

Óptica

Extracto de “Visión por Computador. Fundamentos y métodos”. Arturo de la Escalera. Prentice Hall, 2001

Copia para el alumno con fines didácticos

Óptica

La función de la óptica de una cámara es captar los rayos luminosos y concentrarlos sobre el sensor sensible de la cámara de video. Después de determinar el tipo de iluminación que mejor se adecua al problema, la elección de una óptica u otra influirá en la calidad de la imagen y el tamaño de los objetos.

1. Principales parámetros.

Cuando los rayos paralelos pasan a través de una lente convexa, convergen hacia un punto que se denomina *punto focal* (figura 2.12). La distancia entre el eje de la lente y el punto se llama *distancia focal*. Como luego se verá, la distancia focal es el parámetro principal a la hora de calcular la posición y el tamaño de los objetos en la imagen. Realmente toda lente tiene dos puntos focales según la luz pase en un sentido o en el opuesto. La distancia focal está también relacionada con la cantidad de luz refractada por la lente. Es el denominado factor de potencia D cuyo valor es la inversa de la distancia focal y su unidad de medida la dioptría.

Otro valor que se encontrará en toda óptica es el número F . Este parámetro indica la relación entre la distancia focal y el diámetro del diafragma:

$$F = \frac{f}{D}$$

Indica la cantidad de luz (brillantez) que se deja pasar por el objetivo (figura 2.12 derecha) y se puede regular mediante un anillo presente en la montura de la óptica. A menores números, mayor diámetro y por tanto mayor luminosidad. La relación entre un número y el siguiente es $\sqrt{2}$: 1.4, 2, 2.8, 4, etc. Pero al ser la cantidad de luz proporcional al cuadrado del diámetro (proporcional al área de la óptica), el pasar de un número a otro indica la mitad (o el doble) de luz. En las ópticas habrá que tener por tanto en cuenta su F mínimo, que indicará la máxima cantidad de luz que puede atravesar la óptica y que tendrá que estar en concordancia con la sensibilidad de la cámara. Por último sobre otro anillo similar se encuentra una escala graduada en metros, que sirve para regular el *enfoque* según la distancia del objeto encuadrado. Al moverlo el plano de elementos sensibles se aproxima a la lente para hacerlo coincidir con el de formación de la imagen (figura 2.13). Este es el modelo denominado de la *lente fina*. La lente fina es aquella en la que todo rayo que entra paralelo al eje óptico pasa por el foco posterior de la lente y todo rayo que pasa por el foco anterior sale de la lente paralelo al eje óptico.

Con ello las ecuaciones que se obtienen (por triángulos semejantes) son:

$$\frac{P}{u-f} = \frac{p}{f}$$
$$\frac{p}{v-f} = \frac{P}{f}$$

por lo que:

$$(u-f)(v-f) = f^2$$
$$uv - f(u+v) = 0$$

$$\frac{uv}{u+v} = f$$

$$\frac{u+v}{uv} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$$

Donde u es la distancia del objeto a la lente, v es la distancia del plano de enfoque a la lente y f la distancia focal. De esta última ecuación puede observarse:

1. Que no se pueden enfocar objetos que se encuentren a una distancia menor de la distancia focal.
2. Que cuando los objetos están lejos (u tiende a infinito), la distancia v se aproxima a la distancia focal f , tal como había sido definida antes.
3. Que puntos más lejanos (o mayores) se enfocan a distancias menores (al tener que ser la suma constante).

¿Cómo obtener la distancia focal necesaria para cada caso? Fijando el tamaño con que se quiere ver el objeto en la imagen. De nuevo, sea:

- P el tamaño del objeto en la realidad.
- p el tamaño del objeto en la imagen.

Se define un nuevo parámetro, el factor de magnificación, M , como:

$$M = \frac{p}{P}$$

que indicará lo grande que se verá un objeto en la imagen. Por triángulos semejantes se obtiene de la figura 2.13 que:

$$\frac{p}{v} = \frac{P}{u} \quad \text{luego} \quad M = \frac{p}{P} = \frac{v}{u}$$

de la fórmula de la lente fina se deriva que:

$$\frac{1}{f} = \frac{u+v}{uv}$$

$$f = \frac{uv}{u+v}$$

$$f = \frac{u}{\frac{u}{v} + 1} = \frac{u}{\frac{1}{M} + 1}$$

y se tiene que la distancia focal es:

$$f = \frac{uM}{M+1}$$

Así, si se desea recoger un objeto de 10cm a 50cm de distancia con un elemento sensor de dimensiones 8.8x8.8mm se necesitará una óptica con una distancia focal de 40.44mm.

2. Ópticas tipo *zoom*.

Una óptica tipo *zoom* es aquella que permite cambiar su distancia focal mientras la imagen sigue bien enfocada. Con una única lente, si se varía su distancia al objeto, se modifica el tamaño de éste pero a costa de tener que enfocarlo de nuevo, ya que la distancia a la que se concentran los rayos ha variado. Si se tienen dos lentes y se mueven correctamente, con la primera se modificaría el tamaño de la imagen (luego cambiaría el factor de magnificación y la distancia focal), mientras que con la segunda se enfocaría bien la imagen. A la primera lente se la denomina *variador* y *compensador* a la segunda.

Con esta explicación del funcionamiento de una óptica de tipo zoom queda claro que no se puede seguir usando el modelo de lente fina. Hay que usar el de lente gruesa, en el que, como su nombre indica, no se puede despreciar el grosor de la lente. De nuevo se tiene que los rayos reflejados por el punto A_o son concentrados por la lente en el punto A_i . Si x_{A_0} y x_{A_i} son las alturas de los puntos A_o y A_i respectivamente, al eje óptico, la magnificación transversal de la lente será:

$$m_t = \frac{x_{A_i}}{x_{A_0}}$$

En toda lente habrá dos planos (uno a cada lado de ella) cuya magnificación transversal es la unidad (planos H_{oxy} y H_{ixy} en la figura). Los puntos de corte del eje óptico con los planos principales se denominan puntos principales, H_o y H_i .

