

Capítulo 3 Sistemas objetivos

3.1 Cámara fotográfica

3.1.1 Principio de la cámara fotográfica

1. Óptica fotográfica

Con una lente convergente se obtiene, de un objeto muy lejano, una imagen real, invertida, mucho más pequeña que el objeto y situada muy cerca del foco imagen.

Con un objetivo fotográfico desmontado y separado de la cámara se puede hacer la misma experiencia.

Se abre el aparato y se pone, en lugar de la placa o de la película, un vidrio esmerilado. Se dirige el aparato hacia un objeto lejano; la imagen de este objeto estará invertida y aparecerá sobre el vidrio esmerilado (Fig. 3.1).

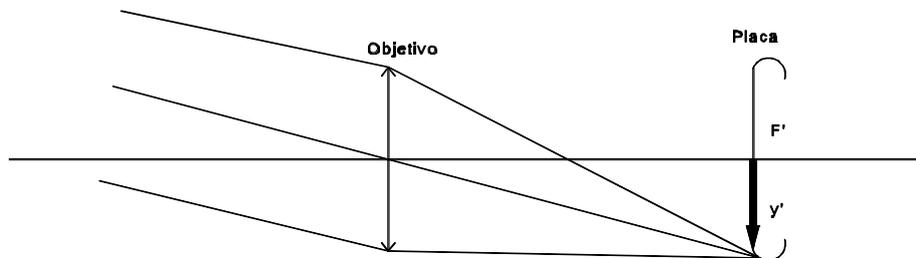


Fig. 3.1

Fotografiar un objeto es formar la imagen de este objeto dado por un sistema convergente, llamado objetivo fotográfico, sobre una placa o una película que puede conservar la reproducción de esta imagen gracias a las reacciones fotoquímicas.

Posición de la imagen. Se halla la posición de la imagen y' de y a través de un objetivo representado por sus focos y por sus planos principales (Fig. 3.2).

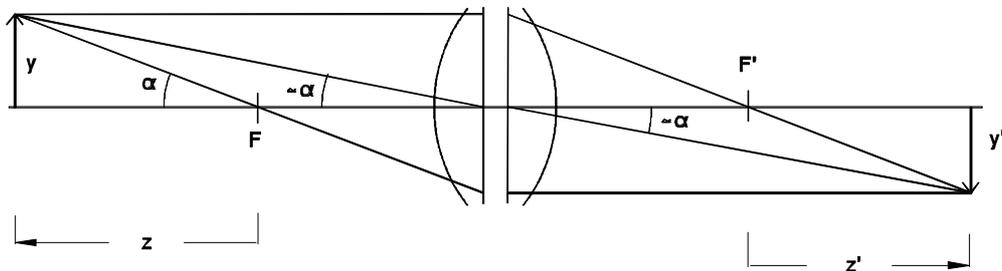


Fig. 3.2

Aplicando la fórmula de Newton, podemos encontrar la posición de la imagen:

$$z' = \frac{-f'^2}{z}$$

donde f' es la distancia focal del objetivo.

Es necesario que el objetivo tenga una distancia focal pequeña; si no sería muy voluminoso. En las cámaras universales modernas la focal varía entre 100 y 50 mm.

La imagen está muy próxima al foco cuando el objeto está a pocos metros del objetivo. Veámoslo con dos ejemplos:

Si

$$f' = 100\text{mm} \quad \text{y} \quad |z| = 50 f'$$

entonces

$$|z| = 50 \cdot 100 = 5000 \text{ mm} = 50 \text{ m} \quad |z'| = \frac{100}{5000} = 2 \text{ mm}$$

Si

$$f' = 50 \text{ mm} \quad i \quad |z| = 50 f'$$

entonces

$$|z| = 50 \cdot 50 = 2500 \text{ mm} \quad |z'| = 1 \text{ mm}$$

Nota. Si el objeto está muy lejos, la imagen y' es extremadamente pequeña y se forma en el plano focal. Construyámosla considerando el diámetro aparente del objeto (Fig. 3.3) se tiene:

$$\frac{y'}{f'} = \text{tg } \alpha \approx \alpha \quad (3.2)$$

donde

$$y' = \alpha f'$$

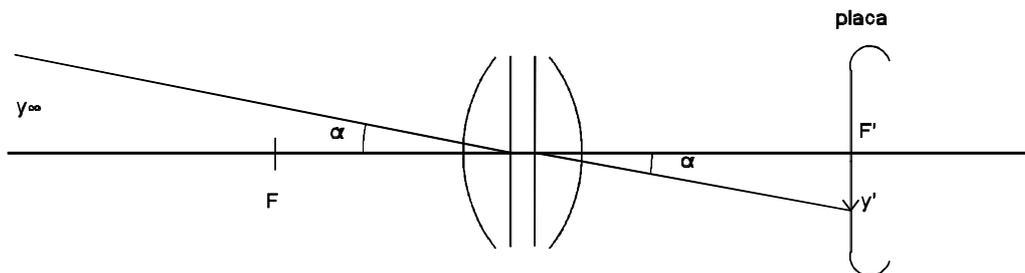


Fig. 3.3

Para la fotografía de objetos muy lejanos se deberá usar objetivos de distancia focal muy grande, si se quiere que y' sea bastante grande, ya que y' debe ser proporcional a f' .

Por ejemplo, para fotografiar los astros, actividad denominada astrofotografía, se emplean objetivos de distancias focales grandes (más de 10 m).

Para la fotografía aérea y la fotografía de objetos que no se pueden apreciar, se reemplazan los objetivos ordinarios por los teleobjetivos, que dan una imagen y' bastante más grande que la obtenida con un

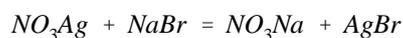
objetivo normal y, aproximadamente, en la misma posición del plano focal imagen.

2. Impresión fotográfica y químico-física de la fotografía

Las placas de vidrio y las películas de acetato de celulosa están recubiertas por una capa de bromuro de plata con gelatina. Situada en el plano focal del objetivo, la placa o película registra la imagen; lo hace de la manera siguiente.

Química de la fotografía. Para obtener un precipitado de bromuro de plata se vierte en un vaso de agua nitrato de plata (NO_3Ag) y bromuro de sodio (NaBr).

Esta es la disolución, que da un precipitado blanco amarillento:



Se hacen dos partes del precipitado, una se deja a la luz viva y la otra se ilumina por un arco eléctrico durante un instante corto de tiempo.

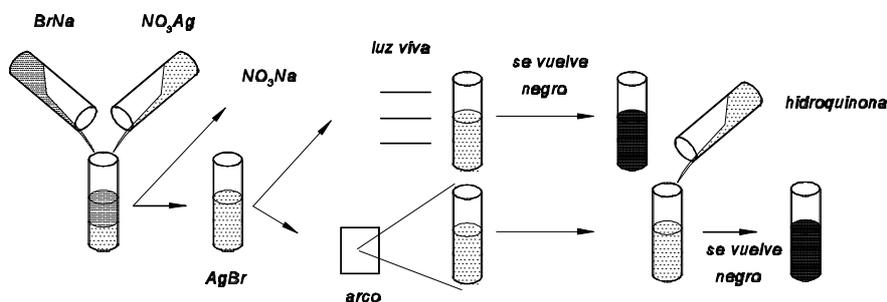
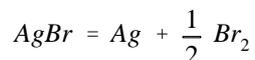


Fig. 3.4

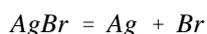
La primera parte, expuesta largamente a la luz, se acaba por ennegrecer. Si a la segunda parte se le añade hidroquinona, reductor ávido de bromo, el precipitado, que hasta ahora era blanco amarillento, también se ensombrece del todo.

Estos hechos se interpretan así:

- Una exposición larga a la luz da la reacción total:



- Una exposición corta sólo reduce la reacción y el bromo queda en estado atómico:



Esta reducción de la reacción se llama impresión.

El reductor (revelador de la fotografía) absorbe los átomos del bromo, los átomos de plata se aglomeran en paquetes que precipitan y la reacción se convierte en total.

Remarquemos que la sola reacción del reductor, sin impresión previa, difícilmente puede producir el mismo efecto.

Impresión fotográfica. Negativo-positivo. Imaginemos, por ejemplo, que en la placa fotográfica se ha formado la imagen de un objeto luminoso con una figura determinada. La placa está iluminada sólo en algunos puntos. Hay impresión en estos puntos y sólo en estos puntos.

La placa sacada de la cámara fotográfica, con el chasis (caja cerrada a la luz) que la contiene, es puesta en un baño revelador (reductor orgánico). La imagen va apareciendo lentamente por la precipitación de la plata en los puntos impresionados. El obscurecimiento es progresivo, a medida que aumenta el número de átomos precipitados.

Cuando la imagen es lo bastante negra se saca la placa del revelador, se lava y se coloca en un baño de hiposulfito de sodio que disuelve el bromuro que no ha estado disociado. La placa entonces sólo contiene la gelatina y el depósito negro de plata. Se lava. De ahora en adelante se puede exponer a la luz. Se ha realizado lo que se llama la fijación. Se ha obtenido un negativo, en el que las partículas más brillantes del objeto corresponden a las partículas más negras de la imagen fotográfica.

Se pone la placa negativa sobre un papel de gelatina con bromuro de plata (gelatina contra gelatina, para obtener una reproducción perfecta); si se ilumina el reverso del negativo, el papel está menos impresionado en los puntos del negativo donde son reproducidos los detalles claros del objeto. Después que se ha revelado, fijado y finalmente lavado y secado, se obtiene una reproducción positiva del objeto en la que las imágenes de los puntos claros y oscuros son también, respectivamente, claras y oscuras.

Exposición en la placa fotográfica. Cuando una emulsión fotográfica se ilumina con luz monocromática a la cual es sensible, y después la placa se revela, aparece un ennegrecimiento que dentro de unos ciertos límites es proporcional a la energía recibida por unidad de superficie.

El ennegrecimiento de la placa es medido por su densidad óptica: $D = -\log_{10} T$, donde T es la transmitancia de la placa fijada y revelada.

La cantidad de energía por unidad de superficie será proporcional a la iluminación E' y al tiempo de exposición t . El producto $H = E' \cdot t$ recibe el nombre de exposición.

La representación de la densidad óptica respecto al logaritmo natural (base e, neperiano) de la exposición se llama curva característica de la placa, y suele ser de la forma de la figura 3.5.

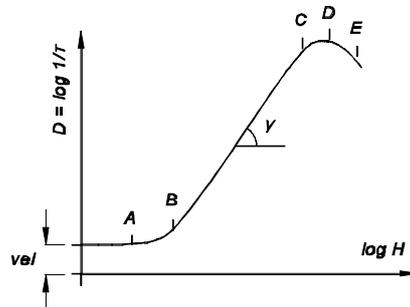


Fig. 3.5

En esta figura se distinguen cinco tramos.

El primero representa un ennegrecimiento que, más o menos, tienen todas las placas aunque no hayan estado expuestas, y que se llama velo.

La zona AB se llama de subexposición.

La zona BC , prácticamente recta, es la exposición normal.

La zona CD es la zona de sobreexposición u hombro.

La zona DE es la zona de solarización.

La curva característica varía mucho de unos materiales a otros y también varía para un mismo material según el proceso de revelado utilizado.

La pendiente de la parte recta (tangente del ángulo con el eje) se llama contraste o gamma γ de la emulsión, e indica la relación entre el contraste del negativo y el del objeto fotografiado. Si $\gamma \geq 1$ el negativo tiene contraste igual o mayor que el del objeto. Para un mismo material depende del revelado. En las películas de uso común, γ varía entre 0,8 y 2, pudiendo llegar hasta 4 y 5 en materiales industriales o para rayos X.

La abscisa en el origen, i , se denomina inercia y representa la exposición mínima necesaria para que haya respuesta. El inverso $1/i$ sirve para caracterizar la rapidez o sensibilidad de la placa. Actualmente se mide en unidades DIN o ASA.

Tabla 3.1 Equivalencias entre valores ASA y DIN

ASA	DIN
6	9/10
8	10/10
10	11
12	12
16	13
20	14
25	15
32	16
40	17
50	18
64	19
80	20
100	21
125	22
200	24
400	27
800	30
1.600	33
3.200	36
8.000	40

El sistema ASA (*American Standard Association*) es lineal. Una película de 80 ASA es doblemente sensible que una de 40 ASA.

Como regla empírica para encontrar el tiempo correcto de exposición, se coloca $N = 16$ y para una película de 100 ASA se utiliza un tiempo de exposición de $1/100$ s.

El sistema DIN (*Deutsche Industrie Normen*) es logarítmico. Un aumento de la velocidad de dos veces se induce con un aumento de tres en las unidades DIN.

Por ejemplo, pasar de 40 a 80 ASA es equivalente a pasar de 17 a 20 DIN.

Finalmente, se darán unas cuantas nociones sobre la sensibilidad espectral de las emulsiones fotográficas.

Actualmente, excepto en artes gráficas, ya no se utilizan materiales insensibles al color (sólo son sensibles a los azules).

Un grupo reducido de materiales son ortocromáticos. Tanto para estos materiales como para los no sensibles, la respuesta a la luz de tungsteno es diferente que la respuesta a la luz del día. En las figuras 3.6 (B) y 3.6 (C) se representan las respuestas espectrales, comparadas con las del ojo (Fig. 3.6 (A)).

La mayor parte de los materiales utilizados son pancromáticos. En estos materiales la respuesta al espectro es bastante uniforme (Fig. 3.6 (d)).

