

## 5 Cámaras

### 5.1 Introducción

La cámara constituye uno de los elementos más importantes en cualquier sistema de comunicación visual. Su función básica es convertir la escena tridimensional en una señal temporal, analógica o digital, que pueda ser tratada, almacenada en soporte óptico o magnético, o modulada para transmitirse a un receptor remoto. En este capítulo consideraremos varios aspectos relacionados con la cámara y los elementos que la constituyen. Aunque la presentación está orientada fundamentalmente a cámaras de vídeo, también consideraremos con cierto detalle los principios de funcionamiento de la cámara fotográfica y se proporcionaran algunos ejemplos de cámaras orientadas a aplicaciones industriales de reconocimiento de imágenes.

La primera parte del capítulo se centra en el estudio del sistema de formación de imágenes o grupo óptico. El objetivo es introducir los conceptos de enfoque, variación de la distancia focal, ángulo de visión, profundidad de campo de la imagen, etc., y aprender cómo interaccionan todos ellos en la captación de imágenes. Para ello, se utiliza un modelo de lente muy simplificado, cuya limitación es que no permite realizar cálculos avanzados sobre aberraciones de imagen o posiciones relativas entre varias lentes, pero que resulta eficiente para comprender la incidencia de los distintos componentes del grupo óptico en la imagen final. La presentación de estos conceptos se centra en el contexto de una cámara fotográfica del tipo *reflex* y se particulariza a cámaras de vídeo en aquellos puntos donde aparecen diferencias entre ambos equipos.

En la siguiente sección se definen las unidades fotométricas elementales como la *candela*, el *lumen* y el *lux*. Estas unidades se utilizan con frecuencia en catálogos de cámaras para describir la sensibilidad de los elementos sensores de imagen o las características de los focos o fuentes de luz. Este análisis también permite redefinir el concepto de luminancia de un objeto en función de unidades físicas y representan una alternativa a los parámetros eléctricos que hemos usado en los capítulos anteriores.

La conversión de la proyección plana de la escena a una señal eléctrica requiere el uso de transductores de luz a carga eléctrica, que se conocen como *sensores de imagen*. El sensor de imagen más utilizado en las cámaras de vídeo modernas, tanto en aplicaciones profesionales como domésticas, es la célula CCD (*Charge Coupled Device*). Se trata de un dispositivo de estado sólido de reducido tamaño, elevada resolución de imagen y bajo consumo que ha desplazado completamente el uso de otros tipos de captadores como los tubos de imagen. Dedicaremos cierta atención a comentar los principios de funcionamiento de estos sensores y veremos las distintas alternativas tecnológicas

que suelen usarse en función de la aplicación y sus necesidades. La descripción de sensores de imagen incluye sólo los dispositivos CCD, puesto que el impacto en el mercado de otras tecnologías para la captura de señal de vídeo es cada vez más reducido y tiende a desaparecer. En fotografía analógica y cine se utiliza una película sensible cuyos principios físicos escapan de los propósitos de este texto.

Una vez definidos los principios de los sistemas de captura de imagen se describen las distintas funciones que suelen encontrarse en cámaras de vídeo o fotografía, como el *zoom* digital, el enfoque automático, el ajuste del balance de blanco o los subsistemas de estabilización de imagen. La exposición se centra principalmente en las distintas alternativas tecnológicas que se utilizan para realizar cada una de estas funciones.

En la última sección de este capítulo se incluye un resumen de los distintos tipos de cámaras que pueden encontrarse en el mercado, clasificadas en función de su ámbito de aplicación y sus características. También se proporciona un breve compendio de los distintos formatos de señal de vídeo no estándar que se utilizan en aplicaciones de TV de alta definición, video-vigilancia, visión por ordenador, etc.

## 5.2 Diagrama de bloques de una cámara

Los elementos que integran una cámara de vídeo o de fotografía pueden ser muy diversos y dependen de la aplicación y del mercado al que se destina la cámara. En esta sección nos concentraremos exclusivamente en los bloques básicos que, con mayor o menor complejidad y calidad, son comunes a prácticamente todas las cámaras.

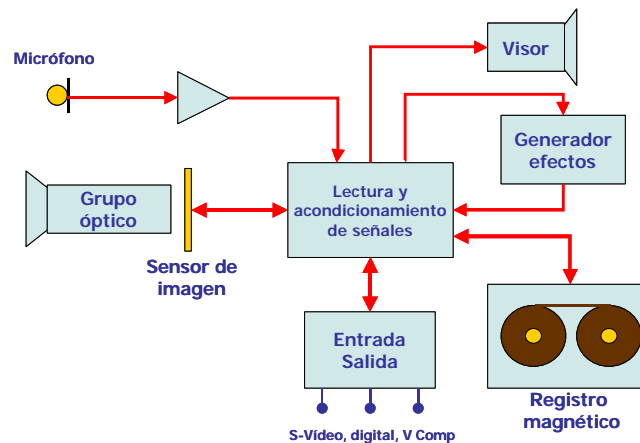


Fig.5.1 Diagrama de bloques de una cámara

En la figura 5,1 se representa un posible diagrama de bloques para una cámara de vídeo doméstica. El grupo óptico, el sensor de imagen y el subsistema de lectura y acondicionamiento de señal están

presentes en todos los tipos de cámaras de vídeo, independientemente de la aplicación a la que se destinen. El resto de bloques pueden estar disponibles o no en función de la aplicación. Así, las cámaras de vídeo-vigilancia no suelen incorporar ningún visor, puesto que la imagen se visualiza directamente desde el centro de control. Examinemos con cierto detalle las funciones de cada uno de los bloques:

- a) *Grupo óptico*. Su función es proporcionar una proyección plana de la escena sobre la superficie del sensor de imagen. Para ello, incluye varias lentes que permiten variar la región del espacio a la que enfoca la cámara. En el caso de cámaras con *zoom*, el grupo óptico puede modificar la posición relativa entre las lentes para controlar el ángulo de la escena que se proyecta al sensor. El grupo óptico también incluye elementos que regulan la cantidad de luz que incide sobre el sensor (iris o diafragma).
- b) *Sensor de imagen*. Es el dispositivo encargado de convertir la luz incidente en una señal eléctrica. En las cámaras de vídeo, la imagen debe ser adquirida a intervalos periódicos (frecuencia de imagen) y debería facilitarse la lectura de la imagen descompuesta en las líneas que constituyen la información de vídeo. Esto no siempre es así, por lo que puede ser necesario un acondicionamiento posterior de las señales al estándar de vídeo con el que trabaja la cámara. En algunos casos, el propio sensor de imagen tiene la capacidad de ajustar la cantidad de luz incidente con la que se estima la señal eléctrica (obturador electrónico). En cámaras de vídeo domésticas suele utilizarse un único sensor de imagen para capturar las tres componentes de color, mientras que en cámaras profesionales es habitual utilizar un sensor distinto para cada componente. En general, los sensores de imagen de estado sólido suelen tener asociado un complejo circuito de control que proporciona las señales necesarias para la lectura de la información.
- c) *Lectura y acondicionamiento de señal*. Las funciones que se realizan dentro de este bloque de tratamiento de señal dependen de la aplicación a la que se destina la cámara. En el caso de cámaras domésticas, se realiza el control de la lectura del sensor en las líneas que componen la imagen, de forma sincronizada con los impulsos de borrado horizontal y se proporcionan las señales de sincronización de cuadro al sensor de imagen. Las señales proporcionadas por el sensor de imagen se filtran y se acondicionan en ganancia, convirtiéndolas, por una parte, al estándar de vídeo en el que se realiza el registro de la secuencia de vídeo sobre la cinta magnética y, por otra, al formato de señal requerido por el visor de imagen. Este módulo de tratamiento también se encarga del control del grupo óptico y del sistema de adquisición, como en el caso de las funciones de enfoque automático, ajuste del iris y la velocidad de obturación en función del modo de exposición y del tipo de imágenes que se estén registrando o, incluso, funciones más avanzadas como la estabilización del movimiento de la cámara. Adicionalmente se suele realizar la conversión de las señales a formatos de vídeo convencionales (vídeo compuesto, S-Vídeo, RF) que se proporcionan como salida de la cámara y que permiten su conexión a receptores de televisión o sistemas de registro sobre cinta magnética convencionales. Evidentemente, el tipo de formatos de señal de vídeo que se utilizan en el subsistema de acondicionamiento de señal depende de las aplicaciones a las que se destine la cámara. En el ámbito de cámaras de estudio profesionales, únicamente se proporcionan las distintas componentes de color, que posteriormente serán tratados por

unidades de control de cámara externas. En cámaras de video-vigilancia o de circuito cerrado de televisión (CCTV) se suele suministrar una única señal de vídeo compuesto en el formato PAL o NTSC.

