
Pascuela Villalobos / Hernández Poveda
Fimia Gil/ Mateos Alvarez

PRACTICAS DE OPTICA GEOMETRICA Y RADIOMETRICA



UNIVERSIDAD DE ALICANTE

Edita: Secretariado de Publicaciones
Universidad de Alicante

Diseño portada: Enrique. Gabinete de Diseño
Universidad de Alicante

Composición e impresión: Gráficas CIUDAD S.A.

ISBN: 84-86809-01-0
Depósito legal: A-247-1988

Reservados todos los derechos. No se permite reproducir, almacenar en sistemas de recuperación de la información ni transmitir alguna parte de esta publicación, cualquiera que sea el medio empleado –electrónico, mecánico, fotocopia, grabación, etc.–, sin el permiso previo de los titulares de los derechos de la propiedad intelectual.

**Estos créditos pertenecen a la edición impresa
de la obra**

Edición electrónica:



Pascuela Villalobos / Hernández Poveda
Fimia Gil/ Mateos Alvarez

Prácticas de óptica geométrica y radiométrica

Índice

Portada

Créditos

Prólogo 8

ÓPTICA GEOMÉTRICA

Introducción: lentes 10

 Puntos y planos focales 10

 Distancia focal 13

 Planos y puntos principales 13

 Reconocimiento de lentes 15

Obtención de distintos haces de luz 17

Criterio de signos. Normas DIN 20

Óptica paraxial: ecuaciones de correspondencia en sistemas centrados 23

Prácticas 30

 1. Medida de los radios de curvatura de una lente con el esferómetro 30

Índice

2. Medida del espesor de una lente planoconvexa gruesa	34
3. Medida del índice de refracción de una lámina de vidrio con el microscopio.	36
4. Medida del índice de refracción de un prisma	39
5. Abertura numérica de un objetivo de microscopio . . .	42
6. Cálculo de la focal de una lente convergente I: procedimiento de Gauss	46
7. Cálculo de la focal de una lente convergente II: procedimiento de Bessel	48
8. Cálculo de la focal de una lente convergente III: procedimiento del aumento de Abbe	51
9. Cálculo de la focal de una lente convergente IV	53
10. Cálculo de la focal de una lente convergente V: Autocolimación.	55
11. Cálculo de la focal de una lente convergente VI: método de Silvermann	56
12. Cálculo de la focal de una lente convergente VII: método gráfico	59

Índice

13. Cálculo de la focal de una lente divergente I: método indirecto	62
14. Cálculo de la focal de una lente divergente II: método directo	65
15. Determinación de la distancia focal de un espejo cóncavo	67
16. Índice de refracción y planos principales en una lente planoconvexa	69
17. Lente esférica gruesa	71
18. Sistema de lentes I	74
19. Sistema de lentes II	77
20. Aberración cromática	80
21. Aberración esférica de una lente planoconvexa . . .	82

Índice

RADIOMETRÍA

Introducción	87
Unidades	89
Detectores	97
Prácticas	101
22. Ley de Lambert	101
23. Medida de la intensidad de una fuente luminosa. .	103
24. Comprobación de la ley del cuadrado de la distancia.	106
25. Fotometría física: fotometría fotográfica	108
Bibliografía	113

Prólogo

Este libro constituye una recopilación de las prácticas que se vienen realizando en el Laboratorio de Óptica Geométrica y Radiometría de la Escuela Universitaria de Óptica de la Universidad de Alicante. Se compone de un total de veinticinco experiencias agrupadas en dos partes bien diferenciadas, la primera correspondiente a Óptica Geométrica, y la segunda a Radiometría.

Cada práctica consta de dos partes: una pequeña introducción teórica y un esquema del desarrollo experimental. Con estas prácticas se pretende que el alumno tenga presente la relación existente entre el fenómeno experimental y la explicación teórica del mismo, de forma que sea capaz de comprobar, a partir de los resultados experimentales obtenidos, la validez y limitaciones de las ideas y expresiones teóricas consideradas.

Prólogo

Salvo las prácticas de Radiometría, que necesitan de un material muy específico, el resto de las prácticas pueden ser montadas con un único equipo básico, con el fin de que el alumno se familiarice con una serie de elementos e instrumentos ópticos que deberá conocer y utilizar en futuras asignaturas.

Esperamos que esta publicación sirva de ayuda a profesores y alumnos, y cubra los objetivos propuestos.

Alicante, diciembre de 1987.

Los autores

Introducción: lentes

Lente es todo cuerpo transparente, limitado por dos superficies, de las cuales al menos una, es una superficie curva.

En función de estas superficies se distingue entre lentes *esféricas*, que pueden ser *cóncavas* o *convexas*, lentes *cilíndricas* y lentes *tóricas*. Otra clasificación importante se hace al tener en cuenta la posición de los focos objeto e imagen de una lente, lo que determina las llamadas lentes *convergentes* o *positivas* y *divergentes* o *negativas*.

Puntos y planos focales

Un haz de rayos paralelos entre sí y paralelos al eje óptico de una lente, inciden sobre ella, y a su salida se dirigen a un punto del eje, que es el llamado foco imagen del sistema F' . Análogamente cuando el haz de rayos que emerge de la lente es paralelo al eje óptico, es porque proviene de un punto situado en dicho eje y denominado punto focal objeto F .

Introducción: lentes

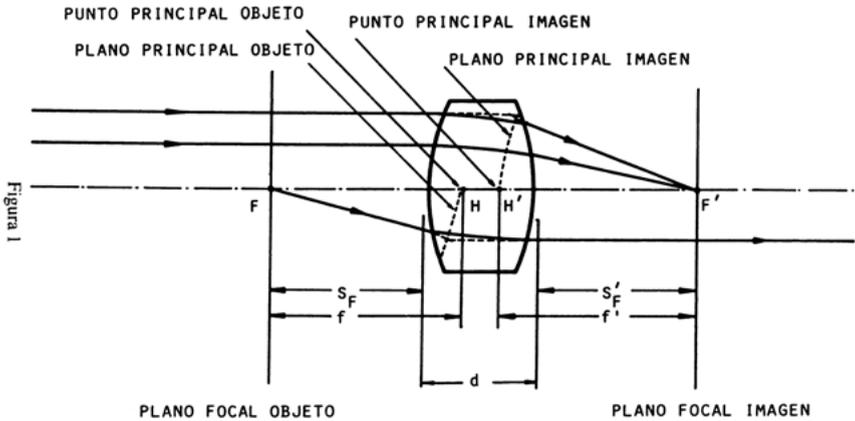


Figura 1

Relacionado con los focos, está el concepto de plano focal. Recibe el nombre de plano focal, aquel plano perpendicular al eje óptico que pasa por su correspondiente foco. Planos y puntos focales pueden verse en la figura 1.

Cuando un haz de rayos incide paralelamente sobre una lente convergente, este haz sale de dicha lente y se reúne en un punto F' , llamado foco imagen de la lente. Se trata de una lente que da una imagen real de dicho haz puesto que puede recogerse en una pantalla (figura 2). Las lentes divergentes, en lugar de reunir el haz de rayos paralelos que incide sobre ellas, lo separan como si procediera de un punto F' , foco ima-

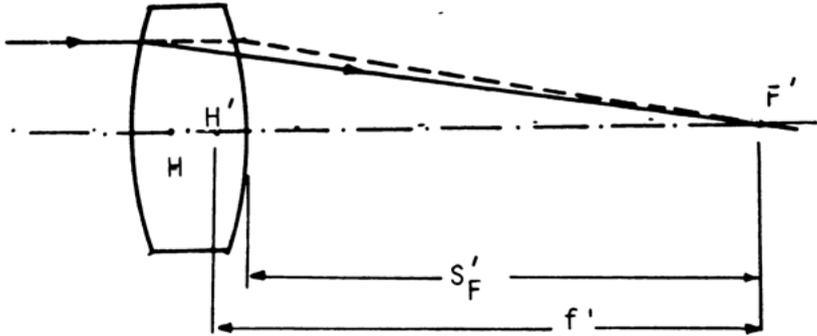


Figura 2

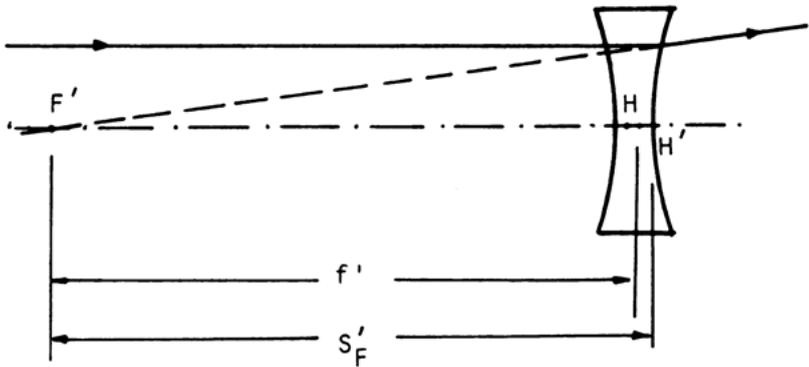


Figura 3

gen del sistema, situado delante de dichas lentes (Figura 3). Las lentes convergentes tienen focos reales, mientras que en las divergentes los focos son virtuales.

Distancia focal

Hay dos tipos de distancias focales asociadas con cada lente o sistema de lentes. La más importante de las dos es la llamada distancia focal imagen, o simplemente distancia focal, que denotamos como f' , la cual determina, el aumento de la imagen. Esta f' , aparece normalmente en las fórmulas de lentes. Desafortunadamente, f' es la medida del foco imagen F' , referida al punto principal imagen (que se definirá a continuación) el cual está a veces en el interior de la lente, y por lo tanto el valor de f' , no puede ser medido fácilmente.

La otra distancia focal, ver figura 1, es la distancia de los focos a los vértices de las superficies externas de una lente o sistema de lentes. Son los segmentos focales, objeto s_f e imagen s_f' . Dichos segmentos son más fáciles de medir.

Planos y puntos principales

Cuando un rayo incide sobre una lente, se producen dos refracciones, una en cada superficie de la lente. Estas dos superficies, pueden sustituirse por dos planos, que dan lugar a un haz en la misma dirección que el rayo emergente del sistema. Estos planos estarán situados perpendiculares al eje de la lente. La posición de los planos principales, (ver figura 1), se determina de la siguiente manera: Si tenemos

Prácticas de óptica geométrica y radiométrica

una fuente situada en el foco objeto de la lente, los rayos que emite dicha fuente, saldrán paralelos después de atravesar la lente. Si prolongamos el haz que incide y el que sale de la lente, cada rayo emergente cortará a su incidente en un punto. Todos estos puntos de corte darán lugar a una superficie que puede estar dentro o fuera de la lente. Esta superficie, que es un plano en la zona paraxial, se denomina plano principal objeto. Análogamente, si ahora incidimos con un haz paralelo, éste saldrá de la lente en dirección al foco imagen. Al prolongar de nuevo los rayos de dicho haz, se obtendrán los puntos de intersección que determinan el plano principal imagen.

Los planos principales pueden caer completamente fuera del sistema de lentes. Dependerá del tipo de lente, como puede verse en la figura 4.

Los planos principales, se caracterizan a su vez porque todo haz que incide sobre el plano principal objeto, sufre un aumento lateral igual a uno al salir por el plano principal imagen.

La intersección entre los planos principales objeto e imagen y el eje óptico de una lente, determina los llamados puntos principales objeto H e imagen H' respectivamente.

Introducción: lentes

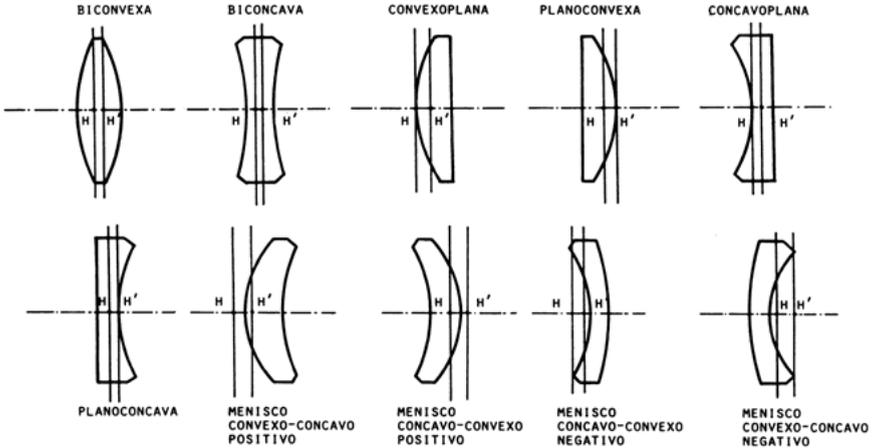


Figura 4

Reconocimiento de lentes

A continuación se dan unas indicaciones que nos permitirán distinguir a simple vista, entre lentes convergentes y divergentes:

1° *Relación entre el espesor central y el espesor de borde.*

Una lente convergente es más gruesa en el centro que en los bordes; en cambio, una divergente es más delgada en el centro, y más gruesa en los bordes.

2° *Observación de la imagen que nos da la lente.* Las convergentes pueden formar imágenes más pequeñas, iguales

Prácticas de óptica geométrica y radiométrica

o más grandes que el objeto, dependiendo de la posición del objeto respecto al foco; en el caso de las divergentes las imágenes que se tienen son siempre de menor tamaño, cuando se emplean objetos reales.

3° Producir movimientos verticales u horizontales a la lente, y observar el movimiento de la imagen. Si desplazamos una lente convergente, su imagen se moverá en sentido contrario; en cambio en las divergentes, lente e imagen sufren el desplazamiento en el mismo sentido.

Obtención de distintos haces de luz

Es conveniente manejar distintos haces, a fin de poder estudiar las leyes de la óptica, que se encontrarán en las prácticas que se desarrollan a continuación.

Si situamos una fuente de luz, en el infinito, o a suficiente distancia, el haz de rayos que se obtiene será un haz paralelo. Conseguir un haz paralelo en estas condiciones no es útil, ya que sería demasiado débil para que el rayo luminoso tuviese la intensidad necesaria para realizar las experiencias.

Cuando se quiere conseguir un haz paralelo se emplea una lente convergente.

Una lente convergente, es un elemento óptico tal que al situar una fuente luminosa en su punto focal objeto da lugar a un haz paralelo.

Un haz de luz paralelo así obtenido presenta la ventaja de no perder luminosidad (Figura 5).

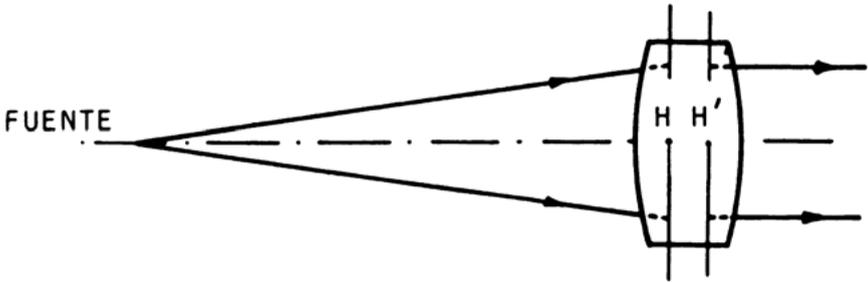


Figura 5

Otros tipos de haces, que podrían ser útiles son los convergentes y los divergentes. Para obtener los primeros, se sitúa la fuente a una distancia mayor que la distancia focal de una lente convergente. Esta lente, como su nombre indica, hará converger el haz que emerge de ella (Figura 6).

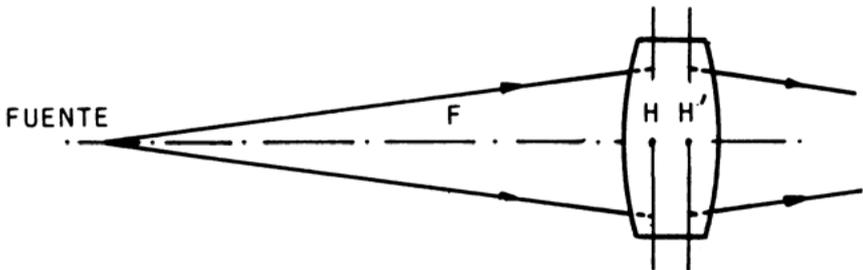


Figura 6

Obtención de distintos haces de luz

En el caso de un haz divergente, se sitúa la fuente a una distancia mayor que la distancia focal de una lente divergente, resultando un haz que diverge al emerger de la lente (Figura 7).