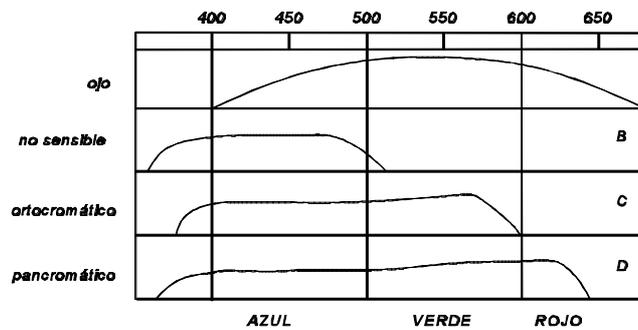


Fig. 3.6

Otros materiales pueden ser sensibles al infrarrojo o bien al ultravioleta, llegando hasta los rayos X. Al estudiar la sensibilidad espectral se debe tener en cuenta la curva de emisión de la fuente y la de transmisión de los filtros, si es que se emplean.

Resolución. La resolución de una película es el número de líneas por milímetro que se pueden resolver; es importante cuando se hacen grandes ampliaciones o se desea mucha precisión; viene dada en la película por una letra que equivale a un intervalo de resolución, según la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Resolución de la película

<i>Líneas/m</i>	<i>Abreviaturas</i>
55	L - baja
55-68	ML - media baja
69-95	M - media
96-135	H - alta
136-225	VH - muy alta
>225	EH - extra alta

3. Descripción de la cámara fotográfica

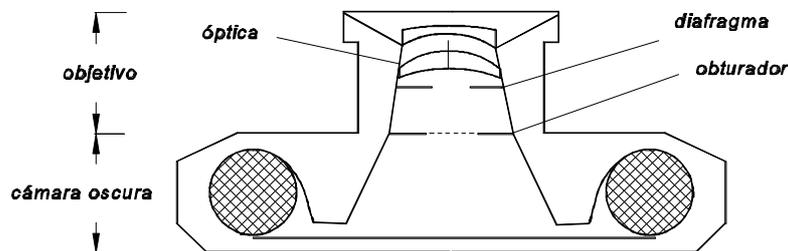


Fig. 3.7

Objetivo. Es la parte esencial de la cámara y la más cara. Está formado por un sistema óptico convergente constituido por un sistema de lentes unidas (objetivo simple) o por muchos grupos de lentes unidas (objetivo compuesto).

Cámara oscura. Es una caja cerrada a la luz sobre la cual se fija el objetivo. En la cara posterior de la cámara oscura hay un vidrio esmerilado para la puesta a punto o la placa sensible (o la película) que ocupa el lugar del vidrio esmerilado.

Obturador. El obturador es un órgano mecánico que no deja pasar la luz hacia la emulsión (a través del objetivo) durante un tiempo, (llamado tiempo de exposición) regulable a voluntad.

Al disparar el obturador, se abre la apertura y, a continuación, se cierra automáticamente. Pero se puede suprimir este automatismo y abrir el obturador y después cerrarlo al cabo de un cierto tiempo, contado por medio de un reloj.

Diafragma. Todos los aparatos fotográficos tienen un diafragma iris de diámetro variable, colocado entre dos lentes del objetivo. Este diafragma limita la apertura de los haces incidentes y, por lo tanto, la energía transportada por la luz incidente durante cada unidad de tiempo.

La cantidad de energía luminosa (transformada en energía química) que es necesaria para producir en un punto de la placa de oscurecimiento determinado, está determinada por el producto de la cantidad de energía E recibida por la emulsión durante una unidad de tiempo por el tiempo de exposición. E crece, evidentemente, cuando la apertura del diafragma crece, y decrece en el caso inverso.

$$H = E t$$

3.1.2 Objetivo fotográfico

1. Representación de un punto

La imagen de un punto objeto, dada por el objetivo, es necesariamente una mancha. Esta mancha, que asimilamos a un círculo, tiene un diámetro más pequeño a medida que la corrección de las aberraciones es mayor.

El bromuro de plata está contenido en la emulsión en forma de pequeños vidrios casi iguales entre sí. Si la mancha aberración, que representa la imagen de un punto, es suficientemente pequeña para ser contenida en el interior de un vidrio de bromuro de plata, este es iluminado por completo y, una vez revelado, da un grano de plata. Este grano representa un punto de la imagen conjugado de un punto del objeto.

El diámetro de un grano es de $10 \text{ n}\mu$ a 30μ para una emulsión de gelatina y de 1μ para una emulsión de colodión. De una emulsión a otra varía, aunque es prácticamente constante para una emulsión dada.

Si la mancha aberración es mayor que un vidrio (o que el grano), muchos vidrios son transformados en granos de plata y forman una mancha negra, que es la denominada mancha de aberración.

Así, un punto es representado sobre una placa o película:

- Por una mancha igual a la mancha de aberración, si esta es mayor que el grano.
- Por una mancha igual al grano si la mancha de aberración es igual o inferior al grano.

Por tanto, es inútil corregir el objetivo en un punto que dé una mancha de aberración más pequeña que el grano; es suficiente que sea de dimensiones iguales al grano para poder decir que el objetivo no limita la nitidez de la imagen.

Veremos que para los usos ordinarios de la fotografía un punto puede estar representado por un círculo mayor que el grano sin perjudicar la nitidez de la imagen. Por tanto, es este círculo, que se llama círculo de tolerancia, el que limita la nitidez y no el grano.

De todas formas, un buen objetivo siempre está suficientemente corregido porque la mancha de aberración sea ligeramente inferior al grano en el interior de un campo que corresponde al formato de la placa o de la película.

Se debe remarcar que, si se desea una buena claridad, se da siempre una apertura bastante grande al objetivo fotográfico. Esto hace que los fenómenos de difracción no influyan en el diámetro de la mancha imagen que, por lo tanto, recibe sólo el nombre de mancha de aberración.

2. Cualidades que debe tener una cámara

a) Primera cualidad. Un tiempo de exposición bastante corto, de manera que se puedan tomar instantáneas rápidas de escenas en movimiento, aunque la iluminación no sea muy fuerte. Por esto hace falta una buena claridad, es decir, una apertura relativa tan grande como sea posible, mayor en todo caso que la exigida por la aproximación de Gauss.

b) Segunda cualidad. Un gran campo, de manera que se puedan tomar panorámicas y fotografiar objetos a una distancia pequeña (monumentos, grupos, documentos muy grandes).

Notemos que no se trata del campo geométrico total, que es el conjunto de puntos del espacio que dan una imagen buena o mala en la placa, y que depende de la forma y de las dimensiones de la cámara negra, del diafragma y de las monturas de las lentes del objetivo. Se trata de un campo nítido, que es el conjunto de puntos del espacio que dan una imagen suficientemente puntual sobre la placa o la película. El aumento del campo, a plena apertura, depende evidentemente de la corrección de las aberraciones y es inútil tener un campo geométrico mayor que el campo de nitidez. A menudo se tienen campos de 50° a 75° en las cámaras fotográficas no especializadas que tienen objetivos angulares medios.

c) Tercera cualidad. Una profundidad de campo bastante grande, de forma que los objetos situados en planos diferentes dan simultáneamente imágenes nítidas en la placa o la película.

La profundidad de campo es la distancia entre dos planos límites y es mayor, como veremos, a medida que la distancia focal y las aperturas son más pequeñas.

3.1.3 Soluciones adoptadas

1. Generalidades

De lo que precede resulta que un objetivo fotográfico debe tener una apertura y un campo de nitidez tan grande como sea posible; la mancha de aberración debe ser, en principio, inferior a un grano de la placa.

Debe estar corregida para las aberraciones cromáticas, las aberraciones de apertura y las de campo. Esto es difícil de realizar cuando las aperturas y los campos son grandes.

El problema ha sido resuelto inspirándose en los principios siguientes:

a) Escoger entre una gran apertura y un gran campo

En la mayoría de casos no hay necesidad de un campo mayor de 50 o 60° . Impuesto este campo, es necesario construir objetivos de apertura tan grande como sea posible, siempre que estén bien corregidas las aberraciones de apertura.

En el caso en que se quiera tener un gran campo, se renuncia a obtener una gran apertura y se corrige el objetivo para los defectos de campo.

Hay dos grandes categorías de objetivos: los objetivos de gran apertura y los de gran campo (gran angular).

b) Uso de una pequeña distancia focal

Si disminuye la distancia focal aumenta el ángulo que subtiende el grano, desde el punto nodal imagen del objetivo y, por tanto, aumenta la mancha de aberración tolerable. Esto facilita la corrección de las aberraciones.

Por otra parte, se verá que este hecho aumenta la profundidad de campo.

2. Principales tipos de objetivos

a) Objetivos de gran apertura. Se trata de objetivos cuya apertura relativa es igual o superior a $1/4,5$.

En la figura 3.8 se muestran los diseños más conocidos de objetivos fotográficos estándar, con indicación del número de diafragma máximo y el semicampo.

Con una sola lente, la mejor solución la da un menisco que se aparta del formato que corrige el coma para mejorar la curvatura. El coma se reduce colocando convenientemente el diafragma. En el año 1812 Wollaston lo desarrolló colocando el diafragma delante de la lente (Fig. 3.8 (a)). El hecho de poner el diafragma delante resulta mejor por lo que hace a la curvatura que poner el diafragma detrás de la lente. Posteriormente se intentó acromatizar el sistema substituyendo la lente por un doblete, pero empeoraba el astigmatismo.

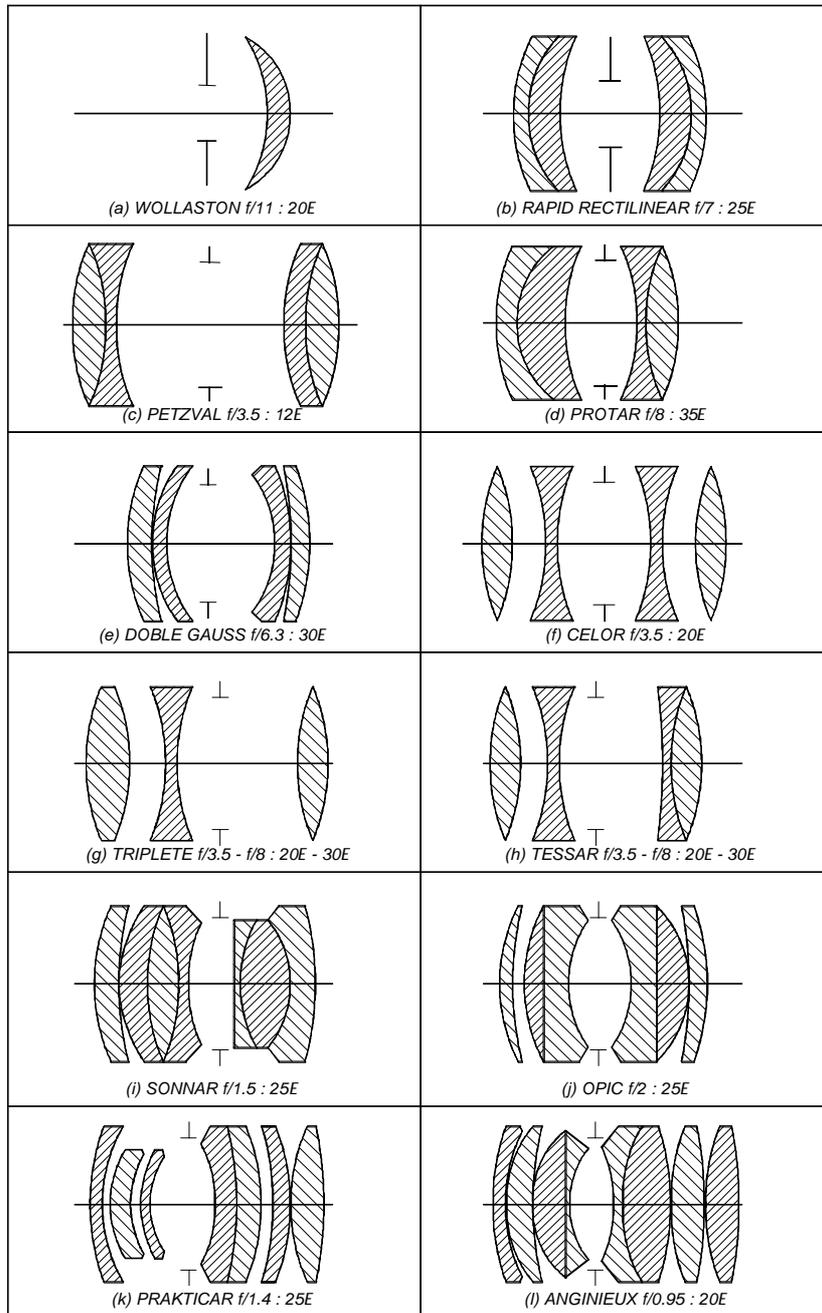


Fig. 3.8

En el año 1860 Steinheil y Dallmeyer descubrieron que un sistema simétrico corregía por sí solo el coma, la distorsión y la cromática de aumento, y diseñaron el Rapid Rectilinear (Fig. 3.8 (b)) que cubre aperturas de $f/7$ a $f/8$ con campos de 20 a 50° .

En realidad, la simetría corrige las aberraciones de campo cuando es completa, y además afecta al objeto y a la imagen, con lo cual el aumento es la unidad. Esta propiedad se conserva suficientemente, para objetos lejanos, como para que sea ventajosa la simetría.

Poco tiempo antes, en el año 1840, Petzval diseñó el objetivo que lleva su nombre (Fig. 3.8 (c)), que corrige muy bien la esférica y da una buena apertura pero permite poco campo. Por esta razón se usa actualmente en proyectores.

Durante el siglo XIX se intentó conjugar la apertura de Petzval con el campo del simétrico, pero no fue hasta el descubrimiento de nuevos tipos de vidrio, en el año 1888, que se consiguió el Protar debido a Zeiss (Fig. 3.8 (d)) y el Doble Gauss (Fig. 3.8 (e)) de Rodenstock y Busch. En el año 1898 Van Höegh desarrolló el Celor (Fig. 3.8 (f)) que experimentó después diversas modificaciones para adaptarse a diferentes aperturas o campos.