- d) *Visor*. Proporciona al usuario o al operador de cámara una réplica de la imagen que se está recibiendo en el sensor. Es útil para realizar el control de enfoque y del ángulo de visión de la escena. El visor suele estar formado por un pequeño tubo de rayos catódicos o dispositivo de cristal líquido y una lente que ajusta la imagen para que pueda visualizarse desde una distancia corta. En las cámaras domésticas más modernas suele incorporarse un visor de cristal líquido auxiliar, situado en el exterior del cuerpo de la cámara y desplegable, que se utiliza tanto para ajustar el grupo óptico como para visionar las imágenes previamente registradas en la cinta. Los visores pueden ser en blanco y negro o en color. Estos últimos sólo se encuentran en las cámaras domésticas de alta gama. En cámaras profesionales se siguen utilizando visores en blanco y negro debido a que la resolución del sistema visual es más alta en luminancia que en imágenes de color, con lo que el control de foco de la escena resulta más fácil si se realiza sobre un visor en blanco y negro.
- e) *Registro magnético*. Sólo está presente en las unidades de cámara que incorporan un sistema de registro de vídeo en cinta. Prácticamente todos los modelos orientados al mercado doméstico integran la unidad de cámara con un sistema de registro y reproducción de vídeo portátil. En el ámbito profesional se utilizan este tipo de cámaras para la realización de reportajes en directo. Existen versiones para todos los formatos de vídeo profesionales. En algunos casos, el subsistema de registro de vídeo es un módulo separado que se añade al cabezal de cámara.
- f) *Generador de efectos*. Únicamente se incorpora en videocámaras domésticas y el objetivo es que el usuario final disponga de cierta capacidad para editar y proporcionar efectos de mezcla en sus vídeos sin necesidad de disponer de un sistema de edición independiente. Los efectos más habituales son el registro de señales en blanco y negro, en color sepia, fundidos entre escenas, etc. En algunos modelos, aunque cada vez es menos frecuente, se incluyen pequeñas unidades de titulación.
- g) *Micrófono integrado*. Se usa para el registro de señal de audio en directo. Únicamente lo incorporan las cámaras domésticas y las profesionales para reportajes exteriores. En el registro y producción de vídeo en estudio se utilizan micrófonos y canales de audio independientes y sólo se mezclan con la señal de vídeo en la fase de producción. En las cámaras más modernas se integran dos micrófonos con diagramas de radiación ligeramente inclinados hacia la derecha y la izquierda del eje de la cámara. Con ello se logra obtener un registro estereofónico de la componente de audio. En la mayoría de formatos de vídeo doméstico que se comercializan actualmente (Hi-8, miniDV, Digital 8, etc.) el registro de la señal de audio es digital.
- h) *Entradas y salidas*. Proporcionan la señal de vídeo y/o audio capturada por la cámara. El número y tipo de entradas y salidas depende también de las aplicaciones de la cámara. Así, en cámaras para CCTV únicamente se proporciona la señal de vídeo compuesto,

mientras que en cámaras domésticas suelen proporcionarse distintos formatos de salida: PAL, S-Vídeo, digital, etc. En algunas cámaras, como las *webcam*, el formato de vídeo de salida está especialmente diseñado para su adaptación a un puerto del ordenador (USB, RS-232). Las entradas suelen corresponder a señales de audio externo, capturadas con micrófonos auxiliares. No suelen proporcionarse entradas de señal de vídeo y muy pocos modelos de cámaras domésticas disponen de ellas.

Las cámaras de fotografía digital (*Digital Still Cameras*) tienen un principio de funcionamiento muy parecido a las cámaras de vídeo, con la salvedad de que únicamente registran el contenido de un fotograma y no la secuencia de vídeo completa. De hecho, la mayoría de modelos también proporcionan una señal de vídeo en tiempo real en la salida, que permite reproducir las fotografías almacenadas en la memoria u observar la señal del visor en un receptor de televisión convencional. En consecuencia, tanto el grupo óptico como los sensores de imagen son del mismo tipo y características que los utilizados en las cámaras de vídeo; en todo caso, estos últimos, tienden a utilizar resoluciones de imagen más altas para competir con los sistemas de fotografía analógica. La unidad de acondicionamiento de señal también es parecida, ya que también debe realizarse la lectura del sensor de imagen y producir una señal de vídeo compuesto. En este caso, la conversión a formato de vídeo para registro en cinta se sustituye por un subsistema de digitalización de imágenes que se almacenan en una memoria RAM interna para su posterior volcado a un sistema de registro informático en disquete, integrado dentro de la propia cámara o directamente a un puerto serie conectado con el ordenador. Para mejorar la eficiencia del sistema y poder registrar múltiples imágenes con una memoria interna reducida, se incluyen procesadores específicos que realizan la compresión de imágenes estacionarias (normalmente JPEG o JPEG2000).

En cámaras de fotografía convencional se utiliza película fotográfica (positiva o negativa) como sensor de imagen. Este tipo de sensor tiene una resolución considerablemente superior a la de los sensores electrónicos, proporcionando una gran definición y calidad de imagen. El margen de colores que pueden reproducirse con la técnica fotográfica es, no obstante, menor que el que proporciona una cámara de vídeo. La simplicidad de la cámara fotográfica analógica reduce notablemente los circuitos electrónicos, ya que sólo se utilizan en los modelos automáticos para el cálculo automático de la exposición y del enfoque de las imágenes. En la figura 5.2 se reproduce un esquema simplificado de una cámara del tipo *reflex*. La película fotográfica se sitúa en la parte posterior de la cámara y está protegida de la luz por el obturador, que no es más que una cortinilla que controla el tiempo de exposición de la película. El grupo óptico tiene la misma función que en las cámaras de vídeo, aunque en este caso suelen ser de un mayor tamaño, debido a que la superficie sobre la que se proyecta la imagen es más grande que en vídeo y exige el uso de lentes con una distancia focal superior. Analizaremos con detalle la relación que existe entre el tamaño del sensor y las distancias focales de las lentes.

La cámara *reflex* tiene la particularidad de que la imagen que se observa por el visor coincide exactamente con la imagen que finalmente incidirá sobre la película. En cámaras de fotografía convencionales el visor tiene un grupo óptico simplificado e independiente, que no está situado en la misma posición, de modo que pueden producirse errores de paralelismo que conducen a que la imagen fotografiada no coincida exactamente con la que se veía por el visor. La ventaja de una cámara *reflex* es que estos errores se eliminan completamente, y además, el fotógrafo puede predecir exactamente cuál será la profundidad de campo de la fotografía, ya que la está observando con el

mismo sistema de lentes e iluminación que incidirá sobre la película. Aunque la implementación mecánica de una cámara *reflex* es bastante costosa, su principio de funcionamiento es simple. La imagen, tal y como la produce el grupo óptico, se refleja mediante el uso de un espejo para dirigirla hacia el visor. El pentaprisma situado en el recinto del visor realiza una inversión de la imagen para que pueda observarse sin el giro horizontal y vertical que producen las lentes del grupo óptico. Al realizar la fotografía, el espejo que refleja la imagen hacia el visor se levanta, dejando que la imagen se forme sobre el fondo de la cámara, donde está situada la película. Durante este intervalo de tiempo el visor queda en negro. El control del tiempo de exposición se realiza mediante un obturador de precisión, ya que no es posible retirar el espejo a grandes velocidades. A pesar de este sofisticado movimiento mecánico, se trata de cámaras muy robustas, que son usadas por casi todos los fotógrafos profesionales para la elaboración de reportajes de campo. Su principal inconveniente respecto a otro tipo de cámaras profesionales es que utilizan película fotográfica de miniatura (35 mm, baja resolución si se compara con otros tipos de película de mayor tamaño) y que siempre existe un pequeño retardo entre el momento de disparar y el de tomar la fotografía, que puede ser importante en la toma de instantáneas con objetos que se mueven a alta velocidad.

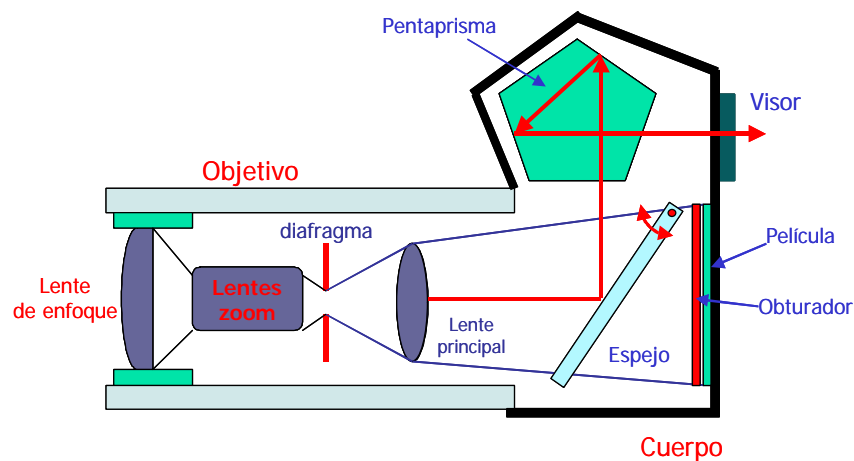


Fig 5.2 Elementos de una cámara fotográfica

### 5.3 Principios de óptica geométrica y formación de imágenes

El grupo óptico desempeña un papel fundamental en el proceso de adquisición de la imagen, ya que determina la parte de la escena que será capturada y los elementos que permanecerán correctamente enfocados. También se encarga de regular la cantidad de luz que incide sobre el sensor, de modo que es posible operar en un amplio margen de condiciones de iluminación sin necesidad de modificar la sensibilidad del sensor. En este apartado se proporcionan las herramientas básicas para comprender la función de los distintos elementos que forman el grupo óptico: lentes, diafragma y obturador, así como su incidencia sobre la imagen final. El objetivo es comprender las relaciones existentes entre velocidad de obturación, apertura del diafragma, distancia focal y profundidad de campo. Para simplificar el análisis supondremos que todas las lentes del grupo óptico son ideales y que pueden

modelarse por una única lente equivalente. Esta simplificación no nos permite evaluar las aberraciones de las lentes, pero no supone ninguna restricción importante sobre los conceptos que pretendemos manejar.

### 5.3.1 Lentes, grupo óptico y la lente ideal

Una lente es una pieza de vidrio u otro material transparente que se utiliza para la formación de imágenes de objetos reales mediante el desvío de los rayos de luz que proceden del objeto. Suelen tener forma circular y sus superficies frontal y posterior están pulidas con curvaturas cóncavas o convexas que casi siempre tienen forma esférica. En la figura 5.3 se representa el esquema de una lente.