Interesa saber cual es la relación entre los ángulos de los rayos incidentes y los emergentes de la lente. Para ello se puede aplicar la fórmula del invariante de Lagrange que dice que para dos planos conjugados (el formado por los puntos del mundo y donde se enfocan al otro lado de la lente) existe una constante definida por:

$$n u x = Cte$$

Siendo n el coeficiente de refracción del medio por donde se propagan los rayos. Si el medio es el mismo (el aire) se tiene que la relación de ángulos es:

$$\frac{n_o u_o x_o}{n_i u_i x_i} = 1 = \frac{u_o x_o}{u_i x_i} = \frac{u_o}{u_i} \frac{1}{m_t} \longrightarrow \frac{u_i}{u_o} = \frac{1}{m_t}$$

Como m_t es la unidad para los planos principales, todo rayo que pase por el punto principal H_o , sale con el mismo ángulo por su punto conjugado H_i . Puede entonces aplicarse la misma fórmula que para la lente fina; sólo que las distancias entre el punto y la lente, y entre ésta y la formación de la imagen, se refieren ahora a los planos principales y no al centro de la lente. Esto es importante porque en las ópticas de tipo zoom la situación de los planos principales varía espacialmente con la distancia focal.

En el caso de objetivos complejos, como por ejemplo los de tipo *zoom*, existe una considerable pérdida de luz debida a las reflexiones que se producen en cada una de las superficies aire-vidrio y a la absorción de cada lente. No se usará por tanto el número F sino el T que indica cuanta luz es realmente transmitida por el objetivo. La relación entre ambas es:

$$T = 10 \frac{\text{numero}F}{\sqrt{\text{Transmitancia}}}$$

donde la transmitancia del medio está en tanto por ciento.

3. Modelo pin-hole.

Dentro de los modelos que de una manera simple intentan reflejar el comportamiento de la óptica destaca el denominado *pin-hole* (figura 2.15). Este modelo¹ reduce la óptica a un punto situado a la distancia focal de la imagen. Por ello, de todos los rayos luminosos que refleja un punto perteneciente a un objeto, solamente es importante el que pasa directamente por la distancia focal. El modelo pin-hole supone que todos los puntos están enfocados y no tiene en cuenta ninguna de las aberraciones que se verán más adelante. Por triángulos semejantes es fácil ver que las ecuaciones que relacionan un punto en el espacio con su proyección en la imagen son:

¹ Es el modelo de las primerísimas cámaras donde en una caja se realizaba en un lado una apertura muy pequeña y se colocaba la película en el otro extremo de la caja, dejándose durante varias horas que la película se impresione.

$$x = \frac{f}{Z} X$$

$$y = \frac{f}{Z} Y$$

Queda aquí clara la perdida de una dimensión que se explicó en la introducción, ya que todos los puntos cuya relación entre las coordenadas X y Z sea constante darán la misma coordenada x en la imagen (igual con Y , Z e y). Como puede verse en la figura 2.15 la imagen formada está invertida, por lo que habrá que cambiar los sentidos de los ejes vertical y horizontal. Una posibilidad es “suponer” que el sensor se encuentra antes de la distancia focal, con lo que esto ya no es necesario.

Si de cualquiera de las dos ecuaciones anteriores se despeja la distancia focal se tiene:

$$f = Z \frac{x}{X} = ZM$$

donde M era el factor de magnificación. Antes se tenía que:

$$f = Z \frac{M}{M+1}$$

Para que ambas ecuaciones tengan valores aproximados debe darse como condición que el factor de magnificación sea mucho menor que la unidad. Así, con los mismo datos que en el caso anterior, se obtiene una distancia focal de 44mm frente a los 40.44 mm según el modelo de la lente fina. Si el objeto a ver ahora fuera de 30cm, se obtendría una diferencia entre los dos valores de 0.41mm. Depende por tanto de cada caso el que se pueda seguir el modelo más sencillo de lente o no.

El tamaño máximo del objeto cuya imagen puede ser contenida dentro del plano de imagen depende de tres factores:

- El tamaño de la zona sensible de la cámara.
- La distancia a la que se sitúa el objeto enfocado.
- La distancia focal.

Variando estos parámetros se conseguirá que el sistema de visión sea capaz de captar con suficiente resolución los objetos, defectos, etc que se quieran analizar o detectar.

Un parámetro que relaciona la distancia focal y el tamaño de la zona sensible es el *ángulo visual*. Éste se define como el ángulo que forman dos rayos que inciden sobre los bordes externos de la zona sensible de la imagen cuando ésta se encuentra enfocada a una distancia infinita (figura 2.15). De las fórmulas anteriores puede deducirse la expresión matemática del ángulo visual:

$$w = 2 \arctan \frac{CCD}{2f}$$

donde:

- CCD es el tamaño de la zona sensible.
- f es la distancia focal.

Dado que es frecuente que la zona sensible no sea cuadrada sino rectangular es factible hablar de un ángulo visual vertical y de otro horizontal, así como de un ángulo visual según la diagonal.

Valores típicos son:

- Gran angular: $35^\circ - 100^\circ$
- Estándar: $12^\circ - 35^\circ$
- Telefoto: $6^\circ - 12^\circ$

Por último, a las lentes se les pueden añadir unos extensores. Con este accesorio se aumenta la distancia entre el punto focal y el sensor. Los efectos que se producen son:

- Disminuye la profundidad de campo (que se describe a continuación).
- Disminuye el ángulo visual.
- Disminuye la distancia mínima a la que se puede enfocar la óptica.
- Aumenta el factor de magnificación.

4. Profundidad de campo y distancia hiperfocal.

Profundidad de campo.

