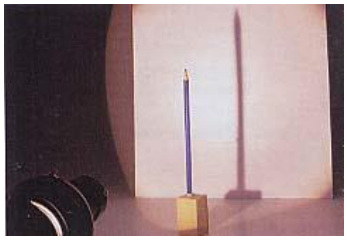
ÓPTICA GEOMÉTRICA.

1. Definición de óptica geométrica.

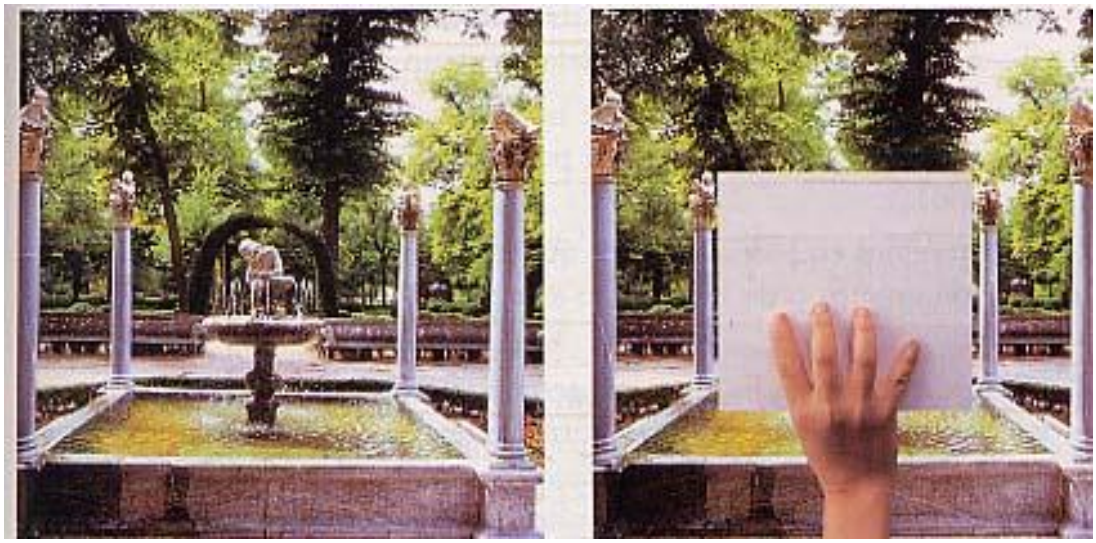
" La óptica geométrica es la parte de la óptica que trata, a partir de representaciones geométricas de los cambios de dirección que experimentan los rayos luminosos en los distintos fenómenos de reflexión y refracción."

Se basa en las siguientes leyes:



- **Ley de la propagación rectilínea de la luz**: Fue establecida en la antigüedad y tiene su base experimental en la formación de sombras de objetos a partir de focos luminosos puntuales. El tamaño de la sombra real es igual al que se obtendría prolongando geométricamente rectas que partiendo del foco, pasasen por los puntos de la silueta del objeto.

- **Ley de la independencia de rayos luminosos**: Establece que la acción de cada rayo es independiente de los demás, es decir, no guarda relación con el hecho de que los demás actúen simultáneamente o no actúen en absoluto. Imaginemos una foto de un objeto con un paisaje de fondo. Si tapamos el objeto y volvemos a fotografiar, solo se han interceptado los rayos que provienen del objeto, sin afectar al paisaje.



- **Ley de la reflexión y refracción**.

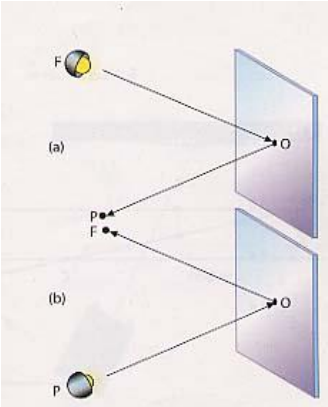


FIGURA 11.3. Ley de reciprocidad.

- **Ley de reciprocidad**: Establece que la trayectoria de un rayo que partiendo de F llega a un punto P por reflexión en O sería la misma que seguiría un rayo que partiera de P y se reflejara en dicho punto O. Este rayo pasaría por F. Esto también es valido para la refracción.

OJO: En el estudio de la óptica geométrica hacemos uso de la aproximación del rayo. El concepto de rayo es una construcción matemática que solo representa la dirección de propagación de un punto del frente de onda. Su dirección sería la de un fino haz de luz que hubiese atravesado una rendija cuyas dimensiones no fueran comparables con la longitud de onda de la luz. No se consideraran los efectos de la difracción.