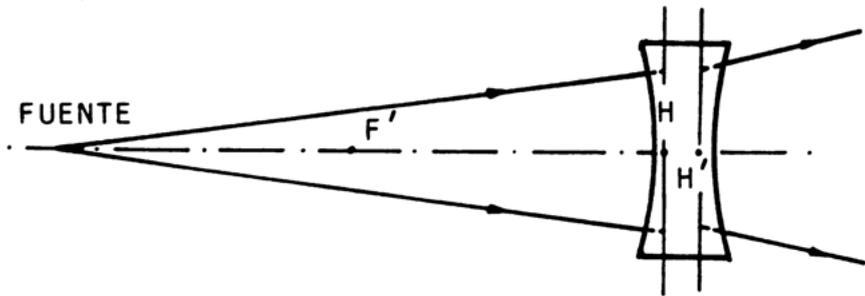


Figura 7

Criterio de signos. Normas DIN

En lo sucesivo se utilizarán las normas y notación que a continuación se señalan:

- (a) La luz incide siempre de izquierda a derecha.
- (b) Los elementos que hacen referencia a la imagen se designan con las mismas letras que los del objeto pero con primas. Los puntos se representan con letras mayúsculas, los segmentos con letras minúsculas y los ángulos con letras griegas.
- (c) Las distancias toman su origen en la superficie óptica, de manera que para los puntos situados a su izquierda la distancia es negativa y para los situados a la derecha la distancia es positiva. Con los radios de curvatura se emplea el mismo criterio. (Si el centro de curvatura está situado a la izquierda de la superficie el radio es negativo y si está situado a la derecha el radio es positivo).
- (d) Los ángulos de incidencia y refracción se consideran positivos si al llevar por giro el rayo a coincidir con la normal

Criterio de signos. Normas DIN

por el camino angular más corto se va en sentido horario y negativos en el caso contrario.

(e) Los ángulos formados con el eje se consideran positivos si al llevar por giro el rayo a coincidir con el eje por el camino angular más corto se va en sentido antihorario y negativos en el caso contrario.

(f) Las distancias perpendiculares al eje se consideran positivas hacia arriba y negativas hacia abajo.

Óptica paraxial: ecuaciones de correspondencia en sistemas centrados

Óptica paraxial: ecuaciones de correspondencia en sistemas centrados

Ecuaciones generales (Figura 9)

Origen en los focos:

$$xx' = ff'$$

Origen en los puntos principales:

$$-\left(\frac{n}{s}\right) + \left(\frac{n'}{s'}\right) = \frac{n'}{f'}$$

Aumento axial:

$$s' = \frac{\Delta x'}{\Delta x}$$

Aumento lateral:

$$\beta' = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{x} = -\frac{f}{s-f} = -\frac{x'}{f'} = -\frac{s'-f'}{f'} = \frac{ns'}{n's}$$

Aumento angular:

$$\gamma' = \frac{\omega'}{\omega}$$

Relación entre aumentos:

$$\alpha' = \frac{n'}{n} \beta'^2 ; \quad \beta' = \gamma' \alpha'$$

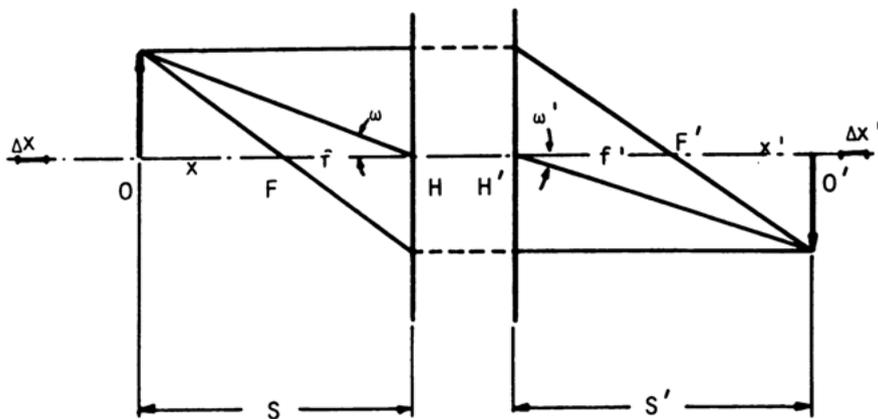


Figura 9

Óptica paraxial: ecuaciones de correspondencia en sistemas centrados

Sistemas compuestos

$$e = H'_1 H_2 \text{ (Distancia de acoplamiento)}$$

$$f' = - \frac{f'_1 f'_2}{e - f'_1 + f_2}$$

$$f = \frac{f_1 f_2}{e - f'_1 + f_2}$$

$$f = - \frac{n}{n'} f'$$

$$H_1 H = \frac{e f_1}{e - f'_1 + f_2}$$

$$H'_2 H' = \frac{e f'_2}{e - f'_1 + f_2}$$

$$H_1 F = \frac{f_1 (f_2 + e)}{e - f'_1 + f_2}$$

$$H'_2 F' = \frac{f'_2 (e - f'_1)}{e - f'_1 + f_2}$$

$$P = P_1 + P_2 - \frac{e P_1 P_2}{n'_1}$$

Sistemas sumergidos en un mismo medio de índice n .(Figura 10)

$$f' = \frac{f_1' f_2'}{f_1' + f_2' - e}$$

$$H_1 H = \frac{e f_1'}{f_1' + f_2' - e}$$

$$H_2' H' = - \frac{e f_2'}{f_1' + f_2' - e}$$

$$H_1 F = \frac{f_1' (e - f_2')}{f_1' + f_2' - e}$$

$$H_2' F' = \frac{f_2' (f_1' - e)}{f_1' + f_2' - e}$$

$$P = P_1 + P_2 - \frac{e P_1 P_2}{n}$$

Óptica paraxial: ecuaciones de correspondencia en sistemas centrados

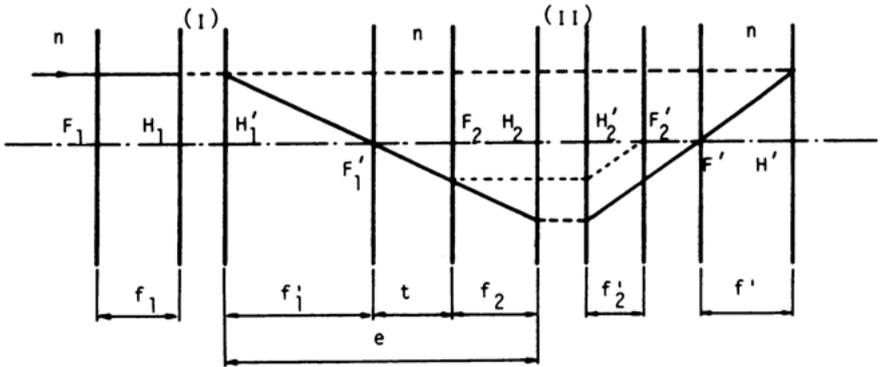


Figura 10

Caso particular: Lentes de espesor d en aire (Figura 11)

$$d = H_1' H_2$$

$$\frac{1}{f'} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{(n - 1)^2 d}{n R_1 R_2}$$

$$H_2' H' = - \frac{(n - 1) f' d}{n R_1} = \frac{R_2 d}{n (R_1 - R_2) - (n - 1) d} = - \frac{f' d}{f_1'}$$

$$H_1 H = - \frac{(n - 1) f' d}{n R_2} = \frac{R_1 d}{n (R_1 - R_2) - (n - 1) d} = \frac{f' d}{n f_2'}$$

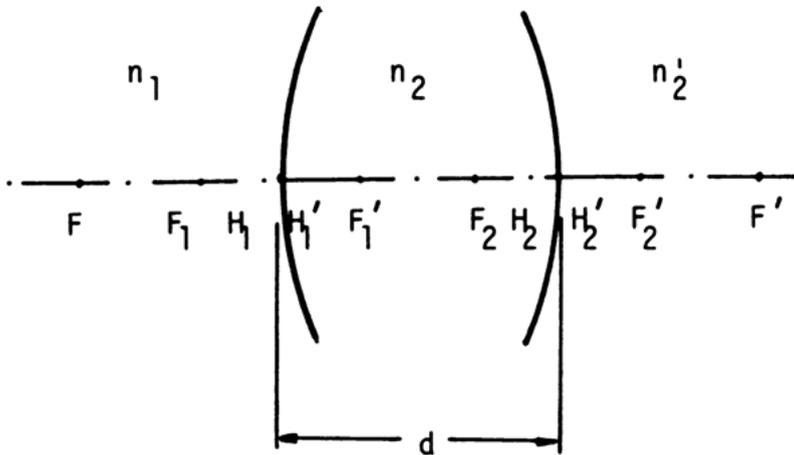


Figura 11

Óptica paraxial: ecuaciones de correspondencia en sistemas centrados

Invariante de Abbe (Figura 12)

$$n \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{s} \right) = n' \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{s'} \right)$$

* Superficie plana refractante: $s' = \frac{n'}{n} s$

* Espejo esférico: $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{r}$

* Espejo plano: $s' = s$

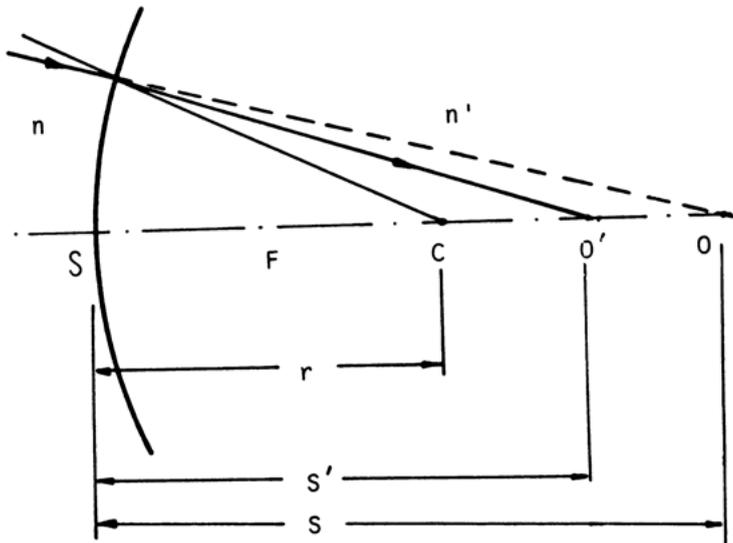


Figura 12

Prácticas

Práctica 1

Medida de los radios de curvatura de una lente con el esferómetro

Material: Lentes, Esferómetro, Superficie plana patrón y Pie de rey.

Para determinar el valor de los radios de curvatura de las dos superficies que forman la lente, vamos a emplear un instrumento denominado esferómetro.

El esferómetro permite medir los radios R_1 y R_2 de una lente con gran precisión. Consta fundamentalmente de un tornillo micrométrico T (figura 1.1), que se desliza verticalmente; de tres pies fijos P, y de una escala vertical E, en mm. El tornillo T, cuyo paso de rosca es de 0.5 mm, lleva solidario un disco, denominado escala circular C, cuyo borde está dividido en n partes iguales.

Prácticas

La lectura de cualquier valor se realiza añadiendo al número de medios milímetros a , que indica la escala E, el número de divisiones b de la escala C, que coincide con el trazo horizontal de la escala E, de modo que:

$$\text{Medida: } a + (0.5/n)b$$

Primeramente se debe comprobar el error de cero del aparato, lo que se hace colocando el esferómetro sobre una superficie plana patrón y descendiendo el tornillo T hasta que su punta de medida apoye en dicha superficie.

Comprobamos entonces que el cero de la escala vertical y el cero de la circular coinciden. En caso contrario, se anota el valor obtenido para sumar o restar a las lecturas, según los casos.

Se empieza midiendo el valor del segmento h , figura 1.2. Para realizar su medida, inicialmente se desplaza el tornillo T hacia arriba en la escala vertical E.

Seguidamente se coloca el esferómetro sobre la lente, en la parte central, y se baja el tornillo hasta que la punta toque la superficie de la lente; leyendo directamente obtenemos el valor de h .

De la figura 1.2 se deduce:

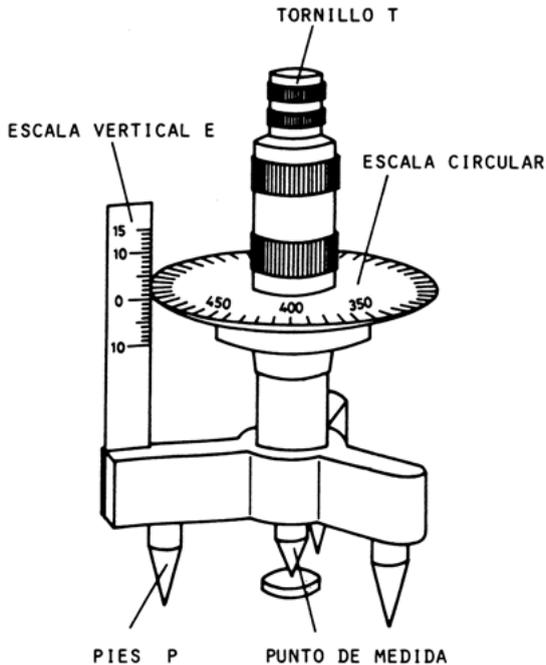


Figura 1.1

$$r^2 + (R - h)^2 = R^2$$

siendo r , como se ve en la figura 1.3, el radio de la circunferencia determinada por los tres pies P del esferómetro.

Para calcular el valor de r se sitúan los pies P sobre un papel y se miden con ayuda del pie de rey los tres lados l_1, l_2, l_3 del triángulo que se forma. El valor de r se deduce que es:

Prácticas

$$r = l/(3)^{1/2}$$

siendo l el valor medio de los valores l_1, l_2, l_3 medidos.

como:

$$l^2/3 + (R - h)^2 = R^2$$

de la que despejando, se obtiene para R el valor:

$$R = (l^2 + 3h^2)/6h$$

En el caso en el cual $h \ll R$, la ecuación anterior se puede aproximar con bastante precisión a:

$$R \approx l^2/6h$$

Determinar los radios de curvatura de las lentes a estudiar.

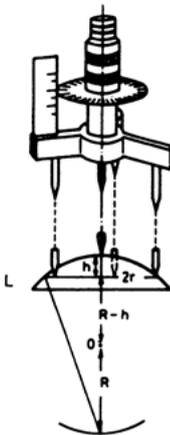


Figura 1.2

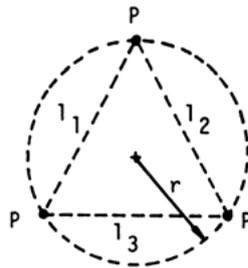


Figura 1.3

Práctica 2

Medida del espesor de una lente planoconvexa gruesa

Material: Lente planoconvexa gruesa, Esferómetro, Superficie plana patrón y Pie de rey.

Los cálculos de parámetros de las lentes, tales como focales, planos principales, etc..., varían según sean las lentes delgadas o gruesas. Para los cálculos con estas últimas hay que tomar en consideración su espesor.

El espesor de una lente planoconvexa se mide en su centro y corresponde a la distancia d que se muestra en la figura 2.1. Es decir:

$$d = d_B + d_e$$

siendo d_B el espesor del sustrato en el borde de la lente y d_e el espesor del casquete esférico en el centro de la lente.

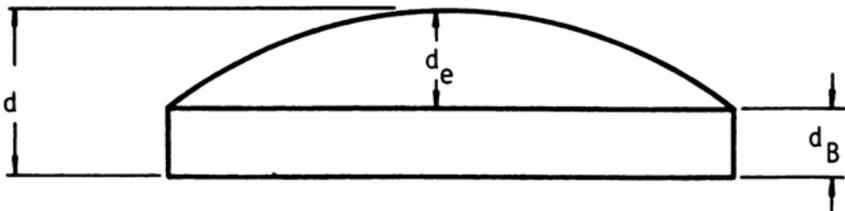


Figura 2.1

Prácticas

En primer lugar es necesario determinar el espesor del casquete esférico de lente problema, es decir d_e . Teniendo en cuenta que este parámetro está relacionado con un casquete planoconvexo, fijándonos en la figura 2.2, se obtienen las siguientes igualdades:

$$(2R - d_e)^2 + r^2 = l_2^2$$

$$r^2 + d^2 = l_1^2$$

$$l_1^2 + l_2^2 = (2R)^2$$

Operando se tiene:

$$d_e^2 - 2Rd_e + r^2 = 0$$

donde los valores de R y r corresponden a los radios de curvatura y del marco exterior de la lente respectivamente, que se miden, el primero con el esferómetro (práctica 1), y el segundo con el pie de rey.