En teoría, solamente un plano perpendicular al eje óptico de la lente estará enfocado sobre el plano de imagen. Sin embargo, la realidad muestra que, si el objeto tiene profundidad, su imagen aparece enfocada dentro de un cierto margen (por delante y por detrás de la distancia para la que la lente ha sido enfocada) (figura 2.16). Por tanto si un objeto está fuera de foco por menos de un cierto margen, el desenfoque es indetectable, y la imagen aparece nítida. Este efecto viene determinado por el elemento sensible de la cámara y define el *círculo de confusión permisible*. En efecto, y como puede comprobarse en la figura, para puntos situados a distintas distancias su proyección en la imagen cae dentro del mismo elemento sensible, por lo que aparecerán enfocados. Esta zona, por delante y por detrás del plano de imagen, para la cual el desenfoque es menor que el círculo de confusión permisible, se llama *profundidad de enfoque*. La *profundidad de campo* es la zona dentro de la cual el objeto forma una imagen que está dentro de la profundidad de enfoque.

Del dibujo de la figura 2.16 pueden extraerse las tres ecuaciones:

$$\begin{aligned}\frac{1}{f} &= \frac{1}{D} + \frac{1}{u} \\ \frac{1}{f} &= \frac{1}{D+d} + \frac{1}{u-a} \\ \frac{R}{u-a} &= \frac{\delta}{2a}\end{aligned}$$

donde:

- d es la profundidad de campo.
- δ es el tamaño del elemento sensible de la cámara.
- D es la distancia a la que está enfocada la óptica
- f es la distancia focal.
- u es la distancia a la que enfoca el objeto.

De la última ecuación se puede obtener la relación entre u y a :

$$a = \frac{\delta}{2R + \delta} u$$

Si se va con este valor a la segunda ecuación:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{D+d} + \frac{2R+\delta}{2Ru}$$

Luego:

$$u = \frac{2R+\delta}{2R} \frac{f(D+d)}{D+d-f}$$

Si se despeja u de la primera ecuación:

$$u = \frac{fD}{D - f}$$

Igualando:

$$u = \frac{2R + \delta}{2R} \frac{f(D + d)}{D + d - f} = \frac{fD}{D - f}$$

Y despejando d se obtiene:

$$d = \frac{\delta D(D - f)}{2Rf - \delta(D - f)}$$

Y ya que la distancia a la que se encuentra el objeto suele ser mucho mayor que la distancia focal se puede aproximar por:

$$d = \frac{\delta D^2}{2Rf - \delta D}$$

Por último, si se multiplica por la expresión del número F, N_F se tiene la expresión:

$$d = \frac{\delta N_F D^2}{f^2 - \delta N_F D}$$

Para el segundo caso el desarrollo sería similar, sólo que ahora las tres ecuaciones serían:

$$\begin{aligned}\frac{1}{f} &= \frac{1}{D} + \frac{1}{u} \\ \frac{1}{f} &= \frac{1}{D - d} + \frac{1}{u + a} \\ \frac{R}{u + a} &= \frac{\delta}{2a}\end{aligned}$$

y el resultado:

$$d = \frac{\delta N_F D^2}{f^2 + \delta N_F D}$$

De las dos fórmulas obtenidas se puede deducir que la profundidad de campo posee las siguientes características:

- Al aumentar el número F (cerrar el diafragma) aumenta la profundidad de campo (figura 2.17).
- Menores distancias focales dan mayores profundidades de campo.
- Cuanta mayor sea la distancia al objeto enfocado se obtiene una mayor profundidad de campo.
- La profundidad de campo es mayor por detrás que por delante del objeto enfocado.

De la primera característica se puede deducir que el diafragma, además de limitar la intensidad del haz luminoso, mejora la calidad general de la imagen, al aumentar la profundidad de campo; así la nitidez de la imagen mejora notablemente cerrando el diafragma dos o tres puntos, a partir de la máxima abertura, además de por el efecto visto en la profundidad de campo, por el hecho de que se eliminan algunas de las principales aberraciones ópticas o defectos de los objetivos, como se verá más adelante.

Distancia Hiperfocal.

Se define como *distancia hiperfocal*, H , a aquella distancia de enfoque que provoca una profundidad de campo que va desde infinito hasta $\frac{H}{2}$. Por su definición, el enfoque es innecesario dentro de este campo (figura 2.18). Para obtener su valor se tiene que cumplir que en la fórmula obtenida anteriormente para la profundidad de campo máxima, el denominador sea cero, luego:

$$D_{\text{enf}} = H = \frac{f^2}{\delta N_F}$$

Puede comprobarse que sustituyendo este valor en la ecuación de la profundidad de campo mínima se obtiene:

$$d_{\text{min}} = \frac{f^2}{2 \delta N_F} = \frac{H}{2}$$

Como se comentó al principio de este apartado, todas las ópticas permiten variar el enfoque para unas distancias determinadas. La distancia hiperfocal viene dada para el enfoque al infinito, ya que por su definición, todos los objetos se encuentran ya enfocados a partir de esa distancia.

5. Aberraciones ópticas.

El término aberraciones designa las imperfecciones introducidas en las imágenes por los sistemas ópticos. Estas imperfecciones son debidas no a la mala calidad de la lente, sino a que las propiedades vistas hasta ahora no reflejan perfectamente el paso de la luz a través de ella.

Se suelen clasificar en dos tipos:

- Cromáticas.
- Geométricas o aberraciones de Seidel.

Mientras que las aberraciones cromáticas se presentan ya en el eje paraxial, el que pasa por el centro de la lente, las aberraciones geométricas aparecen si los rayos se apartan de él, es decir, si los haces luminosos tienen una abertura importante y proceden de puntos situados fuera de la lente.

Aberraciones cromáticas.

Las aberraciones cromáticas son debidas a los diferentes índices de refracción de los rayos luminosos según su longitud de onda (su color). Este efecto puede ser de dos tipos (figura 2.19):

Aberración cromática longitudinal. Este tipo de aberración provoca que los rayos de distintas longitudes de onda, procedentes de un punto sobre el eje óptico de la lente, se enfoquen sobre diferentes planos de imagen. Por lo tanto, si no fuera por la profundidad de campo, solamente se podría tener enfocado un color.

Aberración cromática lateral. Ocurre debido a que la magnificación de la lente cambia según la longitud de onda del rayo. Se produce un desplazamiento lateral de los puntos de convergencia de los rayos de diferente longitud de onda, de modo que las componentes del color son captadas por diferentes elementos sensibles de la cámara.