1.1 Conceptos básicos de óptica geométrica

Vamos a dividir el tema en tres partes:

- Óptica por reflexión: Imágenes en sistemas de espejos planos y espejos esféricos (cóncavos y convexos).
- Óptica por refracción. Imágenes formadas a través de lentes delgadas de formas diversas.
- Algunas aplicaciones prácticas de la óptica geométrica.

Terminología:

- **Sistema óptico**: Es el conjunto de superficies que separan medios transparentes, homogéneos e isótropos de distinto índice de refracción.
- **Objeto**: Fuente de la que proceden los rayos luminosos, bien por luz propia o reflejada. Cada punto de la superficie del objeto será considerado como una fuente puntual de rayos divergentes.
- **Imagen:** Figura formada por el conjunto de puntos donde convergen los rayos que provienen de las fuentes puntuales del objeto tras su interacción con el sistema óptico. Puede ser de dos tipos:

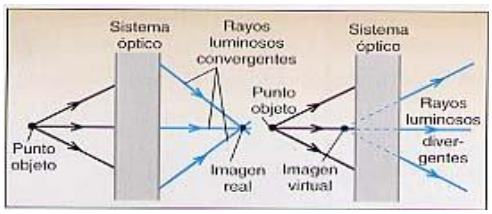


Imagen real: Es la imagen formada en un sistema óptico mediante intersección en un punto de los rayos convergentes procedentes del objeto puntual después de atravesar el sistema.

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

- **Imagen de un objeto extenso**: Está formada por las imágenes virtuales de cada uno de los puntos del objeto.
- Con respecto a la posición las imágenes pueden ser, **derechas** si están en la misma posición que el objeto, e **invertidas** si están en la posición contraria al objeto. Según su tamaño se denominan **mayores** si son más grandes que el objeto y **menores** si son más pequeñas.

Consideraremos que las superficies curvas son esféricas (espejos y lentes. Debemos definir:

- **Centro de curvatura:** Es el centro geométrico de la esfera al que corresponde la superficie del espejo o lente. Se representa por la letra C. En espejos planos el centro de curvatura se considera en el infinito.

- **Vértice, V**. Es el punto de corte de la superficie esférica con el eje óptico.
- **Radio de curvatura**. Es la distancia que existe entre el centro de curvatura y el vértice.
- **Eje óptico**. Es el eje que une el objeto con el centro de curvatura de la lente o espejo, C, y con el centro del sistema óptico (lente o espejo).

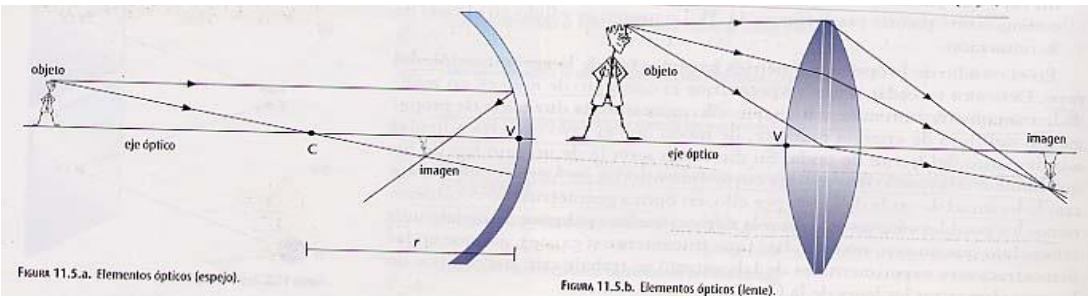


FIGURA 11.5.a. Elementos ópticos (espejo).
FIGURA 11.5.b. Elementos ópticos (lente).

El sistema óptico en el que todos los rayos que parten de un punto se juntan en otro se denomina **estigmático.** Si el sistema óptico no cumple esta propiedad recibe el nombre de **astigmático**. Cuando todas las superficies de separación de medio tienen un eje común de simetría el sistema se denomina centrado.

2. Óptica de la reflexión.

2.1 Espejos planos.

Supongamos un conjunto de rayos incidentes que provienen de un foco luminoso, O, y que se reflejan en un espejo plano pulido. Al observador le parecerá que los rayos reflejados que le llegan provienen del foco O`, al otro lado del espejo. O` constituye un foco virtual. La distancia de O al espejo es la misma que hay del espejo a O'. El foco virtual O` es simétrico a O respecto del espejo.