De la última expresión se obtiene como valor para d_e :

$$d_e = R - \sqrt{R^2 - r^2}$$

Determinar el grosor d para una lente planoconvexa, conociendo el valor de d_B .

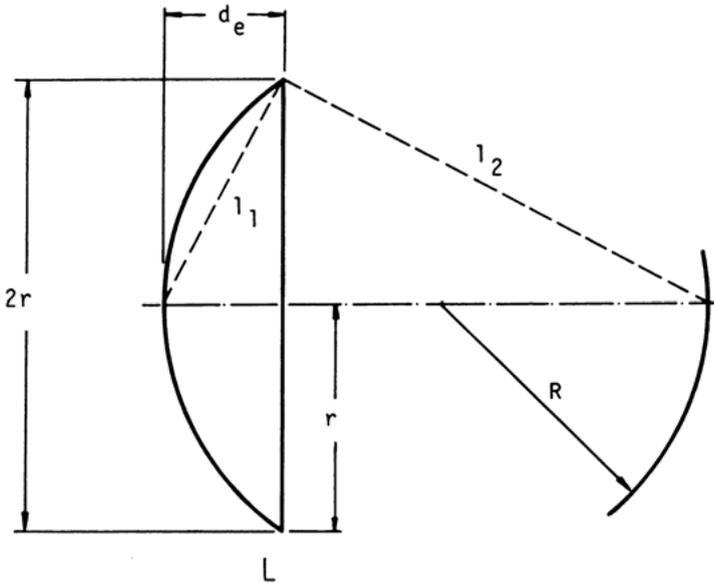


Figura 2.2

Práctica 3

Medida del índice de refracción de una lámina de vidrio con el microscopio

Material: Microscopio, Pie de rey, Tornillo micrométrico y Láminas de vidrio.

Vamos a calcular el índice de refracción de una lámina de vidrio midiendo su espesor real y su espesor aparente observado a través de un microscopio.

Prácticas

Si miramos un objeto determinado, primero de manera directa y luego, perpendicularmente, a través de una lámina transparente, de caras planas y paralelas, observamos en el segundo caso que el objeto parece hallarse más elevado que en el primero.

La luz al pasar de un medio a otro cambia su velocidad y dirección según la ley de Snell:

$$n_1 \text{sen } i = n_2 \text{sen } r$$

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción absolutos de ambos medios y r e i , los ángulos de refracción e incidencia.

Sea A un punto luminoso de la segunda superficie (figura 3.1), del que parten los rayos AO y AB. Según los rayos luminosos emergentes, la posición aparente de A será A'. Como la primera superficie separa el aire del vidrio de la lámina, se tiene que $n_1 = n$ y $n_2 = 1$ con lo cual obtenemos que:

$$n = \text{sen } r / \text{sen } i = (OB/A' B)/(OB/AB) = AB/A' B$$

Si consideramos los ángulos i , y r , muy pequeños se puede escribir:

$$AB/A' B = AO/A' O$$

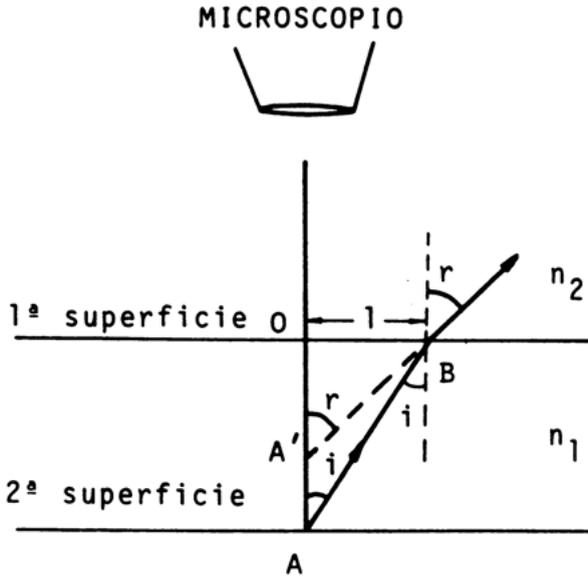


Figura 3.1

lo que coincide, si miramos a través de la lámina en dirección normal, con el cociente entre el espesor real AO y el espesor aparente A'O.

Por lo tanto:

$$n = AO/A'O = \text{espesor real} / \text{espesor aparente}$$

Para medir A'O, se dibujan señales en ambas caras de la lámina. Una vez fijada la lámina a la platina, se enfoca la señal

Prácticas

de la cara superior y se mide la posición de la platina respecto a una referencia fija, utilizando para ello un pie de rey. Sin mover la lámina se enfoca ahora la cara inferior, midiendo de nuevo la posición de la platina respecto a la misma referencia anterior. La diferencia de longitudes proporciona el valor del espesor aparente.

Al medir las distancias se debe tomar la precaución de que la imagen no se desenfoque al presionar con el pie de rey sobre la platina.

El espesor real AO se mide directamente con ayuda del tornillo micrométrico.

El objetivo más adecuado para realizar la experiencia, será el de mayor potencia (menor profundidad de campo), que nos permitirá un enfoque más preciso, siempre que se pueda acercar lo suficiente para enfocar la señal de la cara inferior.

Calcular el índice de refracción n para distintas láminas de vidrio.

Práctica 4

Medida del índice de refracción de un prisma

Material: Prisma, Glicerina, Papel milimetrado, Regla, Transportador de ángulos y Alfileres.

Un prisma es un medio de índice n limitado por dos superficies planas que forman un ángulo α .

Para hallar el índice de refracción de un prisma nos basaremos en la marcha de un rayo cualquiera que entre en el prisma por una de sus caras. El rayo que haremos incidir en el prisma, lo definiremos mediante dos puntos ya que dos puntos definen una recta.

El rayo incidente PQ (figura 4.1), sufre dos refracciones y emerge del prisma desviándose un ángulo δ respecto a la dirección incidente. La desviación δ depende del ángulo de incidencia, i , de forma que hay un rayo particular para el cual la desviación es mínima, δ_{\min} .

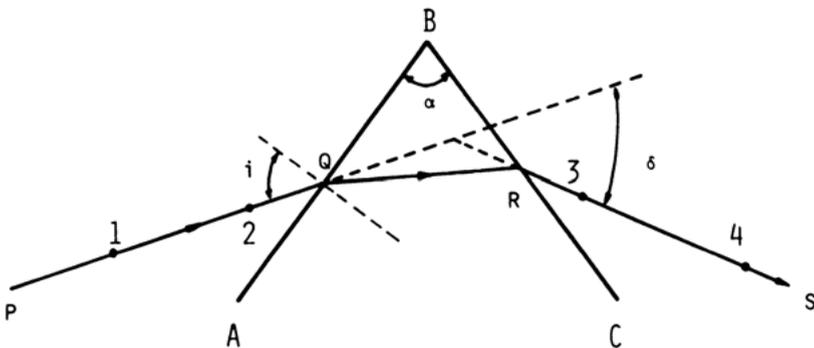


Figura 4.1

Prácticas

El índice de refracción de un prisma se puede escribir:

$$n = [\text{sen } 1/2 (\delta_{\text{min}} + \alpha)] / \text{sen } 1/2 \alpha$$

La práctica consiste en determinar el índice de refracción de la glicerina. Se trabaja con un prisma hueco. En su interior se deposita el líquido cuyo índice se quiere medir (en este caso glicerina).

El índice de refracción se tiene al medir los ángulos α y δ_{min} , y sustituir su valor en la expresión anterior.

Para determinar el valor de δ_{min} y del ángulo de refringencia α , operamos de la forma siguiente, haciendo un estudio de la variación de la desviación δ con el ángulo de incidencia:

1° Se coloca el prisma con su arista normal a una hoja de papel milimetrado. Con un lápiz de punta fina se traza el ángulo plano ABC correspondiente al diedro que forman las caras. Prolongando estas líneas, podemos medir con un transportador el ángulo α del diedro.

2° Se quita el prisma y desde un punto cualquiera de la línea AB se dibuja una recta PQ. Entonces se clavan en ella dos alfileres 1 y 2 normales al papel; uno próximo a la cara del prisma y el otro a unos 10 cm.

Prácticas de óptica geométrica y radiométrica

3° Se coloca de nuevo el prisma ajustándolo a las líneas AB y BC y se mira desde la cara BC de modo que se vean superpuestas las imágenes de los dos alfileres 1 y 2 (que determinan el rayo incidente). Se clavan otros dos alfileres 3 y 4; alineados aparentemente con los anteriores uno cerca de la cara emergente y el otro a unos 10 cm. Los puntos correspondientes a los alfileres 3 y 4 determinan el rayo emergente.

4° Se quita nuevamente el prisma, se prolonga la recta PQ y se traza la recta RS que une los puntos 3 y 4. El ángulo de desviación δ se mide con la ayuda de un transportador.

La experiencia se repite para varios ángulos de incidencia. Se recomienda hacer el estudio para ángulos comprendidos entre 35° y 70° (con intervalos de 5°).

De la representación gráfica en papel milimetrado de $\delta = f(i)$, se obtiene δ_{\min} que, junto con el valor medido de a permite determinar el índice de refracción n que vamos buscando, a partir de la ecuación correspondiente.

Práctica 5

Abertura numérica de un objetivo de microscopio

Material: Microscopio, Papel milimetrado, Pie de rey, Chapa con orificio, Soporte para el papel milimetrado.

Prácticas

La calidad de un microscopio no sólo viene definida por el aumento que produce, aumento que está determinado por consideraciones de óptica geométrica y que teóricamente puede hacerse tan grande como se quiera. Además hay que tener en cuenta que la finalidad esencial del microscopio es poner de manifiesto estructuras que no son visibles a simple vista.

Según Abbe, la distancia mínima que puede existir entre dos puntos objeto para que sean resolubles es:

$$d = \lambda / (n \cdot \text{sen } \beta)$$

donde λ es la longitud de onda de la luz empleada, n el índice de refracción del medio que hay entre el objeto y el objetivo, y β el ángulo de semiapertura del cono de luz que parte de un punto objeto y consigue penetrar en el objetivo (Figura 5.1).

Al producto $n \cdot \text{sen } \beta$ le llama apertura numérica del objetivo y da una medida del poder resolutivo.

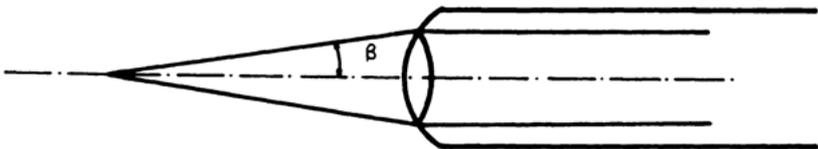


Figura 5.1

Si el medio de separación es el aire, $n = 1$, la abertura numérica se escribe:

$$A = \sin \beta$$

En la figura 5.2 se muestra de forma esquemática un procedimiento que permite calcular la abertura numérica de un objetivo.

AB representa una escala horizontal milimetrada, siendo C un pequeño diafragma, situado en el centro del campo visual, el cual representa un punto objeto axial.

Se comienza enfocando el pequeño orificio realizado en una chapa metálica, C. A continuación se coloca el papel milimetrado a una distancia D, de la chapa metálica tal y como se indica en la figura 5.2, de manera que el tubo del microscopio se dirija al centro de la escala.

Se apaga y se quita el dispositivo de iluminación, se quita el ocular, y mirando a través del tubo se mide L, máxima longitud observada en la escala horizontal AB.

Con ayuda del pie de rey se mide la distancia entre la platina y la escala, es decir D, que se calcula al medirla distancia entre la platina y una referencia fija, y la distancia entre el papel milimetrado y la misma referencia fija.

Prácticas

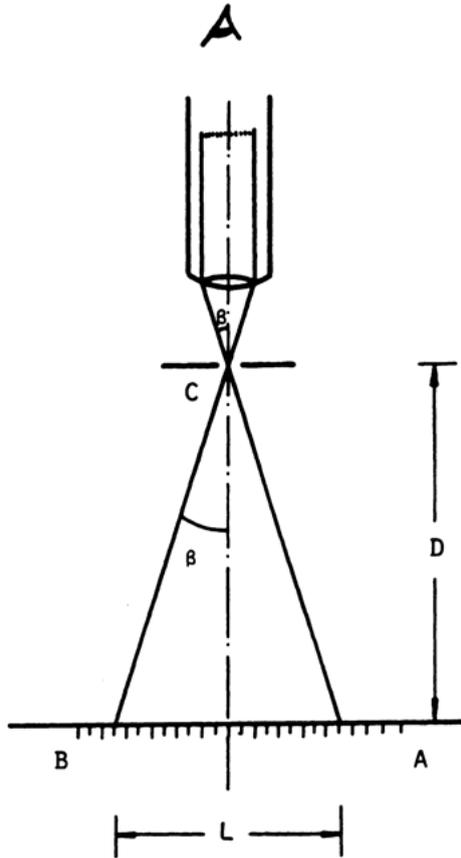


Figura 5.2

Con estos datos y según relaciones trigonométricas conocidas, se tiene:

$$\operatorname{tg} \beta = L/2D; A = \operatorname{sen} \beta = \operatorname{tg} \beta / \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta}$$

o bien

$$A = \operatorname{sen} \beta = L / \sqrt{4D^2 + L^2}$$

Calcular la abertura numérica del objetivo de 10X. Comparar el valor obtenido con el valor que aparece en dicho objetivo.

Práctica 6

Cálculo de la focal de una lente convergente I: procedimiento de Gauss

Material: Banco óptico, Soportes, Fuente de iluminación, Objeto, Lentes delgadas y Pantalla.

Vamos a determinar la focal de una lente, midiendo las distancias objeto s , e imagen s' .

El procedimiento de Gauss para la determinación de la distancia focal f' de una lente convergente, consiste en medir la distancia objeto s , y la distancia imagen s' para calcular f' a través de la expresión:

$$-1/s + 1/s' = 1/f'$$

de donde

$$f' = s \cdot s' / (s - s')$$

Prácticas

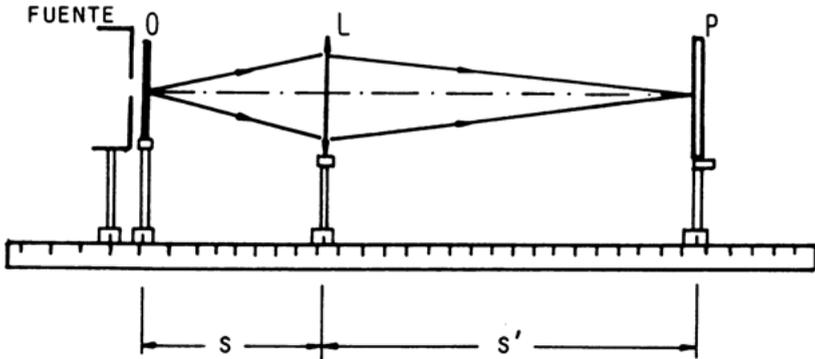


Figura 6.1

Utilizamos un banco óptico provisto de una escala graduada en milímetros. En un extremo de la escala se sitúa el objeto, O. La lente L, que se ha de examinar, se coloca en su montura sobre uno de los soportes para deslizarla a lo largo del banco óptico. La imagen se recoge sobre una pantalla, P, (ver figura 6.1).

Si delante de una lente convergente, se coloca un objeto luminoso a una distancia s , mayor que su distancia focal f' , ésta forma una imagen real e invertida del objeto a una distancia s' . Para medir la focal de la lente dada, se ilumina un objeto y se obtiene su imagen a través de la lente. Deslizándose la pantalla, se busca la posición en que la imagen se observa con nitidez. Si no se encuentra esta posición hay que alejar más

la lente del objeto y volver a buscar la imagen. Las distancias se leen sobre el banco óptico.

Para obtener el resultado correcto hay que tener en cuenta el signo de cada una de las distancias.

Considerando que los rayos siempre inciden en la lente de izquierda a derecha y que el origen de coordenadas está en el centro óptico de la lente se tiene:

$$S < 0 \text{ y } s' > 0$$

lo que dará lugar a una focal positiva.