Aberraciones de Seidel.

Las cinco aberraciones geométricas básicas son así conocidas en honor del investigador Seidel, que fue quien las clasificó. Estas aberraciones son:

- Esférica.

- Coma.
- Astigmatismo.
- Curvatura de campo.
- Distorsión.

Las cuatro primeras afectan a la nitidez de la imagen y la última a la forma geométrica de los objetos. Su origen está en la ley de la refracción que descubrió Willebrord Snell en 1621 y que lleva su nombre (figura 2.20): la relación entre el ángulo de incidencia, θ_i , y el de refracción θ_r es igual a la relación entre los índices de refracción del medio refractor, n_r , y del incidente, n_i :

$$\frac{n_i}{n_r} = \frac{\sin \theta_r}{\sin \theta_i}$$

Siendo el índice de refracción la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y en ese medio óptico. Así, por ejemplo, en el cristal es de 1.520, en el agua 1.333, y en la córnea 1.376.

Por Taylor la función seno puede descomponerse en la serie,

$$\sin \theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \frac{\theta^7}{7!} + \frac{\theta^9}{9!} - \frac{\theta^{11}}{11!} \dots$$

Si se consideran ángulos pequeños se puede aproximar $\sin \theta = \theta$ y se obtiene el modelo paraxial que es el estudiado hasta ahora. Seidel extendió la aproximación a la tercera potencia de θ y encontró las cinco aberraciones antes nombradas (figura 2.21).

Aberración Esférica

A la hora de definir la distancia focal se dijo que los rayos provenientes del infinito convergían en un punto. Esto, estrictamente hablando, no es cierto. Si tenemos un punto situado en el eje óptico, los rayos luminosos reflejados por él que pasan por la lente tendrán una mayor convergencia a medida que aumente la distancia de su incidencia en el eje perpendicular de la lente. Debido a este efecto los rayos luminosos que provienen de un único punto se proyectarán en un disco (una estrella se vería como un punto luminoso rodeado de un halo). Para cualquier caso se tendrá una imagen con menor contraste y peor detalle. Si el diafragma está a dos o tres posiciones de su F mínima este efecto es menor, ya que al ser el diafragma más pequeño también lo es la inclinación de los rayos que pasan por los extremos de la lente. De forma general se puede usar la fórmula:

$$d = 0.067 \frac{f}{N_F}$$

Donde d indica la distorsión esférica de la lente. La distancia en el eje óptico entre el punto de corte de los rayos que pasan cerca del centro de la lente (que siguen la aproximación paraxial) y el de los rayos que pasan por el borde de la lente se denomina aberración esférica longitudinal. La altura que alcanzan estos rayos es la aberración esférica transversal.

Coma

En el caso de que la lente esté completamente corregida del fenómeno de aberración esférica, otros tipos de aberraciones aparecen en los puntos no pertenecientes a los ejes. La coma o cometa es una de ellas. Hasta ahora se ha supuesto que los rayos que llegan a la lente provienen de puntos situados en el eje paraxial. Cuando esto no es

así los rayos que inciden con un cierto ángulo se concentran en un punto a la misma distancia de la lente pero desplazado lateralmente del punto focal, presentando por tanto distinta magnificación. Al igual que en el caso de la aberración cromática lateral se tiene un cambio en la magnificación por lo que se forma una figura alargada de tipo cometa. Dependiendo de la lente el efecto apuntará al centro de la imagen (coma) cuando la magnificación sea mayor, conforme los rayos pasen más alejados del centro de la lente; o apuntará al exterior de la imagen (cometa), cuando la magnificación sea mayor para el rayo que pasa por el centro de la lente. Esta aberración decrece mucho cuando la superficie de incidencia de los rayos sobre la lente es pequeña, lo que se consigue de nuevo cerrando el diafragma.

Astigmatismo.

El astigmatismo es una aberración que se manifiesta cuando el punto está muy alejado del centro óptico y provoca la impresión de que la lente tienen dos distancias focales distintas. Esto es debido a que en este caso, el cono de rayos que inciden sobre la lente no puede considerarse simétrico. Se puede entonces distinguir dos planos: el meridional y el sagital. El plano meridional está definido por dos rectas: el eje óptico y la recta que contiene al rayo que partiendo del objeto, pasa por el centro de la lente. El plano sagital es aquel que contiene al rayo que pasa por el centro y es perpendicular al plano meridional. Los rayos que parten de los puntos del plano meridional llegan a la lente con una inclinación mayor que los sagitales. Convergen entonces más rápidamente y como resultado tienen una distancia focal más corta que los rayos meridionales. Esta aberración provoca que los rayos procedentes de un punto que no esté situado sobre el eje de la lente, no converjan en un solo punto de la imagen, sino que formen una elipse. La forma de estas elipses depende de la posición del plano de la imagen. Así, los rayos, al salir de la lente, forman un círculo. Al decrecer los rayos meridionales más rápidamente, se forma una elipse cuyo eje mayor está en el plano sagital. El caso extremo será una línea recta en este plano. Al diverger ahora los rayos meridionales y seguir convergiendo los rayos sagitales se volverá a tener un círculo, que se deformará en una recta en el plano meridional, y dará después una elipse que tendrá ahora el eje mayor en ese plano. Como la disminución de la apertura de la lente conduce a un aumento de la profundidad de enfoque, absorbe en cierta medida el problema del astigmatismo, no corrigiéndolo de una manera completa.

Curvatura de campo.

La curvatura de campo es el error que se produce cuando una lente intenta enfocar un objeto plano. Se comprueba entonces que los puntos próximos al centro de la imagen están enfocados pero no ocurre así con los de los extremos. Si se enfocan los extremos se desenfoca el centro de la imagen. Esto es debido a que los rayos no se concentran en un plano sino según una curva. De nuevo, el efecto de esta aberración queda disminuido cuando la superficie de la lente es pequeña. Al igual que ocurría con el astigmatismo, la curvatura de campo puede ser absorbida por la disminución de la abertura de la lente y el aumento de la profundidad de enfoque.

Distorsión.

