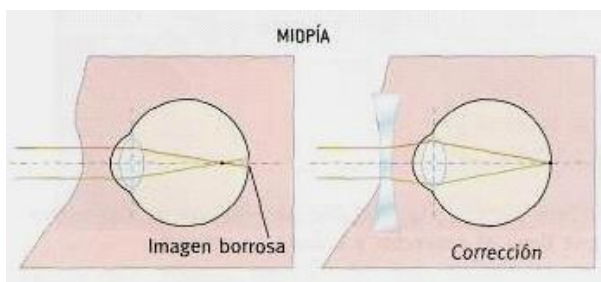
Defectos de la visión

Para una visión correcta, es preciso que la imagen se forme siempre en la retina; cuando no sucede esto, se produce un fallo en la acomodación que puede deberse a diversas causas:

- **Presbicia**, o vista cansada. Es un defecto que aparece con la edad. Una persona con vista cansada sufre una reducción en su proceso de acomodación porque sus músculos ciliares se fatigan o porque su cristalino pierde elasticidad. Estos síntomas no afectan a la visión lejana, pues en ella el cristalino no está comprimido debido a que los músculos ciliares están en reposo, sino al punto próximo, que puede alejarse hasta el doble de su distancia normal. El indicador de la presbicia es el gesto de algunas personas cuando, para leer un texto o mirar con precisión un objeto que se encuentra en su mano, alargan el brazo, hasta estirarlo totalmente en algunos casos, e inclinan la cabeza hacia atrás.

Para corregirla se usan lentes convergentes.

- **Miopía**. El ojo miope pierde acomodación porque su cristalino tiene un exceso de convergencia. Esto hace que los rayos que proceden de un mismo punto se junten entre el cristalino y la retina; como resultado, la imagen nítida se forma ahí y no en la propia retina, adonde ya llega borrosa transmitiéndose así al cerebro.



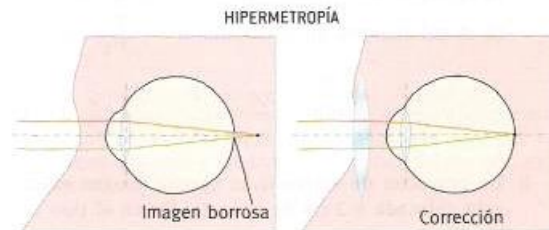
Los miopes son personas que, debido al exceso de convergencia de su cristalino, tienen el punto próximo más cercano que el resto de la gente; por eso ven bien de cerca y mal de lejos.

Para su corrección se utilizan **lentes divergentes** que logran alejar el foco del cristalino.

- **Hipermetropía.** la pérdida de acomodación de los ojos hipermétropes es debida al efecto contrario que en el caso de los miopes: a un defecto de convergencia. Por ello, los rayos que proceden de un mismo punto se juntan detrás de la retina, formándose también en ella la imagen sin nitidez.

El **cristalino** de una persona hipermetrope tiene menos curvatura que uno normal, lo que le permite ver con mayor precisión a grandes distancias: su punto lejano se aleja.

Para su corrección se emplean lentes convergentes que consiguen acercar el foco al cristalino.



Otro de los defectos visuales más comunes es el **astigmatismo**, aunque este no se debe a un defecto de acomodación sino a una irregularidad en la curvatura de la córnea. El síntoma del astigmatismo es la incapacidad de ver claramente dos rectas perpendiculares que se encuentran en un mismo plano, debido a que la córnea recibe imágenes parciales a diferente distancia. El efecto es el mismo que si se proyecta a la vez una diapositiva sobre dos planos que están a distinta distancia: cuando se enfoca en uno, se desenfoca en el otro, no pudiendo ver en los dos a la vez nítidamente.

El astigmatismo se corrige con lentes cilíndricas que consiguen situar el foco en el mismo punto para distintos planos objeto.