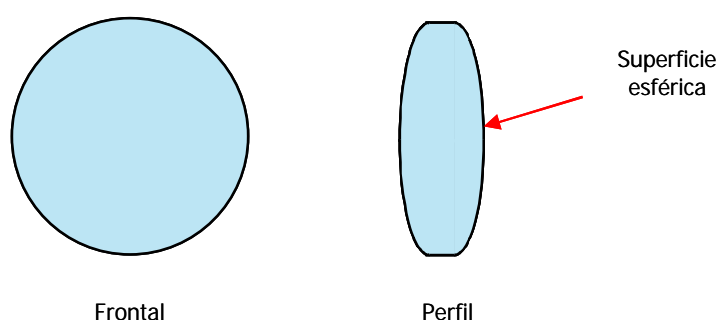


Fig.5.3 Esquema de una lente

Las superficies frontal y posterior introducen un cambio en la dirección de propagación de los rayos de luz, debido al cambio de medio (aire-vidrio-aire), conocido como refracción. Al tratarse de curvaturas esféricas, los rayos que entran perpendiculares al plano de la lente convergen en un único punto denominado *foco*. La distancia entre el foco y el plano de la lente es la *distancia focal* y depende de la curvatura de las superficies frontal y posterior. El plano paralelo al plano de la lente, que pasa por el foco, se denomina *plano focal*. Además, cuando los rayos de luz proceden de una dirección distinta a la ortogonal también convergen en un mismo punto que se sitúa sobre el plano focal. En la figura 5.4 se representan el foco, la distancia focal y el plano focal de una lente.

Debe observarse que el pulido de las superficies de las lentes debe ser muy preciso, puesto que cualquier imperfección modificará la dirección en la que se refractan los rayos y significará que no todos ellos convergen en un único punto. Este problema se conoce como *aberración* y puede introducir distintos tipos de distorsión en la imagen, como la falta de enfoque, aparición de distorsiones geométricas o cromáticas, etc. En nuestro caso supondremos que las lentes son ideales y que no producen este tipo de problemas.

Las lentes pueden ser convergentes o divergentes, dependiendo de la forma cóncava o convexa de sus superficies y de sus radios de curvatura. Las lentes convergentes se comportan tal y como hemos

definido anteriormente, es decir, los rayos que atraviesan la lente convergen en un punto denominado foco que está situado por detrás de la lente. En las lentes divergentes, los rayos se separan al atravesar la lente. No obstante, tal y como se ilustra en la figura 5.5, los rayos resultantes parecen proceder de un punto situado por delante de la lente que se denomina *foco virtual*. Las lentes convergentes se utilizan en la captura o proyección de imágenes. Las aplicaciones típicas son las cámaras de vídeo, de fotografía o cine, los proyectores de vídeo o película, lupas de bolsillo, etc. Las imágenes obtenidas con lentes convergentes se denominan *imágenes reales*, en contraposición con las que se obtienen mediante lentes divergentes que se denominan *imágenes virtuales*. En este último caso los rayos parecen proceder de un punto inexistente o virtual. Son ejemplos de imágenes virtuales las que se observan a través de un espejo o de un microscopio.

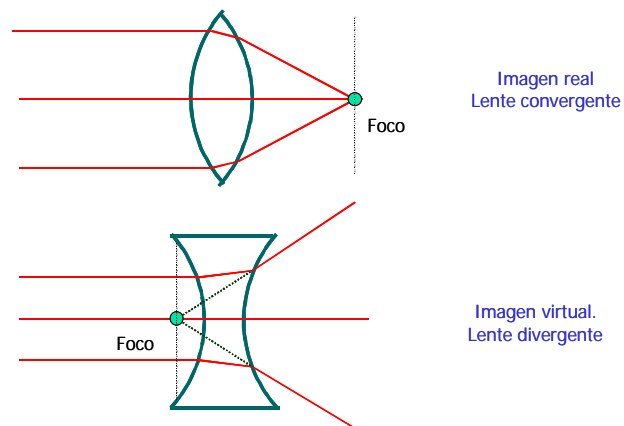


Fig. 5.4 Foco, plano de la lente y plano focal en lentes convergentes

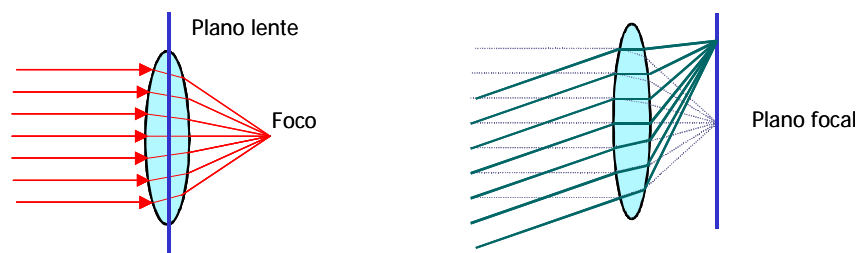


Fig. 5.5 Lentes convergentes y divergentes. Imagen real y virtual.

El carácter convergente o divergente de una lente depende de los radios de curvatura de las superficies frontal y posterior. Cuando ambas superficies son convexas la lente es convergente, mientras que si

son cóncavas, la lente resulta ser divergente. En los casos en que una de las superficies es cóncava y la otra convexa, la lente puede resultar convergente o divergente en función de los radios de curvatura de cada superficie.

La calidad de una lente se mide mediante su *poder de resolución*, que indica la capacidad de la lente para formar correctamente las imágenes de dos puntos o líneas muy próximos. Esta medida puede realizarse por diferentes métodos. Uno de los procedimientos más utilizados es utilizar un patrón de líneas blancas y negras que van alternándose en el sentido horizontal o vertical. El poder de resolución de la lente se considera como el número de pares de línea por milímetro que pueden discernirse en la imagen. Este valor nos proporciona una primera idea aproximada de la calidad de la lente. En general, para obtener grupos ópticos con un poder de resolución aceptable para fotografía o vídeo es necesario utilizar varias lentes.

Existen diversas aplicaciones que utilizan una única lente para la formación de imágenes. Entre estas destacan las lentes de contacto, las gafas, los visores de las cámaras de vídeo, los semáforos, las lupas de bolsillo, los proyectores de transparencias, etc. Sin embargo, las imágenes que se obtienen con una única lente no resultan de suficiente calidad en campos como la fotografía o la microscopía, que requieren imágenes de gran precisión. El problema se debe a que, a pesar de que el proceso de fabricación de la lente se cuida en extremo, resulta inevitable la aparición de cierto grado de aberración.

Las aberraciones en una lente pueden ser de distintos tipos en función de la naturaleza del problema que las origina. La *aberración esférica* aparece cuando los rayos de luz no convergen en el foco de la lente y se debe a las imprecisiones en la fabricación y pulido de las superficies esféricas de la lente. Las *aberraciones cromáticas* aparecen cuando los planos en los que se forman las imágenes dependen de la longitud de onda de la luz. En este caso, las distintas componentes de color no convergen en el mismo punto, de modo que los colores de la imagen aparecen falseados. La *aberración de curvatura de campo* se produce cuando los rayos procedentes de distintas direcciones no convergen sobre el plano focal, sino sobre una superficie con una ligera forma esférica. El resultado es que si enfocamos la parte central de la imagen, los extremos aparecerán desenfocados. La *aberración de coma* aparece en los extremos de la imagen y se debe a que los rayos no convergen en un único punto para los objetos que están alejados del eje de la lente. El *astigmatismo* se produce cuando el plano de convergencia de las imágenes para un patrón de líneas horizontales no coincide con el plano donde converge un patrón de líneas verticales. Por ello, aparece pérdida de definición en los contornos verticales u horizontales de la imagen. La *distorsión geométrica* consiste en que las líneas rectas aparecen curvadas a medida que nos alejamos del centro de la lente. Puede ser de *cojín* o de *barril* en función de la curvatura.

Las aberraciones pueden reducirse si se sustituye la lente por un conjunto de lentes con la forma y la separación apropiadas. La reducción de la aberración se consigue provocando que las lentes individuales tengan aberraciones contrapuestas que se cancelen entre sí. En el grupo óptico de una cámara de fotografía pueden encontrarse entre 15 y 20 lentes individuales, cuyos parámetros geométricos y posiciones relativas han sido calculados con precisión y que resultan equivalentes a una única lente con un nivel de aberración reducido. Pueden combinarse lentes convergentes y divergentes (véase la Fig. 5,6) aunque el equivalente resulta ser siempre una lente convergente. Algunas lentes pueden modificar su posición relativa respecto a otras lentes para permitir modificar la distancia focal

(objetivos con *zoom*) o enfocar correctamente la imagen sobre el sensor. El coste de un grupo óptico está directamente relacionado con la ausencia de aberraciones del conjunto de lentes. Así, los precios de objetivos que tienen una gran apertura (mucha entrada de luz) son muy superiores a los de los objetivos con poca apertura. La razón es que para obtener aperturas grandes se requieren también lentes de gran tamaño, en las que deben eliminarse todas las aberraciones que puedan aparecer en la periferia de la lente.

### Grupo óptico

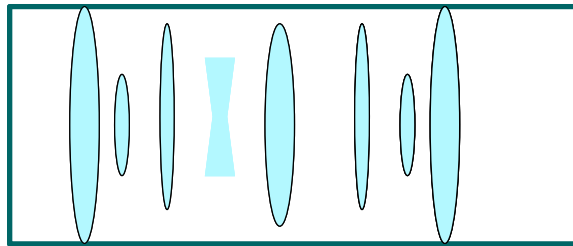


Fig. 5.6 Un grupo óptico está formado por varias lentes para reducir la aberración.

Una buena cámara para fotografía en miniatura de 35 mm puede utilizar grupos ópticos con un poder de resolución de unas 80-100 líneas por milímetro. Esto significa que con una película de suficiente resolución pueden obtenerse hasta un total de 2400 líneas en el sentido vertical (la altura de la película es de 24mm), lo que representa una resolución unas 4 ó 5 veces superior a la de los sistemas de televisión de definición convencional.