A diferencia de los otros cuatro tipos, la distorsión provoca una deformación geométrica de la imagen, pero manteniendo todos los puntos enfocados. Este efecto es

debido al distinto aumento de la imagen en función de la distancia de los rayos incidentes respecto al centro de la lente. La deformación puede ser positiva (aumento de la imagen con la distancia al eje) o negativa (disminución de la imagen con la distancia al eje). Matemáticamente puede expresarse como:

$$x_{real} = (1 + g_x d^2) x_{teorica}$$

$$y_{real} = (1 + g_y d^2) y_{teorica}$$

donde: $d = \sqrt{x_{teorica}^2 + y_{teorica}^2}$ y g_x g_y los coeficientes de distorsión, que suele tomarse iguales. La distorsión positiva se manifiesta mediante la formación de una imagen de tipo cojín o corsé a partir de un objeto cuadrado. Para el mismo objeto, el efecto de distorsión negativa será la formación de una imagen de tipo barril. Generalmente distancias focales cortas producen la distorsión de barrilete y largas la de cojín.

Los efectos de todas estas aberraciones pueden observarse en la figura 2.22.

Como se ha ido comentando, incrementar el número F (cerrar el diafragma), redonda en beneficio de la imagen, ya que se aumenta la profundidad de campo y se disminuye la influencia de las aberraciones (pues al ser menor la apertura, el comportamiento de los rayos se aproxima más a la teoría paraxial). Sin embargo puede llegar un punto en que, al cerrar el diafragma, la calidad disminuya en lugar de mejorar. Esto es debido a que el factor dominante es ahora la difracción de la lente. La difracción es una limitación de todo sistema óptico y siempre está presente aunque a veces se encuentre enmascarada por la presencia de las aberraciones. Se produce cuando la luz pasa a través de una apertura pequeña, ya que se dispersa en varias direcciones. Habrá que llegar entonces a un compromiso entre la disminución de las aberraciones y la influencia de la difracción.

2.7. Bibliografía.

- Hecht E., Zajac A. *Óptica*. Addison-Wesley Iberoamericana 1989.
- Willson R. G. *Modeling and calibration of automated zoom lenses*. Carnegie Mellon University. CMU-RI-TR-94-03. January 1994.
- Vernon D. *Machine vision: automated visual inspection and robot vision*, Prentice-Hall, 1991

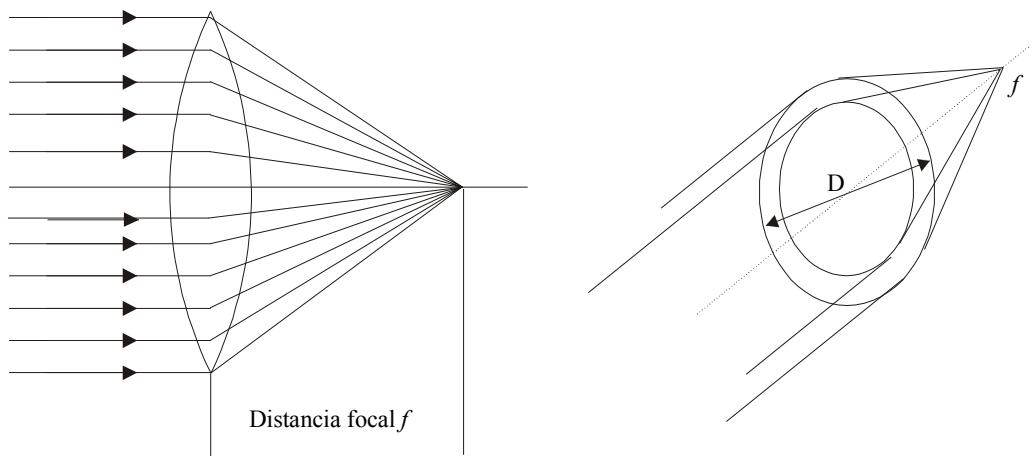


Figura 2.12 distancia focal y número F.

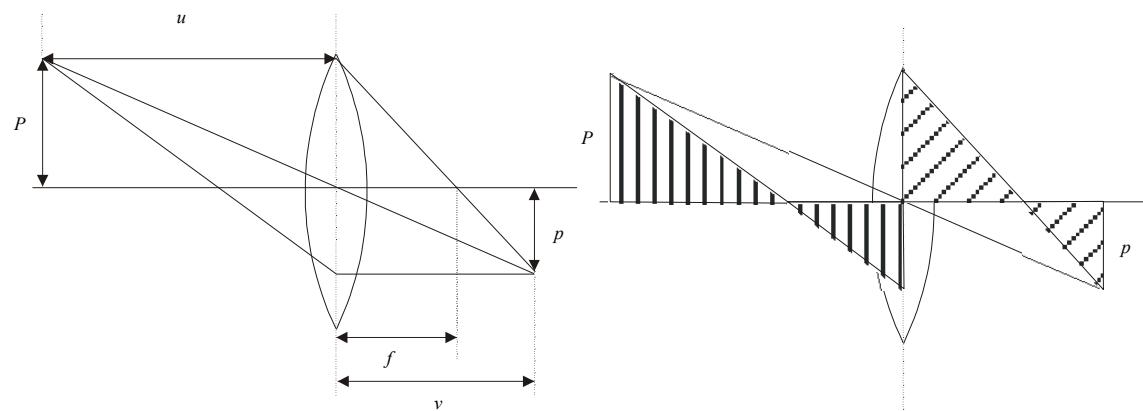


Figura 2.13. Modelo de lente fina.