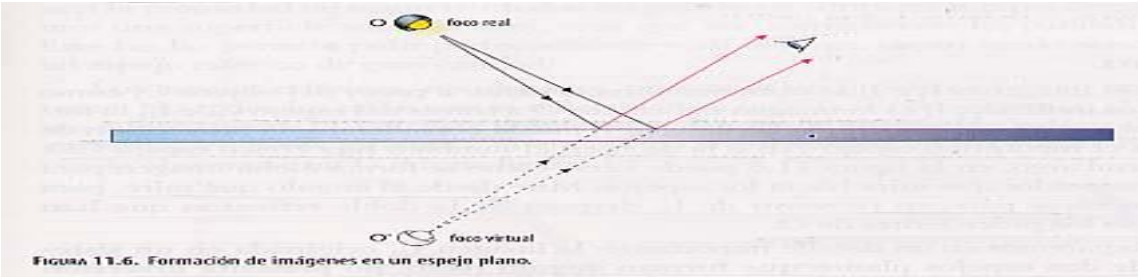


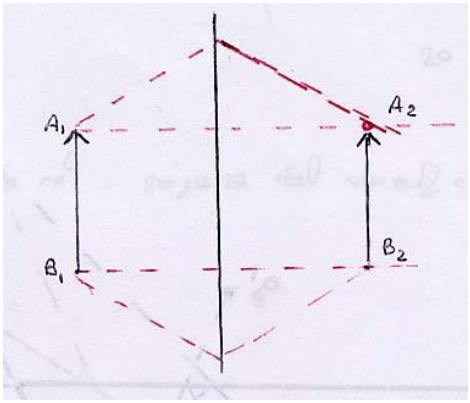
FIGURA 11.6. Formación de imágenes en un espejo plano.

Para representar imágenes reflejadas en un espejo plano basta con prolongar por el otro lado del espejo líneas perpendiculares a la superficie desde cada punto de la imagen real hasta una distancia idéntica. Uniendo estos puntos tendremos la imagen reflejada. Por la ley de la reflexión y teniendo en cuenta lo comentado, si te colocas delante de un espejo plano y alzas la mano derecha la imagen alzará la mano izquierda. La imagen presenta inversión lateral.

Resumiendo:

- **La imagen formada en un espejo plano es virtua**l (los rayos reflejados parecen provenir del punto imagen pero no pasan realmente por dicho punto, sólo lo hacen sus prolongaciones).
- **La imagen formada en un espejo plano es del mismo tamaño que el objeto.**

- **La imagen formada presenta inversión lateral(izquierda-derecha).**



Formación de imágenes en un espejo plano

- Desde el punto A_1 se trazan dos rayos luminosos. Uno de ellos es normal al espejo y se refleja retrocediendo en la misma dirección. El otro incide con un cierto ángulo i en el espejo y se refleja formado un ángulo igual. La prolongación de los dos rayos reflejados da lugar a A_2, imagen virtual de A_1.
- Si procedemos de igual modo con B_1, obtendremos B_2.
- Al unir A_2 con B_2 obtendremos la imagen del objeto

Ejemplo 1

Una persona de 1,70 m de altura se coloca ante un espejo plano. Sabiendo que sus ojos distan del suelo 1,60 m, establece la altura (mínima) del espejo para que se vea de pies a cabeza, y a qué altura del suelo debe colocarse.

En la figura 4.19 la imagen de la persona se ha construido teniendo en cuenta que es simétrica respecto del objeto. El punto imagen P' es percibido por los ojos por el rayo DO, que es el reflejado del PD. Como el ángulo de incidencia es igual que el de reflexión, la altura a la que debe ponerse el espejo (distancia $\overline{DB}$) es $1/2\ \overline{OP}$, es decir, a 0,80 m.

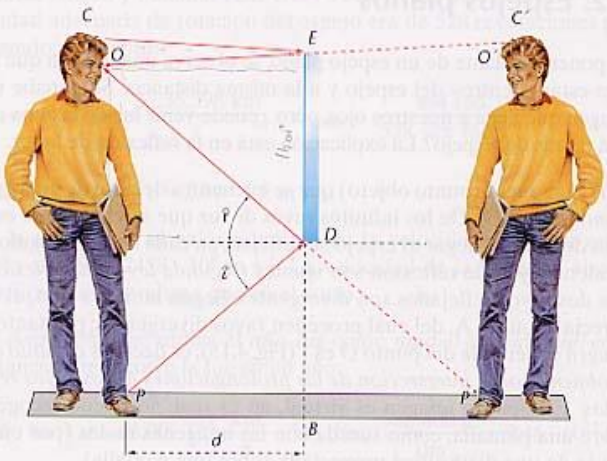


Fig. 4.19

Los puntos C, O y P corresponden a la cabeza, ojos y pies de la persona, respectivamente.

Siguiendo el mismo procedimiento, para observar el otro extremo de la persona (punto C), se trazan los rayos CE y EO, de donde se deduce que la persona ve íntegramente su imagen si la longitud (mínima) del espejo es: $1/2\ \overline{CO} + 1/2\ \overline{OP}$, es decir, la mitad de su altura: 0,85 m.