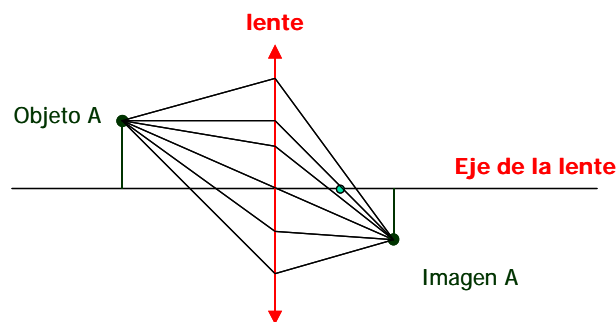


Fig. 5.7 Formación de imágenes en una lente ideal.

La lente ideal puede utilizarse como primera aproximación para estudiar las propiedades y características de un grupo óptico. La lente ideal queda caracterizada por su distancia focal ( $F$ ) y se representa como una línea vertical con dos flechas en sus extremos. En la figura 5.7 se representa una

lente ideal y se indica cómo se obtiene la imagen del punto A. Todos los rayos que proceden de este punto son desviados por la lente hacia el punto imagen. La imagen siempre se forma sobre un plano paralelo al plano de la lente que se denomina *plano de imagen* y que está situado por detrás del plano focal. Si deseamos enfocar el objeto A, deberemos situar el sensor de imagen sobre el plano de imagen. Para realizar el enfoque en cámaras fotográficas o de vídeo, en las que el sensor está en una posición fija, es necesario modificar la posición de la lente, adelantándola o atrasándola hasta que el objeto quede correctamente enfocado. Es importante tener en cuenta que las imágenes de todos los objetos situados a una misma distancia de la lente (sobre el plano de objeto) se forman en el mismo plano de imagen. Esto significa que los objetos situados a la misma distancia resultarán enfocados simultáneamente. En el siguiente apartado veremos como puede determinarse la distancia a la que se sitúa el plano de imagen.

### 5.3.2 Formación de imágenes con lentes ideales

Para determinar el punto donde se forma la imagen de un objeto pueden usarse las tres reglas siguientes:

- 1) El rayo procedente del objeto que pasa por el centro de la lente no es desviado.
- 2) El rayo procedente del objeto que entra perpendicular al plano de la lente se desvía hacia el foco.
- 3) La imagen del objeto se obtiene en el punto de intersección de los dos rayos anteriores.

En la figura 5.8 se representan gráficamente las reglas anteriores cuya aplicación es de carácter general, exceptuando aquellos objetos que se encuentran sobre el eje de la lente. En este caso concreto, las dos primeras reglas representan el mismo rayo, por lo que no puede calcularse el punto de intersección. No obstante, resulta trivial calcular la distancia a la que se formará la imagen si consideramos que todos los objetos situados a la misma distancia convergen en el mismo plano de imagen.

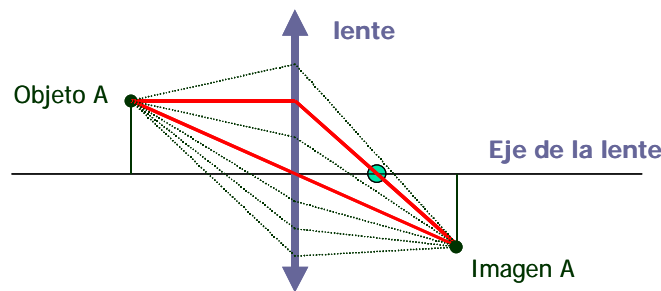


Fig. 5.8 Reglas para el cálculo del punto en el que se forma la imagen

Las reglas anteriores proporcionan un método simple e intuitivo para determinar el punto donde se forma la imagen. Por ello, en muchas representaciones, sólo se utilizarán estos dos rayos para indicar el punto donde aparece la imagen. Sin embargo, no debe olvidarse que del objeto A salen rayos en

todas las direcciones y que todos ellos, cuando pasan a través de la lente, son desviados hacia el punto imagen. La consideración de todos estos rayos será fundamental cuando analicemos la función del diafragma y su incidencia en la profundidad de campo.

A partir de estas consideraciones resulta bastante sencillo determinar analíticamente las relaciones entre las distancias y alturas del objeto y su imagen. En la figura 5.9 se representan los diferentes parámetros que deseamos relacionar donde  $H$  y  $L$  representan la altura y la distancia respectivamente del objeto real,  $F$  la distancia focal y  $h$  y  $l$  la altura y distancia del punto donde se forma la imagen.

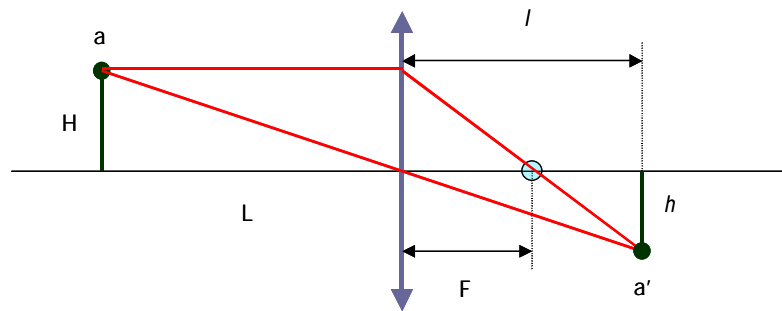


Fig. 5.9 Relaciones trigonométricas en la lente ideal

La ecuación de la recta que pasa por el centro de la lente puede expresarse:

$$y = -\frac{H}{L} \cdot x \quad (5.1)$$

La recta que pasa por el foco viene dada por:

$$y = H - \frac{H}{F} \cdot x \quad (5.2)$$

Igualando ambas expresiones para  $x = l$  obtenemos:

$$\frac{1}{L} + \frac{1}{l} = \frac{1}{F} \quad (5.3)$$

que relaciona la distancia a la que se encuentra el objeto de la lente con la distancia en la que se forma la imagen. Análogamente, si sustituimos para  $y = h$  obtenemos:

$$\frac{1}{H} + \frac{1}{h} = \frac{1}{F} \quad (5.4)$$

Las ecuaciones 5.3 y 5.4 proporcionan las relaciones básicas entre un objeto y su imagen en función de la distancia focal de la lente. De ellas podemos extraer varias conclusiones que nos ayudan a comprender el fenómeno de formación de imágenes:

- a) *Las imágenes de los objetos muy lejanos se forman sobre el plano focal.* En efecto, a medida que  $L$  aumenta, el factor  $1/L$  en la ecuación 5.3 se reduce, con lo que el plano de imagen (situado a una distancia  $l$ ) coincide con el plano focal. Existen algunas cámaras de fotografía muy económicas que no tienen la capacidad de ajustar el enfoque de la imagen y que sitúan la película sobre el plano focal. De este modo, siempre enfocan las imágenes que se encuentran en el infinito. Estas cámaras suelen dar resultados aceptables cuando se realizan fotografías de paisajes o de objetos alejados. Veremos que suelen utilizar diafragmas muy cerrados y grandes angulares, con lo que consiguen una profundidad de campo considerable que permite que los objetos situados a una distancia media permanezcan más o menos enfocados.
- b) *A medida que un objeto se acerca a la lente, el plano de imagen se aleja del plano focal.* Resulta evidente que al aumentar el término  $1/L$  debe reducirse  $1/l$  para mantener la contribución de ambos constante e igual a  $1/F$ . Como una consecuencia directa de esta relación, debe observarse que cuando el objeto se sitúa a una distancia de la lente igual a la distancia focal, no se obtiene ninguna imagen, ya que el rayo que pasa por el centro de la lente y el que se desvía hacia el foco son paralelos y no se intersecan en ningún punto. En la práctica, la distancia mínima para la que puede enfocar una lente depende de la máxima separación que podamos obtener entre la lente ideal equivalente y la posición del sensor de imagen. Esta distancia depende de las características del grupo óptico.
- c) *Si aumenta la distancia focal también aumenta el tamaño de la imagen.* Si aislamos  $h$  en la ecuación 5.4 obtenemos:

$$h = \frac{H}{H/F - 1} \quad (5.5)$$

de donde se deduce inmediatamente que un aumento de  $F$  supone que el denominador disminuye y por lo tanto que aumenta el tamaño  $h$  de la imagen del objeto. Así pues, los teleobjetivos se corresponderán con distancias focales grandes mientras los grandes angulares u ojos de pez con distancias focales pequeñas.

- d) *Si aumenta la distancia focal también aumenta la distancia del plano de imagen.* La distancia a la que se obtiene el plano de imagen puede despejarse de la ecuación 5.3, obteniendo:

$$l = \frac{L}{L/F - 1} \quad (5.6)$$

Por tanto, si  $F$  aumenta el denominador disminuye y aumenta la distancia del plano focal. Debe notarse que la relación sólo es válida cuando  $L/F$  es mayor que la unidad, ya que en el

caso contrario no se forma ninguna imagen. Esta relación nos indica que las lentes de gran distancia focal requieren una separación considerable entre el plano de la lente y el sensor. Por ello, todos los teleobjetivos suelen ser largos, ya que se trata de mantener la lente equivalente alejada del sensor.