CUESTIONES Y PROBLEMAS

1.- Determina el ángulo límite para un observador que mira hacia la superficie del agua de un lago desde la orilla. Repite el cálculo para un buceador que mira hacia la superficie desde dentro del agua. $n_{\text{aire}} = 1$; $n_{\text{agua}} = 1,33$

2.- Calcula el valor de la longitud de onda de la luz roja en el agua sabiendo que el índice de refracción de ésta es 1,33. Determina también la velocidad de un haz monocromático rojo. Datos: En el vacío $c = 3 \cdot 10^8$ m/s; $\lambda_{\text{rojo}} = 6,98 \cdot 10^{-7}$ m

3.- ¿A qué se debe el fenómeno de dispersión de la luz? ¿Puede existir dispersión para un haz de luz monocromática?

4.- Un material presenta un índice de refracción $n_R = 1,12$ para el color rojo y $n_V = 1,42$ para el color violeta.

- Determina los correspondientes ángulos de refracción cuando la luz blanca incide con un ángulo de 45° .
- Calcula la velocidad de la luz de cada color en el material.

5.- Desde el aire se observa un objeto luminoso que está situado a 1 m debajo del agua.

(i) Si desde dicho objeto sale un rayo de luz que llega a la superficie formando un ángulo de 15° con la normal, ¿cuál es el ángulo de refracción en el aire?

(ii) calcule la profundidad aparente a la que se encuentra el objeto. $n_{\text{aire}} = 1$; $n_{\text{agua}} = 1,33$

6.- Un rayo de luz láser incide en un bloque de vidrio.

- Describe los fenómenos que suceden.
- Si el ángulo de incidencia es de 45° y el de refracción es de 30° , ¿cuál es el índice de refracción del vidrio?
- Determina el valor del ángulo límite.

7.-a) Un rayo de luz monocromática pasa de un medio de índice de refracción n_1 a otro medio con índice de refracción n_2 , siendo $n_1 < n_2$. Razone y justifique la veracidad o falsedad de las siguientes frases:

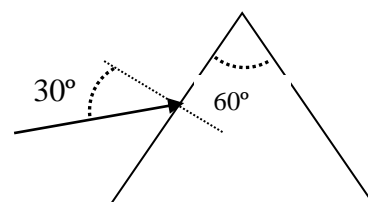
- La velocidad de dicho rayo aumenta al pasar del primer medio al segundo.
- La longitud de onda del rayo es mayor en el segundo medio.

b) Sea un recipiente que contiene agua que llega hasta una altura de 0,25 m, y sobre la que se ha colocado una capa de aceite. Procedente del aire, incide sobre la capa de aceite un rayo de luz que forma 50° con la normal a la superficie de separación aire-aceite.

i) Haga un esquema de la trayectoria que sigue el rayo en los diferentes medios (aire, aceite, agua), en el que se incluyan los valores de los ángulos que forman con la normal los rayos refractados en el aceite y en el agua.

ii) Calcule la velocidad de la luz en el agua. $c = 3 \cdot 10^8$ m s⁻¹ ; $n_{\text{aire}} = 1$; $n_{\text{aceite}} = 1,47$; $n_{\text{agua}} = 1,33$

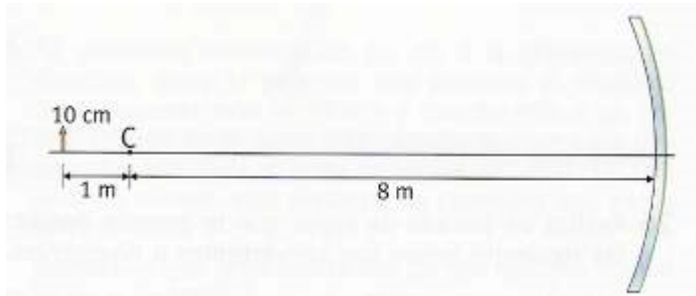
8.- Determina la desviación entre el rayo incidente y el emergente en un prisma cuyo ángulo es de 60° y cuyo índice de refracción es de 1,5. El rayo incide con un ángulo de 30° . (Se requiere un desarrollo gráfico utilizando semejanzas trigonométricas).