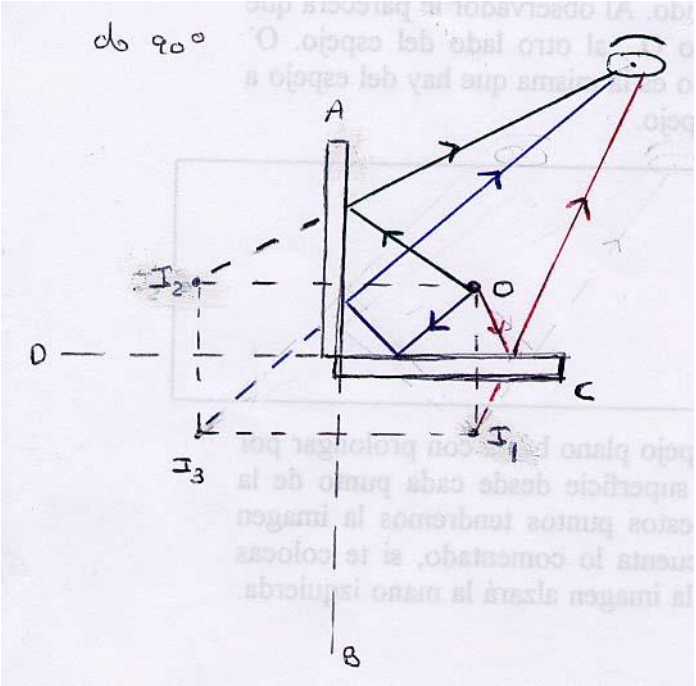
Nota: Las magnitudes solicitadas en el ejercicio no dependen de la distancia d entre la persona y el espejo. Si el espejo es de mayor longitud, por ejemplo, si se extiende por debajo del punto D, la persona aprecia parte del suelo que hay entre ella y el espejo.

2.2 Sistemas de espejos planos.

Existe la posibilidad de combinar espejos planos para producir una imagen sin inversión lateral, por ejemplo, situando dos espejos de forma que formen un ángulo de 90º.

Las imágenes I_1 e I_2 se obtienen directamente, como hemos visto. I_3 es la proyección de I_1 en el hipotético espejo AB o de I_2 en el hipotético CA. Para un observador, las rayas parecen proceder de I después de la doble reflexión.

OJO: La imagen I_3 no presenta inversión lateral.



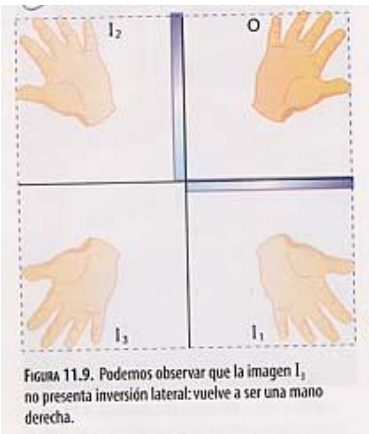
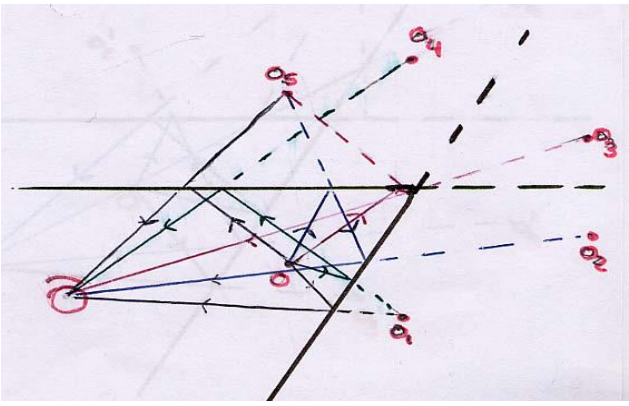


FIGURA 11.9. Podemos observar que la imagen I_3 no presenta inversión lateral: vuelve a ser una mano derecha.

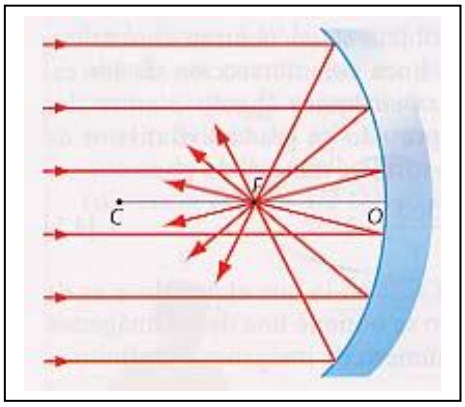
Espejos que forman un ángulo entre sí

Puede obtenerse que el número de imágenes formadas en general en un sistema de dos espejos es $n = \frac{360º}{\alpha} - 1$ siendo α el ángulo que forman los espejos. Por ejemplo para un ángulo de 60º.