Hacia el 1930, Taylor atacó el problema de otra forma. Abandonó el formato simétrico y, para reducir la curvatura, llegó al Triplete (Fig. 3.8 (g)) con el cual cubría gran variedad de aperturas y campos, y resultó un diseño más barato que los anteriores.

Rudolph llegó por diferente camino al Tessar (Fig. 3.8 (h)), donde las dos primeras lentes forman un sistema casi afocal que sólo contribuye a corregir las aberraciones.

Mediante el desdoblamiento de las dos lentes se han conseguido derivados del Triplete como el Sonar (Fig. 3.8 (i)), realizado por Zeiss (1934), que fue muy utilizado antes del descubrimiento de las láminas antirreflejantes al tener sólo seis superficies aire-vidrio. El Opic (Fig. 3.8 (j)) es derivado del simétrico por desdoblamiento de las lentes frontales. Actualmente, coexisten los derivados del Triplete y del simétrico, como el Prakticar (Fig. 3.8 (k)) y el debido a Angénieux (Fig. 3.8 (l)), con los que se consiguen grandes aperturas desdoblando las lentes frontales. Casi todos los objetivos japoneses son derivados del simétrico con lentes desdobladas.

b) Objetivos de gran campo (grandes angulares). Los grandes angulares están ante todo corregidos de los defectos de campo. Si las superficies tienen los centros próximos al centro del diafragma, se consigue corregir como mínimo el astigmatismo; si son simétricas se asegura una buena corrección de la distorsión.

Ya se ha visto el Doblete de Gauss, que se puede considerar el primer gran angular. En el año 1900 Van Höegh introdujo el Hypergon (Fig. 3.9 (a)), que funcionaba con una apertura muy pequeña y un gran campo, de 70° .

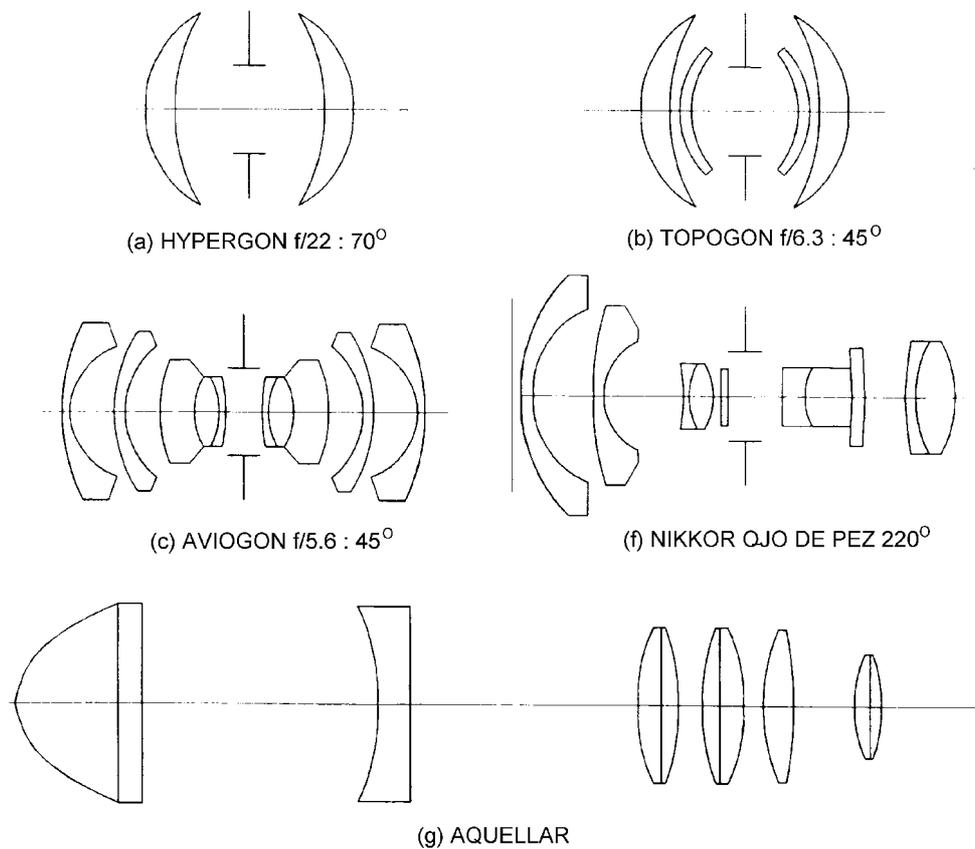


Fig. 3.9

Richter, de la casa Zeiss, diseñó el Topogon el año 1933 (Fig. 3.9 b) con una apertura mayor. Posteriormente se consiguió aperturas mayores con gran campo y se presentaron dos tipos de problemas:

1. La disminución de luz en los bordes de la imagen, debida a que la pupila de entrada se ve como una elipse desde los puntos fuera del eje y la sección del haz disminuye de área. Este problema se soluciona con un filtro más oscurecido por el centro que por los bordes, igualando la iluminación.
2. La distorsión es muy difícil de corregir para grandes campos. El Aviogon, por ejemplo, (Fig. 3.9 c) es un objetivo de fotografía aérea que necesita una gran cantidad de lentes para corregirla.

Versiones más modernas y mejor corregidas son, por ejemplo, el Noctilux (Fig. 3.9 (d)) y el Hologen (Fig. 3.9 (e)), y como verdaderos grandes angulares hay el ojo de pez Nikkor con 220° (Fig. 3.9 (f)) y el Aquellar de 360° (Fig. 3.9 (g)).

c) Objetivos de reflexión. En determinados tipos de objetivos se utilizan superficies reflectantes para converger los rayos luminosos. Son muy antiguos los objetivos de telescopios de observación astronómica y pueden ser de diversos tipos, como los representados en la figura 3.10.

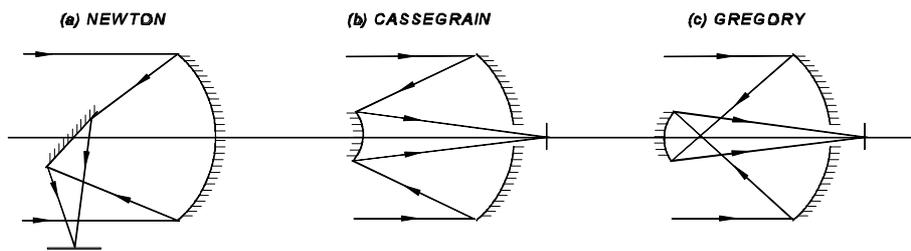


Fig. 3.10

Los objetivos de reflexión presentan ciertas ventajas respecto a los dioptrios:

- Ausencia de dispersión cromática.
- Menor longitud del sistema para la misma focal.
- Mayor facilidad de tallado, por tener que trabajar una sola cara.

En contrapartida presentan algunos inconvenientes:

- La obturación que se debe utilizar elimina los rayos de la zona paraxial y reduce la apertura.
- Los espejos esféricos presentan una fuerte aberración esférica, pero tienen gran coma y astigmatismo para pequeños ángulos de campo.
- No se pueden utilizar diafragmas de iris para controlar la iluminación, por tanto, se necesitan filtros oscurecidos.

El uso de reflectores es muy recomendable en los sistemas de gran focal, como en los telescopios citados anteriormente. También son muy útiles en los teleobjetivos ya que su dimensión se puede reducir a un tercio de la focal.

En la década de los años 30, Schmidt descubrió que los haces de luz que atraviesan un diafragma colocado en el centro de curvatura de un espejo esférico se comportaban de la misma manera para todas las inclinaciones, y se podía cubrir un campo extenso si se corregía la esférica del espejo, sin deformarlo, para transformarlo en uno parabólico. Resolvió el problema colocando en el centro de curvatura una placa con una superficie no esférica, que corrige la esférica para las diferentes alturas, variando su espesor.

Si se utiliza una película fotográfica curvada se pueden conseguir ángulos de campo grandes (Fig. 3.11).

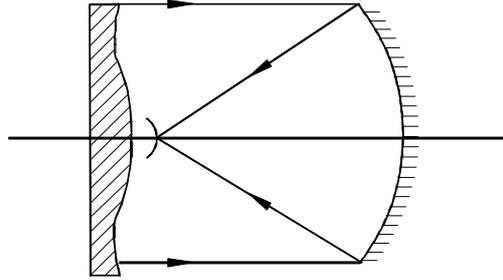


Fig. 3.11

Sin embargo, se prefieren los sistemas correctores esféricos, aprovechando que la esférica introducida por una lente divergente es de signo contrario a la del espejo esférico. En algunas ocasiones se utilizan formatos de menisco corrector y de espejo esférico concéntricos respecto a la posición del diafragma, llamados sistemas monocéntricos. Estos son útiles en medias aperturas y campos grandes cuando se necesita una dimensión pequeña y cuando se admite cierta cromática (Fig. 3.12).

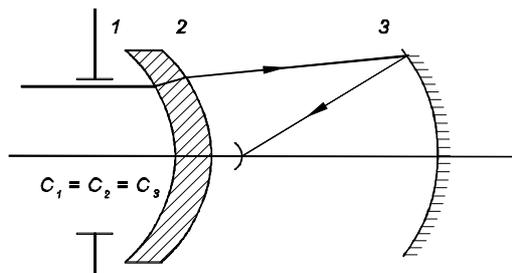


Fig. 3.12

Otro formato es el del menisco de Maksutov en el que ambas superficies compensan sus cromáticas de posición y eliminan el espectro secundario, y esto hace que se prefieran para aperturas grandes y campos pequeños.

A veces se utilizan correctores compuestos de diversas lentes que formen un sistema afocal anterior al sistema, y corrigen la esférica sin introducir apenas cromáticas.

En todos estos correctores se acostumbra a utilizar un montaje de Cassegrain en el que el segundo espejo se forma metalizando el área central de la última superficie del corrector; así se simplifica el montaje y se aligera el peso. A menudo se utilizan correctores situados detrás del espejo secundario, que mejoran las aberraciones de campo sin afectar los puntos del eje, ya que se encuentra cerca del plano focal. Se les llama aplanadores y se utilizan también en combinación con objetivos dióptricos.

En la figura 3.13 se muestra un objetivo catadióptrico con un corrector afocal compuesto de tres lentes y de un aplanador de campo posterior de dos lentes, que cubre grandes aperturas. Su característica más destacable es que usa un solo tipo de vidrio.

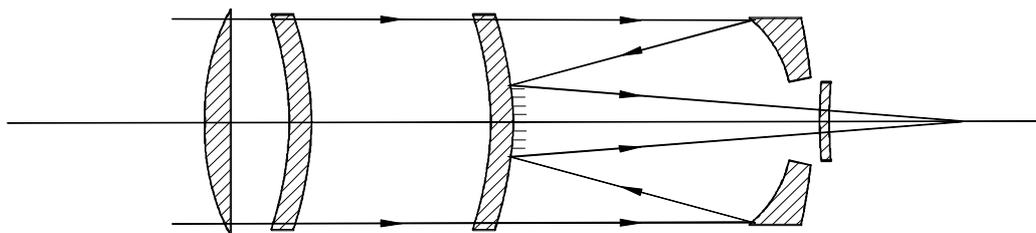


Fig. 3.13

d) Corrección de aberraciones. Al corregir los objetivos fotográficos se debe tener en cuenta que la película será ampliada, por lo que la resolución debe ser mayor que la del ojo. También se debe tener presente el uso que se dará al objetivo; no es lo mismo un objetivo de retrato, en el que conviene dejar una esférica residual que suavice los contornos (*flou*), que un objetivo de observación aérea, que debe dar una imagen perfecta. En general, se puede decir que deben ser corregidas todas las aberraciones, y esto implica que conseguir un buen objetivo fotográfico es una labor difícil, en cuanto se exige algo de apertura y campo.

El coma debe ser completamente eliminado, la distorsión no debe superar el 0,5%, conviene que el astigmatismo esté corregido para un ángulo de campo y se debe dejar una curvatura pequeña que no

afecte a la imagen. Según las exigencias bastará acromatizar el objetivo o será necesario eliminar el espectro secundario. La cromática de aumento debe estar bien corregida.

Los objetivos corregidos de las aberraciones de apertura y del astigmatismo se denominan anastigmáticos. Cuando, además, la curvatura de campo está también corregida, en la industria o en el comercio de la fotografía, se suele hablar de objetivos aplanáticos, aunque la palabra aplanático tenga otros significados en óptica (que cumple la ley de los senos de Abbe).

Notas. A pesar de lo que se acaba de ver y del teleobjetivo, que se verá más adelante, hay una gran variedad de objetivos y no todos derivan del Petzval, del Taylor o del Hypergone; no es importante revisarlos pero tampoco se puede ignorar su existencia.

Los profesionales de la fotografía utilizan a menudo objetivos concebidos para un uso determinado, reproducciones de documentos, fotografías de monumentos y de paisajes, etc. Estos objetivos especializados entran en las dos grandes categorías mencionadas anteriormente.

Las cámaras fotográficas habituales deben ser muy claras, aunque no suele haber necesidad de un gran campo. Son los campos de gran apertura.

Las cámaras destinadas a la fotografía de documentos tienen que estar bien corregidas de distorsión; entran en la categoría de los grandes angulares. Se las acostumbra a calificar de rectilíneas o de ortoscópicas y no tienen necesidad de una gran apertura; el tiempo de exposición puede ser largo (objetivos inanimados).

Los objetivos destinados a la fotografía de paisaje también son grandes angulares. Se han corregido, en el proceso de fabricación, de astigmatismo y de curvatura de campo.

3. Conclusiones

- Existen muchos tipos de objetivos fotográficos.
- Los más corrientes (cámaras de aficionados) tienen un campo de 50° - 60°.
- Es la apertura del objetivo, cuando es de un tipo corriente, la que determina el valor técnico y comercial.