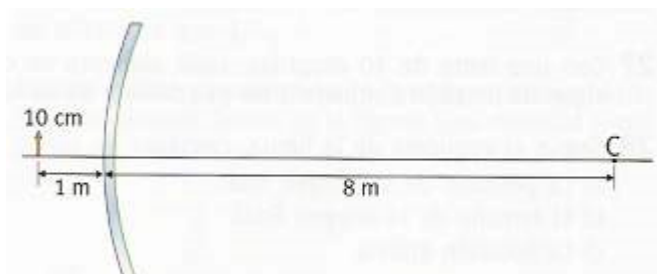
9.- Para el maquillaje se usan espejos en los que al mirarnos vemos nuestra cara mucho más grande. ¿Qué tipo de espejos son?

10.- Resuelve gráficamente la imagen para los siguientes casos(deberás dibujarlas a escala):

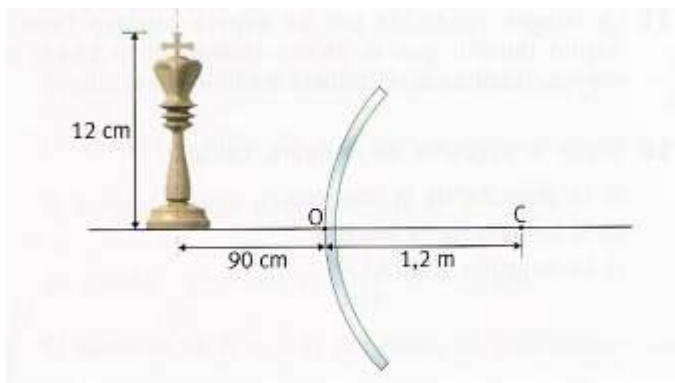
a)



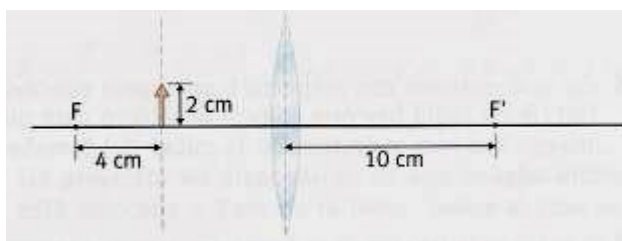
b)



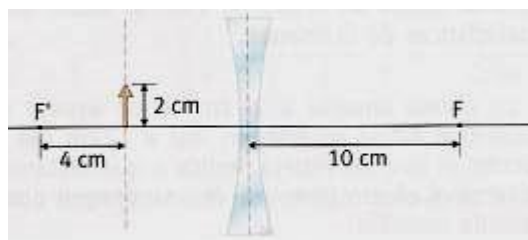
c)



d)



e)



EJERCICIOS DE SELECTIVIDAD EN ANDALUCÍA

2004

1. a) Construya gráficamente la imagen obtenida en un espejo cóncavo de un objeto situado entre el espejo y el foco. ¿Qué características tiene dicha imagen?
- b) Los espejos convexos se emplean, por sus características, en los retrovisores de los automóviles, en los espejos de los cruces en las calles, etc. Explique por qué.

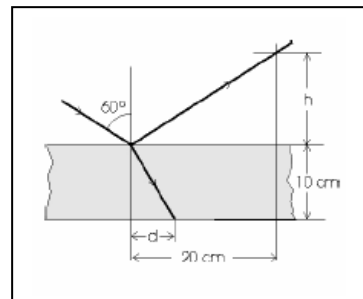
SOL: a) Imagen virtual, derecha y aumentada

2. Una lámina de vidrio, de índice de refracción 1,5 de caras paralelas y espesor 10 cm, está colocada en el aire. Sobre una de sus caras incide un rayo de luz, como se muestra en la figura. Calcule:

- a) La altura h y la distancia d marcadas en la figura.
- b) El tiempo que tarda la luz en atravesar la lámina.