2.3 Espejos esféricos.

Aberración esférica: No todos los rayos que se reflejan en la superficie convergen en un punto. Esa desviación es la aberración esférica. Por eso usamos la aproximación paraxial.



Se denomina rayos paraxiales a los rayos más próximos al eje óptico. En el estudio de los espejos esféricos, estudiaremos únicamente los rayos próximos al eje óptico, debido a que todos los rayos paralelos que convergen en su superficie los hacen converger en un punto que llamaremos Foco. Es lo que se conoce como aproximación paraxial.
Llamamos espejo esférico a una porción de superficie esférica pulimentada. Son cuando su superficie interior es reflectante y convexos cuando lo es la exterior.

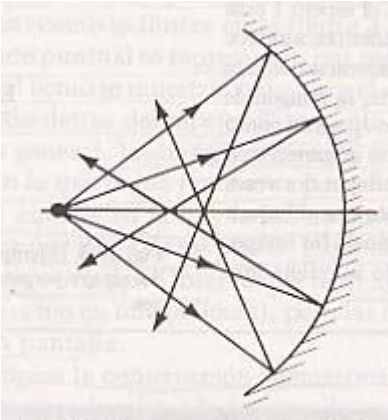
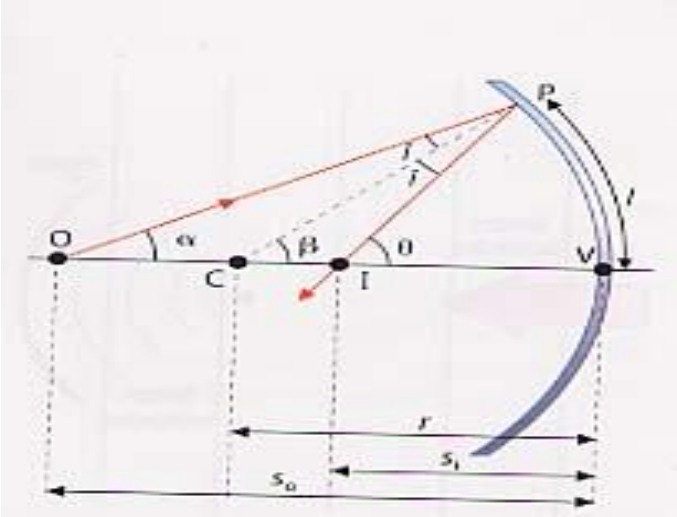


Fig. 37.5 Los rayos no paraxiales se reflejan en un espejo esférico cóncavo, se intersecan en el eje óptico en diferentes puntos y resulta una imagen borrosa. Esto se llama aberración esférica.



Consideramos un espejo cóncavo en el que se reflejan los rayos paraxiales que provienen del objeto O para converger en I dando se forma la imagen. C es el centro de curvatura, P es el punto de incidencia con el espejo. Por la ley de reflexión el rayo incidente y el reflejado tienen el mismo ángulo.
Llamamos S_0 a la distancia desde 0 al vértice V, S_i a la distancia entre el punto imagen, I y el vértice. La distancia CV es el radio de curvatura r. Según la figura y considerando que los ángulos son muy pequeños, podemos hacer las siguientes aproximaciones:

$$tg\alpha \cong \alpha \cong \frac{1}{S_0} \quad ; \qquad tg\beta \cong \beta \cong \frac{1}{r}; \qquad tg\vartheta \cong \vartheta = \frac{1}{S_i}$$

En el triángulo OPI tenemos que $\alpha + 2i + (180^o - \vartheta) = 180^o$; de donde $\alpha + 2i = \vartheta$

De la misma forma, en el triángulo CPI, tenemos que: $\beta + i + (180^{o} - \vartheta) = 180^{o}$; de donde $i = \vartheta - \beta$

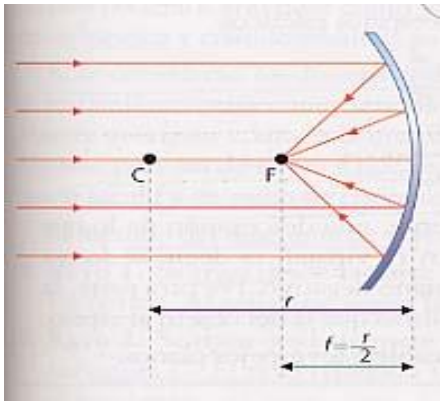
Sustituyendo en la primera $\alpha + 2(\vartheta - \beta) = \vartheta$; $\alpha + \vartheta = 2\beta$.