3.2 El objetivo fotográfico. Características principales

Entre las cualidades de un objetivo, no se ha comentado el campo de nitidez y la apertura. En este capítulo, se estudiará el aumento y el campo transversal ligados a la distancia focal y al formato y se recuperará la noción de apertura ligada a la profundidad de campo y a la noción de claridad.

3.2.1 Aumento y distancia focal

1. Aumento de la imagen y distancia focal

- Relación fundamental. Recordaremos el principio óptico de la fotografía. Un vector y del objeto tiene por imagen, sobre la placa o la película, el vector y' .

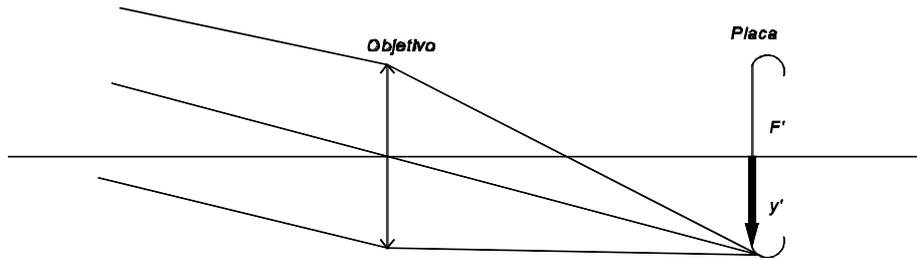


Fig. 3.14

Se llama aumento del objetivo el cociente y'/y (Fig. 3.14 y 3.15), que según la fórmula de Newton es igual a

$$\frac{y'}{y} = -\frac{f}{z}$$

Si α es el diámetro aparente de y ,

$$\frac{y}{z} = \operatorname{tg} \alpha$$

De estas dos relaciones se deduce otra vez que

$$y' = f' \operatorname{tg} \alpha$$

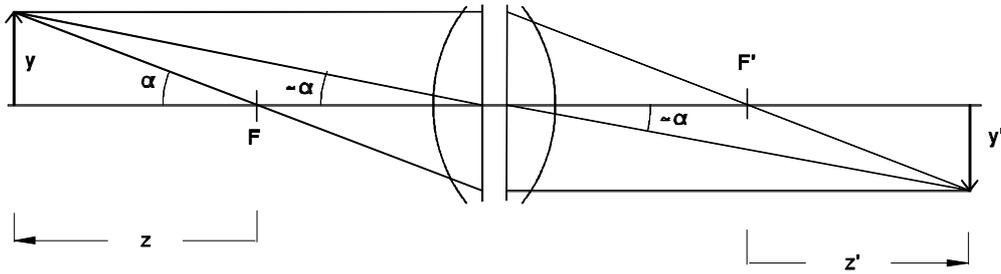


Fig. 3.15

La imagen de un objeto de diámetro aparente dado es proporcional a la distancia focal. Así, el aumento puede ser expresado por la distancia focal.

- Formato. Suponiendo que B es el extremo del campo de nitidez, entonces el punto A' es entonces el centro de un círculo de radio $A'B'=y'$ en el exterior del cual las imágenes no son buenas.

La fotografía debe quedar en el interior de un rectángulo o de un cuadrado, donde la diagonal es igual a $2y'A'B'$. La relación $y' = f' \cdot \operatorname{tg}''$ es (en la aproximación de Gauss):

$$2y' = f' \operatorname{tg} 2\alpha$$

siendo $2''$ el campo de nitidez, que es prácticamente el mismo para todos los objetivos (45°).

Por tanto, el formato medido por la diagonal de la fotografía es proporcional a la distancia focal. Así, los objetivos de grandes focales son objetivos de gran formato, y viceversa.

Aún se encuentran aparatos fotográficos de focal igual a 110 mm y formato 6x9 cm. Si se busca el formato semejante para una cámara fotográfica de focal igual a 45 mm (el más frecuente actualmente), se tiene:

$$\frac{60}{110} = 24,5 \text{ mm} \quad i \quad \frac{90}{110} = 36,8 \text{ mm}$$

Efectivamente, los objetivos de 45 a 50 mm de focal trabajan sobre un formato de 24x36 cm o sobre un formato parecido.

Nótese que si $2''$ es del orden de 45° , $tg 2''$ es del orden de l y $2y'$ es del orden de f' . Esto es lo que se constata en los ejemplos citados, si se calcula la diagonal del rectángulo.

La tabla 3.3 muestra los formatos para los tipos más usuales de películas fotográficas.

Tabla 3.3 Tipos más usuales de películas fotográficas

<i>Formato</i>	<i>Uso</i>
3,55x4,9 mm	cine 8 mm
4x5,36 mm	super 8 mm
7,44x10,05 mm	cine 16 mm
8x11 mm	foto compacta
10x14 mm	foto compacta
14x21 mm	foto compacta
16x22 mm	cine normal 35 mm
18x24 mm	foto semiformato
24x36 mm	fotocámara normal
23x52,5 mm	cinemascope
6x6 cm	foto reportero/moda
9x12 cm	foto técnica
13x18 cm	foto técnica
18x54 cm	foto técnica
18x18 cm	foto técnica/aerofotografía
30x30 cm	aerofotografía
50x50 cm	aerofotografía
30x40 cm	artes gráficas
50x60 cm	artes gráficas
70x80 cm	artes gráficas

2. Valor de la distancia focal

Lo más simple es medir la imagen y' de un segmento y suficientemente lejano, sobre vidrio esmerilado, después de enfocararlo sobre el vidrio y calcular $tg \alpha''$ dividiendo la dimensión del objeto y por la distancia desde este hasta el objetivo. Seguidamente, se calcula f' , que es igual a $y'/tg \alpha''$ (relación fundamental). Se desprecia la distancia focal respecto a la distancia z , ya que α es el ángulo que subtiende y desde F .

Para medir la focal también se puede proceder de la forma siguiente (Método de Davane-Martin):

Después de haber enfocado la imagen de un objeto en el infinito sobre un vidrio esmerilado, se mide su distancia a la cara posterior del objetivo. Luego, teniendo el objeto y la imagen en los puntos antiprincipales, se comprueba que las dimensiones del objeto y de la imagen sean las mismas controlando la igualdad de la graduación imagen trazada sobre el esmerilado que sirve de pantalla con la de una

graduación idéntica en el objeto. Entonces, desde la cara posterior del objetivo, es medida la posición del punto antiprincipal imagen.

Si el objetivo está fijo, la distancia del foco imagen al punto antiprincipal imagen, equivale al desplazamiento del vidrio esmerilado, y es igual a la distancia focal.

- Valor de f' . Después de lo que se ha visto en los párrafos precedentes, tiene interés coger grandes distancias focales de manera que los detalles sean discernibles más fácilmente. Para esto se aumenta la longitud total de la cámara fotográfica. Por otra parte, una distancia focal corta permite obtener un campo un poco mayor y, tal como veremos más adelante, permite una gran profundidad de campo.

Prácticamente f' , después de haber estado de 200 mm en los primeros tiempos de la fotografía, ha pasado a 100 mm, y actualmente se utilizan focales de 50 mm o inferiores. Pero cuando el objeto está más alejado y no se puede acercar (fotografía astronómica, fotografía desde un avión) es necesario tener una gran focal, a pesar de la distancia objeto-placa. Esto se consigue mediante una combinación de lentes de campo pequeño, llamada teleobjetivo. Otra solución sería ampliar mucho las placas obtenidas con objetivos normales, pero enseguida aparecen los granos de la emulsión y los defectos que, si la fotografía es pequeña, no son resueltos por el ojo, pero que en la ampliación se hacen insoportables.

3. Teleobjetivo

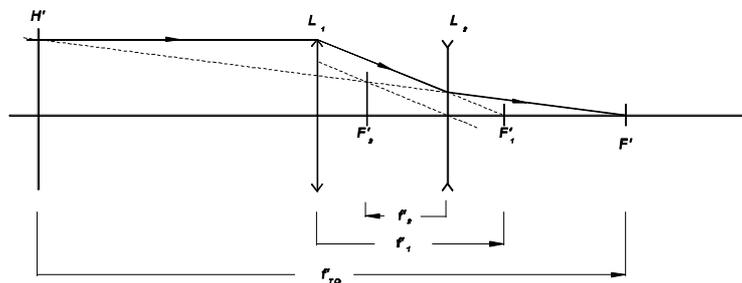


Fig. 3.16

- Principio. Un teleobjetivo es una combinación de un sistema convergente y un sistema divergente; el divergente tiene una focal al menos dos veces más pequeña que el convergente. Los dos sistemas tienen a menudo un intersticio muy débil, y para simplificar se representan como dos lentes delgadas (Fig. 3.16). El truco del teleobjetivo está en el hecho de que la distancia focal f' es grande, ya que el plano principal imagen H' del sistema se encuentra por delante de la primera lente (Fig. 3.16).

En la figura 3.17 (a) se muestra la obtención de la imagen y'_1 a través de un teleobjetivo, de un objeto extenso y .

En la figura 3.17 (b) se muestra la obtención de la imagen y'_2 a través de un objetivo convergente (L_3), del mismo objeto extenso y , el objetivo convergente está situado en la misma posición que la lente convergente del teleobjetivo y tiene una focal menor que este.

Comparando la figura 3.17 (a) y 3.17 (b) vemos que, a igual distancia objetivo-imagen (d), la imagen obtenida con el teleobjetivo (y'_1) es mucho mayor que la imagen obtenida con el objetivo convergente (y'_2).

La figura 3.17 (c) muestra que un objetivo convergente (L_4) de igual focal que el teleobjetivo proporciona una imagen y'_4 de las mismas dimensiones que y'_1 , pero con una distancia objetivo-imagen (d_2) mayor.

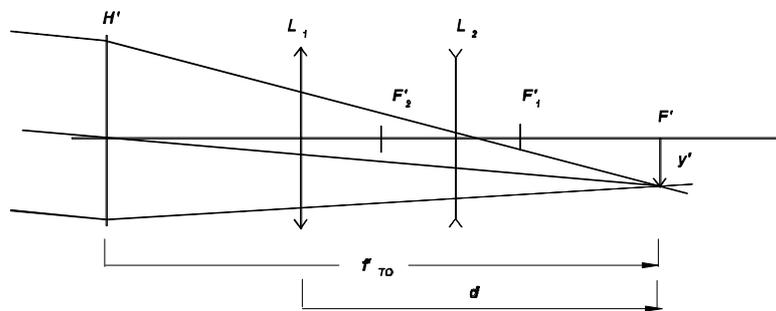


Fig. 3.17a

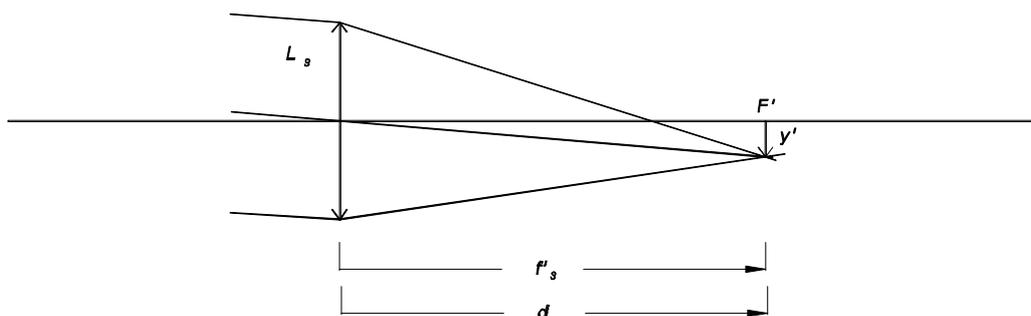


Fig. 3.17b

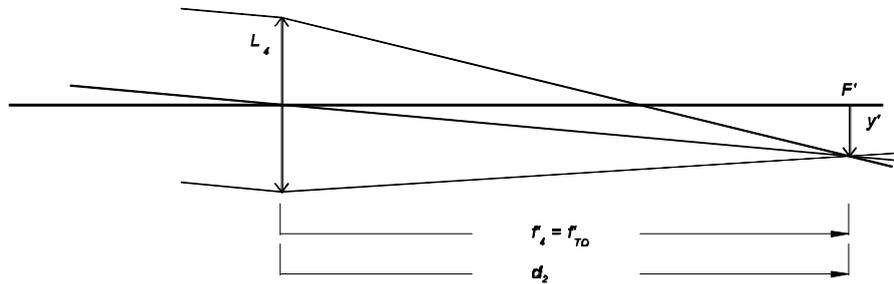


Fig. 3.17c

Se llama efecto del teleobjetivo el cociente entre la distancia frontal imagen y la focal:

$$E = \frac{\overline{L_2 O'}}{f'} \quad (3.4)$$

-Cálculo de los elementos cardinales del teleobjetivo

Para calcular la posición de los planos principales (H y H') y de la focal imagen (F'), se aplican simplemente las fórmulas de asociación de sistemas:

$$f' = \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 + f'_2 - e} \quad H_1 H = \frac{f' - e}{f'_2} \quad H'_2 H' = -\frac{f' e}{f'_1}$$

Dado que en el teleobjetivo $f'_1 > 0$ y $f'_2 < 0$, las distancias $H_1 H$ y $H'_2 H'$ son negativas. Esto nos indica que los planos principales estarán por delante de las lentes, cosa que nos permitirá reducir la longitud del instrumento.

Se ve, por tanto, que para una longitud dada, la distancia focal del teleobjetivo es proporcional al cociente f'_1/f'_2 .

Por ejemplo, se toma $f'_1 = 120$ mm y $f'_2 = 30$ mm, de donde $f' = 4$ d.

Si $f' = 1600$ mm, $d = 400$ mm, y inversamente.

Si $d = 100$ mm, $f' = 400$ mm.

Nota. Hay numerosos tipos de teleobjetivos. Son diferentes entre ellos no solamente por la distancia focal, que puede variar de algunos centímetros (usos normales) a algunos metros (usos astronómicos), sino más aun por su diseño. Algunos llevan espejos en lugar de lentes, pero el principio es el mismo.