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

SOL: a) $h=11,54 \text{ m}$; $d=7,07 \text{ cm}$ b) $t=6,12 \cdot 10^{-10} \text{ s}$



2006

- 3.- Dibuje la marcha de los rayos e indique el tipo de imagen formada con una lente convergente si:

- a) La distancia objeto, s , es igual al doble de la focal, f .
- b) La distancia objeto es igual a la focal.

2008

4. Sobre la superficie de un bloque de vidrio de índice de refracción 1,60 hay una capa de agua de índice 1,33. Una luz amarilla de sodio, cuya longitud de onda en el aire es $589 \cdot 10^{-9} \text{ m}$, se propaga por el vidrio hacia el agua.

- a) Describa el fenómeno de reflexión total y determine el valor del ángulo límite para esos dos medios.

- b) Calcule la longitud de onda de la luz cuando se propaga por el vidrio y por el agua.

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

SOL: a) $\hat{i} = 56,2^\circ$ b) $\lambda_{\text{agua}} = 443 \cdot 10^{-9} \text{ m}$

2010

5. Un teléfono móvil opera con ondas electromagnéticas cuya frecuencia es $1,2 \cdot 10^9 \text{ Hz}$.

- a) Determine la longitud de onda.

- b) Esas ondas entran en un medio en el que la velocidad de propagación se reduce a $5c/6$. Determine el índice de refracción del medio y la frecuencia y la longitud de onda en dicho medio.

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1} ; n_{\text{aire}} = 1 ; v_{\text{sonido}} = 340 \text{ m s}^{-1}$$

SOL: a) $\lambda = 0,25 \text{ m}$ b) $n = 1,2$; f no cambia; $\lambda' = 0,21 \text{ m}$

6. Una antena emite una onda de radio de $6 \cdot 10^7 \text{ Hz}$.

- a) Explique las diferencias entre esa onda y una onda sonora de la misma longitud de onda y determine la frecuencia de esta última.

- b) La onda de radio penetra en un medio material y su velocidad se reduce a $0,75 c$. Determine su frecuencia y su longitud de onda en ese medio.

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1} ; v(\text{sonido en el aire}) = 340 \text{ m s}^{-1}$$

SOL: a) $f = 68 \text{ s}^{-1}$ b) la frecuencia no cambia; $\lambda = 3,75 \text{ m}$

SOLUCIONES A LOS EJERCICIOS DEL TEMA 4

- 1- No existe; $48,75^\circ$
- 2- $5,25 \cdot 10^{-7} \text{ m}$; $2,256 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$
- 3- consultar la teoría; no
- 4- a) $\hat{r}_{\text{rojo}} = 39,1^\circ$; $\hat{r}_{\text{violeta}} = 29,9^\circ$ b) $v_{\text{rojo}} = 2,68 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$; $v_{\text{violeta}} = 2,11 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$
- 5- a) $20,13^\circ$ b) $0,73 \text{ m}$
- 6- a) refracción, cambio de la velocidad y de la longitud de onda b) 1,41
c) no se puede dar la reflexión total
- 7-a) i) Falso ii) Falso b) i) En el esquema, el ángulo de la segunda refracción es $31,41^\circ$ ii) $2,25 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$.
- 8- $47,1^\circ$
- 9.- espejos cóncavos con el objeto entre el foco y el espejo
- 10- a) real, invertida, menor tamaño ; $s' = -7,2 \text{ m}$; $y' = -8 \text{ cm}$
b) virtual, derecha, menor tamaño $s' = 0,8 \text{ m}$; $y' = 8 \text{ cm}$
c) virtual, derecha, menor tamaño ; $s' = 0,36 \text{ m}$; $y' = 4,8 \text{ cm}$
d) virtual, derecha, mayor tamaño ; $s' = -15 \text{ cm}$; $h' = 5 \text{ cm}$
e) virtual, derecha, menor tamaño; $s' = -3,75 \text{ cm}$; $h' = 1,25 \text{ cm}$