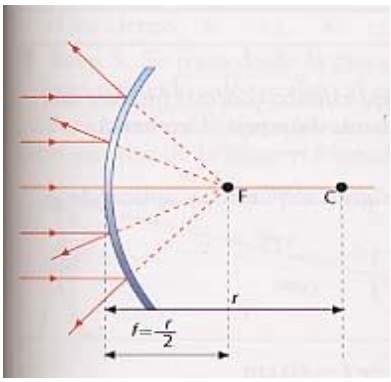
Ecuación de los espejos: $\frac{1}{S_0} + \frac{1}{S_i} = \frac{2}{r}$

Si O está muy distante de forma que $\frac{1}{S_0} \cong 0$, entonces $S_i = \frac{r}{2}$.

En este caso, se puede considerar que los rayos son prácticamente paralelos, puesto que vienen de un punto muy alejado, y por tanto, los reflejados convergen en un punto que llamábamos foco. En este caso el foco coincide con la imagen y S_i es la distancia focal $f = \frac{r}{2}$.

Entonces se puede escribir : $\frac{1}{S_0} + \frac{1}{S_i} = \frac{1}{f}$





Es valido tanto para espejos cóncavos como convexos. Solo depende del criterio de signos que se utilice.

<u>Criterio de signos</u>

S_0 es + si el objeto está enfrente del espejo (objeto real)
S_0 es - si el objeto está detrás del espejo (objeto virtual)
S_i es + si la imagen está enfrente del espejo (imagen real)
S_i es - si la imagen está detrás del espejo (imagen virtual)
f y r son + si el centro de curvatura está enfrente del espejo (cóncavo) y - si está detrás (convexo).

¿Puede emplearse la ecuación de los espejos esféricos para un espejo plano?
Se puede suponer, al igual que suponemos que un fuente de onda esférico es plano cuando está a gran distancia del foco emisor, que un espejo plano es como un esférico de radio ∞. Por tanto:

$$\frac{1}{S_0} + \frac{1}{S_i} = \frac{2}{\infty}; \qquad S_0 = -S_i$$

Esto es efectivamente una descripción de lo que sucede en un espejo plano: La imagen es virtual, es decir, negativa, pero las distancias son iguales.

Un objeto situado a 8 cm de un espejo esférico cóncavo produce una imagen virtual a 10 cm por detrás del espejo. Determina:
a)La distancia focal del espejo.
b) Su radio de curvatura.
c) La localización y el tipo de imagen si el objeto se aleja hasta 25 cm de distancia con respecto al espejo.

a) $\frac{1}{S_0}+\frac{1}{S_i}=\frac{1}{f}$; $\frac{1}{8}+\frac{1}{-10}=\frac{1}{f}$; $\frac{5-4}{40}=\frac{1}{f}$ f = 40 cm

b) f = $\frac{r}{2}$; r = 80 cm

c) $\frac{1}{S_0}+\frac{1}{S_i}=\frac{1}{f}$ $\frac{1}{25}+\frac{1}{S_i}=\frac{1}{40}$ $\frac{1}{S_i}=\frac{1}{40}-\frac{1}{25}=\frac{10-16}{400}=\frac{-6}{400}$

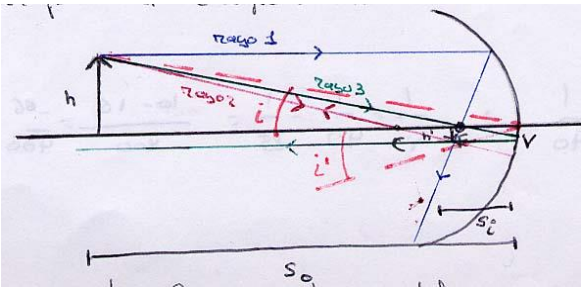
$S_i=-\frac{400}{6}=-66{,}6cm$ VIRTUAL

2.4 Formación de imágenes en espejos esféricos: diagramas de rayos y aumento de la imagen.

Si consideramos la imagen del objeto realiza lo que llamamos un diagrama de rayos, que nos permite averiguar como es la imagen formada del objeto.
Consideramos una flecha de altura h, reflejada en un espejo esférico cóncavo de distancia focal f y radio de curvatura r.
El método es el siguiente:

- Rayo 1: Se traza desde la parte superior del objeto y transcurre paralelo al eje óptico. Al reflejarse según la ley de la reflexión pasará por el foco F.
- Rayo 2: Se traza desde la parte superior del objeto y pasa por el centro de curvatura C. El rayo reflejado tiene la misma dirección que el incidente. El rayo es al espejo.
- Rayo 3: Se traza desde la parte superior del objeto y pasa por el foco F. El rayo reflejado sale paralelo al eje óptico.

En realidad solo se necesitan dos de los tres rayos. El tercero puede servir para la comprobación.



Se denomina <u>aumento de la imagen</u> a la relación que existe entre el tamaño de la imagen h y del objeto h`
Podemos observar que el rayo --------- pasa por la parte superior de las dos imágenes por tanto

tgi = $\frac{h}{S_0}$; tgi` = $\frac{-h'}{S_i}$

Aumento lateral de la imagen → $\frac{h}{S_0} = \frac{-h'}{S_i}$; $\frac{h}{h'} = -\frac{S_0}{S_i}$

Si es negativo la imagen estará invertida, Si es 1 el tamaño es natural.