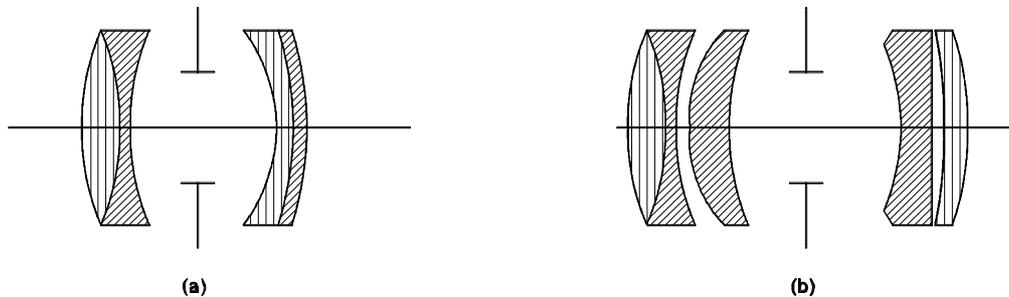


Fig. 3.18

En la figura 3.18 a se representa el formato típico de teleobjetivo y en la 3.18 b un teleobjetivo sin distorsión.

4. Objetivos de focal variable. Zoom

Son sistemas en los que mediante el desplazamiento de alguna o algunas de sus lentes, respecto de las otras, se consigue modificar la distancia focal y, por lo tanto, las dimensiones de la imagen sin cambiar la posición. Se pueden distinguir dos posibilidades:

- Objetivos de compensación óptica. En estos objetivos todas las lentes móviles se desplazan solidarias entre sí y compensan sus contribuciones gracias a una correcta distribución de focales.

Se sitúan las lentes móviles y fijas alternadas, de manera que el plano focal se mantenga dentro de la profundidad de foco. Se cumple que el plano focal pasa por su posición inicial tantas veces como el número de componentes de la sección modificadora de focal. Por ejemplo, en la figura 3.19, el objetivo Berthiot Pan-Cinor hace pasar cuatro veces el plano focal por el mismo punto. La razón de focales máxima y mínima de este objetivo es de 6:1.

- Objetivos de compensación mecánica. En estos objetivos se mantiene la posición del plano focal mediante movimientos independientes de dos elementos llamados variador y compensador.

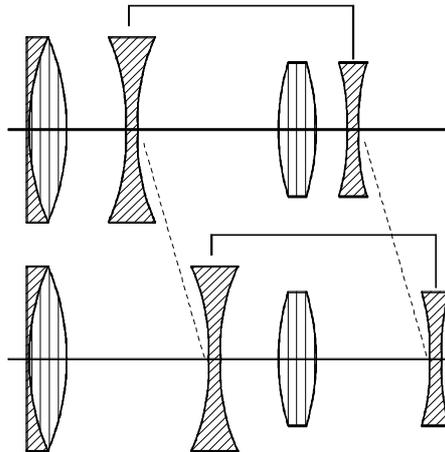


Fig. 3.19

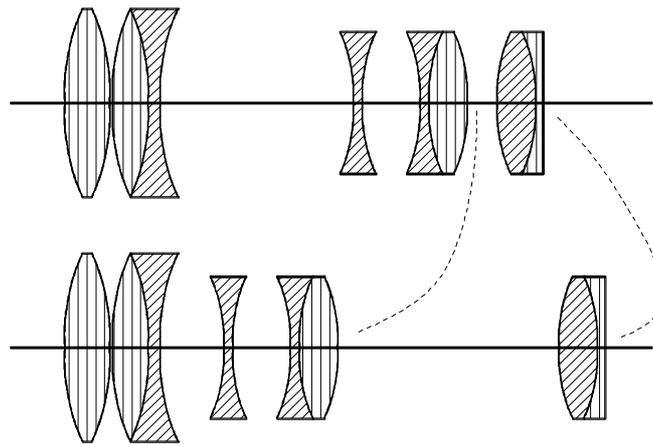


Fig. 3.20

La complicación mecánica es mayor, pues cada elemento necesita un mecanismo diferente para acoplar su movimiento a una ecuación obtenida, al imponer la condición de zoom. Por ejemplo, en la figura 3.20 se muestra el movimiento de los componentes de un zoom de Zeiss para microscopio, que es un sistema afocal, que varía continuamente el aumento y que se acopla a un objetivo corregido por sí mismo con relación de aumentos 10:1.

3.2.2 Apertura y claridad

1. Pupilas

Pupila de entrada. Si se consideran las imágenes de los diversos diafragmas y las diversas monturas, cada una tomada en relación al conjunto de dioptrios que la preceden en sentido contrario a la luz, hay una que limita la apertura de los haces incidentes útiles: es la que se ve desde el plano objeto bajo el ángulo más pequeño, y se llama pupila de entrada.

Todo rayo incidente que pasa por el interior de la pupila de entrada pasará por el interior de las otras antiimágenes de diafragmas y monturas, y en consecuencia pasará por el interior de todos los diafragmas y monturas, y se convertirá finalmente en un rayo emergente que contribuye a formar un punto imagen.

Este rayo incidente es *un rayo útil*.

Todo rayo incidente que pasa por el exterior de la pupila de entrada da, necesariamente, un conjugado que encuentra la parte llena del diafragma conjugado de la pupila de entrada. Este rayo, seguramente será parado (viñetado) y no dará un rayo emergente. Este rayo incidente *no es un rayo útil*. El diafragma conjugado de la pupila de entrada se llama *diafragma de apertura*.

Pupila de salida. Es la imagen de la pupila de entrada a través de todo el sistema, en el sentido de la luz. Es una apertura que limita los haces emergentes. Los vértices de estos haces son los puntos que constituyen la imagen.

En un objetivo fotográfico sólo hay un diafragma y es el conjugado de la pupila de entrada en todos los casos. Lo más corriente es que las dos pupilas sean iguales o al menos tengan los diámetros del mismo orden. Se admite, por tanto, por esta razón que las pupilas están entre los planos principales.

2. Diámetro y número de diafragma

- Se llama diámetro de diafragma al diámetro de la pupila de entrada. Para medir el diámetro de diafragma se sustituye el vidrio esmerilado situado en el foco imagen, después de haber enfocado un objeto lejano, por una cartulina con un pequeño agujero sobre el cual se forma la imagen de una fuente luminosa (Fig. 3.21). Se mide con la pantalla en la salida (el sentido de la luz es opuesto al sentido habitual) el diámetro del haz.

- Se llama número de diafragma N al cociente de la distancia focal f' por el diámetro de diafragma D :

$$N = \frac{f'}{d} \quad (3.6)$$

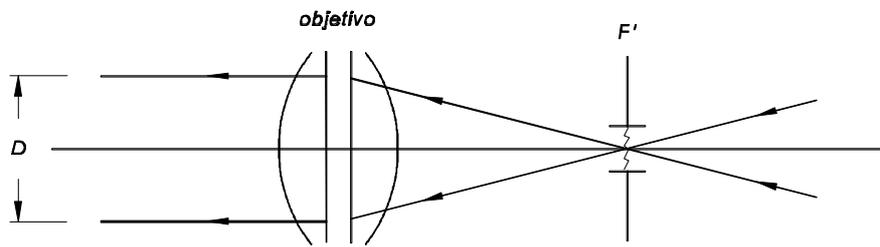


Fig. 3.21

que es el que se suele expresar en los objetivos fotográficos. Por ejemplo: 1:2,8 o $f/2,8$.

Entonces,

$$D = \frac{f'}{N} \quad (3.7)$$

El diafragma de diámetro variable D puede variar de un máximo (apertura llena) a un mínimo, a lo que corresponde un N mínimo (2,8;4;5,6;8 según los objetivos), a un máximo (64 por ejemplo).

A continuación se verá la gran importancia que tiene el número de diafragma en las propiedades del objetivo fotográfico.

3. Tiempo de exposición y apertura

- Relación entre t y N . Ya se ha visto que, a una impresión fotográfica dada, le corresponde un valor determinado de exposición (H), que es el producto del tiempo de exposición (t) por el flujo de energía luminosa que se dirige a la placa por una unidad de superficie (E).

$$H = t E \quad (3.8)$$

Según las leyes de la fotometría, E es proporcional al flujo que entra por la pupila de entrada, y F'

inversamente proporcional a la superficie de la imagen (S').

$$E = \frac{F'}{S'} \quad (3.9)$$

El flujo F' es, a su vez, proporcional a la superficie de la pupila de entrada $F' = k S_{PE}$, donde k es una constante que depende del objeto.

Calculando estas superficies y substituyendo sus valores en (3.9) obtendremos:

$$S_{PE} = \frac{D_{PE}^2}{4} \quad ; \quad S' = \frac{y^2}{4} \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E = \frac{k S_{PE}}{S'} = \frac{k D_{PE}^2}{y'^2} \quad (3.10)$$

Según la figura 3.22 podemos expresar y' en función de f' :

$$y' = \alpha f'$$

y si a su vez expresamos $D_{PE} = f'/N$, de 3.8 y 3.10, obtendremos que:

$$H = E t = t \frac{k \frac{f'^2}{N^2}}{\alpha^2 f'^2} = \frac{k}{\alpha^2} \frac{1}{N^2} t$$

Si englobamos las constantes k y α en una nueva constante K , obtendremos que,

$$H = \frac{t}{N^2} K$$

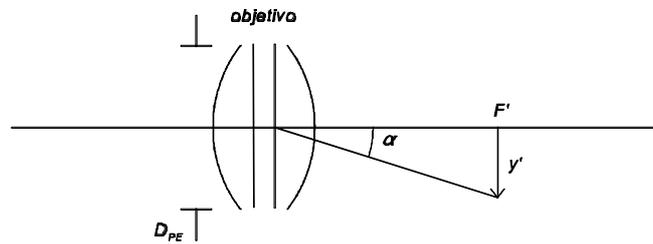


Fig. 3.22

Así, por una exposición y un objeto determinados la relación t/N^2 es constante, y podemos decir que el tiempo de exposición varía con el cuadrado del número de apertura:

$$\frac{t}{N^2} = cte \Rightarrow t = cte N^2$$

Consecuencias: se dice que un objetivo es claro, o rápido, cuando el tiempo de exposición es muy corto.

El tiempo de exposición decrece mucho cuando N disminuye, (siendo el tiempo de exposición mínimo el obtenido para la máxima apertura del objetivo considerado).

Un objetivo claro es, por tanto, aquel en el que el número de diafragma mínimo es pequeño. Por ejemplo, un objetivo capaz de abrir $f/2,8$ es cuatro veces más claro que un objetivo que se abra a $f/5,6$. Esto explica que se deban obtener las aperturas mayores posibles y que N mínimo exprese de alguna manera la calidad (y el precio) de un objetivo, a igual campo.

Otra consecuencia de $t = cte \cdot N^2$ es la graduación en número de diafragma del diámetro de apertura. La secuencia de los números de diafragma se obtiene de multiplicar por $\sqrt{2}$ el número de diafragma anterior; así, si el valor mínimo de N es 2,8, los valores siguientes serán,

$$2,8 \sqrt{2} = 4 ; \quad 4 \sqrt{2} = 5,6 ; \quad 5,6 \sqrt{2} = 8 , \text{ etc.}$$

Esta graduación se hace de forma que, cuando se pasa de un número de diafragma al siguiente, el tiempo de exposición se divide por dos, y se mantiene el mismo valor de exposición.

Así, con unos valores de t y N dados, obtenemos una exposición:

$$H = k \frac{t}{N^2} \quad (3.11)$$

Con el siguiente valor de número de diafragma ($N\sqrt{2}$), y manteniendo la exposición, el valor de tiempo variará de t a t' :

$$H = \frac{t'}{(\sqrt{2} N)^2} = k \frac{t'}{2 N^2} \quad (3.12)$$

Igualando las expresiones 3.11 y 3.12, vemos que, efectivamente, el tiempo necesario es la mitad $t' = t/2$.

Así, para un buen objetivo de número de apertura máximo 1, la graduación de diafragmas, que suele ser el estándar, será:

1 1,4 2 2,8 4 5,6 8 11 16 22 32 45 64

a la que correspondería, por ejemplo, una selección de tiempo de exposición:

1/16 1/8 1/4 1/2 1 2 4 8 16 32 64 128 256

Puede pasar que el valor máximo de la apertura no concuerde con ningún valor de la serie estándar.

3.2.3 Tolerancia de la nitidez y profundidad de campo

1. Círculo de tolerancia

Se demostrará que un punto puede ser representado, sobre una placa o película, por una mancha mayor que el grano de la película y que la mancha de aberración. Se remarca que, si se amplía la fotografía o si se proyecta, esta mancha aumenta en el mismo grado que la fotografía.

Por otra parte, se puede admitir que una fotografía, y su ampliación o proyección, parece nítida cuando la mancha circular, que representa un punto sobre esta foto, sea vista bajo un ángulo inferior a la resolución del ojo (2 minutos o $6 \cdot 10^{-4}$ radianes). La experiencia, en efecto, confirma las consecuencias de esta hipótesis.

Examinemos un caso. Exceptuando el caso en que se proyecte, una foto o una ampliación se observa, normalmente, a una distancia de 400 mm. El diámetro c de la mancha que representa un punto debe ser, según la figura 3.23:

$$\frac{c}{400} \leq 6 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$$

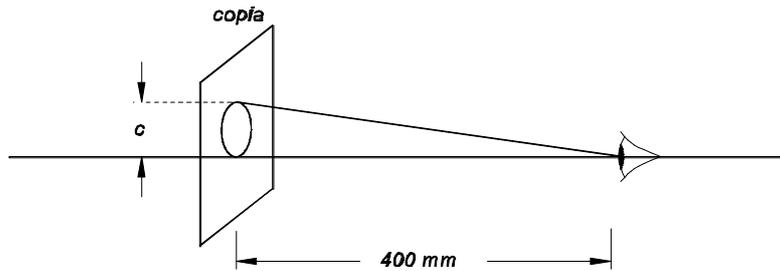


Fig. 3.23

de donde $c \leq 0,24 \text{ mm} \approx 1/4$ de mm.