### 5.3.4 Ángulo de visión

Se entiende como campo o ángulo de visión de una fotografía o secuencia de vídeo el ángulo que abarcan los objetos que aparecen en la imagen cuando son observados desde el punto donde se ha realizado la toma. Un ángulo de visión reducido se corresponde con imágenes tomadas desde un teleobjetivo. Con un gran angular o un ojo de pez pueden obtenerse campos de visión muy amplios. El campo de visión depende de la distancia focal del objetivo y del tamaño del sensor. Para calcularlo de forma simple es conveniente suponer que estamos capturando imágenes que se encuentran en el infinito. En este caso, el sensor de imagen debe situarse en el plano focal, a una distancia  $F$  de la lente. En la figura 5.10 se muestra un diagrama en el que se relaciona la distancia focal, con el ángulo de visión y el tamaño del sensor. Los objetos de la escena que serán capturados se encuentran en el ángulo definido por los rayos que pasan por el centro de la lente y que inciden en los extremos del sensor. La relación entre el ángulo de visión ( $\alpha$ ), la distancia focal ( $F$ ) y el tamaño del sensor ( $D$ ) puede obtenerse usando relaciones trigonométricas:

$$\frac{D/2}{F} = \tan(\alpha/2) \Rightarrow \alpha = 2 \cdot \arctan\left(\frac{D}{2 \cdot F}\right) \quad (5.7)$$

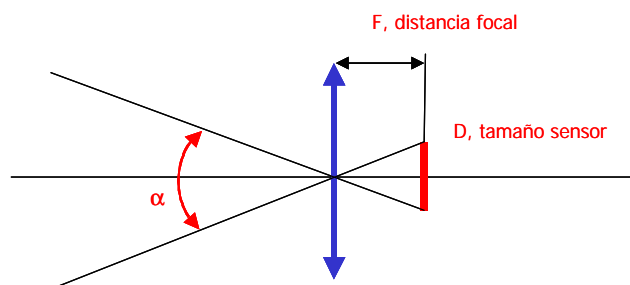


Fig. 5.10 Cálculo del ángulo de visión

Evidentemente, como el sensor no es cuadrado, puede definirse un ángulo de visión en el sentido horizontal y otro en el sentido vertical. La dependencia del ángulo de visión con el tamaño del sensor es la razón por la que los objetivos usados en las cámaras de vídeo son mucho más pequeños que los objetivos utilizados en fotografía convencional. En efecto, en la ecuación 5.7 resulta evidente que si deseamos mantener el ángulo de visión constante la relación entre el tamaño del sensor y la distancia focal también debe mantenerse constante. Por lo tanto, un aumento del tamaño del sensor supone un aumento proporcional de la distancia focal del objetivo.

Consideremos como ejemplo el cálculo de los ángulos de visión que se obtienen con un objetivo de 50mm de distancia focal en cámaras de fotografía en miniatura de 35 mm. En este tipo de fotografía se utiliza una película que tiene 35 mm de altura, pero de la que sólo se aprovechan 24 mm, pues el resto se utilizan para las guías de arrastre de la película. La anchura efectiva del fotograma es, tal y como se indica en la figura 5.11, de 36 mm. Debe observarse que en este tipo de fotografía la relación de aspecto es de 3:2, es decir, algo más alargada que en televisión convencional (4:3) y ligeramente inferior a la que se utiliza en los formatos panorámicos (16:9). Los ángulos de visión vertical y horizontal (suponemos que la toma se realiza en la forma apaisada) que se obtienen para un objetivo de 50 mm son:

$$\alpha_V = 26,99^\circ; \quad \alpha_H = 39,59^\circ \quad (5.8)$$

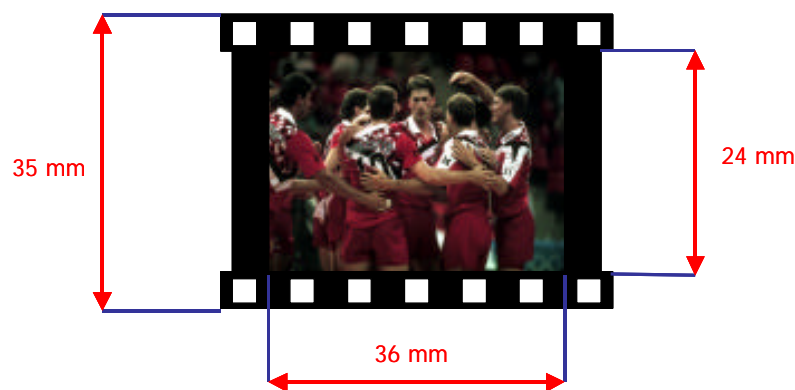


Fig. 5.11 Tamaño del sensor utilizado en fotografía en miniatura de 35 mm

La perspectiva que proporciona con un objetivo de 50 mm en este tipo de fotografía es parecido al que tiene el sistema visual humano. Las fotografías obtenidas con estos objetivos resultan por tanto muy naturales. Los objetivos con una distancia focal menor producen una mayor sensación de perspectiva en la escena. Las distancias focales de 35 mm suelen utilizarse para paisajes, entre 24 y 28 mm tenemos los grandes angulares, que ya introducen una distorsión apreciable de la imagen. Los ojos de pez de 16 o 18 mm permiten capturar escenas con un ángulo de visión horizontal de más de 90°. Por el contrario, si se utilizan distancias focales superiores a 50 mm, se reduce la sensación de perspectiva. La distancia focal de 105 mm, muy utilizada en retratos de personas, produce unos ángulos de visión de 13,04° (vertical) y 19,45° (horizontal). Un teleobjetivo de 300 mm reduce notablemente la perspectiva y tiene unos ángulos de visión de 4,58° (vertical) y 6,86° (horizontal).

El sistema de fotografía APS (*Advanced Photo System*) fue creado conjuntamente por varios fabricantes (*Kodak, Fuji, Canon, Nikon* y *Minolta*) como una alternativa universal al clásico formato de 35 mm. El objetivo fundamental del lanzamiento de este nuevo sistema era reactivar el mercado de cámaras fotográficas y ha tenido cierto éxito en la gama de cámaras compactas. El APS introduce diversas prestaciones adicionales entre las que destaca la presencia de una banda magnética en los laterales de la parte posterior de la película y en la que puede incorporarse información digital diversa

sobre las tomas: fecha, hora, diafragma, velocidad de obturación, tipo de encuadre y otros datos digitales. El envase del carrete también contiene información sobre la sensibilidad de la película y el número de exposiciones realizado, que se intercambian con la cámara. El usuario puede seleccionar el formato con el que se realiza la toma existiendo los modos normal, angular y panorámico en los que se modifica el tamaño o zona de la película en la que se realiza el registro de la imagen. El sistema APS dispone de una completa gama de productos adicionales para la presentación de imágenes en una pantalla de televisión, equipos para realizar escaneado de los negativos, etc. Se utiliza una película fotográfica de 24 mm de anchura que, en el modo de encuadre normal, tiene un tamaño efectivo de 16,7x30,2 mm. Este tamaño de sensor representa una superficie un 40 % menor que la de un fotograma en el formato de 35 mm. No obstante, los fabricantes aseguran que las copias tienen una calidad parecida en ambos formatos debido a las mejoras introducidas en las emulsiones sensibles.

Al modificar la relación de aspecto del sensor, la relación entre ángulos de visión y la sensación de perspectiva no se mantiene. Así, un objetivo de 42 mm para el formato APS cubre el mismo ángulo de visión horizontal que un objetivo de 50 mm en el formato de 35 mm. En efecto, utilizando el ángulo de visión horizontal que hemos obtenido en la ecuación 5.8, podemos calcular la nueva distancia focal mediante:

$$F = \frac{D}{2 \cdot \tan(\alpha/2)} = 42 \text{ mm} \quad (5.9)$$

No obstante, si utilizamos esta misma distancia focal para calcular, mediante la ecuación 5.7, el ángulo de visión vertical que obtenemos es de 22,48°, algo inferior al que se obtiene en el formato de 35 mm. Una alternativa que se utiliza con cierta frecuencia para obtener las distancias focales equivalentes en formatos que tienen relaciones de aspecto distintas consiste en igualar los ángulos de visión que se obtienen en la diagonal del sensor. Con ello, tal y como se representa en la figura 5.12, se modifican los dos campos de visión ajustándose a la relación de aspecto de modo que las imágenes tendrán una sensación de perspectiva parecida.

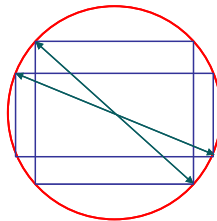


Fig. 5.12 Ángulos de visión equivalentes en imágenes con distinta relación de aspecto

En cámaras de vídeo el sensor tiene casi siempre una relación de aspecto de 4:3, o de 16:9 si se trata de cámaras que trabajan en el formato panorámico. El tamaño del sensor depende de la tecnología y de las prestaciones de la cámara. En cámaras domésticas suelen usarse sensores de 1/4 " ó 1/3". En cámaras profesionales pueden usarse sensores de mayor tamaño para mejorar la resolución (2/3"), aunque la tendencia es ir reduciendo el tamaño del sensor a medida que el avance tecnológico permite mejorar la resolución de los sensores de estado sólido. En la actualidad pueden encontrarse cámaras en

miniatura que incorporan sensores de 1/6". La terminología que expresa el tamaño del sensor en pulgadas procede de las antiguas cámaras que usaban tubos de imagen y no tiene mucho que ver con las dimensiones físicas reales del área de imagen. El número de pulgadas indicaba el diámetro de todo el tubo de imagen, del que sólo la parte central se utilizaba para la lectura de la imagen. Las primeras CCD indicaban el tipo de tubo de imagen con el que eran compatibles. Así, una CCD de 2/3" indicaba que tenía un área de imagen útil que podía sustituir a un tubo de imagen de 2/3" sin necesidad de modificar el grupo óptico. Una CCD de 2/3" tiene una zona de imagen útil de 11 mm de diagonal. En una CCD de 1/4 " la zona de imagen útil tiene una diagonal de aproximadamente 4 mm. Las dimensiones reales de la zona de imagen suelen depender del fabricante, sobre todo en sensores de reducido tamaño, y del modelo de cámara en el que se incorporan, ya que algunos sistemas de tratamiento digital reducen la zona de imagen útil para poder aplicar algoritmos de estabilización del movimiento de cámara. De todos modos, resulta evidente que la reducción del tamaño del sensor en cámaras de vídeo es notable y por tanto, los objetivos requieren distancias focales mucho menores. Consideremos como ejemplo un sensor CCD de 1/4 " que tiene un área de imagen de 2,1 mm x 2,8 mm. Este sensor requiere una óptica con una distancia focal de sólo 3,9 mm para obtener el mismo ángulo de visión horizontal que se obtiene con una óptica de 50 mm en fotografía de 35 mm. Esto indica que los grupos ópticos para cámaras de vídeo suelen ser menos aparatosos (menor distancia focal) que los utilizados en fotografía. La comparación resultaría aún más exagerada si hubiéramos considerado formatos de fotografía de estudio o de cine de 70 mm en los que el tamaño del sensor es todavía mayor.