Imágenes en los espejos esféricos cóncavos **(Transparencia edebé 216)**

Tienen inversión lateral.

a) <u>Distancia objeto mayor que el radio de curvatura.</u>

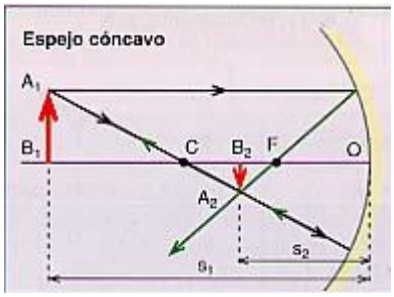
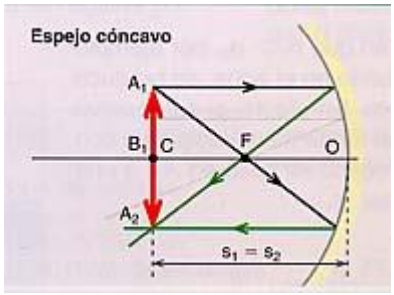


Imagen real, invertida y disminuida.

(Si estamos muy lejos como para considerar ∞ la imagen se forma en el foco)

Si acercamos el objeto aumenta el tamaño de la imagen pero sigue siendo menor que la real. Se aleja del foco.

b) <u>Si el objeto está justo en c, la imagen es a tamaño natural, real e invertida.</u>



Nota: Los espejos cóncavos tienen aplicaciones:

- Faros de coche. Son espejos parabólicos donde su punto luminoso esta situado en el eje de la parábola y reflejan la luz paralelamente al eje principal.
- Antenas parabólicas. Las señales de radio de los satélites se pueden considerar como rayos paralelos que proveen del infinito y que al reflejarse se concentran en el foco.

<u>c) Si el objeto está entre C y F</u>

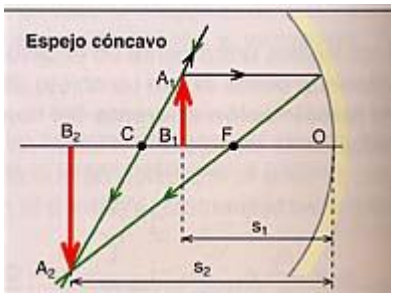
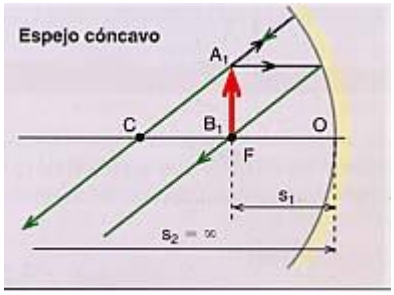


Imagen real, invertida y aumentada



Se irá agrandando hasta que el observador se coloque en F en el que la imagen borrosa e irreconocible (S_i =∞) llenará la totalidad del espejo.

d)Si el objeto está entre F y el V

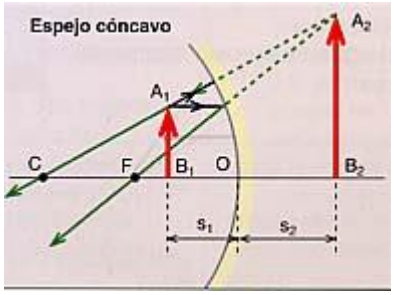
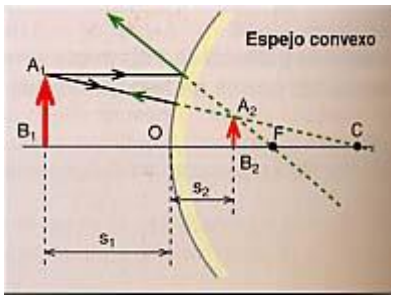


Imagen natural, aumentada y derecha. Si nos pegamos al espejo será de tamaño real.

Imágenes en espejos esféricos convexos



Como f siempre es negativa y S_0 positiva en un convexo y sabemos que $\frac{1}{S_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{S_0}$, S_i siempre negativo.
La imagen en un esférico convexo es virtual y además no invertida y disminuida más cuando más lejos.
El campo de visión es más amplio al diverger los rayos.
Ej: Espejos de las calles o panorámicos de los coches.