Si la fotografía no se ha ampliado, será nítida siempre que la mancha, que representa un punto sobre la placa o la película, sea inferior o igual a un círculo de 1/4 de mm de diámetro. Este círculo se llama círculo de tolerancia. Se dice, también, que la tolerancia en la nitidez es de 1/4 de mm.

Si la fotografía es una ampliación, será nítida cuando la mancha que representa un punto en la placa o la película sea inferior o igual a un círculo de $0,25/a$ mm de diámetro, siendo a la ampliación. La mancha ampliada, en efecto, tiene de máximo 0,25 mm de diámetro en estas condiciones.

Si $a = 5$, entonces, $0,25 / a = 0,05 \text{ mm}$. Diremos que el círculo de diámetro 0,05 mm (50μ) (o, en general, el círculo de diámetro $0,25/a$) es el círculo de tolerancia.

Si se proyecta la foto (proyección fija o cine), el diámetro de la mancha, que representa un punto sobre la pantalla, deberá ser visto bajo un ángulo inferior a 2 minutos. El diámetro de la mancha depende, entonces, de la distancia que separa al espectador de la pantalla. Si esta distancia es, por ejemplo, de 10, m el diámetro en cuestión debe ser inferior a 6 mm, tal como demuestra un simple cálculo. Pero esta mancha de 6 mm de diámetro es la proyección de una mancha a veces más pequeña, siendo m el aumento de la proyección. Esta última mancha, o círculo de tolerancia, debe tener un diámetro que no debe rebasar un límite que, en nuestro ejemplo, es $6/m$ ($6 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$ si se toma $m = 100$).

En resumen:

- Se llama círculo de tolerancia al círculo de diámetro máximo en el negativo o diapositiva susceptible de representar un punto sobre la placa o la película, sin que la foto, la ampliación o la proyección deje de verse nítida.

- En los usos habituales, el círculo de tolerancia siempre es mayor (250μ , 50μ , 60μ) que el grano de la película (menos de 30μ). Por ello el grano no limita casi nunca la nitidez.

Notemos que en el caso de ampliaciones muy grandes, cuando se examina una fotografía con lupa o al microscopio (fotos científicas), el grano puede limitar la nitidez. Por ello las películas destinadas a pequeños formatos deben tener un grano fino, y para ciertos usos científicos el colodión reemplaza la gelatina.

2. Profundidad de campo (PdC)

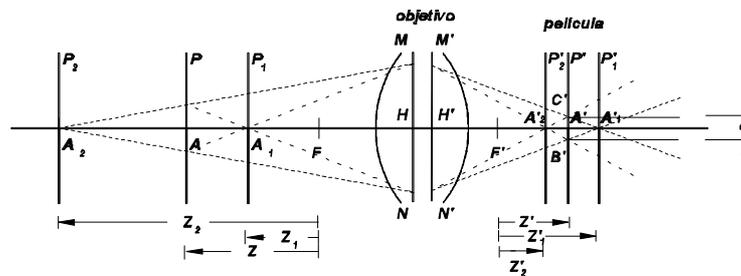


Fig. 3.24

Consideremos que el objetivo está enfocado para un plano objeto P (que es el conjugado del plano P' de la película). Si el plano objeto P se desplaza hacia el objetivo, su conjugado se desplaza en el mismo sentido, de manera que el haz emergente, que corresponde a un punto cualquiera del plano objeto, es cortado por el plano P' según un círculo, cuyo diámetro va creciendo. Este círculo se llama círculo de difracción. El plano objeto acaba por llegar a una cierta posición P_1 a la que corresponde una posición del plano imagen y para la que el círculo de difracción es igual al círculo de tolerancia (Fig. 3.24).

Si el plano objeto se desplaza en el sentido inverso a partir de P , se llega a encontrar un plano P_2 que da un círculo de difracción igual al círculo de tolerancia. De lo que precede, resulta que todo objeto situado entre los planos P_1 y P_2 da una imagen nítida sobre la placa o la película ya que las dimensiones de la mancha que proporciona son menores o iguales al círculo de tolerancia.

Cálculo de profundidad de campo.

La profundidad de campo (dC) es la distancia que podemos mover el objeto (entre los planos P_1 y P_2) sin que apreciemos una imagen desenfocada en el plano de la película P' . Consideremos la figura 3.24, donde se han trazado los haces incidentes que parten de los puntos A_1 y A_2 , y los haces conjugados que tienen los vértices en A'_1 y A'_2 . P_1 , P_2 , P'_1 y P'_2 son los planos correspondientes que cortan el eje y MN y $M'N'$ son las pupilas (que se supone que están contenidas en los planos principales).

Los triángulos $M'N'A'_1$ y $B'C'A'_1$ son semejantes:

$$\frac{B'C'}{M'N'} = \frac{\overline{A'A'_1}}{\overline{H'A'_1}} \quad (3.13)$$

donde $B'C'$ es igual al diámetro C del círculo de tolerancia, y $M'N'$ es el diámetro de la pupila de salida, ya que es igual al de la pupila de entrada. Entonces,

$$M'N' = D_{PS} = D_{PE} = \frac{f'}{N} \quad (3.14)$$

Por otro lado, se puede escribir:

$$\overline{A'A'_1} = \overline{F'A'_1} - \overline{F'A'} = z'_1 - z'$$

Y aplicando la fórmula de Newton:

$$z'_1 = -\frac{f'^2}{z_1} \quad y \quad z' = -\frac{f'^2}{z} \quad (3.16)$$

Finalmente, hace falta observar que $H'A'_1$ siempre es muy próximo a f' , ya que z_1 y también z son grandes delante de f' . Es por esta última razón que se confunden z_1 y HA_1 , z y HA .

Teniendo en cuenta esto, y sustituyendo 3.14 y 3.15 en la ecuación 3.13, se tendrá:

$$\frac{C N}{f'} = \frac{z'_1 - z'}{f'} \rightarrow CN = z_1 - z'$$

Aplicando la fórmula de Newton (3.16):

$$C N = f'^2 \left(\frac{1}{z} - \frac{1}{z_1} \right)$$

Finalmente obtenemos:

$$\frac{1}{z_1} = \frac{1}{z} - \frac{C N}{f'^2} = \frac{f'^2 - CNz}{z f'^2} \rightarrow z_1 = \frac{z f'^2}{f'^2 - CNz} \quad (3.17)$$

De la figura 3.24, también se puede ver que los triángulos $M'N'A'_2$ y $C'B'A'_2$ son semejantes. Procediendo de forma análoga, obtendremos:

$$\frac{1}{z_2} = \frac{1}{z} + \frac{C N}{f'^2} \rightarrow z_2 = \frac{z f'^2}{f'^2 + CNz} \quad (3.18)$$

Notemos que $1/z$, $1/z_1$, $1/z_2$ son negativos y que CN/f'_2 es positivo; por lo tanto, se tiene:

$$|z_2| > |z| > |z_1|$$

A_1 es el más próximo al objetivo, cosa que concuerda con la figura 3.24.

De las fórmulas 3.17 y 3.18 se puede calcular la profundidad de campo. Se obtiene:

$$PdC = A_1A_2 = z_2 - z_1 = z f'^2 \left(\frac{1}{f'^2 + CNz} - \frac{1}{f'^2 - CNz} \right) = \frac{2 f'^2 CNz^2}{f'^4 - (CNz)^2} \quad (3.19)$$

En muchos casos

$$(CNz)^2 \ll f'^4$$

con lo que

$$PdC = 2CN \frac{z^2}{f'^2} = \frac{2CN}{m^2}$$

3. Distancia hiperfocal

Supongamos que la película está situada exactamente en el foco objetivo, entonces, un objeto situado en el infinito se ve enfocado. Si acercamos el objeto sin desplazar la película, se formará una mancha imagen en la película. Mientras la mancha imagen sea menor que el círculo de confusión (C), el objeto se verá enfocado.

La distancia hiperfocal es la distancia a partir de la cual se debe encontrar un objeto, para que su imagen sea nítida, en la película situada en el plano focal imagen (Fig. 3.25). El punto que determina la distancia hiperfocal indica donde comienza el infinito para la cámara fotográfica.

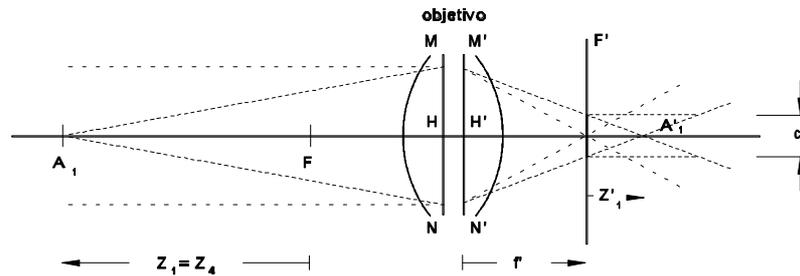


Fig. 3.25

Calculemos el valor desde la distancia hiperfocal.

La relación 3.17 da:

$$\frac{1}{z_1} = \frac{1}{z} - \frac{N C}{f'^2}$$

como el objetivo está enfocado al ∞ , $1/Z = 0$, entonces

$$\frac{1}{z_1} = -\frac{N C}{f'^2}$$

de donde

$$z_1 = z_H = -\frac{f'^2}{N C} \quad (3.20)$$

La distancia hiperfocal es $HA_1 = z_H - f$, pero como que z_H acostumbra a ser bastante mayor f , $HA_1 \approx z_H$

La distancia hiperfocal es directamente proporcional al cuadrado de la distancia focal e inversamente proporcional al número de apertura y al radio del círculo de nitidez.

Disminuyendo la apertura disminuye la distancia hiperfocal, en perjuicio de la claridad. Por esto se tiende a adoptar objetivos de pequeño formato en los que la distancia focal es pequeña.

Ejemplo. Sea $N = 5$, $C = 0,2$ mm y diversos valores de f' . Aplicando la fórmula 3.20

Para $f' = 200$ mm, $z_H = 40$ m

Para $f' = 100$ mm, $z_H = 10$ m

Para $f' = 50$ mm, $z_H = 2,5$ m

Según sea un objetivo de 200 mm, 100 mm o 50 mm, el infinito comenzará a 40 m, 10 m, o a 2,50 m en las condiciones admitidas.

En las cámaras más simples, ($f' \leq 25$ mm), el infinito comienza a 60 cm; se puede decir que está todo enfocado.

Notemos que si se enfoca a la distancia hiperfocal, z_1 es igual a la mitad de la distancia hiperfocal.

Veámoslo:

Si se toma $z = z_H$, la relación 3.17 nos da:

$$\frac{1}{z_1} = \frac{1}{z_H} - \frac{NC}{f'^2} \quad (3.21)$$

Si aplicamos la relación 3.20, tenemos que

$$\frac{1}{z_1} = -\frac{2NC}{f'^2} \rightarrow z_1 = \frac{1}{2} z_H$$

4. Profundidad de foco (Pdf)

Si enfocamos un plano P la película debe estar en el plano P' , conjugado de P por el objetivo. Si la película se desplaza del plano P' , se obtienen imágenes aceptables si el círculo de confusión que se produce sobre la película es menor o igual que el círculo de tolerancia. Así, el desplazamiento de la película será posible sólo entre los puntos C_1 y C_2 (Fig. 3.26).

Librarse de este dilema y utilizar las cualidades de la cámara fotográfica conduce a:

- Hacer objetivos muy bien corregidos de aberraciones, con un campo de nitidez suficiente para un valor de N pequeño (se llega a $N = 1$).
- Dar a estos objetivos distancias focales muy pequeñas de manera que se aumente la profundidad de campo y disminuya la distancia hiperfocal sin tener que diafragmar demasiado.
- Proveer a la cámara fotográfica de un proceso de enfoque preciso, que es muy necesario si la profundidad de foco es pequeña.
- Proveer a la cámara fotográfica de un obturador muy rápido, que permite grandes instantáneas (1/1000 s, y menos) y aprovechar así la máxima claridad del objetivo.
- Usar películas o placas de grano fino, con lo que se puede conseguir grandes ampliaciones, y trabajar con formatos pequeños.

Las buenas cámaras fotográficas modernas responden a estas exigencias y son muy poco voluminosas. El objetivo puede ser fácilmente reemplazado por un gran angular o por un teleobjetivo.

5. Perspectiva. Focal principal

El objetivo representa sobre el plano imagen los objetos situados en el plano de enfoque, y también los situados más cerca y más lejos de este plano. Los objetos situados tras de la distancia de enfoque se representan con una profundidad aparente menor, mientras que los objetos situados más cerca se representan con una profundidad de perspectiva mayor.

La impresión de perspectiva en el observador depende de la distancia a que se coloque la fotografía del ojo. Para obtener una perspectiva natural, es necesario que, al observar la copia fotográfica, se mantengan las dimensiones angulares que tenía el objeto (Fig. 3.27). Para que se mantenga el ángulo, se debe cumplir que

$$\frac{\text{dimensiones negativo}}{\text{focal}} = \frac{\text{dimensiones copia}}{\text{distancia de observación copia}}$$

En esta situación la focal del objetivo debe cumplir:

$$\text{focal} = \frac{\text{dist. de observación copia} \cdot \text{diagonal negativo}}{\text{diagonal copia}}$$

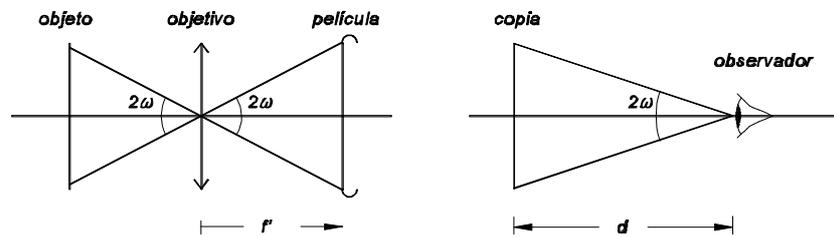


Fig. 3.27

La focal que cumple esta relación se llama focal principal.