Medir s y s' para tres posiciones distintas del objeto. Calcular los tres valores de f' y el correspondiente valor medio.

Una vez determinada la focal media, calcular la potencia de la lente:

$$\text{POTENCIA (dioptrías)} = 1/f' \text{ (metros)}$$

Práctica 7

Cálculo de la focal de una lente convergente II: procedimiento de Bessel

Material: Banco óptico, Fuente de iluminación, Soportes, Objeto, Lentes y Pantalla.

Prácticas

Este procedimiento para obtener el valor de la focal de una lente convergente consiste en situar objeto y pantalla fijos, a una distancia tal que desplazando la lente entre ellos se obtengan dos imágenes reales.

Si situamos la pantalla a una distancia mayor de $4f'$ con respecto al objeto, encontramos que existen dos posiciones de la lente para las cuales resulta una imagen real. Cuando la distancia del objeto a la lente s_1 , es menor que la distancia de la lente a la imagen obtenida s'_1 , es decir cuando

$$|s_1| < |s'_1|$$

la imagen aparece aumentada, (figura 7.1), y cuando

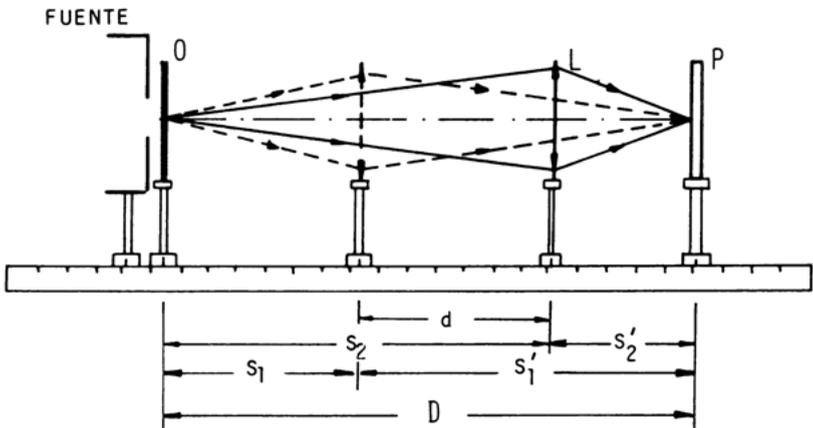


Figura 7.1

$$|S_2| > |s'_2|$$

la imagen aparece reducida.

Ambas posiciones de la lente son simétricas respecto a la mitad de la distancia entre el objeto y la pantalla. Es decir si D es la distancia entre objeto y pantalla se tendrá que en los dos casos, figura 7.1:

$$|s| + |s'| = D$$

Por otra parte la diferencia entre estas dos posiciones, d , puede leerse directamente de la escala que viene en el banco óptico, con lo que tendremos:

$$|s_2| - |s_1| = d \text{ o } |s'_1| - |s'_2| = d$$

Introduciendo estas dos expresiones en la fórmula gaussiana que nos relaciona s , s' , y f' , y teniendo en cuenta la simetría de las dos posiciones de la lente, nos quedará f' en función de las distancias D y d :

$$f' = (D^2 - d^2)/4D$$

Fijar la distancia D entre objeto y pantalla y medir el desplazamiento d sufrido por la lente al pasar de una posición a otra. Obtener el valor de f' para tres valores diferentes de D y d . Calcular finalmente el valor de f' media.

Prácticas

Una vez determinada la focal media de la lente calcular su potencia:

$$\text{POTENCIA (dioptrías)} = 1/f' \text{ (metros)}$$

Práctica 8

Cálculo de la focal de una lente convergente III: procedimiento del aumento de Abbe

Material: Banco óptico, Fuente de iluminación, Soportes, Objeto, Lentes y Pantalla.

Este procedimiento consiste en determinar la focal de una lente convergente con ayuda de la medida de los aumentos que produce dicha lente.

Si se coloca en el banco óptico una lente L, un objeto O debidamente iluminado y una pantalla P, tal y como aparece en la figura 8.1, se podrá medir el tamaño de la imagen O'. De esta manera, y puesto que el objeto es de dimensiones conocidas, se puede calcular el aumento a través de la expresión:

$$\beta'_1 = y'_1/y_1$$

A continuación desplazamos O, una distancia l, y se determina de nuevo el aumento, en este caso β'_2 , sin haber desplazado la lente. Empleando la ecuación de Gauss para las dos posiciones del objeto:

$$-1/s_1 + 1/s'_1 = 1/f'$$

$$-1/s_2 + 1/s'_2 = 1/f'$$

expresándolas en función de los aumentos β'_1 y β'_2 y siendo l la distancia que se desplaza el objeto al pasar de la primera a la segunda posición, es decir:

$$l = s_1 - s_2$$

podemos tener una relación entre la focal de una lente convergente, los aumentos que produce para dos posiciones y la distancia l que hemos desplazado el objeto al pasar de la primera posición a la segunda, o lo que es lo mismo:

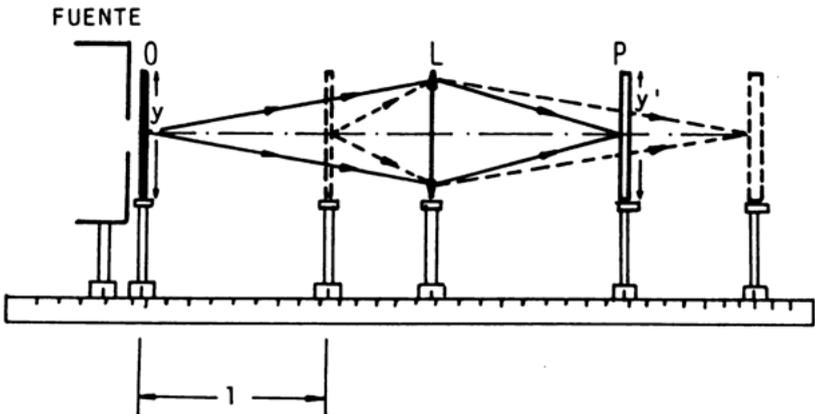


Figura 8.1

Prácticas

$$f' = 1/[(1/\beta'_1) - (1/\beta'_2)]$$

Este método da la distancia focal en su estricto sentido. Basándose en esta teoría, Abbe construyó un focómetro para lentes muy curvadas.

Calcular f' para tres desplazamientos diferentes del objeto. Dando el valor de f' medio.

Una vez determinada la focal media de la lente calcular también su potencia:

$$\text{POTENCIA (dioptrías)} = 1/f' \text{ (metros)}$$

Práctica 9

Cálculo de la focal de una lente convergente IV

Material: Banco óptico, Fuente de iluminación, Objeto, Soportes, Lentes y Pantalla.

Un método para calcular la focal de una lente convergente es el de hacer incidir sobre dicha lente, un haz de luz paralelo.

Cuando se quiere conseguir un haz de luz paralelo, es necesario colocar la fuente luminosa en el foco objeto de una lente convergente C, como muestra la figura 9.1, de forma que, los rayos, al emerger de ella, lo harán paralelamente al eje óptico. A esta lente convergente C se la denomina colimador.

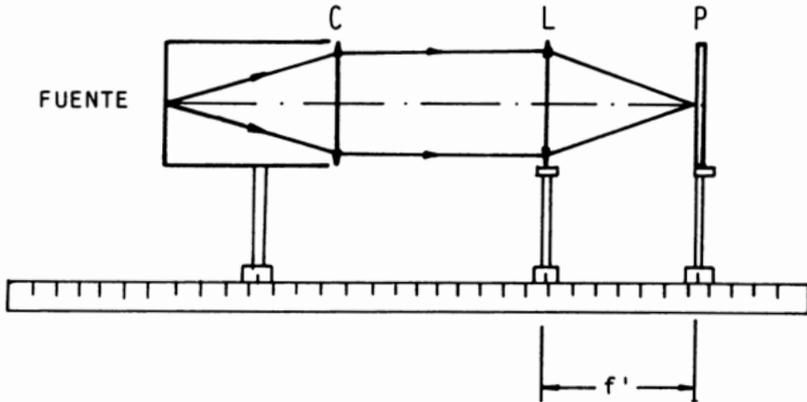


Figura 9.1

Una vez obtenido este haz de rayos paralelos, lo hacemos incidir sobre una segunda lente convergente, en este caso sobre la lente problema L; ésta focalizará dicho haz en su punto focal imagen, es decir a una distancia f' de la lente.

Si disponemos de un banco óptico, sobre el que situar los siguientes elementos: la fuente de iluminación, el objeto O que ha de ser puntual, el colimador C que nos permitirá obtener un haz de rayos paralelos de dicho objeto, la lente problema L y, por último, una pantalla P para observar la imagen del objeto dada por la lente problema. Entonces se podrá calcular la focal de la lente L, simplemente con la medida de la distancia desde dicha lente L, a la pantalla P.

producida por los rayos reflejados en el espejo sea nítida y se forme, de igual tamaño, junto al objeto.

En este caso los rayos procedentes de O llegan a la lente con distintas direcciones y emergen de ella paralelos; como tales se proyectan y reflejan en el espejo, y por último son reunidos en una imagen de igual tamaño junto al objeto.

A continuación se mide la distancia de la lente al objeto, siendo ésta la distancia focal f' que buscamos.

Práctica 11

Cálculo de la focal de una lente convergente VI: método de Silvermann

Material: Banco óptico, Fuente de iluminación, Objeto, Sopor-tes, Lente y Pantalla.

El método de Silvermann permite calcular f' midiendo la distancia entre planos antiprincipales.

Los planos antiprincipales son planos similares a los principales. Se caracterizan por producir un aumento -1 . Están dispuestos simétricamente respecto de la lente, es decir, existe la misma distancia de objeto a lente que de lente a imagen (suponiendo siempre lentes delgadas).

Prácticas

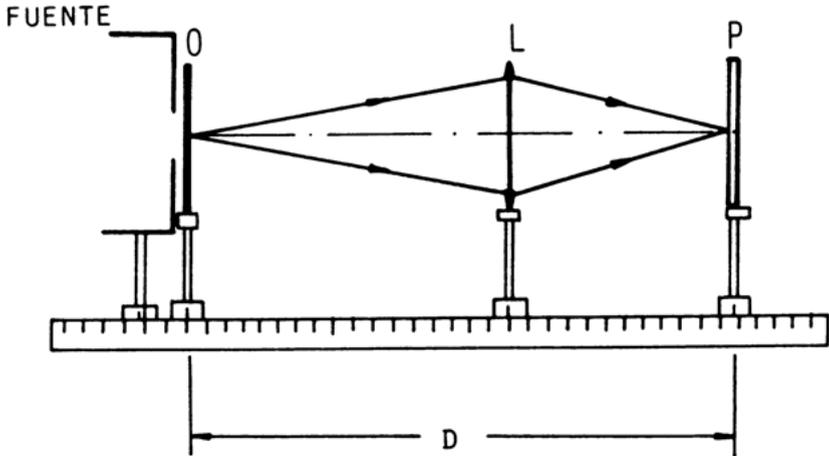


Figura 11.1

Para calcularla focal de una lente convergente a través de este método, hay que situar sobre un banco óptico, un objeto, una pantalla y una lente entre ambos (figura 11.1).

A continuación dejando fijo el objeto, se desplazan lente y pantalla, hasta que se consiga sobre ésta, una imagen del mismo tamaño que el objeto, pero invertida. En este caso, objeto e imagen coinciden con los planos antiprincipales.

Sabemos que la distancia de un plano principal a su plano antiprincipal respectivo es el doble de la focal. Así, al considerar la lente problema como delgada, de forma que H y H'

están confundidos en uno solo, la distancia del plano antiprincipal objeto h al plano antiprincipal imagen h' será:

$$hH + H'h' = 2f' + 2f' = 4f' = D$$

Midiendo la distancia D entre objeto e imagen y dividiéndola por 4, obtendremos la focal imagen de la lente problema.

Esta distancia D recibe el nombre de distancia mínima. Se trata de la menor distancia posible que separa h y h' , ya que H y H' coinciden, al estar considerando lentes delgadas.

Cuando se trata de lentes gruesas hay que tener en cuenta la distancia entre planos principales.

Para iniciarla búsqueda de los planos antiprincipales de la lente problema, es conveniente que se empiece situando el objeto y la pantalla en los extremos del banco. Si al desplazar la lente L , entre ellos no se encuentran los planos antiprincipales, se disminuirá la distancia entre O y P , desplazando de nuevo la lente L , entre ellos. Esto se repetirá sucesivamente hasta obtener una imagen de O de igual tamaño e invertida.

Repetir el cálculo de f' tres veces, obteniendo finalmente el valor f' medio. Una vez determinada la focal media de la lente calcular su potencia:

$$\text{POTENCIA (dioptrías)} = 1/f' \text{ (metros)}$$

Práctica 12

Cálculo de la focal de una lente convergente VII: método gráfico

Material: Banco óptico, Fuente de iluminación, Objeto, Lentes y Pantalla.

Se quiere calcular la distancia focal f' , de una lente convergente a través de un método gráfico, midiendo las distancias objeto s , e imagen s' .

Se dispone, sobre un banco óptico, un objeto O iluminado y a continuación una lente L , a una distancia del objeto mayor que su distancia focal. La imagen de dicho objeto a través de la lente, siempre y cuando se trate de una lente convergente, puede recogerse en una pantalla P .

Si situamos los elementos, tal y como aparecen en la figura 12.1, se podrán medir para diferentes distancias objeto s , las correspondientes distancias imagen s' .

Se representa ahora sobre un papel milimetrado, en abcisas, los valores de las distancias objeto s , y en ordenadas los valores de las distancias imagen s' . A continuación se unen por medio de una recta los valores de s y s' , que se corresponden. Con lo cual se tendrá tantas rectas como posiciones del objeto en el banco óptico.

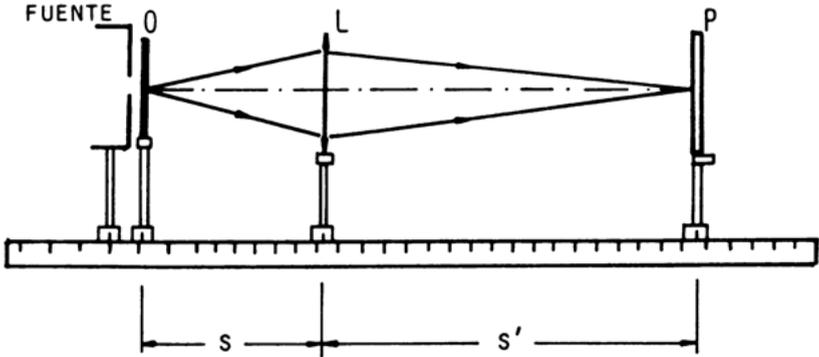


Figura 12.1

Todas estas rectas se cortan en un punto P. A partir de dicho punto se trazan perpendiculares que corten a los ejes, formándose un cuadrado, como se ve en la figura 12.2, y cuyo lado será la focal de la lente problema.

La comprobación teórica de este método se puede realizar a partir de la fórmula de Gauss:

$$-(1/s) + 1/s' = 1/f'$$

multiplicando por $-s$ y despejando $-(s/s')$,

$$-(s/s') = (-s - f')/f'$$

multiplicando ahora en la fórmula de Gauss por s' y despejando $-(s/s')$,

Prácticas

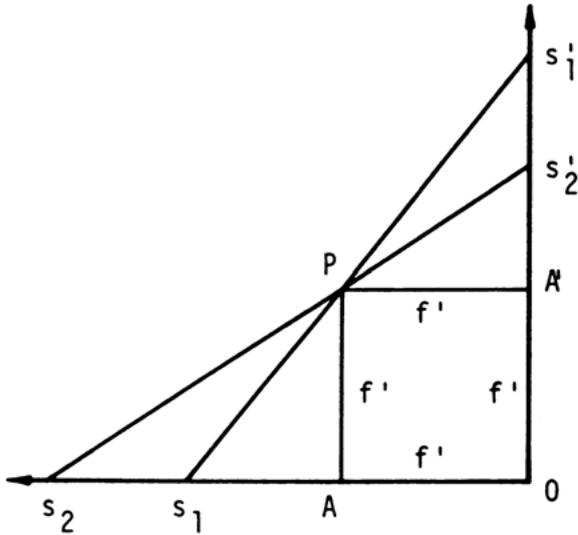


Figura 12.2

$$-(s/s') = f'/(s' - f')$$

con lo cual se tienen las siguientes igualdades:

$$(-s - f')/f' = f'/(s' - f') = -(s/s')$$

Como el objeto ha de encontrarse a una distancia de la lente mayor que su distancia focal, y el método es válido para lentes convergentes, se tiene que $s < 0$, $s' > 0$, y $f' > 0$ con lo cual al introducir los signos en las igualdades nos quedará lo siguiente:

$$(s - f')/f' = f'/(s' - f') = s/s'$$

De la gráfica de la figura 12.2, y teniendo en cuenta la semejanza entre los triángulos s'_iPA' y s_iAP puede deducirse las igualdades anteriores si se considera las distancias AP y $A'P$ iguales a la focal de la lente.