### 5.3.5 Regulación de la cantidad de luz: diafragma y obturador

La cantidad de luz que incide sobre el sensor se controla mediante dos dispositivos que pueden actuar directamente sobre la cantidad de luz (*diafragma*) o sobre el tiempo de exposición del sensor (*obturador*). El diafragma está situado en el interior del grupo óptico, entre las lentes, y puede abrirse o cerrarse para dejar pasar más o menos luz por el objetivo. Su función es parecida a la del iris y la pupila en el sistema visual humano y actúa como regulador del margen dinámico en el que puede trabajar la cámara. En condiciones de elevada iluminación, el diafragma se cierra dejando pasar únicamente una fracción de la luz incidente, mientras que cuando la luz es insuficiente permanece abierto dejando que toda la luz que pasa por el objetivo incida sobre el sensor. El obturador controla el tiempo que el sensor es expuesto a la luz en cada fotograma (tiempo de exposición). También puede actuar como regulador del margen dinámico aumentando o disminuyendo este tiempo en función de las condiciones de luz. La acción conjunta de ambos elementos de control permite que pueda operarse en condiciones de luz muy dispares sin necesidad de modificar la sensibilidad del dispositivo de captura de imagen.

El diafragma (también denominado iris en cámaras de vídeo) y el obturador tienen efectos distintos sobre la imagen. El operador de cámara o fotógrafo deberá dar prioridad a uno u a otro en función de las características de la escena y los efectos de imagen que pretenda conseguir. Examinaremos con algún detalle estos efectos más adelante.

El diafragma tiene forma circular y está formado por un sistema de finas láminas metálicas superpuestas que pueden abrirse o cerrarse en función de la apertura deseada. En la figura 5.13 se muestran tres posibles posiciones de un diafragma. En cámaras de fotografía del tipo *reflex* suele estar

siempre abierto mientras no se realizan fotografías para permitir que toda la luz que entra por el objetivo fluya hacia el visor. Cuando se realiza la fotografía, el diafragma se cierra momentáneamente a la apertura seleccionada. En cámaras de fotografía que tienen un visor independiente y en cámaras de vídeo, el diafragma está permanentemente ajustado a la apertura seleccionada por el usuario o por el modo de exposición automático.

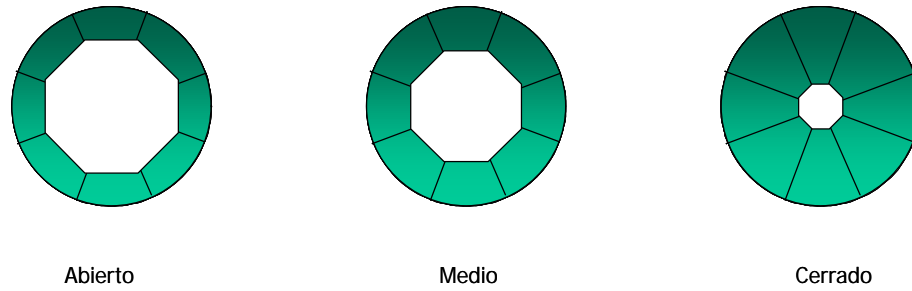


Fig. 5.13 Distintas aperturas del diafragma

En la figura 5.14 se muestra el efecto regulador del diafragma desde el punto de vista de la lente ideal. La posición del diafragma en el grupo óptico debe estar perfectamente ajustada para que su centro coincida con el eje visual de la lente y para que el diafragma equivalente esté situado exactamente en la misma posición que la lente equivalente. El diagrama de la figura 5.14 indica claramente que el uso del diafragma limita la energía total de luz incidente sobre el sensor. Esta representación del efecto del diafragma en la formación de imágenes será de gran trascendencia cuando consideremos sus efectos sobre la profundidad de campo.

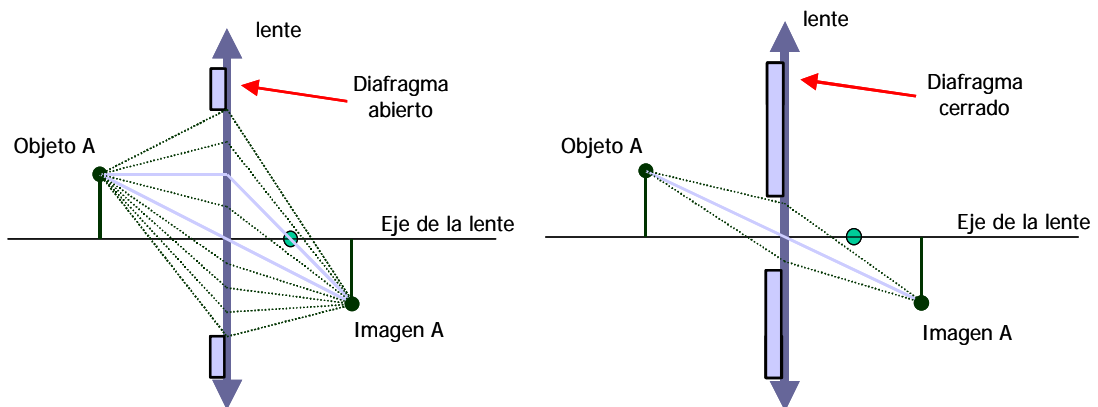


Fig. 5.14 Control de la cantidad de luz incidente en el sensor mediante el uso del diafragma.

La apertura del diafragma se indica mediante la apertura numérica (N.A) o los *números f*. Estos se obtienen como el cociente entre el diámetro del diafragma y la distancia focal. Así:

$$\text{número } f = \frac{F}{D_{\text{diafragma}}} \quad (5.10)$$

De este modo, un número *f* igual a 4 significa que el diámetro del diafragma es 4 veces menor que la distancia focal. Esta relación se indica de forma esquemática en la figura 5.15.

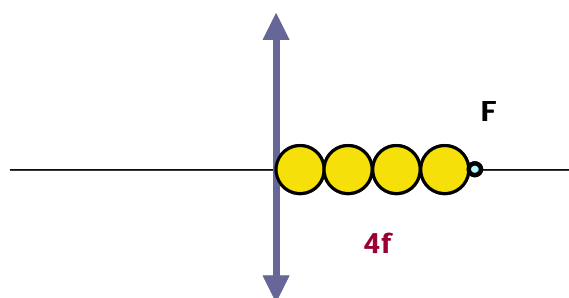


Fig. 5.15 Relación entre números *f*, apertura del diafragma y distancia focal

Los números *f* no pueden variarse de forma continua, sino mediante una secuencia discreta que toma los valores 1,4; 2; 2,8; 4; 5,6; 8; 11; 16; 22; 32; etc. El número más pequeño indica la apertura máxima de la lente y es variable en función de la calidad del objetivo. Pueden encontrarse objetivos que empiezan la secuencia en 1,8; 2,8; 4; etc., u otros con menor apertura que siguen la secuencia 3,5; 5,6; 8; etc. La relación entre un número *f* y el siguiente es de aproximadamente la raíz de 2. Esto significa que el diámetro del diafragma se reduce en un factor de 1,41 entre pasos sucesivos, lo que equivale a que la superficie de la apertura del diafragma se reduzca en un factor 2 (la apertura es circular por lo viene dada por  $\pi(D/2)^2$ ). Según esta relación, la cantidad de luz que pasa a través del objetivo para dos pasos sucesivos del diafragma se reduce en la mitad. Esto puede parecer en principio exagerado, pero está de acuerdo con las características del sistema visual humano que observará estos cambios exponenciales como si fueran lineales. Algunas cámaras pueden modificar los pasos del diafragma en pasos de 1/3 cuando trabajan en modo automático. En modo manual, muchos fotógrafos dejan la anilla selectora entre dos pasos para ajustar la cantidad de luz de forma más precisa.

El coste de un objetivo está muy relacionado con su apertura máxima, sobre todo cuando la distancia focal es grande. La razón de este aumento de coste se debe a que para conseguir aperturas grandes debe aumentarse el diámetro de las lentes, resultando más costoso reducir las aberraciones que pueden aparecer en la periferia.

El obturador también realiza el control del tiempo de exposición en pasos discretos, que varían en factores de 2. Como en el caso del diafragma, esto significa que entre dos pasos consecutivos la cantidad de luz incidente en el sensor se reduce a la mitad. El efecto sobre la imagen es, no obstante,

lineal y gradual. Las velocidades de obturación se indican en fracciones de segundos o directamente en segundos, dependiendo de si el tiempo de exposición es inferior o superior al segundo. Así, una velocidad de 250 significa que el tiempo de exposición es de  $1/250$ .

La secuencia de velocidades de obturación utilizada en cámaras de fotografía es: 8000, 4000, 2000, 1000, 500, 250, 125, 60, 30, 15, 8, 4, 2, 1", 2", 4", 8", ..., *bulb*. Las velocidades de  $1/8000$  o  $1/4000$  sólo se consiguen con las cámaras de fotografía más avanzadas. El modo *bulb* se utiliza para tiempos de exposición muy prolongados y consiste en mantener abierto el obturador durante todo el tiempo que se mantenga pulsado el disparador.

Resulta indiscutible que si el tiempo de exposición es muy prolongado y existen objetos móviles en la escena este movimiento quedará registrado en el sensor. La película fotográfica o el sensor CCD se comportan como un integrador de luz, de modo que registran todos los movimientos que ocurren en la escena durante el tiempo en que el obturador permanece abierto. Por lo tanto, es importante evaluar el movimiento de los objetos de la imagen si queremos tener la garantía que la toma será correcta. Para tiempos de exposición de  $1/30$  o mayores, empieza a apreciarse el propio movimiento de la mano y es aconsejable utilizar un trípode para mantener la cámara estacionaria. En la fotografía de escenas deportivas, donde existe un movimiento considerable resulta aconsejable aumentar en lo posible la velocidad del obturador. La pérdida de luz puede compensarse abriendo el diafragma.