Ejemplo. Supongamos una placa de 24x36 mm con la copia más usual de 13x18 cm, con una distancia de observación de 250 mm; se obtiene una focal principal de 54 mm.

Con una placa de semiformato de 18x24 mm, y la misma copia de observación, se obtiene una focal principal de 35 mm; y en una cámara de gran formato con placa 9x12 cm. se obtiene una focal principal de 150 mm.

Cuando se desea un valor diferente de las dimensiones de la copia o de la distancia de observación, se debe encontrar el valor correspondiente de la focal principal que nos dará la perspectiva natural.

3.3 Sistema de proyección

3.3.1 Principio del sistema de proyección

1. Experiencia

Si se coloca una lámpara delante del foco de una lente convergente, se observa una imagen real y mayor que el objeto sobre la pantalla.

Proyectar un objeto es ponerlo cerca del foco de una lente convergente o de un sistema convergente para obtener una imagen real, invertida y mayor, sobre la pantalla. Al sistema convergente se le llama objetivo de proyección.

2. Cálculo

El esquema de un sistema de proyección es el siguiente:

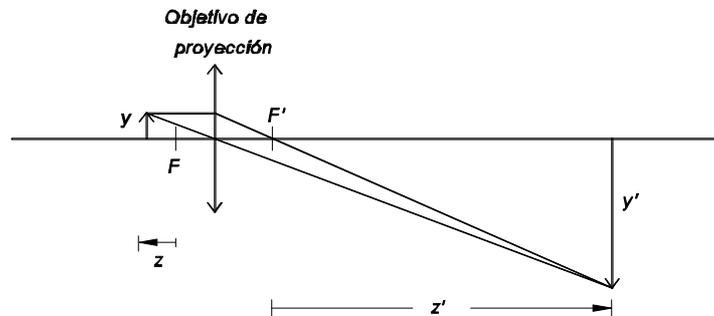


Fig. 3.28

Marcha de la luz. Los haces de luz que salen del objetivo son prácticamente cilíndricos. La distancia de proyección acostumbra a ser muy grande, en comparación con la distancia focal (200 veces la distancia focal, por ejemplo).

Relación fundamental. Expresemos primeramente el aumento. Se tiene:

$$m = \frac{y'}{y} = - \frac{z'}{f'} \quad (3.23)$$

z' es prácticamente la distancia del objeto a la pantalla, ya que f' respecto al valor de z' , en una relación 1/100 (por ejemplo, $z' = 20 \text{ m} = 2000 \text{ cm}$ y $f' = 10 \text{ cm}$).

y' puede ser el tamaño de la pantalla, si es lo suficientemente grande para contener la proyección. La relación 3.23 se escribe, entonces:

$$|y'| = \frac{\text{tamaño pantalla}}{\text{tamaño película}} = \frac{\text{dist. sistema a pantalla}}{\text{distancia focal}} \quad (3.24)$$

Aplicación. Se calcula z . Se expresa y' en función de z :

$$|y'| = \frac{f'}{z} \quad (3.25)$$

$$z = \frac{f'}{|y'|}$$

Se deduce de esta relación que z es muy pequeño. Por ejemplo, para $y' = 200$ y $f' = 10$ cm, se tiene:

$$Z = \frac{100}{200} = 0,5 \text{ mm}$$

Prácticamente, el objeto se debe colocar al lado del foco objeto; después, mediante un mecanismo de cremallera o de tornillo, se efectúa el enfoque final desplazando el objetivo respecto al objeto.

Lo expuesto hasta aquí es lo que se denomina principio diascópico de proyección de objetos transparentes que son atravesados por la luz que proviene del sistema de iluminación (Fig. 3.29 (a)).

Ciertos instrumentos, llamados episcopios, permiten proyectar los objetos opacos (fotografías, por ejemplo). En este caso es necesario iluminar bien por delante el objeto. Los haces luminosos que emanan de él son devueltos por un espejo al objetivo (tiene gran apertura relativa a causa de las pérdidas luminosas por difusión sobre el objeto), que determinará la formación de una imagen real aumentada y relativamente poco iluminada en la pantalla (Fig. 3.29 (b)).

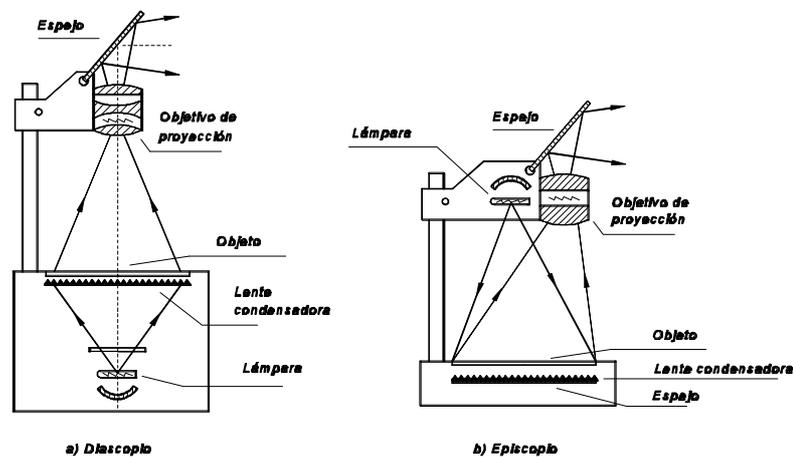


Fig. 3.29

Generalmente, si el mismo instrumento se puede utilizar como episcopio y como diascopio se llama epidiascopio.

Cuando el objeto debe permanecer fijo durante la proyección - como en el caso de las diapositivas -, los proyectores se suelen denominar de vistas fijas. Otras veces deben proyectar numerosas placas en secuencia para obtener en la pantalla la sensación de movimiento, como ocurre en los proyectores de cine.

3.3.2 Funcionamiento

1. Necesidad de un condensador. Experiencia

Es preciso utilizar un condensador para que no haya pérdida de luz (Fig. 3.30), y debe estar adecuadamente colocado. En efecto:

Si se hace una proyección iluminando la diapositiva (objeto) directamente con la lámpara, el campo que se obtiene es pequeño y mal iluminado. Además, en la pantalla se forma una imagen borrosa de la fuente, con lo que la iluminación no es homogénea.

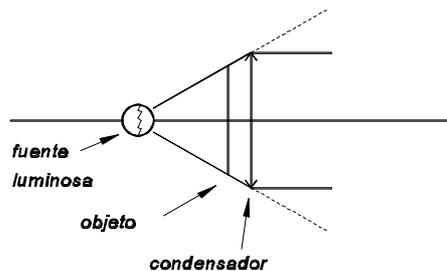


Fig. 3.30

Si se coloca una lente suplementaria (condensador) entre la fuente y el objeto, y cerca de este, la iluminación mejora notablemente.

El sistema de iluminación suele ser de la forma representada en la figura 3.31: un condensador compuesto por dos lentes plano-convexas, una fuente luminosa y, a veces, un espejo posterior, para recoger la luz emitida en esta dirección.

No es necesario que un condensador dé una buena imagen de la fuente sin embargo, como se le exige una gran apertura ($f/1$ es habitual) se procura disminuir la aberración esférica tanto como se puede sin que esto aumente excesivamente su precio.

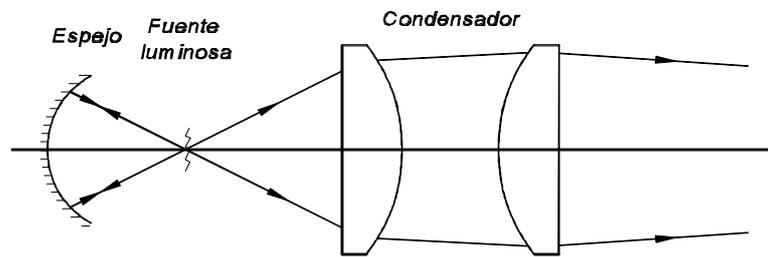


Fig. 3.31

Cuando se proyectan láminas grandes, los condensadores utilizan lentes de Fresnel (Fig. 3.32). En lugar de la lente señalada con línea de puntos se construye otra equivalente formada por dos escalones concéntricos, cuya altura es del orden de décimas de milímetro.

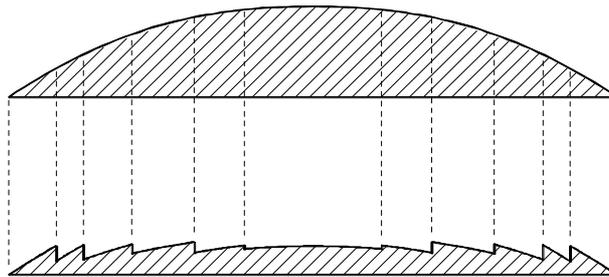


Fig. 3.32

2. Iluminación crítica e iluminación Köhler

Iluminación crítica. Estos tipos de iluminación se utilizan en proyectores cinematográficos. La fuente de luz es proyectada por un condensador sobre la película. El objetivo proyecta la película sobre la pantalla.

Es preciso usar lámparas de arco para que el área sea extensa y su imagen recubra toda la película. Detrás del arco, se puede colocar un espejo que aproveche la luz que se emite en dirección contraria a la película.

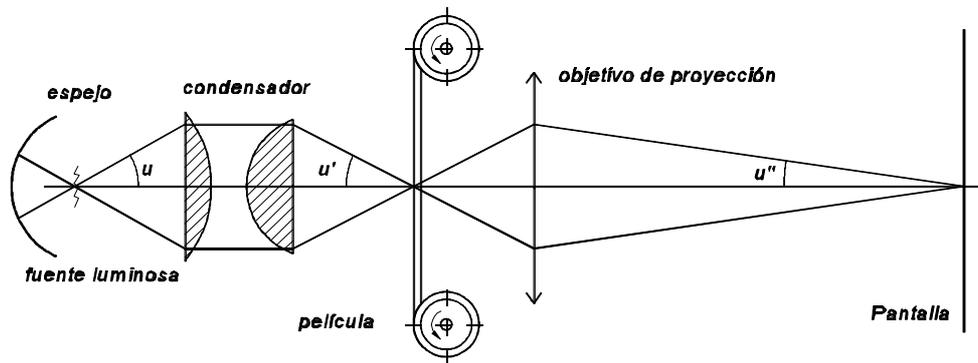


Fig. 3.33

La fuente de luz debe ser muy homogénea ya que su imagen también se proyecta sobre la pantalla. El objetivo debe tener gran apertura para recoger toda la luz que emite la fuente. Como la imagen de la fuente luminosa se concentra sobre la película, si esta se detiene durante un intervalo corto de tiempo llega a quemarse.

La iluminación en la pantalla es

$$E_p = L \pi \tau \operatorname{sen}^2 u''$$

donde τ es el factor de transmitancia del conjunto de iluminación-proyección, L la luminancia de la fuente y u'' la mitad del ángulo por donde se ve la PS del objetivo desde la pantalla.

La iluminación en la pantalla también se puede expresar como

$$E_p = \frac{\pi \tau L_F}{4N^2 \left(1 - \frac{m}{m_p}\right)^2}$$

donde m es el aumento del sistema, m_p el aumento pupilar, y N el número de diafragma del objetivo.

Las normas internacionales exigen que la luminancia de la pantalla sin transparencia sea de 15 nt (cd/m^2).

Marcha de rayos en la iluminación Köhler

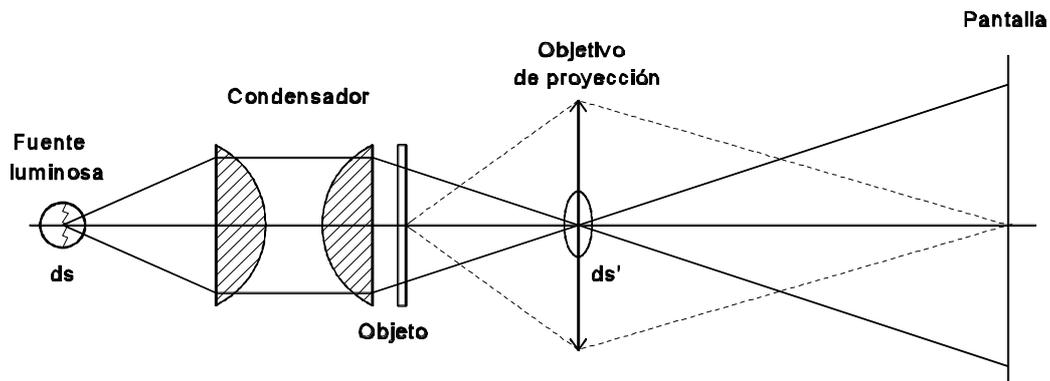


Fig. 3.34

La figura 3.34 muestra la disposición relativa de los sistemas (condensador y objetivo) respecto al objeto que se quiere proyectar y la disposición de la fuente ds , así como la marcha de los rayos que salen de un punto de la fuente.

El condensador da una imagen de la fuente luminosa que debe formarse sobre el objeto. Si la fuente es extensa será necesario imaginarse la infinidad de haces emitidos por el conjunto de sus puntos. Si se quiere captar plenamente toda la luz emitida mediante el condensador, toda la imagen de la fuente debe estar sobre el objetivo, es decir, la imagen de la fuente deberá de ser menor a la sección del plano frontal del objetivo y bien centrada.

3. Cualidades de un objetivo de proyección

Las cualidades de un objetivo son sensiblemente las mismas que las de un objetivo de una cámara fotográfica. Las condiciones de funcionamiento son las mismas, excepto el sentido de propagación de la luz. Es necesario que no produzca distorsión, ni coma y que no haya aberraciones en el eje y que sea acromático. A un objetivo de proyección no se le exige un campo de nitidez muy extenso. Para una película de 18x24 hay suficiente con $25/100 = 1/4$ rad, que es alrededor de 8° (si la distancia focal del objetivo es de 100 mm).