Medir s y s' para cinco posiciones diferentes del objeto respecto de la lente. Representar gráficamente los valores de s' frente a los valores de s y obtener de dicha gráfica el valor de f' .

Con este valor de f' determinar la potencia de la lente:

$$\text{POTENCIA (dioptrías)} = 1/f'(\text{metros})$$

Práctica 13

Cálculo de la focal de una lente divergente I: método indirecto

Material: Banco óptico, Fuente de iluminación, Objeto Soportes, Lente convergente, Lente divergente y Pantalla.

Para el cálculo de la focal de una lente divergente, se puede emplear el procedimiento de Gauss, midiendo las distancias objeto s e imagen s' .

Prácticas

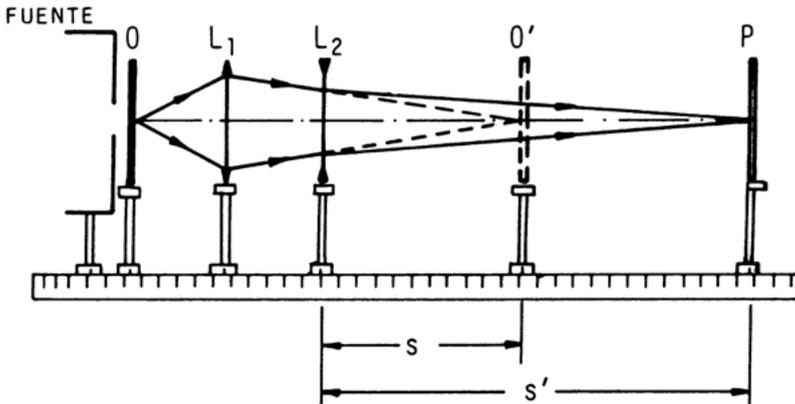


Figura 13.1

Si delante de una lente divergente se coloca un objeto luminoso, se formará una imagen virtual que no podremos recoger en una pantalla.

Para que la imagen sea real debemos colocar el objeto detrás de la lente. Esto se consigue utilizando una lente convergente auxiliar, cuya focal no es necesario que sea conocida.

En un extremo del banco óptico se coloca el objeto iluminado O, a una cierta distancia de éste se coloca la lente convergente L_1 , la cual dará una imagen de O, es decir O' .

La lente divergente L_2 la colocaremos entre la imagen O' que ahora será el objeto de L_2 , y la lente L_1 , como se ha dispuesto

en la figura 13.1. De esta manera obtendremos una imagen real que recogemos en la pantalla P.

A partir de la expresión que nos da la fórmula de Gauss, podemos conocer la focal de la lente:

$$-1/s + 1/s' = 1/f'$$

ya que s y s' pueden medirse directamente a partir de la escala que lleva el banco óptico.

La distancia s será la que hay entre la imagen formada por la lente convergente y la lente divergente, es decir distancia $O'L_2$, mientras que s' será la distancia entre la imagen recogida en la pantalla P y la lente divergente, es decir PL_2 .

Como el origen de coordenadas está ahora en la lente divergente y considerando que los rayos siempre inciden en la lente de izquierda a derecha se tendrá:

$$s > 0 \text{ y } s' > 0$$

lo que dará lugar a una focal negativa.

Calcular f' para tres valores distintos de s y s' . A continuación obtener el valor de f' medio.

Una vez determinada la focal media de la lente calcular su potencia:

$$\text{POTENCIA (dioptrías)} = 1/f' \text{ (metros)}$$

Práctica 14

Cálculo de la focal de una lente divergente II: método directo

Material: Banco óptico, Fuente de iluminación, Lentes convergentes, Lente divergente, Soportes y Pantalla.

Consideremos un haz de rayos paralelos de sección circular que inciden sobre una pantalla P, a la que ilumina en una superficie de diámetro d (figura 14.1). Si se intercala a distancia e de la pantalla una lente divergente L, los rayos que llegan a L paralelos, emergen de la lente divergente iluminando ahora otra superficie de diámetro d' , de modo que:

$$d' > d$$

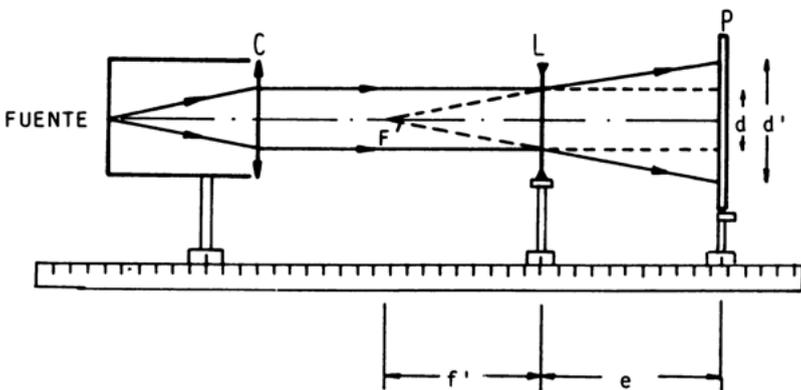


Figura 14.1

Los rayos aparecen como si procedieran de un punto F' , a igual distancia f' de la lente que el foco virtual.

De la figura 14.1, por semejanza de triángulos, se deduce:

$$(d'/d) = (e + |f'|)/|f'|$$

$$|f'| = e d/(d' - d)$$

Si se coloca la pantalla en el lugar adecuado para que el diámetro del círculo iluminado por los rayos emergentes sea doble del iluminado por los rayos paralelos sin intercalar la lente, se cumplirá que:

$$d' = 2d$$

y por tanto,

$$|f'| = e$$

En estas condiciones, la distancia focal es igual a la distancia de la pantalla a la lente.

Para conseguir un haz de rayos paralelos, colocaremos la fuente de iluminación en el foco de una lente convergente a la que denominamos colimador C, dado que Colima el haz (es decir lo convierte en paralelo).

Calcular el valor de f' , midiendo d' y d , de forma que $d' = 2d$, con lo cual entonces $|f'| = e$.

Práctica 15

Determinación de la distancia focal de un espejo cóncavo

Material: Banco óptico, Fuente de iluminación, Objeto, Soportes, Espejo cóncavo y Pantalla.

Para iluminarla retina y proceder a su examen, se utilizan espejos cóncavos especiales, perforados por su parte central. Los rayos de una lámpara situada lateralmente y junto a la cabeza del paciente, son proyectados sobre el objeto que se examina, al tiempo que se mira por el orificio y se enfoca el lugar iluminado, a veces con la ayuda de una lente.

La distancia focal del espejo cóncavo se determina de la siguiente manera: Si recordamos la expresión que nos relaciona la distancia del objeto al espejo, s , la distancia de la imagen al espejo, s' , y la focal f' , tendremos:

$$1/s + 1/s' = 1/f'$$

La distancia focal está relacionada con el radio de curvatura del espejo, $f' = R/2$, de manera que la ecuación anterior quedará:

$$1/s + 1/s' = 2/R$$

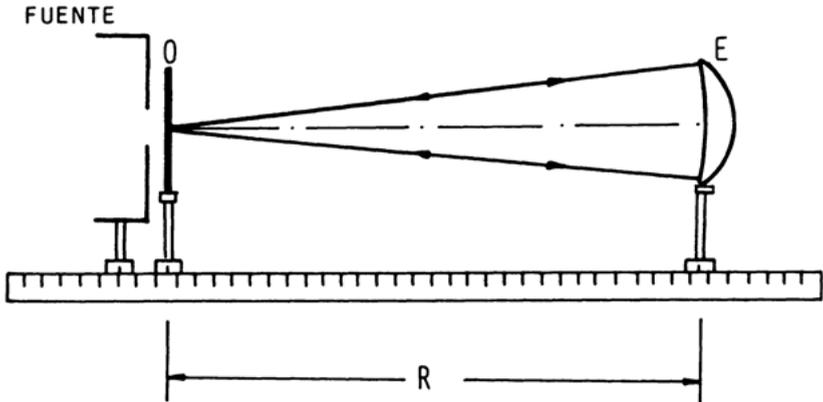


Figura 15.1

De esta expresión se deduce que si situamos el objeto a una distancia objeto del espejo igual al radio de curvatura del mismo, la imagen se encontrará en el mismo lugar que el objeto, es decir, situada en el centro de curvatura del espejo.

La experiencia consiste en disponer sobre un banco óptico la fuente de iluminación en un extremo del mismo, junto a ella se sitúa un objeto O y a continuación el espejo cóncavo E, tal y como aparece en la figura 15.1.

Seguidamente desplazamos el espejo hasta que la imagen se forma de igual tamaño junto al objeto. Midiendo la distancia R del espejo al objeto se podrá calcular la focal del mismo:

$$f' = R/2$$

Práctica 16

Índice de refracción y planos principales en una lente planoconvexa

Material: Lente planoconvexa gruesa, Esferómetro, Superficie plana patrón y Pie de rey.

En esta práctica se quiere caracterizar una lente planoconvexa por sus planos principales.

La lente a estudiar, es gruesa, es decir una lente cuyo espesor d no es despreciable. La distancia focal f' para una lente gruesa de índice de refracción n y radios de curvatura R_1 y R_2 se calcula con ayuda de la expresión:

$$1/f' = (n - 1) \left[(1/R_1) - (1/R_2) \right] + (n - 1)^2 d/nR_1 R_2$$

Por su parte para los planos principales tenemos las siguientes expresiones:

$$H_1 H = R_1 d / [n(R_2 - R_1) - (n-1)d]$$

$$H'_2 H' = R_2 d / [n(R_2 - R_1) - (n-1)d]$$

(a) Índice de Refracción

Para cualquier lente planoconvexa se cumple $R_1 = \infty$ y $R_2 = R$, con lo que la expresión anterior de la focal queda como:

$$1/f' = (n-1)/R$$

Conocida f' para la lente planoconvexa a estudiar, se puede determinar el índice de refracción como:

$$n = (R/f') + 1$$

(b) *Planos principales*

Conociendo los radios de curvatura de la lente planoconvexa, el índice de refracción, y el espesor de la lente, podremos determinar también, la posición de sus planos principales.

En una lente planoconvexa se cumple la relación de planos principales:

$$H_1H + HH' + H'H'_2 = d$$

de la que se puede obtener la distancia entre los planos principales HH' , conocidos H_1H y H'_2H' .

A partir de las ecuaciones anteriores para H_1H y H'_2H' y con la condición de que $R_1 = \infty$ por tratarse de una lente planoconvexa, se obtiene:

$$H_1H = d/n; H'_2H' = 0$$

Con estos valores, y teniendo en cuenta el convenio de signos, de la relación de planos principales, se obtiene:

$$HH' = d(n - 1)/n$$

Prácticas

1° Calcular para una lente planoconvexa gruesa, conocidos su radio de curvatura R y su distancia focal f' , el índice de refracción.

2° Determinar para la misma lente, conocido su espesor d la distancia entre planos principales.

3° Hacer un esquema indicando la posición de los planos principales en la lente planoconvexa gruesa.

4° ¿Cuál sería la expresión de H_1H y H'_2H' si consideramos la lente convexoplana?

Práctica 17

Lente esférica gruesa

Material: Banco óptico, Objeto, Matraz, Soportes, Fuente de iluminación, Pantalla y Espejo plano.

Se puede caracterizar una lente esférica gruesa por sus elementos cardinales.

Cuando se tiene en cuenta el espesor de una lente, ésta queda definida por la posición de dos planos, denominados principales, y que mantienen el aumento constante para sus puntos, siendo uno de ellos, imagen del otro. Las distancias deben entonces medirse desde estos planos principales.

Las ecuaciones que dan la posición de dichos planos son:

$$H_1H = R_1d/[n(R_2 - R_1) - (n-1)d]$$

$$H'_2H' = R_2d/[n(R_2 - R_1) - (n-1)d]$$

donde n es el índice de refracción de la lente, R_1 y R_2 son radios de curvatura y d su espesor, medido de vértice a vértice. Es posible calcular la posición de estos planos si conocemos los parámetros R_1 , R_2 , d y n .

Otra característica importante de una lente gruesa es su distancia focal. Cuando se trata de un sistema de espesor finito vendrá dada por la siguiente ecuación:

$$1/f' = (n - 1) (1/R_1 - R_2) + (n-1)^2d/nR_1R_2$$

que como podemos comprobar también es una función de n , R_1 , R_2 y d .

Se quiere calcular H_1H , H'_2H' y f' para lo cual emplearemos como lente gruesa un matraz lleno de agua, es decir, una lente esférica de índice de refracción $n=4/3$.

Los radios R_1 y R_2 , se miden con el esferómetro, y el espesor d , con un pie de rey; sustituyendo en las expresiones anteriores, se puede obtener el valor de la focal del sistema y la posición de los planos principales para una lente esférica, de estas características.

Prácticas

El valor de la focal puede ser comprobado, si medimos los segmentos focales, esto es, la distancia del foco a la superficie de la lente que, teóricamente, vienen dados por la ecuación:

$$s'_F = f'(1 - [(n - 1)d/nR_1])$$

Los segmentos focales se pueden medir mediante el método de autocolimación. Este consiste en situar la fuente de iluminación, en el foco objeto de la lente gruesa, de forma que la imagen de dicha fuente a través de la lente se forme en el infinito (figura 17.1). Dicho de otra forma, los haces que salen de la lente serán paralelos.

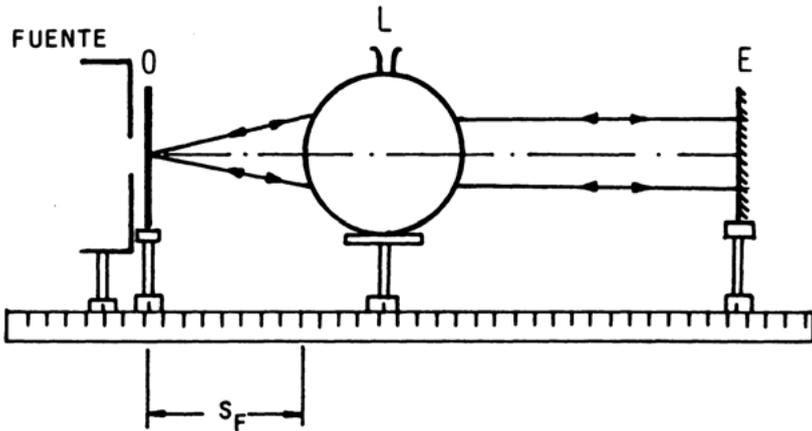


Figura 17.1

Prácticas de óptica geométrica y radiométrica

Si a continuación, situamos un espejo plano, los haces se reflejan en él volviendo de nuevo a la lente de manera que ahora la imagen final se obtendrá en el mismo lugar donde se encuentra el objeto.

Al disponer en el banco óptico la fuente de iluminación, la lente problema y el espejo, colocaremos delante de la fuente un orificio pequeño para trabajar con una fuente lo más puntual posible. El espejo lo situaremos fijo en una posición y la lente se desplazará entre la fuente y el espejo hasta que se produzca la autocolimación.

Finalmente se realizará un esquema de la disposición de los planos principales en la lente.

Práctica 18

Sistema de lentes I

Material: Banco óptico, Fuente de iluminación, Objeto Soportes, Lentes y Pantalla.

Vamos a determinar las características de un sistema óptico formado por dos o varias lentes, separadas una determinada distancia.

Las superficies de las lentes de gran potencia y, por tanto, de distancia focal muy pequeña, son de gran curvatura, presentando un alto grado de aberración cromática y esférica.