Pueden realizarse exposiciones intencionadamente lentas para conseguir efectos artísticos. Entre los más conocidos destacan las fotografías de saltos de agua, que si se registran con velocidades lentas producen un efecto espumoso, mientras que si se capturan con velocidades altas podrán apreciarse con nitidez las gotas de agua. En la fotografía de pruebas de motociclismo o automovilismo pueden usarse velocidades deliberadamente lentas y seguir con la cámara el movimiento del objeto mientras se realiza la fotografía. El efecto es que el sujeto móvil aparece nítido, mientras el fondo registra el movimiento de la cámara, produciendo una agradable sensación de movimiento. Otros efectos típicos obtenidos con velocidades lentas son las fotografías de fuegos artificiales o las fotografías nocturnas de calles, donde quedan registradas las luces de los automóviles durante la circulación.

Las velocidades de  $1/60$  y  $1/30$  pueden utilizarse para capturar imágenes de un televisor en aquellos países que utilizan el sistema NTSC (frecuencia de campo de 60 Hz). Con estas velocidades el haz del receptor de televisión realizará uno o dos barridos completos de la pantalla, de modo que las imágenes resultantes quedarán registradas en la película. Es obvio que si la cámara no está sincronizada con el receptor, los dos barridos pueden corresponder a fotogramas distintos dentro de la secuencia de vídeo, observándose el posible desplazamiento entre los dos fotogramas. Si utilizamos una velocidad de obturación de  $1/60$  en el sistema de televisión PAL (con 50 Hz de frecuencia de campo), el haz no tendrá tiempo de explorar toda la pantalla, con lo que observaremos una parte de la pantalla del televisor en negro. Si se usa la velocidad de  $1/30$ , el haz no habrá tenido tiempo de realizar dos barridos completos, por lo que la zona de la pantalla donde se han producido dos exploraciones aparecerá más brillante que la zona donde el haz sólo ha pasado una vez.

No obstante, es posible realizar fotografías de calidad de imágenes estáticas en la pantalla de un ordenador (p.ej. diapositivas de una presentación). Para ello deberemos seleccionar una velocidad de exposición lenta (alrededor de 1" o  $1/2$ "), con lo que conseguiremos que el haz pase varias mientras se registra la imagen. Si la cámara permanece inmóvil durante la exposición, la imagen quedará nítida.

Para poder realizar las fotografías con estos tiempos de exposición tan lentos será necesario reducir el brillo de la pantalla, cerrar el diafragma y posiblemente trabajar con película de baja sensibilidad. Por el contrario, si se reduce el tiempo de exposición a unos pocos cuadros, suelen aparecer problemas de diferencias de iluminación, debido a que una zona de la imagen ha sido explorada una vez menos que la otra.

El obturador en cámaras *reflex* es un elemento opaco situado por delante de la película que se retira al realizar la fotografía. En el momento de pulsar el disparador se levanta el espejo del visor, se cierra el diafragma a la apertura seleccionada y, finalmente, se abre el obturador durante el tiempo de exposición. Cuando este último se ha cerrado, el espejo y el diafragma vuelven a sus condiciones de reposo. El mecanismo de apertura del obturador debe tener una gran precisión para garantizar que los tiempos de exposición son los correctos. Además, debe tratarse de un sistema fiable y que pueda usarse prolongadamente sin ningún deterioro. Las altas velocidades de 1/8000 o 1/4000 exigen unos movimientos extremadamente rápidos que sólo pueden obtenerse a través de artilugios mecánicos de gran precisión.

La tecnología más utilizada para realizar el control del tiempo de exposición es el obturador de doble cortinilla. Su principio de funcionamiento se ilustra en la figura 5.16, donde se indica la presencia de dos cortinillas opacas que circulan desde arriba hacia abajo (existen modelos donde las cortinillas van desde la izquierda hacia la derecha) a una velocidad constante, pero no excesivamente rápida, para poder garantizar que el mecanismo tenga una vida prolongada. La primera cortinilla destapa la película, mientras que la segunda, que se dispara con un retardo igual al tiempo de exposición, vuelve a tapar la película. Para tiempos de exposición moderados o lentos, la primera cortinilla llega a destapar toda la película antes de que se dispare la segunda. Con ello, todo el fotograma es expuesto a la luz de forma prácticamente simultánea. No obstante, para velocidades altas, la segunda ventanilla se dispara mientras la primera aún está destapando una parte de la película. El resultado es que entre las dos cortinas existe una rendija a través de la cual se expone a la luz el negativo. Esta rendija se desplaza de arriba hacia abajo a la misma velocidad que las cortinillas y su distancia ( $D$ ) depende del tiempo de exposición. Para tiempos de exposición muy pequeños, la distancia entre las cortinillas es extremadamente reducida. En consecuencia, todas las partes de la película quedan expuestas durante el tiempo deseado con un mecanismo sencillo y de elevada fiabilidad.

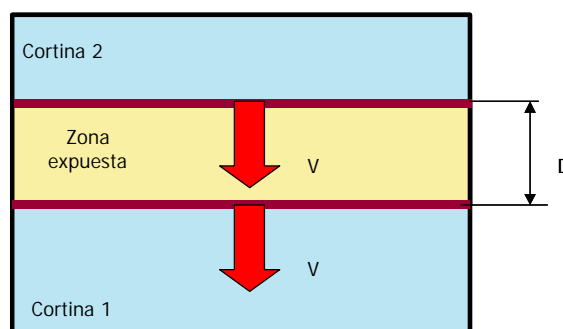


Fig. 5.16 Mecanismo de doble cortinilla para el control del tiempo de exposición

El sistema de doble cortinilla supone que cuando trabajamos con tiempos de exposición de muy pequeños no todas las partes del negativo son expuestas a la luz simultáneamente, sino que éste se va descubriendo a la misma velocidad que las cortinas. No obstante, este efecto resulta imposible de apreciar en la práctica. La doble cortinilla permite obtener velocidades de obturación de hasta 1/1000 o 1/2000. Las velocidades superiores suelen obtenerse con sistemas más sofisticados de múltiples cortinillas.

En cámaras de vídeo o fotografía digital, donde se utiliza un sensor de estado sólido, el tiempo de exposición suele regularse de forma electrónica, sin necesidad de interponer pantallas opacas delante del sensor. La obturación electrónica consiste en mantener las condiciones de adquisición de la CCD sólo durante el periodo de tiempo en que se desea realizar la exposición. Con esta tecnología se simplifican notablemente los aspectos mecánicos de la cámara y pueden obtenerse tiempos de exposición extremadamente cortos, del orden de 1/50.000.

Las cámaras de vídeo no permiten, como resulta obvio, utilizar tiempos de exposición mayores al periodo de campo. Normalmente, la adquisición de cada uno de los campos se realiza de forma secuencial, es decir, realmente cada campo corresponde a una imagen distinta, tomada a doble velocidad y se van alternando las líneas. Esto restringe que el valor máximo del tiempo de exposición coincida con el periodo de campo. En las cámaras del sistema PAL se sustituyen las velocidades de 1/60 por la de 1/50 y, habitualmente, también se incluye la velocidad de 1/100. Algunas cámaras de vídeo digital permiten que puedan utilizarse velocidades de obturación por debajo de la frecuencia de campo, utilizando tiempos bastante más bajos, para poder operar en condiciones de muy baja iluminación. En este caso se realiza un tratamiento digital de la señal de vídeo en el que se reduce la frecuencia de muestreo de las imágenes. La señal PAL que se proporciona en la salida sigue teniendo 25 imágenes por segundo, aunque algunas de ellas son obtenidas como repetición de las anteriores.

### 5.3.6 Profundidad de campo

La profundidad de campo es una medida del margen de distancias, alrededor del objeto de interés, donde puede considerarse que los objetos aún permanecen enfocados. Este concepto se representa esquemáticamente en la figura 5.17, donde suponemos que la lente enfoca al objeto situado en el punto A. Existirá un margen de distancias por delante y por detrás de este objeto en las que podemos considerar que se mantiene un enfoque más o menos correcto de la imagen.

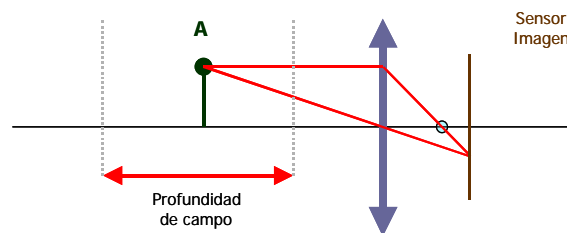


Fig. 5.17 La profundidad de campo indica el rango de distancias en el que los objetos permanecen enfocados

El concepto de la profundidad de campo resulta difuso y difícil de cuantificar. De hecho, desde un punto de vista teórico, todos los objetos que no están exactamente sobre el plano del objeto están desenfocados y los límites para indicar el grado de desenfoco dependen, como veremos, de muchos factores. En la figura 5.18 se muestra un ejemplo de cómo se forma la imagen de un objeto que está fuera de enfoque. El sensor está situado sobre el plano de imagen del objeto A. El objeto B, que está situado por delante de A, tendrá una imagen que se situará por detrás del plano de imagen. La imagen que capturemos en el sensor es un círculo cuyo diámetro será tanto más pequeño cuanto más próximos estén los dos objetos. Este círculo se denomina círculo de ambigüedad o de confusión y su diámetro es una medida del grado de desenfoco de la imagen. La profundidad de campo está directamente relacionada con el grado de definición o nitidez de las imágenes. Si una escena se registra con poca profundidad de campo sólo queda nítido el motivo principal, mientras que todos los demás objetos permanecerán borrosos. En principio es deseable que la profundidad de campo sea lo mayor posible para que aparezcan el máximo de objetos bien definidos. No obstante, es habitual que el fotógrafo fuerce la toma de imágenes con poca profundidad de campo para centrar la atención en el sujeto principal.