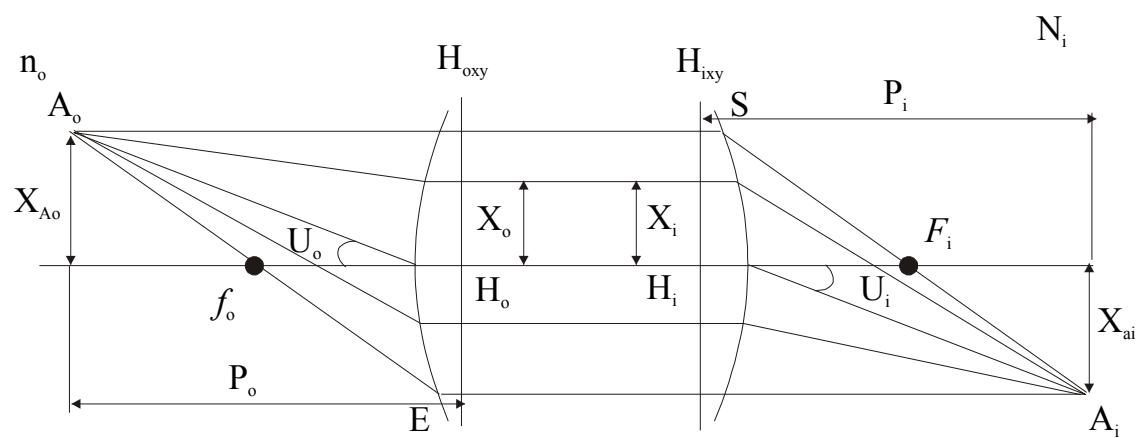


Figura 2.14 Modelo de lente gruesa.

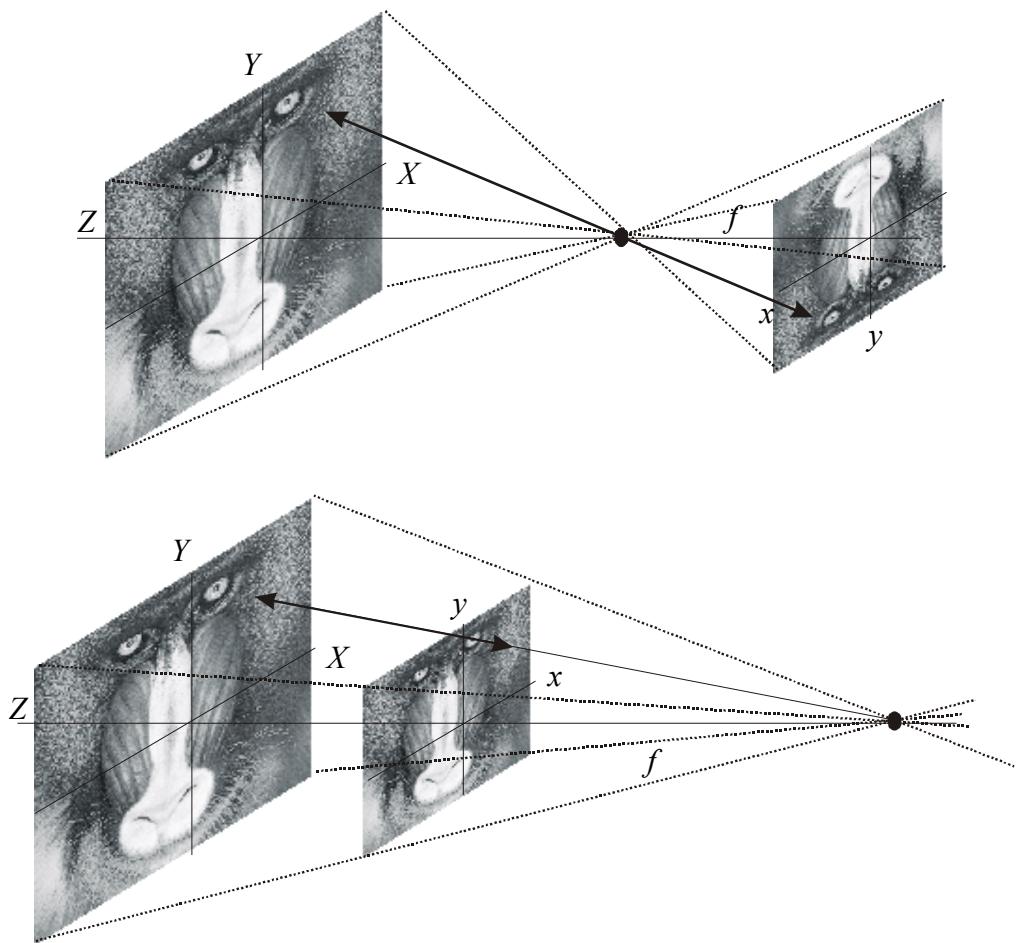


Figura 2.15. Modelo pin-hole y ángulo visual.

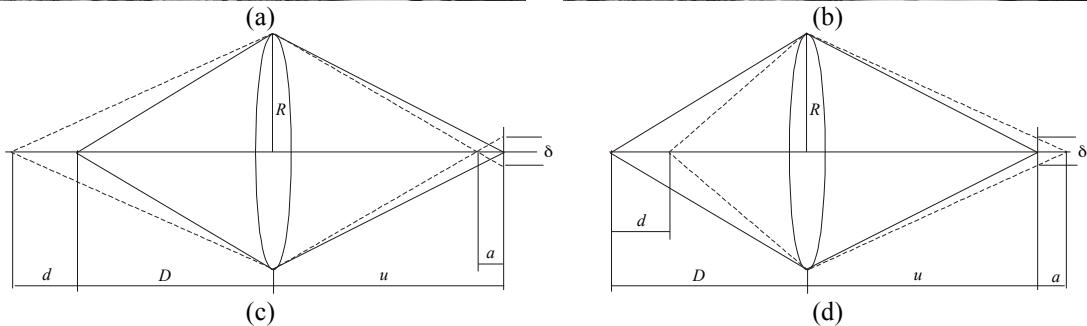


Figura 2.16. Amplitud de campo. (a) imagen con poca amplitud de campo (b) imagen con mucha amplitud de campo (c)(d) efecto del tamaño del elemento sensor

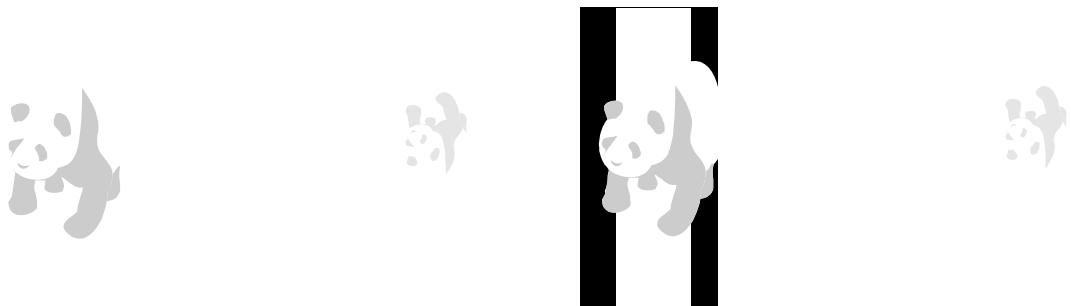


Figura 2.17. Efecto del diafragma en la profundidad de campo.