Prácticas

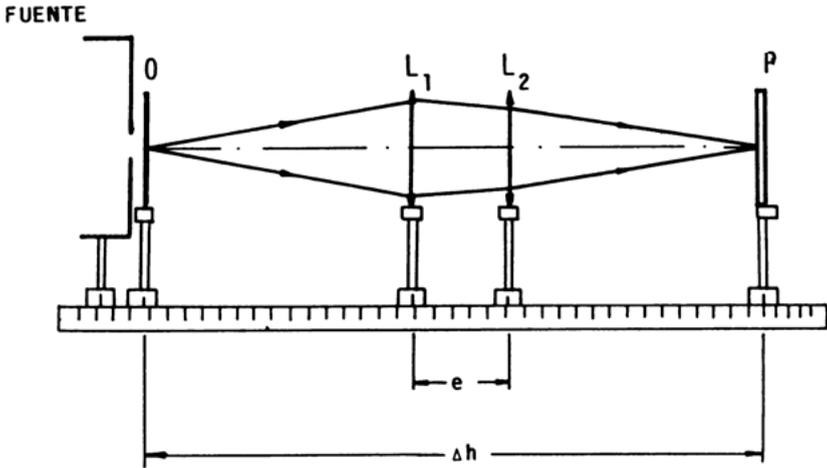


Figura 18.1

Por esto, en lugar de una lente de mucha curvatura se suele emplear un sistema de dos o más lentes de curvatura menor. Para su estudio práctico resulta más sencillo sustituirlas por un sistema equivalente que vendrá caracterizado por los planos principales y focales de dicho sistema.

Para determinar los elementos cardinales de un sistema de dos lentes delgadas, se procede de la siguiente forma: En primer lugar situamos las dos lentes en un banco óptico, separadas una distancia e , tal y como aparece en la figura 18.1

A continuación se ilumina un objeto O situado sobre un soporte y se busca su imagen a través del sistema de lentes,

Prácticas de óptica geométrica y radiométrica

mediante la pantalla P. Seguidamente se mueven objeto y pantalla hasta que la imagen que se obtiene sea de igual tamaño que el objeto aunque invertida. Es decir hasta que objeto e imagen se encuentren en los planos antiprincipales.

La distancia del plano antiprincipal objeto h , al plano antiprincipal imagen h' , se lee directamente en el banco óptico. La distancia entre planos antiprincipales $\Delta h = hh'$, se puede expresar como:

$$\Delta h = hh' = hH + HH' + H'h' \quad [1]$$

donde

$$hH = H'h' = 2f'$$

Las focales de las dos lentes que forman el sistema se pueden determinar empleando uno de los métodos ya conocidos para el cálculo de focales de lentes delgadas. Así conocidas estas focales f'_1 y f'_2 , se puede determinar la f' del sistema a través de la expresión:

$$f' = f'_1 f'_2 / [f'_1 + f'_2 - e] \quad [2]$$

Igualmente los valores de H_1H y H'_2H' para el sistema se pueden calcular de las correspondientes expresiones en función de f'_1 , f'_2 y e :

Prácticas

$$\begin{aligned}H_1H &= ef'_1/[f'_1 + f'_2 - e] \\ H'_2H' &= -ef'_2/[f'_1 + f'_2 - e]\end{aligned}\quad [3]$$

Determinar el valor de la distancia focal f' del sistema con ayuda de la ecuación [2].

Una vez determinado el valor de f' , calcular la potencia del sistema de lentes, que será:

$$\text{POTENCIA (dioptrías)} = 1/f' \text{ (metros)}$$

Conocida la distancia focal del sistema se puede obtener la distancia entre planos principales $\Delta H = HH'$ despejando su valor de la expresión [1].

Con estos datos, se puede hacer un esquema de la disposición de los planos principales y focales del sistema equivalente.

Comprobamos que efectivamente los valores de H_1H y H'_2H' que se obtienen en el esquema coinciden con los obtenidos a partir de las expresiones [3].

Práctica 19

Sistema de lentes II

Material: Banco óptico, Fuente de iluminación, Objeto, Soportes, Lentes delgadas, Pantalla.

Vamos a determinar la focal de un sistema de lentes delgadas, midiendo las distancias objeto s , e imagen s' .

En un sistema de lentes no pueden emplearse para determinar la distancia focal del sistema los mismos procedimientos utilizados en el caso de lentes delgadas aisladas. Esto se debe a desconocer la posición de los planos principales objeto e imagen, los cuales permiten saber a que punto del sistema han de referirse las distancias objeto e imagen.

Sin embargo en esta práctica se calculará la distancia focal de un sistema de lentes delgadas, situadas una inmediatamente después de la otra, mediante el procedimiento de Gauss. De esta forma, y dado que el sistema está constituido por lentes delgadas, puede suponerse que los planos princi-

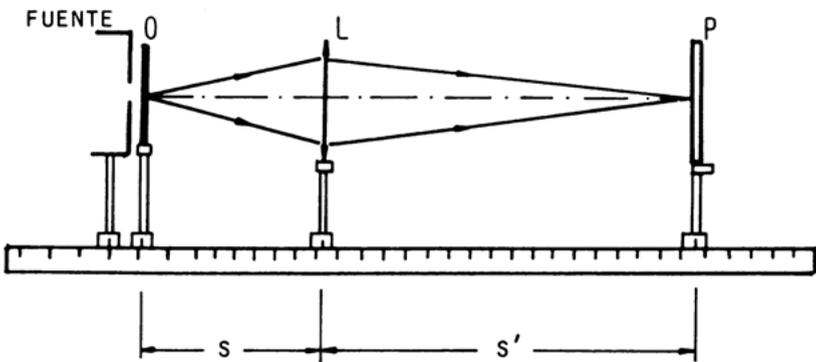


Figura 19.1

Prácticas

pales del sistema, coinciden y se encuentran situados sobre las lentes delgadas unidas.

Procedimiento de Gauss

Utilizamos un banco óptico provisto de una escala graduada en milímetros. En un extremo de la escala se sitúa el objeto, O. El sistema L, que se ha de examinar se coloca sobre una montura deslizable a lo largo del banco óptico. La imagen se recoge sobre una pantalla P (figura 19.1).

Si delante de un sistema convergente, se coloca un objeto luminoso a una distancia s , mayor que su distancia focal f' , éste forma una imagen real e invertida del objeto a una distancia s' . Para medir la focal del sistema dado se ilumina un objeto, y se obtiene su imagen a través de dicho sistema. Deslizándolo la pantalla se busca la posición en que la imagen se observa con nitidez. Si no se encuentra esta posición hay que alejar más la lente del objeto y volver a buscar la imagen. Las distancias se leen sobre el banco.

El procedimiento para la determinación de la distancia focal del sistema convergente consiste en medir la distancia objeto s , y la distancia imagen s' , calculando f' a través de la expresión:

$$- 1/s + 1/s' = 1/f'$$

de donde

$$f' = s \cdot s' / (s - s')$$

Para obtener el resultado correcto hay que tener en cuenta el signo de cada distancia.

Conociendo f'_1 y f'_2 , de las lentes delgadas puede comprobarse que:

$$1/f' = 1/f'_1 + 1/f'_2$$

Práctica 20

Aberración cromática

Material: Banco óptico, Fuente de iluminación, Filtros, Soportes, Lente y Pantalla.

En algunas lentes se observa que no todos los rayos de distintas longitudes de onda, que inciden con un mismo ángulo i , convergen en un punto único. Esta es la denominada aberración cromática axial o longitudinal.

Rayos de diferentes longitudes de onda λ cruzarán el sistema a lo largo de diferentes caminos, ya que el índice de refracción de la lente es una función de la longitud de onda $n = f(\lambda)$ y consecuentemente la distancia focal variará también con λ .

Prácticas

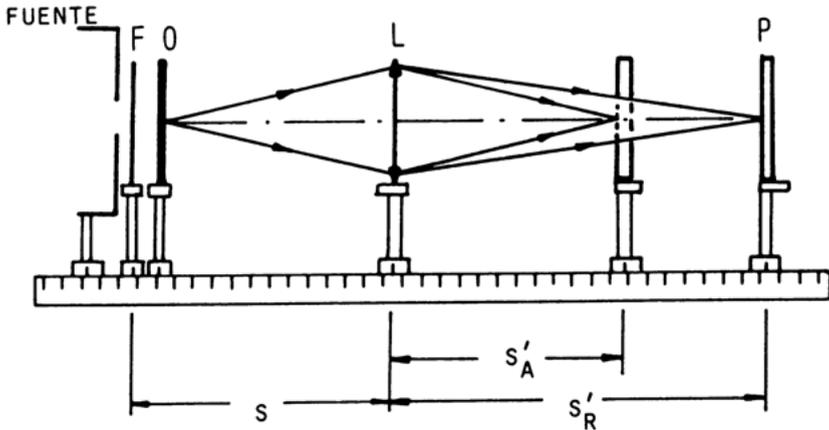


Figura 20.1

En general se tiene que $n(\lambda)$ decrece cuando la longitud de onda en la región visible aumenta. Es decir, los rayos azules al refractarse convergen más próximos a la lente y lo contrario sucede con los rojos.

Este tipo de aberración puede reducirse, en gran medida, por la combinación de dos lentes distintas, una de ellas convergente de vidrio crown y otra divergente de vidrio flint. Este sistema recibe el nombre de doblete acromático.

Se quieren calcular las distancias focales de una lente gruesa, haciendo incidir sobre ella haces de distintas longitudes de onda. Para ello se coloca la lente L, sobre un banco óptico

Prácticas de óptica geométrica y radiométrica

co, como se ve en la figura 20.1. Se ilumina un objeto O, con una fuente de iluminación y se intercala un filtro F que deja pasar sólo una determinada banda de longitudes de onda. Mediante una pantalla P, se observa la imagen de O.

A través de la ecuación de Gauss:

$$-(1/s) + (1/s') = 1/f'$$

se pueden obtener las focales f' , para las distintas longitudes de onda, midiendo las distancias s y s' en el banco óptico para cada uno de los filtros empleados.

Calcular los valores de f' utilizando cuatro filtros distintos.

Práctica 21

Aberración esférica de una lente planoconvexa

Material: Banco óptico, Láser, Red de difracción, Diafragma, Lente planoconvexa, Soportes y Pantalla.

El objetivo de esta práctica es calcular la aberración esférica longitudinal de una lente, comprobando que esta aberración es diferente para cada posición del objeto.

Sea un objeto puntual O, situado sobre el eje óptico de una superficie esférica. La imagen del objeto, a través de dicha superficie, se encontrara sobre el eje óptico, pero su posición

Prácticas

variará al aumentar la divergencia del haz que proviene de O .

Si nos fijamos en la figura 21.1, observamos que los rayos oblicuos que inciden sobre una superficie a distintas alturas h , no son focalizados en un único punto. La imagen de O en el caso de rayos paraxiales se obtiene a la distancia s'_p . La imagen de O en el caso de rayos que inciden sobre la superficie a una altura h , se encuentra a la distancia s'_h . Por lo tanto la imagen de un objeto puntual no es un punto. Se considera siempre que la imagen está situada donde se cortan todos

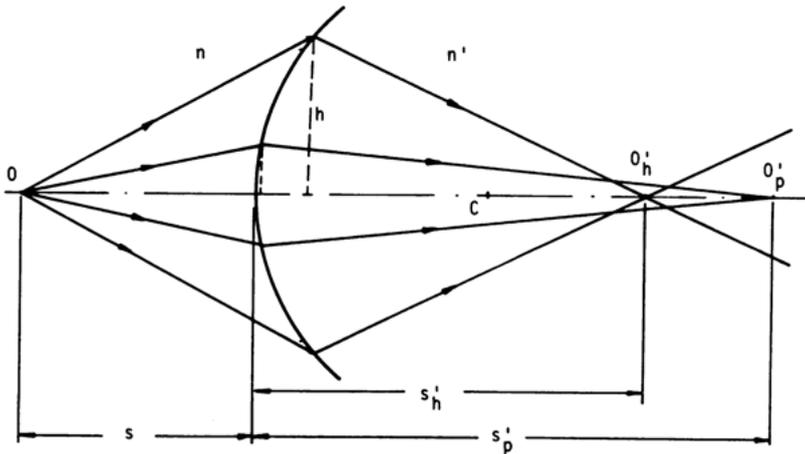


Figura 21.1

los rayos que inciden sobre la superficie, es lo que se denomina círculo de mínima confusión.

La diferencia entre las distancias imagen s'_p y s'_h recibe el nombre de aberración esférica longitudinal (AEL):

$$AEL = s'_p - s'_h$$

Al variar s , se tendrá para cada altura h una aberración esférica diferente.

La existencia de AEL en una superficie es función de su forma, de su radio de curvatura y de los índices de refracción de los medios que separa, por lo que esta aberración puede minimizarse, sobre todo, si se tienen dos o más superficies como es el caso de las lentes.

Comprobemos experimentalmente la variación de la aberración esférica cuando se emplean distintas lentes. En la figura 21.2 aparece un trazado de rayos que muestra la influencia del tipo de lente en el valor de la AEL.

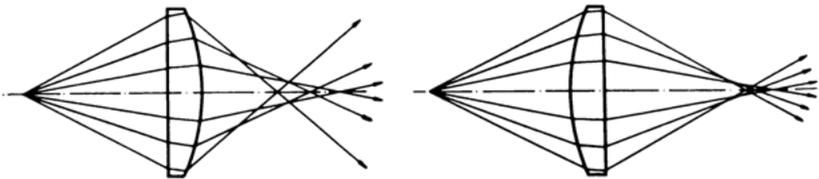


Figura 21.2

Prácticas

Para la realización de la practica, se sitúan en un banco óptico, la fuente de iluminación, el objeto O, un diafragma D y la lente problema L, como se ve en la figura 21.3.

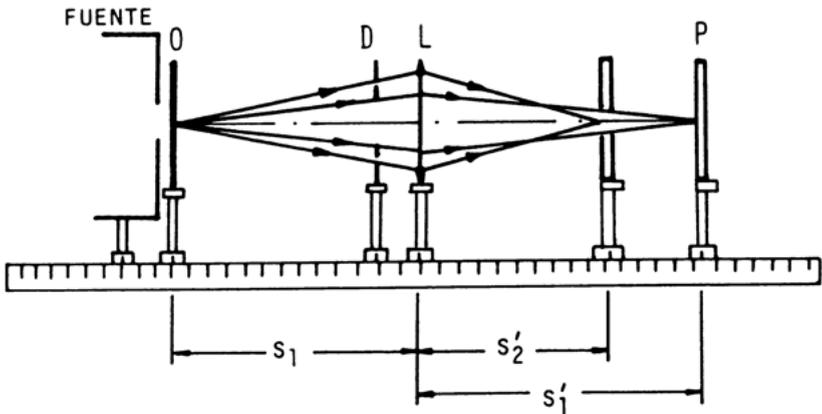


Figura 21.3

Dado que la aberración esférica es una aberración de punto monocromática se emplea como fuente un láser de He-Ne de $\lambda = 633 \text{ nm}$. El objeto en este caso es una red de difracción, que permitirá obtener haces que incidan oblicuamente a distintas alturas del centro de la lente. Por último el diafragma nos limitará la altura h de los rayos marginales.

Para realizar las medidas se sitúa el objeto O a una distancia de la lente s_1 , fija, y con ayuda de una pantalla P se obtienen las imágenes de O, para distintas aberturas del diafragma.

Prácticas de óptica geométrica y radiométrica

Las distancias objeto e imagen se leen en el banco óptico, mientras que las alturas h se deducen al medir el diámetro de la abertura del diafragma con un pie de rey. Las medidas se toman para cuatro aberturas distintas del diafragma. A continuación se representan gráficamente $h = f(s')$ para ese valor fijo de s . Y se calcula el valor de la aberración esférica para la máxima abertura, mediante la expresión:

$$AEL = s'_p - s'_{h \max}$$

Situemos ahora el objeto en otra posición s_2 y calculemos de nuevo su AEL máxima. Repetimos los cálculos y las representaciones gráficas para otra lente.

Cada lente se caracteriza por su factor de forma, que se define como:

$$q = (r_2 + r_1) / (r_2 - r_1)$$

A partir de los resultados experimentales responde a las cuestiones siguientes:

- 1) ¿Para qué factor de forma, la aberración esférica longitudinal es menor?
- 2) ¿Qué AEL tendrían las lentes estudiadas si su diámetro efectivo fuera 3 cm?