PROBLEMAS NUMÉRICOS DE ÓPTICA GEOMÉTRICA

1. Se quiere construir una lente convergente de 2 dioptrías que tenga una cara plana. ¿Cuál ha de ser el radio de la otra cara si se construye con vidrio de índice de refracción 1,74? Dibuja la sección de la lente.
2. Considera una lente delgada cuya distancia focal imagen vale -20 cm. Delante de la lente, a 30 cm, se coloca un objeto (flecha vertical) de 1 cm de alto:
 - a) ¿Qué tipo de lente es? ¿Cuál es la potencia de la lente?
 - b) Dibuja el trazado de rayos e indica las características de la imagen.
 - c) Calcula la distancia a la que se forma la imagen, el tamaño de ésta y el aumento lateral.
3. Se dispone de una lente convergente delgada de distancia focal 30 cm. Calcula, dibujando previamente un trazado de rayos cualitativo:
 - a) La posición y la altura de la imagen formada por la lente si el objeto tiene una altura de 6 cm y se encuentra situado delante de ella, a una distancia de 40 cm.
 - b) La naturaleza de la imagen formada.
4. Un espejo cóncavo forma la imagen, a una distancia de 12 cm de él, de un objeto de 8 cm de altura que está situado a 35 cm del espejo. Calcula:
 - a) El radio del espejo.
 - b) El tamaño de la imagen.
 - c) Indica las características de la imagen.
5. Por medio de un espejo cóncavo se quiere proyectar un objeto de 1 cm sobre una pantalla plana, de modo que la imagen mida 3 cm. La pantalla ha de estar a 2 m del objeto:
 - a) Calcula las distancias del objeto y de la pantalla al espejo.
 - b) Calcula el radio del espejo, su distancia focal y su potencia.
6. Entre los instrumentos que acarrea el Curiosity está la cámara Mars Hand Lens para fotografiar en color los minerales del suelo marciano. La lente de la cámara tiene una distancia focal de 18,3 mm, y lleva un filtro que solo deja pasar la luz comprendida en el intervalo 380-680 nm. Calcula:
 - a) La potencia de la lente.
 - b) La frecuencia más alta de la luz que puede fotografiarse.
 - c) La posición de la imagen formada por la lente de un objeto situado a 10 cm.
7. Se dispone de una lente convergente (una lupa de distancia focal 5 cm) que se utiliza para aumentar sellos.
 - a) Haz un diagrama indicando la trayectoria de los rayos, la posición del objeto y la posición de la imagen si se quiere obtener una imagen virtual, derecha y aumentada.
 - b) Determina la posición en la que hay que colocar los sellos si se quiere que la imagen definida en el caso anterior sea diez veces mayor.
 - c) Determina las características de la imagen obtenida si el sello se coloca a 6 cm de la lente (haz el diagrama y los cálculos correspondientes).

SOLUCIONES

1. -37 cm (cara plana a la izquierda) o +37 cm (cara plana a la derecha)
2. a) Lente divergente de -5 D b) Imagen virtual, derecha y de menor tamaño
c) $s_i = -12$ cm; $h' = 0,4$ cm ; $M = 0,4$
3. a) $s_i = 120$ cm; $h' = -18$ cm b) Imagen virtual, invertida y de mayor tamaño
4. a) $R = 17,87$ cm, espejo cóncavo b) $h' = -2,74$ cm c) Imagen real, invertida, de menor tamaño
5. a) $s_o = 1$ m ; $s_i = 3$ m b) $R = 1,5$ m ; $f = 0,75$ m ; $P = 1,33$ D
6. a) $P = 54,64$ D b) $f = 7,89 \cdot 10^{14}$ Hz c) $s_i = 2,24$ cm
7. b) $s_o = 4,5$ cm c) Imagen real, invertida y de mayor tamaño ($s_i = 30$ cm y $M = -5$)