Cuadro resumen

Tipo de espejo	Situación del objeto	Tipo de imagen formada
Plano	$r = \infty$	Virtual, derecha, tamaño natural
Esférico cóncavo	$s_o > r$	Real, invertida, disminuida
	$s_o = r$	Real, invertida, tamaño natural
	$r > s_o > f$	Real, invertida, aumentada
	$s_o = f$	No se forma imagen nítida
	$s_o < f$	Virtual, derecha, aumentada
Esférico convexo	Cualquier posición	Virtual, derecha, disminuida

3. Imágenes por refracción en superficies esféricas.

Consideremos un objeto luminoso, O, situado en un medio de índice de refracción n_1, a una distancia s_o del vértice V, de una superficie refractora esférica convexa. Si el segundo medio tiene un índice de refracción n_2, mayor que n_2, los rayos que llegan a cualquier punto de la superficie serán desviados hacia una mayor aproximación a la normal a la superficie.

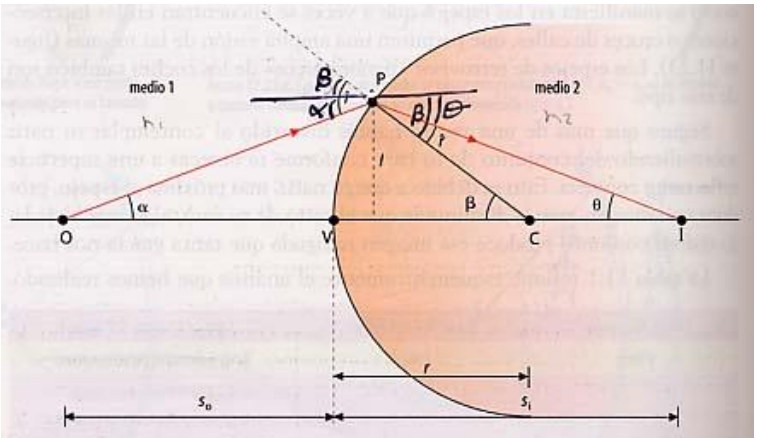


FIGURA 11.25. Refracción en una superficie esférica cuando $n_2 > n_1$.

Consideremos el rayo que incide en el punto P, a una altura l sobre el eje óptico. El radio de curvatura es r y C es el centro de curvatura. El lugar donde se forma la imagen es I localizado a una distancia s_i del vértice de la superficie. Los ángulos α,β, y θ son

los que forman el rayo incidente, la normal y el refractado con el eje óptico.

Teniendo en cuenta la aproximación paraxial (tg ≈sen≈áng., para ángulos pequeños) se tiene que:

$\alpha = \frac{}{s_o}; \beta = \frac{1}{r}; \vartheta = \frac{1}{s_i};$ Si aplicamos la ley de Snell $\boxed{n_1 \text{ sen } i = n_2 \text{ sen } r}$

y teniendo en cuenta la aproximación paraxial $\boxed{n_1 \cdot i = n_2 \cdot r}$

En el triángulo OPC se observa que $\alpha + \beta + (180 - i) = 180$ y por tanto $i = \alpha + \beta$

En el triángulo PCI se observa que $r + \theta + (180 - \beta) = 180$ y pro tanto $r = \beta - \theta$

Si sustituimos tenemos que $n_1 (\alpha + \beta) = n_2 (\beta - \theta)$; Y sustituyendo los valores de los ángulos podemos escribir:

$n_1\left(\frac{l}{s_o} + \frac{l}{r}\right) = n_2\left(\frac{l}{r} - \frac{l}{s_i}\right)$ Expresión de la que se deduce la conocida expresión del dioptrio esférico $\boxed{\frac{n_1}{s_o} + \frac{n_2}{s_i} = \frac{n_2 - n_1}{r}}$ Fue deducida en 1841 por Gauss y también se conoce como **aproximación gaussiana.**

Nota: Dioptrio. Superficie de separación entre dos medios con distinto índice de refracción.

Esta ecuación es valida para cualquier caso de refracción siempre que se adopte un criterio de signos adecuado.

Criterio de signos para la óptica de la refracción a través de una superficie.

Del mismo modo que ocurría en el caso de los espejos, diremos que la distancia a la imagen s es positiva si la imagen es real. **Esto determina una diferencia fundamental entre los criterios de la reflexión y refracción: la imagen real en la primera se forma delante del espejo (en el medio de incidencia) , mientras que en la segunda se forma en el medio de transmisión.**

- s_o es positivo si es objeto está enfrente de la superficie (en el lado de incidencia) y negativo en el caso contrario.
- s_i es positivo si la imagen es real , es decir, si se forma detrás de al superficie (en el lado de transmisión) y negativo en el caso contrario.
- r es positivo si el centro de curvatura se encuentra detrás de la superficie (en el lado de transmisión y negativo en el caso contrario.

Este criterio es el que aplicaremos en las lentes delgadas.

Aumento de la imagen por refracción

Se define el aumento lateral de la imagen como la relación existente entre la altura de la imagen formada, h', y la del objeto, h.