Introducción

Se define la radiación, como la emisión o transporte de energía en forma de ondas electromagnéticas. Esta energía se denomina radiante y su emisión por una superficie, se realiza en función de la naturaleza y temperatura de la misma. Puede medirse a través de distintos procedimientos empleando receptores que la absorben y transforman en otros tipos de energía. La **Radiometría** haciendo uso de sus magnitudes caracteriza dicha energía.

Sin embargo cuando la evaluación de la radiación se hace, utilizando como detector el ojo, es decir considerando la radiación como estímulo productor de una sensación visual, se puede hablar de luz, y nos encontraremos en el campo de la **Fotometría**.

El hecho de trabajar con sensaciones psicológicas y no con entes físicos plantea dificultades. Nuestro ojo no da la misma respuesta ante distintas radiaciones monocromáticas de

Prácticas de óptica geométrica y radiométrica

igual energía, será necesario por tanto utilizar una *función peso* para evaluar correctamente una radiación compleja.

Por razones de comodidad la función peso se ha dividido en una *función relativa* y una *constante*.

La función relativa es la **eficiencia luminosa espectral**, que para el caso de la visión fotópica (niveles altos) se designa por $V(\lambda)$ y sus valores son los acordados por la CIE en 1924. Si se trata de visión escotópica (niveles muy bajos) la eficacia luminosa espectral se designa por $V'(\lambda)$ y sus valores fueron acordados por la CIE en 1951.

La constante se llama **eficacia luminosa espectral máxima** (K_m) y es el cociente entre el flujo luminoso y el flujo radiante correspondiente a una determinada radiación monocromática.

Una vez establecidas $V(\lambda)$ y K_m , se podrá pasar de las magnitudes radiométricas a las fotométricas aplicando la relación general:

$$X_v = K_m \int_{380}^{780} X_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda$$

Introducción

donde X_u es una magnitud luminosa y $X_{e,\lambda} = dFe/d\lambda$, es la densidad espectral de la magnitud radiométrica correspondiente.

Se puede establecer una correspondencia entre magnitudes radiométricas y fotométricas como se aprecia en las tablas I y II.

Otra forma de definir las magnitudes fotométricas es derivar el flujo luminoso del flujo radiante y definir estas en función del flujo luminoso. (Tabla II).

Unidades

Ángulo sólido: ω , desde el cual se ve una superficie S , desde un punto F , (figura 13) es la superficie que determina en la esfera de radio unidad, la figura geométrica que tiene por vértice el punto considerado y cuyas aristas pasan por el contorno de la superficie.

La unidad de ángulo sólido es el estereorradian (sr): ángulo sólido con el que se ve desde el centro de una esfera de radio unidad, a la unidad de superficie localizada en tal esfera.

El ángulo sólido de una superficie cerrada que encierra al punto desde el cual vemos a tal superficie es 4π estereorradianes.

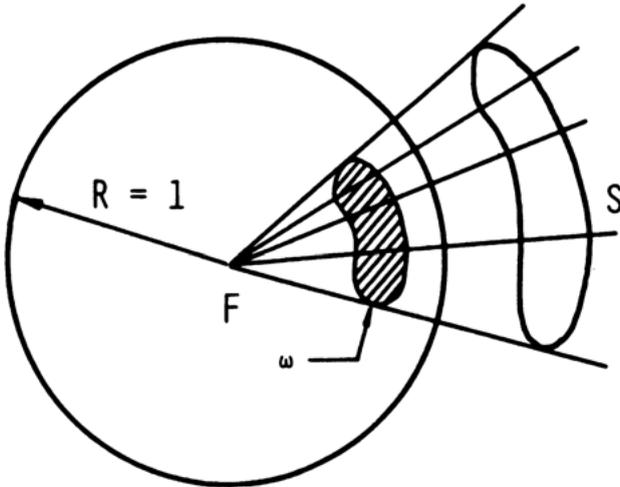


Figura 13

La unidad radiométrica más importante es el Vatio:

Vatio: (W) es un julio de energía emitido, transportado o recibido en la unidad de tiempo.

La unidad fotométrica fundamental es la candela que es unidad de intensidad luminosa y se define como:

Candela: (cd) Intensidad luminosa en una dirección dada, de una fuente que emite radiación monocromática de 540×10^{12} Hz de frecuencia y cuya intensidad energética en esa dirección es de $1/683 \text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}$

Introducción

Lumen: (lm) es el flujo luminoso emitido en un ángulo sólido unidad por un manantial puntual uniforme que tiene una intensidad luminosa de una candela.

Lux: (lx) es la iluminancia producida por un flujo luminoso de un lumen que se distribuye uniformemente sobre una superficie de un metro cuadrado.

Tabla I Magnitudes radiométricas

ENERGÍA RADIANTE: Q_e

Energía emitida, transportada o recibida en forma de radiación

$$Q_e = \int F_e \, dt \quad [J = W.s]$$

FLUJO RADIANTE: F_e

Potencia emitida, transportada o recibida en forma de radiación

$$F_e = dQ_e/dt \quad [W]$$

IRRADIANCIA: E_e

Flujo radiante recibido por unidad de área

$$E_e = dF_e/dA \quad [W.m^{-2}]$$

Prácticas de óptica geométrica y radiométrica

INTENSIDAD RADIANTE: I_e

Flujo radiante que sale de la fuente, y se propaga en un ángulo sólido elemental que contiene la dirección considerada, por dicho ángulo sólido

$$I_e = dF_e/d\omega \quad [\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}]$$

EXITANCIA RADIANTE: M_e

Flujo radiante que sale de un elemento de superficie, que contiene al punto considerado, por el área de dicho elemento

$$M_e = dF_e/dA \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$$

RADIANCIA: L_e

Se define en una dirección dada como el cociente del flujo radiante, que sale de un elemento de superficie, (que contiene al punto considerado), y se propaga en las direcciones definidas por un cono elemental, (que contiene la dirección dada), por el producto del ángulo sólido del cono y el área de la proyección ortogonal del elemento de superficie sobre un plano perpendicular a la dirección dada

$$L_e = d^2F_e/(d\omega)\cdot dA\cdot\cos\Theta \quad [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}]$$

EXPOSICION RADIANTE: H_e

Densidad superficial de energía radiante recibida o lo que es lo mismo la irradiancia por su duración

$$H_e = dQ_e/dA = \int E_e dt \quad [\text{J}\cdot\text{m}^{-2}]$$

Introducción

Tabla II

Magnitudes fotométricas

CANTIDAD DE LUZ: Q_u

Es el producto del flujo luminoso por su duración

$$Q_u = \int F_u dt \quad [\text{lm} \cdot \text{s}]$$

FLUJO LUMINOSO: F_u

Magnitud derivada del flujo radiante

$$F_u = K_m \int F_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda = dQ_u/dt \quad [\text{lm}]$$

ILUMINANCIA: E_u

Flujo luminoso recibido por un elemento de superficie, que contiene al punto considerado, por el área de dicho elemento

$$E_u = dF_u/dA \quad [\text{lux} = \text{lm} \cdot \text{m}^{-2}]$$

INTENSIDAD LUMINOSA: I_u

Se define, para un manantial y en una dirección, y es el cociente del flujo luminoso que sale de un manantial y se propaga en un elemento de ángulo sólido que contiene la dirección considerada, por el elemento de ángulo sólido

$$I_u = dF_u/d\omega \quad [\text{cd}]$$

EXITANCIA LUMINOSA: M_u

Se define para un punto de una superficie, como el cociente del flujo luminoso que sale de un elemento de superficie que

contiene al punto considerado, por el área de dicho elemento

$$M_u = dF_u/dA \quad [lm \cdot m^{-2}]$$

LUMINANCIA: L_u

Se define en un punto de una superficie y en una dirección, como el cociente del flujo luminoso, que sale de un elemento de superficie que contiene al punto considerado, y se propaga en las direcciones definidas por un cono elemental que contiene la dirección dada, por el producto del ángulo sólido por el área de la proyección ortogonal del elemento de superficie sobre un plano perpendicular a la dirección dada

$$L_u = d^2F_u/(d\omega \cdot dA \cdot \cos\theta) \quad [nit = cd \cdot m^{-2}]$$

EXPOSICIÓN LUMINOSA: H_u

Densidad superficial de cantidad de luz recibida o también el producto de la iluminancia por su duración

$$H_u = dQ_u/dA = \int E_u dt \quad [lux \cdot s]$$

Normalmente para la iluminación se utilizan lámparas en las que la fuente de luz propiamente dicha es un filamento incandescente.

El tamaño del emisor en comparación con las distancias a que se utiliza es prácticamente despreciable, por eso haciendo una abstracción matemática de sus dimensiones, se ha

Introducción

definido el manantial puntual. Si además este manantial emite uniformemente en todas las direcciones se llama manantial puntual uniforme. Actualmente con el desarrollo de nuevos tipos de lámparas (fluorescentes, vapor de mercurio de color corregido, etc...) es más difícil equipararlas a puntos, pero si la distancia a que se utilizan es suficientemente grande, para los cálculos se pueden considerar como manantiales puntuales sin introducir errores apreciables.

Cuando la energía radiante encuentra en su camino una superficie de separación con otro medio, puede suceder que la atraviese (transmisión) o que sea devuelta hacia el medio de donde venía (reflexión). Como generalmente tanto la transmisión como la reflexión van acompañadas de una disminución de energía por absorción, se han definido tres magnitudes para caracterizar estos fenómenos:

TRANSMITANCIA: Es el cociente del flujo radiante transmitido por el flujo incidente

$$\tau = F_T/F_O$$

REFLECTANCIA: Es el cociente del flujo radiante reflejado por el flujo incidente

$$\rho = F_R/F_O$$

ABSORTANCIA. Es el cociente del flujo radiante absorbido por el flujo incidente

$$\alpha = F_A / F_O$$

Si la superficie no se comporta del mismo modo para todas las longitudes de onda, se hablará de transmitancia, reflectancia, y absorptancia espectral, $\tau(\lambda)$, $\rho(\lambda)$, y $\alpha(\lambda)$ respectivamente referidas a una radiación monocromática.

Detectores

Un haz de radiación constituye un flujo energético a través de toda superficie que corte al haz. Un detector es un instrumento que, situado en un haz de radiación, absorbe toda o parte de la energía que sobre él incide y responde dando lo que se denomina una señal.

Fundamentalmente un detector se caracteriza por lo siguiente:

Estabilidad: Cualquier elemento que actúe como detector debe dar siempre las mismas respuestas ante idénticos flujos energéticos, esto implica que el detector trabaje bajo determinadas condiciones ambientales y temporales.

Linealidad: Si se mide la energía de un haz de radiación dividido en dos partes, y se compara con la energía total del haz, se dice que un detector es lineal, cuando la energía total es la suma de la energía de las dos partes del haz.

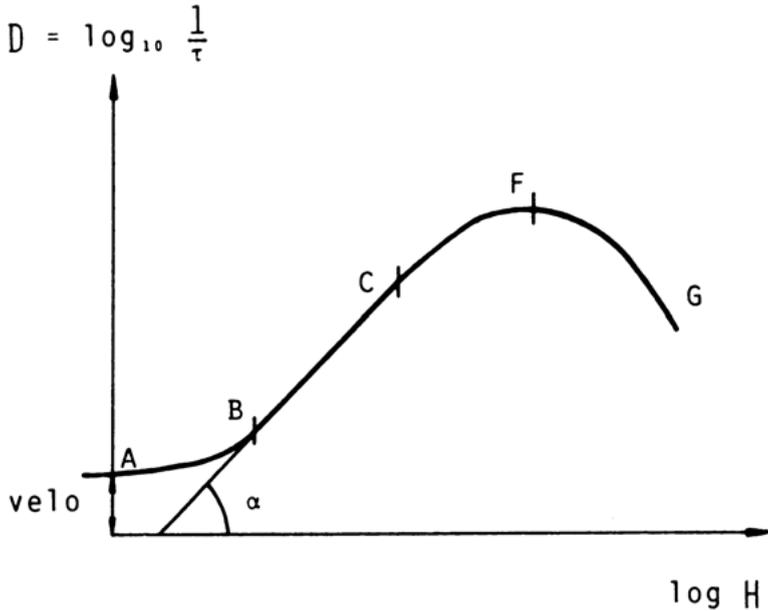


Figura 14

Para una emulsión fotográfica, se representa gráficamente la señal obtenida en función de la exposición. Este detector actúa linealmente, cuando trabaja en la zona BC, de la figura 14.

Respuesta espectral: Cuando la señal producida por un detector sólo depende del flujo energético y no de la longitud de onda, se dice que el detector no es selectivo. Cuando la respuesta varía con la longitud de onda, se trata de detectores

Detectores

selectivos que poseen una determinada respuesta espectral (figura 15).

Sensibilidad: Para un detector la mínima energía radiante que debe absorber para producir una señal es su sensibilidad. De forma que si de la energía que le llega absorbe una energía radiante inferior a este mínimo denominado umbral, el detector no responderá, y por tanto no producirá ninguna señal.

Velocidad de respuesta de un detector: Lógicamente cada detector responde a una misma cantidad de energía radiante

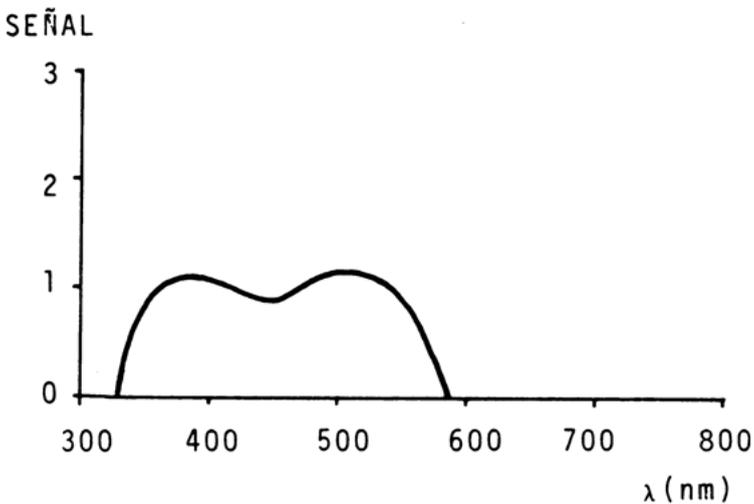


Figura 15

en un tiempo diferente. Esto quiere decir que cada detector posee una determinada velocidad de respuesta y que por tanto para intervalos energéticos inferiores a dicho tiempo de respuesta el detector tampoco dará ninguna señal.

Prácticas

Práctica 22

Ley de Lambert

Material: Banco óptico, Fuente de iluminación, Diafragma, Difusor y Detector sobre soporte giratorio.

Se entiende por claridad, la sensación subjetiva que se tiene cuando varía la luminancia. Lógicamente luminancias iguales producen la misma claridad subjetiva.

Así, cuando una superficie emisora se observa desde distintos ángulos, se ve que, para muchos emisores y difusores, la claridad que presentan es independiente del ángulo de observación, como ocurre con el papel mate o la escayola. Esto quiere decir que estamos en presencia de emisores o difusores perfectos cuya luminancia y claridad son independientes de la dirección de observación.

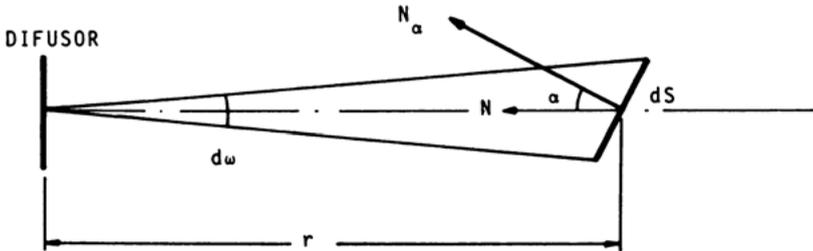


Figura 22.2: Vista superior del dispositivo de la figura 22.1

Para comprobar la ley de Lambert, se dispondrá el material del laboratorio tal y como aparece en la figura 22.1, manteniéndose constante la distancia r del detector a la fuente, y haciendo variar el ángulo α entre 0° y 90° , en intervalos de cinco grados (ver figura 22.2)

Si llamamos I_0 a la intensidad según la normal N (figura 22.2) e I_α a la correspondiente a la dirección α , N_α , podemos escribir que:

$$I_\alpha = I_0 \cos \alpha \quad [1]$$

que es la denominada ley de Lambert o ley del coseno.