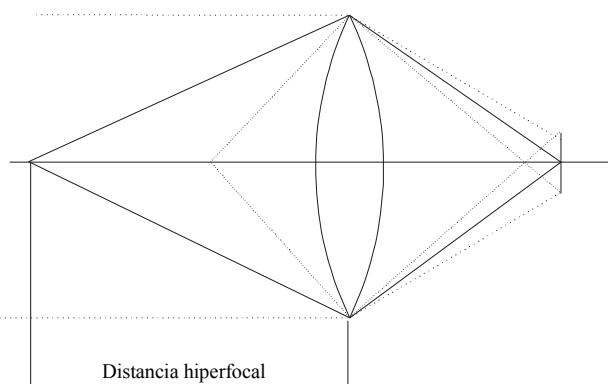


Figura 2.18. Distancia hiperfocal.

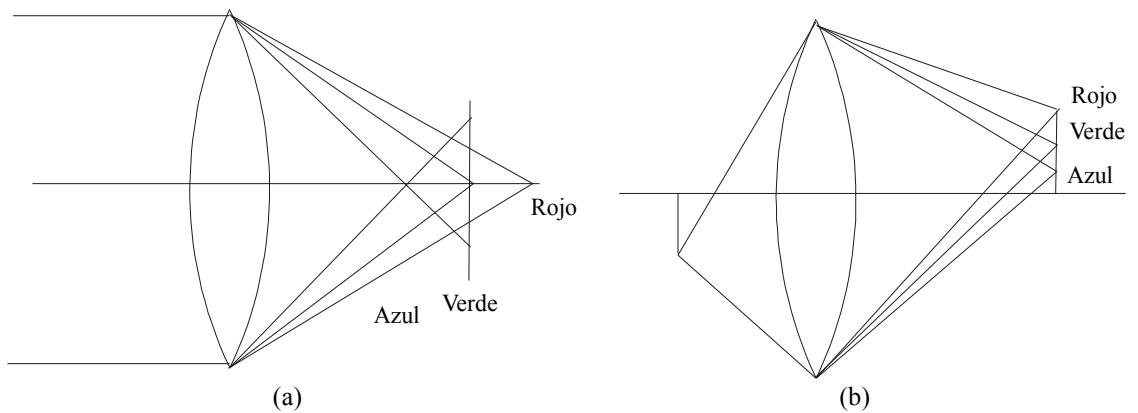


Figura 2.19. Aberraciones cromáticas. (a) longitudinal (b) lateral

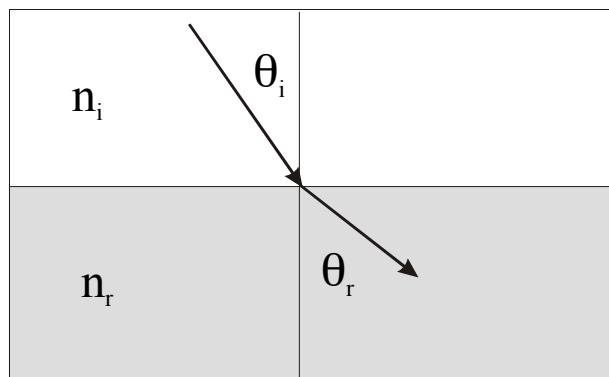


Figura 2.20. Ley de Snell.