EVOLUCIÓN HISTÓRICA SOBRE LA CONSIDERACIÓN DE LA NATURALEZA DE LA LUZ

Siglo XVII	Siglo XIX	Siglo	XX
		Primera decena	A partir de la primera decena
<p><u>Modelo corpuscular (I. Newton).</u> Explica: *Propagación rectilínea (sombras) *Reflexión (choques elásticos) *Refracción (diferente atracción de la luz por diferentes medios). Supone $v_{\text{medios más densos}} > c$</p> <p><u>Modelo ondulatorio (C. Huygens)</u> Explica: *Propagación tridimensional de la luz desde un foco puntual. *Reflexión *Refracción: Supone $v_{\text{medios más densos}} < c$ Para Huygens la luz es una onda longitudinal que, al igual que el sonido, necesita un medio material, el éter.</p>	<p>T. Young- Experimentalmente realiza la difracción en dos rendijas paralelas y muy próximas y la polarización de la luz.</p> <p>A. Fresnel- Justifica teóricamente los experimentos de Young con una teoría ondulatoria.</p> <p>J. Maxwell- Completa la teoría de Fresnel con la predicción de ondas electromagnéticas con una velocidad igual a la de la luz, por lo que la luz sería una onda electromagnética.</p> <p>H. Hertz- Confirma experimentalmente la teoría de Maxwell</p> <p>L. Foucault- Comprueba experimentalmente que $v_{\text{medios más densos}} < c$</p>	<p>M. Planck (1900)- Denomina “cuantos” a porciones mínimas de energía</p> <p>A. Einstein (1905)- Explica el efecto fotoeléctrico utilizando el concepto de fotón como cuanto de luz.</p>	<p>W. Heisenberg- Con su Principio de Incertidumbre pasa de una mecánica determinista a otra probabilística.</p> <p>L. De Broglie- Establece el valor de la longitud de onda asociada a una partícula.</p> <p>Otros científicos relevantes: N.Bohr, P. Dirac, F. Hund, E. Shrödinger, E. Fermi...</p>
<p>En el siglo XVII, la teoría corpuscular tuvo mayor aceptación debido a la mayor autoridad científica que tenía Newton.</p>	<p>La naturaleza de la luz fue considerada ondulatoria en el siglo XIX por las teorías y las pruebas experimentales que la apoyaban.</p>	<p>La aportación de Einstein supuso una vuelta a la teoría corpuscular.</p>	<p>La luz tiene una naturaleza dual, por ejemplo, se manifiesta como onda en los fenómenos de interferencia y difracción, y como partícula cuando interacciona con la materia.</p>
LUZ COMO CORPÚSCULO	LUZ COMO ONDA	LUZ COMO CORPÚSCULO	DUALIDAD ONDA-CORPÚSCULO