Las medidas de la intensidad I_α se tomarán para cada valor de α , comprobando a continuación que verifican la relación [1].

Prácticas

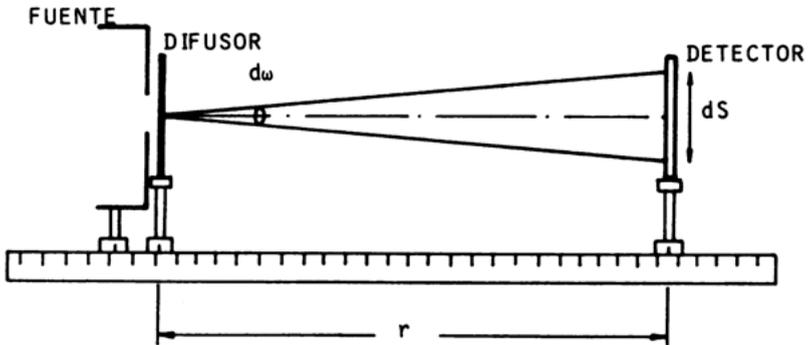


Figura 22.1

Finalmente se hará una tabla con los valores medidos de I_α , I_0 , α e $I_0 \cos \alpha$, representándose a continuación $I_0 \cos \alpha$, en abscisas, frente a I_α en ordenadas.

Práctica 23

Medida de la intensidad de una fuente luminosa

Material: Banco óptico, Fuentes de iluminación y Diedro difusor de 90° .

El objetivo de esta práctica es medir la intensidad de una fuente luminosa con respecto a otra conocida que se tomará como fuente patrón.

Supongamos en principio que las fuentes luminosas presentan el mismo color, en cuyo caso se estará trabajando en fo-

tometría visual homócroma. Un fotómetro sencillo que puede utilizarse para realizar estas medidas es el dispositivo que se describe a continuación.

Este fotómetro consiste, en esencia, en un diedro difusor de 90° , colocado de modo que las aristas sean normales al eje que une las dos luces a comparar (figura 23.1).

Las iluminancias E_1 y E_2 sobre el diedro producen unas luminancias L_1 y L_2 sobre las caras S_1 y S_2 del mismo respectivamente. Como la luminancia es la variable que aprecia el ojo cuando observa fuentes extensas, éste detectará unas luminancias:

$$L_1 = E_1/\pi \quad L_2 = E_2/\pi$$

lo que implica que se acepta que el factor de reflexión difusa en las dos caras es la unidad.

Si se alejan las fuentes del diedro variará la iluminación sobre las caras del mismo de acuerdo con la ley del cuadrado de la distancia:

$$E = (I \cos\alpha)/r^2$$

Debido a la simetría que presenta el sistema fuentes-diedro, como se aprecia en la figura 23.1, el ángulo α será en este caso de 45° (figura 23.2).

Prácticas

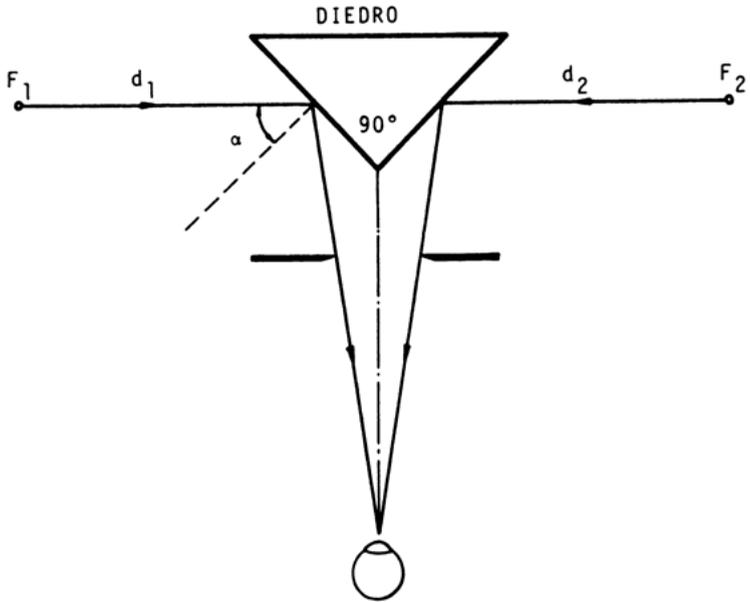


Figura 23.1

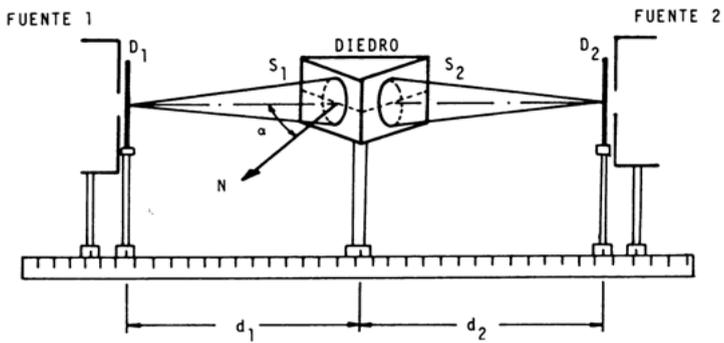


Figura 23.2

Prácticas de óptica geométrica y radiométrica

Para una posición dada, las dos superficies del diedro aparecerán con igual luminancia, es decir, producirán la misma claridad subjetiva, lo que implica que se cumple la relación:

$$I_1/d_1^2 = I_2/d_2^2$$

lo que permite conocer I_2 en función de I_1 , sin más que medir d_1 y d_2 . Realizar las medidas para cada lámpara problema tomando una de ellas como patrón.

Práctica 24

Comprobación de la ley del cuadrado de la distancia

Material: Banco óptico, Fuente luminosa, Orificio y Detector.

Vamos a comprobar la denominada **ley del cuadrado de la distancia** con ayuda de medidas realizadas con un detector que se desplaza en un banco óptico.

Sea un cono de ángulo sólido $d\omega$, tal y como aparece en la figura 24.1, con un vértice en la fuente puntual D. Si se propaga a través del cono un flujo dF procedente de D, la intensidad correspondiente será:

$$I = dF/d\omega$$

Si este flujo incide sobre una superficie dS , a una distancia r de la fuente, cuya normal forma con el eje del cono un ángulo α , la iluminancia E que recibe dicha superficie será:

Prácticas

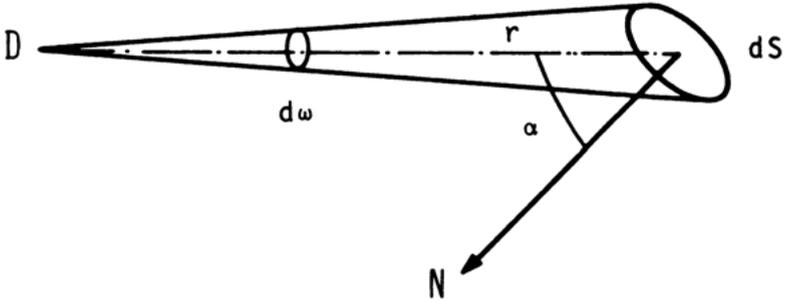


Figura 24.1

$$E = I \cos \alpha / r^2$$

es decir, la iluminancia que sobre un elemento de superficie produce el flujo procedente de una fuente puntual es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, se trata de la denominada **ley del cuadrado de la distancia**.

Se coloca la fuente, el orificio D y el detector tal y como aparecen en la figura 24.2. Como la superficie del detector es perpendicular al banco óptico $\alpha=0^\circ$, y por tanto $E \propto I/r^2$.

Para comprobar la ley del cuadrado de la distancia se mide E colocando el detector a distintas distancias de la fuente, y agrupando los valores obtenidos en tablas.

A continuación se representa gráficamente los valores de E en ordenadas y los de I/r^2 en abscisas para obtener el valor

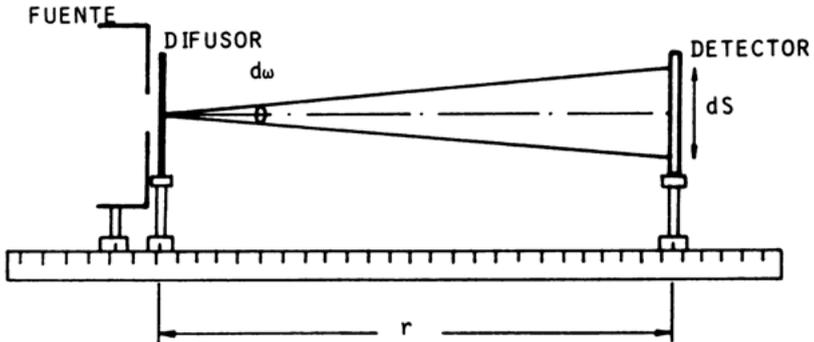


Figura 24.2

de la intensidad I de la fuente como la pendiente de la recta representada.

Práctica 25

Fotometría física: fotometría fotográfica

Material: Banco óptico, Cuerpo de máquina fotográfica, Película blanco y negro y Fuente de iluminación.

Si se quiere determinar las características fotométricas de las fuentes luminosas, puede utilizarse aparte del ojo, los denominados receptores físicos. Estos receptores difieren del ojo en que su respuesta se debe a la *iluminancia* que reciben, E , y no a la *luminancia* L como en el caso del ojo.

Los receptores físicos permiten realizar medidas directas sin necesidad de establecer en el momento de la medición com-

Prácticas

paración con ningún manantial patrón, para lo cual han debido ser previamente calibrados. El calibrado no es otra cosa que el cálculo de la curva de respuesta espectral $V_\lambda = f(\lambda)$.

Entre los detectores más usados en fotometría física están los térmicos, los fotoemisivos, las fotorresistencias, los detectores de unión y la emulsión fotográfica.

Aquí se quiere estudiar precisamente este último.

Cuando una emulsión fotográfica se ilumina con luz monocromática, a la cual responde, y posteriormente se revela, aparece un ennegrecimiento que, dentro de ciertos límites, es proporcional a la energía recibida por unidad de superficie.

El ennegrecimiento de la placa se mide por su densidad óptica:

$$D = \log_{10} (1/\tau)$$

siendo τ la transmitancia de la placa después del proceso de revelado y fijado.

La cantidad de energía que recibe por unidad de superficie será proporcional a la iluminación E y al tiempo de exposición t . El producto $E \cdot t = H$ recibe el nombre de *exposición luminosa*.

Prácticas de óptica geométrica y radiométrica

Si representamos gráficamente la densidad óptica D frente al logaritmo de la exposición $\log_{10}H$ se tiene la denominada **curva característica del material**.

Esta práctica consiste en la representación de esta curva para un determinado material. Se debe tener en cuenta que la curva característica varía mucho de unos materiales a otros, y también en el caso de un mismo material que ha sido sometido a distintos procesos de revelado.

La curva que aparece representada en forma general en la figura 25.1, posee varias partes a distinguir:

La zona AB o subexposición, también denominada talón.

El tramo BC prácticamente recto que corresponde a una exposición normal o correcta.

CF es la zona de sobreexposición u hombro.

y FG el tramo donde el ennegrecimiento disminuye con la exposición, es la solarización.

Por último el velo corresponde al ennegrecimiento que en mayor o menor grado tienen todas las placas aunque no hayan sido expuestas.

En la realización práctica hay que someter una placa a distintas exposiciones H , es lo que se llama hacer una *cuña de pasos*.

Prácticas

Como $H = E.t$ y $E = \text{cte}$ puesto que se impresiona siempre con la misma fuente, para variar H tendremos que ir variando t , y por lo tanto cada zona de la placa deberá ser impresionada durante un tiempo diferente.

A continuación, y después del proceso de revelado, se mide la transmitancia de cada zona, al hacer incidir sobre la placa un haz de luz, y medir que parte de él se ha transmitido. Con esto puede calcularse la densidad óptica y obtenerse la curva característica del material.

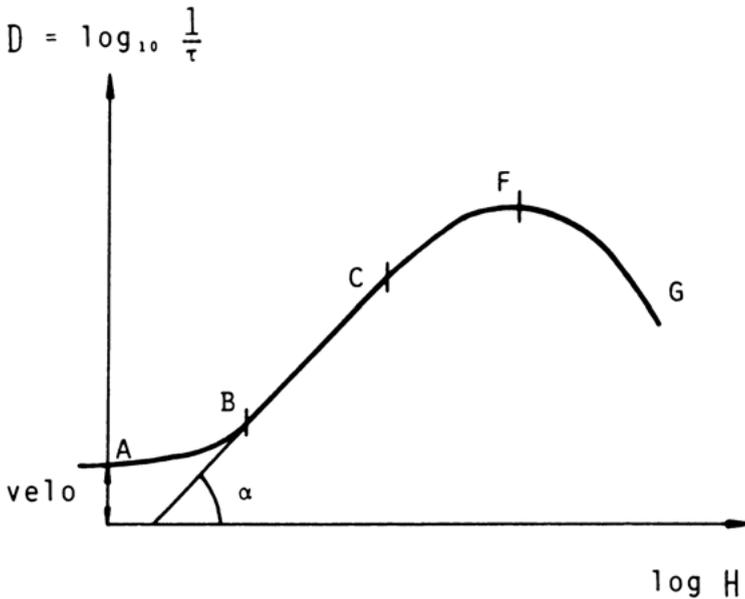


Figura 25.1

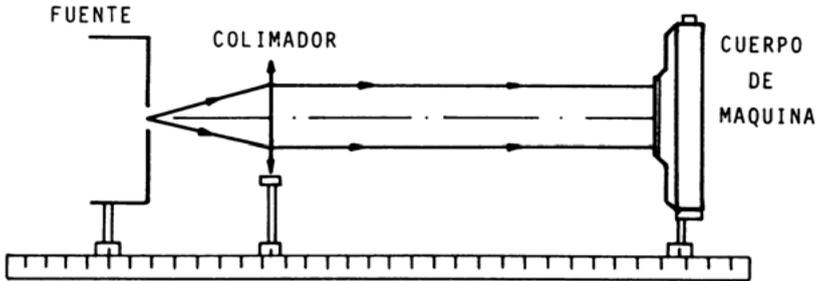


Figura 25.2

Se dispone la fuente de iluminación en el banco óptico (figura 25.2), obteniendo de ella un haz colimado con la ayuda de lentes auxiliares. A continuación se sitúa en el banco el cuerpo de la máquina fotográfica cargado con la película.

Se realizan exposiciones para los tiempos $1/30$, $1/60$, $1/125$, $1/250$ y $1/500$ segundos. Posteriormente se mide la transmitancia de la emulsión para cada exposición y se representan gráficamente los valores de la densidad óptica obtenida frente al tiempo de exposición.

Finalmente comparar la curva obtenida con la descrita teóricamente.

Bibliografía

Bibliografía

- F.A. Jenkins, H.E. White. FUNDAMENTALS OF OPTICS. McGrawHill. New York (1976).
- J. Casas. ÓPTICA. Edita Cátedra de Óptica. Universidad de Zaragoza (1985).
- W.H. Westphal. PRACTICAS DE FÍSICA (ÓPTICA) Editorial LABOR, S.A. (1965).
- Pujal, Giménez, Castillejo. PRÁCTICAS DE FÍSICA GENERAL (ÓPTICA). E.T.S.I.T. Universidad Politécnica de Barcelona. Departamento de Física Fundamental y Nuclear.
- E. Wiedemann, H. Ebert. PRÁCTICAS DE FÍSICA. Nuevamente revisadas por E. Wiedemann, y A. Wehnelt. Editor Gustavo Gili. Barcelona (1932).
- B.K. Johnson. OPTICS AND OPTICAL INSTRUMENTS. Dover Publications, INC. New York. (1960).

- A. Cruz “Magnitudes Radiométricas y Fotométricas”. Óptica Pura y Aplicada, vol 13, 15-19, (1980).
R.W. Ditchburn “Óptica”, Ed. Reverte (1982).
- B.N. Begunov, N.P. Zakaznov “Teoría de Sistemas Ópticos”
Ed. Mir. (1976).
- S. Burbano “Física General”. Ed. Librería General. Zaragoza (1980).
- J. Arasa i Martí “Prácticas de Óptica Geométrica”. Servei de Publicacions. E.U.I.T.I. E.U. Óptica. Terrasa.