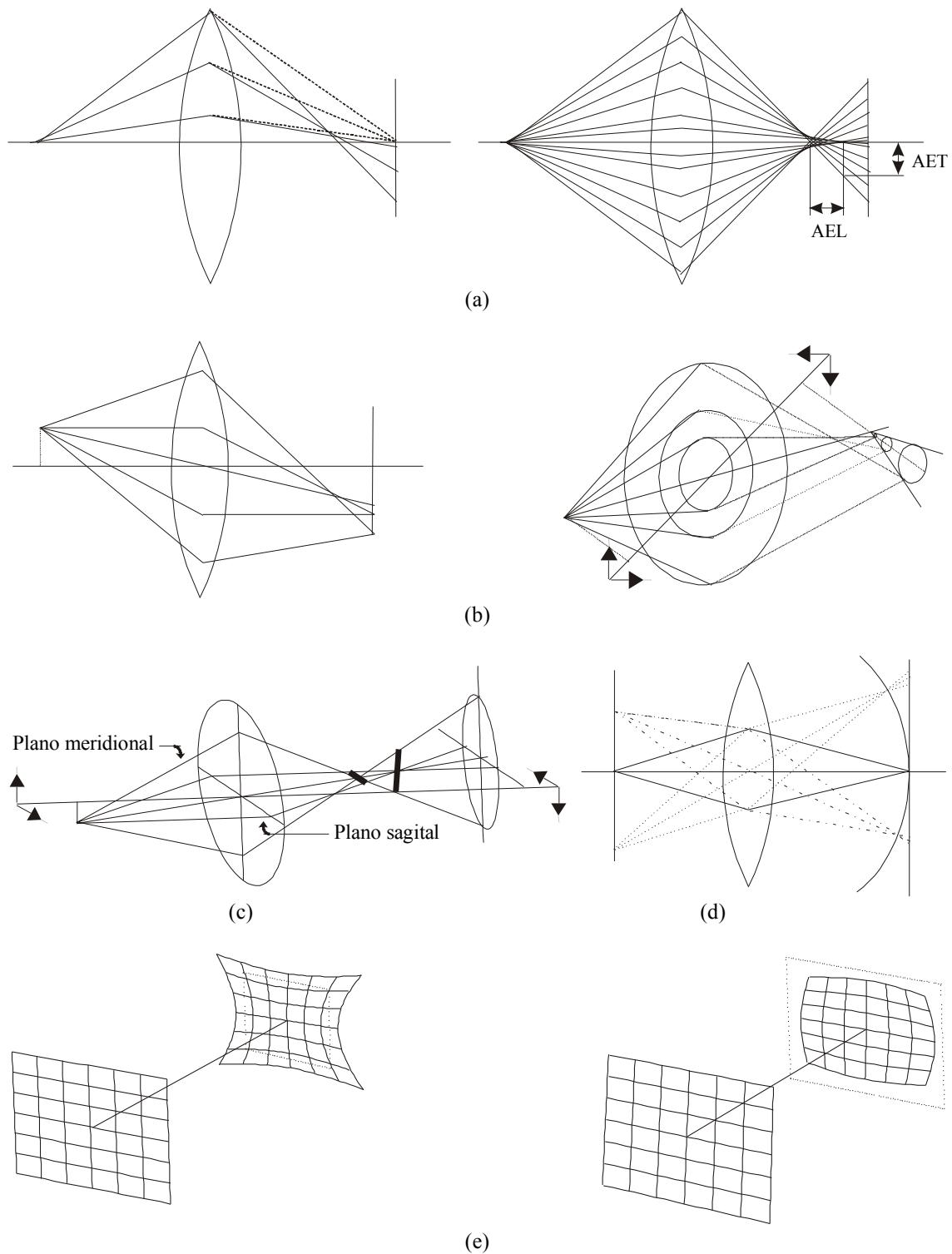


Figura 2.21. Aberraciones de Seidel. (a) Aberración esférica (b) Coma (c) Astigmatismo (d) Curvatura de campo (e) Distorsión

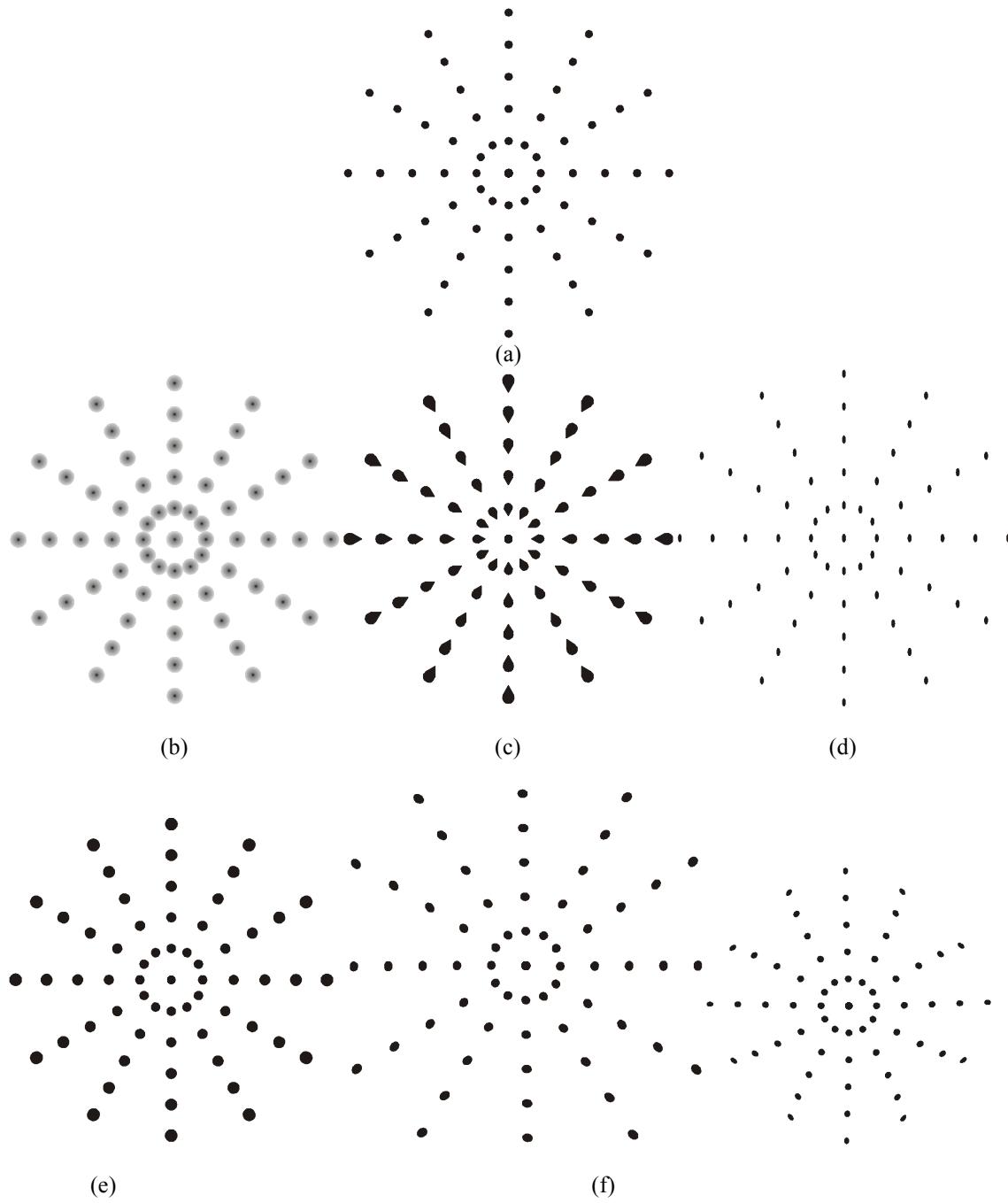


Figura. 2.22 Efecto de las aberraciones en una imagen (a) imagen sin aberraciones (b) Aberración esférica (c) Coma (d) Astigmatismo (e) Curvatura de campo (f) Distorsión