ÓPTICA

Nº	LEY / CONCEPTO	FÓRMULA	SIGNIFICADO Y UNIDAD DE LOS SÍMBOLOS	UTILIDAD/ OBSERVACIÓN
1	Índice de refracción	$n = \frac{c}{v}$	n : Índice de refracción de un medio c : Velocidad de la luz en el vacío ($3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$) v : Velocidad de la luz en ese medio. (m s^{-1})	Al ser la velocidad de la luz en el vacío mayor que en cualquier otro medio, el índice de refracción es siempre ≥ 1
2	2ª Ley de la reflexión	$\hat{i} = \hat{r}$	\hat{i} : Ángulo de incidencia \hat{r} : Ángulo de reflexión	Nos indica que el ángulo del rayo incidente es igual al ángulo del rayo reflejado
3	2ª Ley de la refracción	$n_1 \cdot \text{sen } \hat{i} = n_2 \cdot \text{sen } \hat{r}$	n_1 : Índice de refracción del medio desde el que incide el rayo. $\text{sen } \hat{i}$: seno del ángulo incidente n_2 : Índice de refracción del medio donde se refracta el rayo. $\text{sen } \hat{r}$: seno del ángulo refractado	Esta expresión nos permite relacionar el ángulo de incidencia, el ángulo de refracción y los índices de refracción en los dos medios donde se refracta el rayo.
4	Ángulo límite en la reflexión total	$\hat{i} = \text{arc sen } \frac{n_2}{n_1}$	\hat{i} : Valor del ángulo límite	El ángulo límite es el mínimo valor del ángulo de incidencia para que el rayo no se refracte, sino que sólo se refleje.

ÓPTICA GEOMÉTRICA

ELEMENTO ÓPTICO	FÓRMULA	SIGNIFICADO DE LOS SÍMBOLOS	CRITERIO DE SIGNOS
Espejos (Para calcular la distancia a la que se forma la imagen)	$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}$ $R = 2f$	s_o : Distancia desde el objeto (O) al vértice (V) s_i : Distancia desde el punto imagen(I) al vértice (V) f : Distancia focal equivale a la mitad del radio de curvatura en un espejo esférico. R : Radio de curvatura	(s_o, s_i, f) tienen signo positivo cuando están por delante del espejo (en el lado que se denomina real) y tienen signo negativo cuando quedan en el lado denominado virtual (en el que los rayos son mera prolongaciones de los rayos reales). s_o : Positivo en espejos cóncavos y convexos. f : Positivo en espejos cóncavos y negativo en espejos convexos. s_i : Negativo en espejos convexos y cualquier signo en espejos cóncavos.
Espejos (Para calcular el aumento de la imagen, $M = h'/h$)	$\frac{h'}{h} = -\frac{s_i}{s_o}$	h' : Tamaño de la imagen. h : Tamaño del objeto. s_i : Distancia imagen. s_o : Distancia objeto.	Un aumento negativo ($M < 0$) significa que la imagen está invertida.
Lentes (Suponiendo que el medio circundante de la lente es el aire)	$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = \frac{1}{f}$ $\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$	s_o : Distancia objeto. s_i : Distancia imagen. f : Distancia focal. r_1 : Radio de curvatura de la primera superficie donde se produce refracción r_2 : Radio de curvatura de la segunda superficie donde se produce refracción.	s_o : es positivo en lentes convergentes y divergentes, porque el objeto está en el lado de incidencia. s_i : es positivo si la imagen es real, es decir, si se forma detrás de la superficie (en el lado de transmisión), y negativo en caso contrario. f, r_1, r_2 : son positivos si el centro de curvatura se encuentra detrás de la superficie (en el lado de transmisión), y negativo en caso contrario.
Lentes (Para calcular el aumento de la imagen, $M = h'/h$)	$\frac{h'}{h} = -\frac{s_i}{s_o}$	h' : Tamaño de la imagen. h : Tamaño del objeto. s_i : Distancia imagen. s_o : Distancia objeto.	Un aumento negativo ($M < 0$) significa que la imagen está invertida.
Potencia de una lente (o de un espejo)	$P = \frac{1}{f}$	P : Potencia de una lente (o de un espejo). Se mide en dioptrías (D). f : Distancia focal.	f : Positivo para lentes convergentes (y espejos cóncavos) y negativo para lentes divergentes (y espejos convexos).

Supuestos para los cuales son válidas las fórmulas expuestas:

- Nos movemos dentro de una aproximación paraxial, válida sólo para los rayos más próximos al eje óptico.
- Suponemos que el medio circundante en las lentes es el aire.