En general, una apertura de $f/3,5$ es suficiente (el diámetro de apertura correspondiente es aproximadamente de 30 mm para una $f = 100$ mm). Con ello es bastante fácil obtener la corrección de las aberraciones cromáticas, de las de apertura y, sobre todo, de las de campo.

La fuente, del mismo orden que su imagen (véase más adelante), rara vez sobrepasa los 30 mm en diagonal, de modo que la imagen de la fuente puede estar contenida en el interior de las pupilas del objetivo.

Si se proyecta sucesivamente un cuadrado con una lente delgada y después con un buen objetivo, ambos de la misma focal y apertura, se ve que los bordes del cuadrado son borrosos con la lente y nítidos con el objetivo. Esta experiencia demuestra la necesidad de tener un objetivo bien corregido, de forma que el campo sea bastante grande, y de tener también una fuente grande para iluminar bien la pantalla.

3.3.3 Definición del sistema y los accesorios

1. Objetivo

Hay diversos tipos de objetivos, pero el más antiguo, que se encuentra además a menudo y del cual derivan la mayoría de los otros objetivos, es el de Petzval. También se suelen utilizar objetivos del tipo triplete de Taylor o Celor.

La distancia focal del objetivo se busca teniendo en cuenta la distancia del objetivo a la pantalla y el aumento buscado (o lo que es lo mismo, de las respectivas dimensiones del objeto a la pantalla). Basta aplicar la relación fundamental (3.24).

Para un mismo sistema se dispone de diferentes objetivos cuyas distancias focales se escalonan de 5 en 5 cm; la más corriente es la de 10 cm. El diámetro de los objetivos varía de 4 a 10 cm.

Los objetivos anamórficos son un tipo de objetivo de proyección en los que la imagen se deforma en una dirección mediante prismas, espejos o lentes cilíndricas. Por ejemplo, en el cinemascopio la anchura de la imagen se comprime para que, con la misma película y proyectando con un sistema que ensanche la imagen, se consiga un campo mayor del calculado mediante el valor de la focal.

2. Condensador y fuente

Condensador. Un condensador se compone generalmente de dos lentes plano-convexas. La fuente luminosa está, en principio, en el foco de la primera lente y su imagen se encuentra, por lo tanto, en el foco imagen de la segunda lente. Estas dos lentes trabajan así en las mejores condiciones desde el punto de vista de la aberración esférica, si se procura poner las caras planas una hacia la fuente y la otra hacia el objetivo (Fig. 3.31).

Hay otros tipos de condensadores (Fig. 3.35).

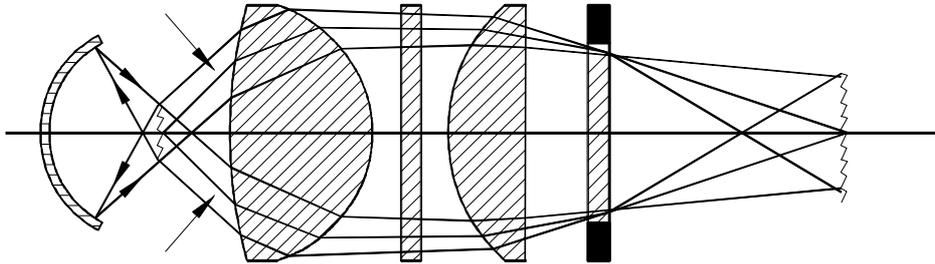


Fig. 3.35

Para tener la iluminación mayor posible, se toma la apertura de la primera lente tan grande como sea posible. Se pone un espejo esférico detrás de la lámpara para recuperar una parte de la luz perdida.

Fuente. Las fuentes son en general lámparas de filamento plano. Las más utilizadas son las lámparas cilíndricas. También hay lámparas esféricas (véase los esquemas sobre los catálogos de las casas de lámparas). Otros veces se usaban arcos de carbón.

Teniendo en cuenta las consideraciones precedentes, se ha establecido el sistema esquematizado para la figura 3.36.

La lámpara es casi esférica, el filamento está descentrado y la primera lente del condensador es cóncava. La bombilla es plateada interiormente y actúa de espejo.

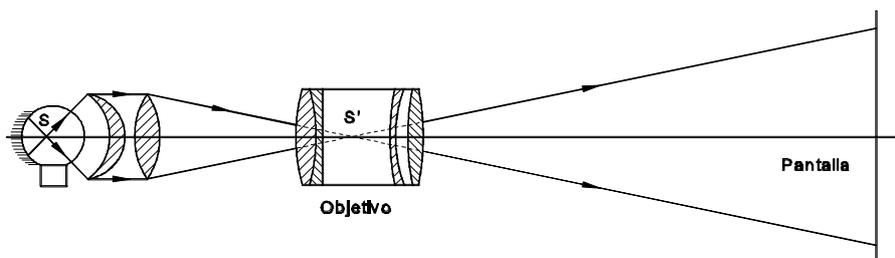


Fig. 3.36

3. linterna. Pasavistas

La fuente y el espejo están cerrados en una caja opaca, la linterna, sobre la que están montados el condensador y el pasavistas. Los pasavistas son más o menos complicados según los aparatos. El objetivo está montado también sobre la linterna, pero es susceptible de desplazarse mediante un dispositivo mecánico en relación a la linterna, según la dirección del eje del aparato, para poder enfocar la imagen sobre la pantalla.

4. Pantallas

Las pantallas trabajan de dos maneras:

- a) Reflejan la luz hacia los ojos.
- b) Difunden la luz.

Las pantallas están hechas generalmente de tejido y pintadas de un blanco especial (un blanco gelatinoso da resultados aceptables). A veces, a fin de aumentar el poder reflejante, se las recubre de pintura metalizada o de una capa de perlas de vidrio que se tocan por los bordes (pantalla perlada).

Es frecuente también encontrar pantallas translúcidas, que son utilizadas para la proyección por transparencia.

Las dimensiones de la pantalla se deducen de la distancia focal del objetivo (si esta está impuesta), de la longitud de la sala (o distancia del aparato a la pantalla) y de las dimensiones de la película. Basta volver a la relación fundamental (3.24). Remarquemos que esta relación puede ser utilizada para encontrar f' conociendo las dimensiones de la película, una vez se han medido las dimensiones de la proyección y las distancias del aparato a la pantalla.

3.3.4 Principio de la cinematografía

1. Principio

La cinematografía está basada en la persistencia de las impresiones luminosas en la retina (que es del orden de 1/15 s).

Experiencia individual. Sobre un cuadrado de papel de dibujo, trazar en una cara la silueta de un pájaro y en el reverso los barrotes de la jaula. Si se hace girar bastante deprisa el cuadrado de papel alrededor de un hilo tenso, se ve el pájaro dentro de la jaula (Fig. 3.37).

Se proyectan las diapositivas de un objeto animado (tomadas sucesivamente a razón de 12 a 15 imágenes por segundo) en la pantalla. El ojo, gracias a la persistencia de las impresiones luminosas sobre la retina, tendrá la impresión de movimientos continuos si las imágenes se suceden a razón de

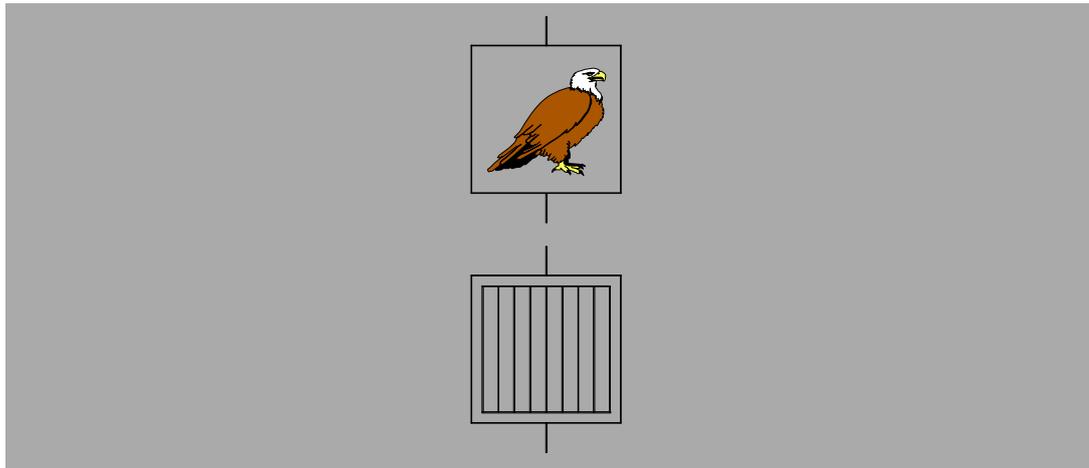


Fig. 3.37

12 a 15 por segundo como mínimo (24 en el caso de película sonora). Después habrá dos operaciones: la toma de vistas (filmación) con una cámara fotográfica especial, y la proyección con un sistema de proyección, también especial.

2. Cámara

Es una cámara fotográfica que presenta las dos características siguientes:

- 1) Es muy grande.
- 2) Tiene un mecanismo accesorio de obturación y de desarrollo de la película.

En efecto, el tiempo de $1/12$ o $1/24$ de segundo que separa dos tomas debe comprender dos fracciones: una corta, que es el tiempo de exposición, durante la que se toma la vista, con la película inmóvil, y una más larga, durante la que el aparato está obturado y la película avanza una longitud correspondiente a la altura del formato (24 mm, por ejemplo).

Para que sea más rápida, el objetivo de la cámara debe tener una gran apertura con un gran campo de nitidez (llega a ser de $f/0,9$). El mecanismo de obturación y desplazamiento de la película no se estudiará aquí. Es parecido al dispositivo, que tiene una función análoga, en la linterna de proyección cinematográfica.

3. Sistema de proyección

Lo que lo diferencia de un sistema de proyección ordinario es el mecanismo de arrastre de la película (Fig. 3.38).

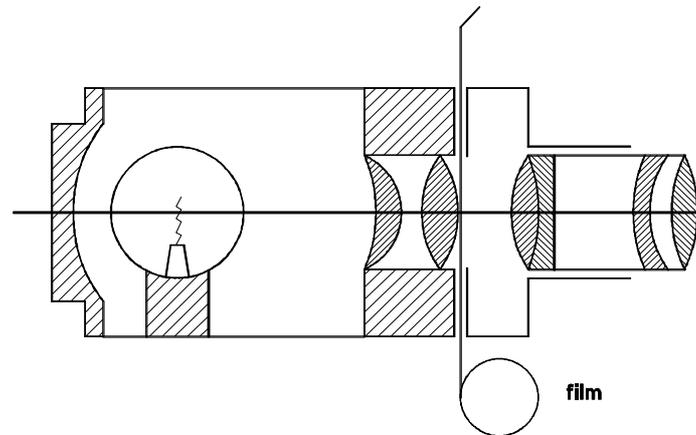


Fig. 3.38

Lo que se quiere conseguir es proyectar un objeto después de sustituirlo por otro, sin que esta sustitución sea sensible al ojo del observador. Durante el paso de una vista a la otra, denominado escamoteo, es necesario que la luz sea interceptada sin que el ojo distinga una perturbación que se llama *hilado*. El obturador que evita el hilado es, en general, un disco partido en cuatro sectores iguales, uno de los cuales es opaco (Fig. 3.39).

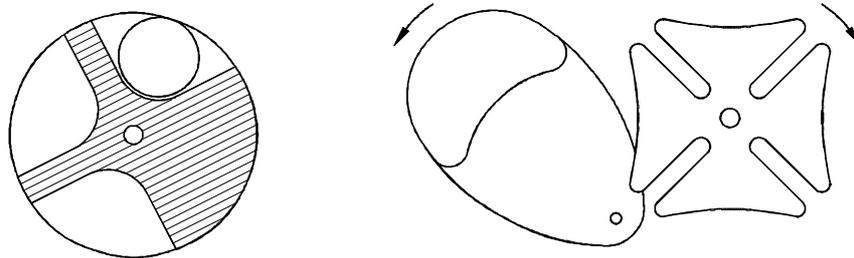


Fig. 3.39

Siendo T el período de rotación de este disco, durante $3/4 T$ la vista estará proyectada y durante $1/4 T$ no habrá nada en la pantalla. Así pues, durante $3/4 T$ la película tendrá que estar inmóvil y durante $1/4 T$ tendrá que avanzar la distancia que separa dos vistas consecutivas. Para realizar este movimiento la película está dotada de perforaciones (en los bordes y entre dos vistas) en las que encajan los dientes de un tambor dentado mandado por una cruz de Malta, que, como su nombre indica, es una cruz con cuatro

ranuras (Fig. 3.39), en las que engrana el dedo de un tambor, arrastrado en un movimiento de rotación uniforme por el motor que lleva el aparato.

El simple examen de la figura 3.39 muestra que el dedo hace girar la cruz durante $1/4$ de vuelta de tambor y que este último, que se aplica sobre la parte cóncava de la cruz, mantiene durante $3/4$ de vuelta la inmovilidad de esta última (y de la película que arrastra el tambor, del cual es solidario).

Notemos que, siendo el movimiento de los tambores continuo y el de la cruz discontinuo, es necesario que la película haga dos bucles que absorban las irregularidades del movimiento. Remarquemos también que la rotación del obturador debe estar sincronizada con el tambor arrastrado por la cruz de Malta.

Remarquemos, para acabar, que la potencia de luz necesaria para iluminar bien la pantalla corre el riesgo de deteriorar, incluso de inflamar, la película, si está mucho tiempo inmóvil delante de la linterna. Por ello se suele disponer también de un obturador fijo que actúa cuando se produce un accidente que inmoviliza la película.