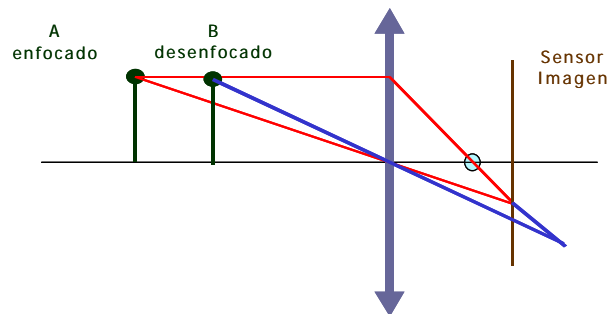


Fig. 5.18 Formación de imágenes de puntos desenfocados y círculo de confusión

El grado de desenfoco depende de varios factores que vamos a analizar con cierto detalle. En primer lugar debe considerarse el tipo de sensor utilizado. En efecto, en películas de gran sensibilidad el grano del material fotosensible es considerablemente mayor que en películas de baja sensibilidad. Es razonable, por tanto, que aparezcan nítidos los objetos que, aún no estando correctamente enfocados, tengan un círculo de confusión del mismo orden que el grano del negativo (casi tan nítidos como los que están enfocados). El tamaño del sensor también desempeña un papel importante, ya que las copias deberán ampliarse más o menos, con lo que el círculo de confusión tendrá mayor o menor importancia. En sensores de estado sólido, es evidente que el círculo de confusión no tendrá ningún efecto sobre la imagen, mientras no supere la distancia entre píxeles consecutivos.

El poder de resolución del grupo óptico también incide sobre la profundidad de campo. En un grupo óptico de baja calidad, la profundidad de campo es aparentemente superior debido a la propia falta de nitidez de los objetos que están correctamente enfocados. Podemos concluir, por tanto, que el círculo

de confusión no tendrá mayor importancia si tiene un diámetro inferior al poder de resolución del grupo óptico.

La profundidad de campo también depende de la distancia a la que se encuentre el objeto al que enfocamos. Si el objeto está próximo a la lente, cualquier pequeña variación de su posición provocará que el plano de imagen varíe considerablemente su posición. En la figura 5.19 se representan los círculos de ambigüedad de un objeto B, que está siempre a la misma distancia del objeto A. En el primer caso, el objeto A está situado próximo a la lente, mientras que en el segundo está alejado.

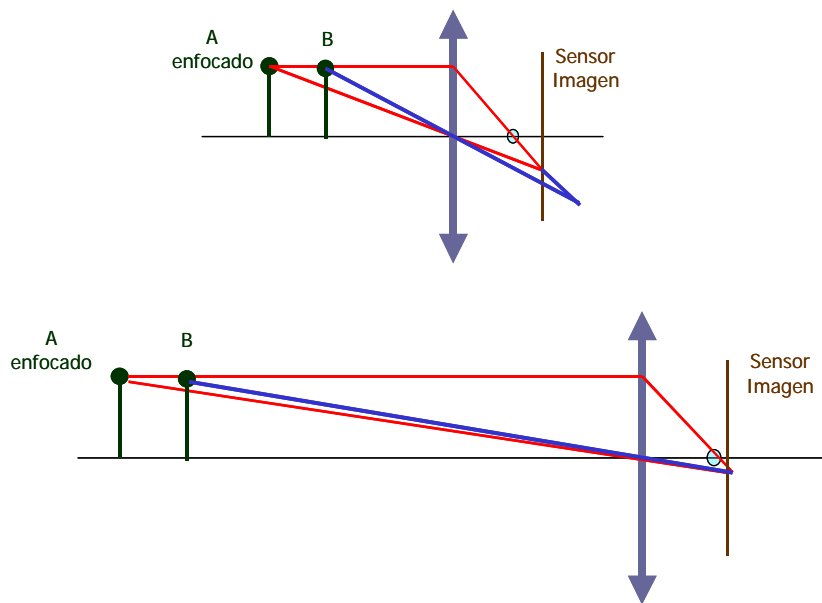


Fig. 5.19 Efecto de la distancia de los objetos en la profundidad de campo

Otro de los factores que inciden directamente sobre la profundidad de campo es la distancia focal de la lente. En la figura 5.20 se representa esquemáticamente esta dependencia para dos objetos situados a una distancia invariable de la lente y donde únicamente se modifica la distancia focal. La profundidad de campo es mucho mayor en lentes con una distancia focal reducida.

La apertura del diafragma también tiene un efecto directo sobre la profundidad de campo. Comprender la relación entre ambos factores es sumamente importante en fotografía y vídeo, puesto que a menudo suelen combinarse los ajustes de tiempo de exposición y diafragma para conseguir los efectos de profundidad de campo y movimiento de objetos deseados. La dependencia de la profundidad de campo con la apertura del diafragma se ilustra en la figura 5.21. En este caso los dos objetos están situados a una misma distancia de la lente y se utiliza una misma distancia focal. Cuando se cierra el diafragma se reduce el volumen de rayos que intervienen en la formación de punto imagen, por lo que el círculo de ambigüedad se reduce.

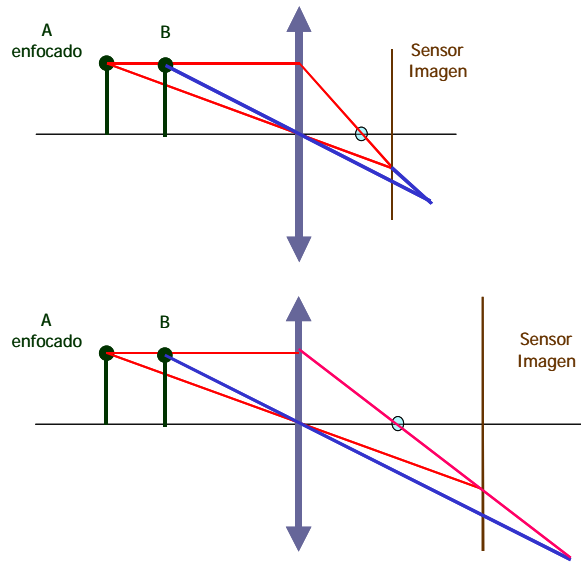


Fig. 5.20 Dependencia de la profundidad de campo con la distancia focal

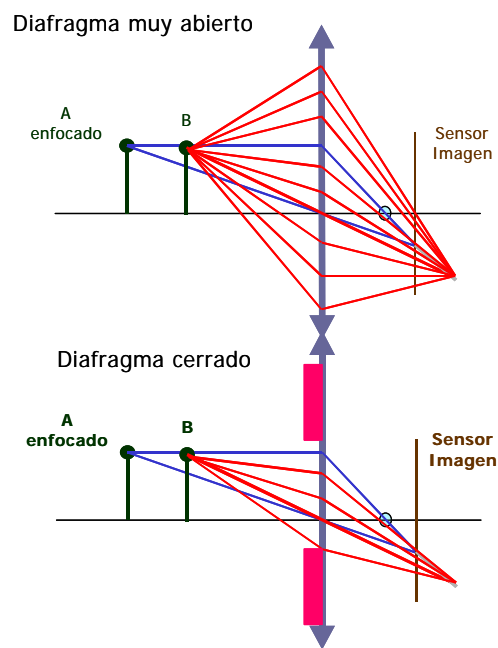


Fig.5.21 Relación entre diafragma y profundidad de campo

A modo de síntesis sobre los efectos del diafragma y el obturador en la calidad final de la imagen, podemos concluir que la pérdida de nitidez puede ser debida, bien a que el objeto no está correctamente enfocado (fuera de campo), o a que el propio movimiento del objeto produce un desenfoque por tiempo de integración. Ambas pérdidas de definición son contrapuestas, ya que si queremos reducir el desenfoque por integración debe disminuirse el tiempo de exposición, lo que, para mantener la luz total que incide sobre el sensor, exige aumentar la apertura del diafragma, con la consiguiente pérdida en profundidad de campo. Así, si damos prioridad a la velocidad del obturador para garantizar que no aparecen imágenes borrosas originadas por el movimiento de los objetos o de la cámara, deberemos aceptar una reducción en la profundidad de campo. Por el contrario, si deseamos obtener una gran profundidad de campo, deberemos cerrar el diafragma, por lo que es posible que los objetos que tienen un movimiento elevado aparezcan borrosos.

Una alternativa para mejorar la profundidad de campo y reducir el enfoque por movimiento consiste en aumentar la sensibilidad del sensor. Con ello se requiere menor cantidad de luz para una exposición correcta, con lo que puede trabajarse con aperturas y tiempos de exposición más pequeños. No obstante, la reducción de la sensibilidad de la película supone un aumento del grano de la película (pérdida de resolución espacial) y una pérdida en colores puros. En sensores CCD puede aumentarse la ganancia de la señal electrónicamente, pero esto produce un aumento del ruido en la imagen.

Si la sensibilidad del sensor es fija, las condiciones de iluminación son las que determinan la fracción de luz que debemos dejar pasar hacia el sensor. Por lo tanto, en condiciones de iluminación diurna resultará más fácil obtener fotografías nítidas que en condiciones de baja iluminación.

Las cámaras económicas que no disponen de la capacidad de enfocar las imágenes suelen utilizar aperturas de diafragma muy pequeñas y ópticas de gran angular. Ambos factores tienden a aumentar la profundidad de campo del fotograma, por lo que, si el sensor está situado sobre el plano focal, todas las imágenes que estén a una cierta distancia de la cámara quedarán correctamente enfocadas. No obstante, el problema inherente a este tipo de cámaras es que sólo pueden trabajar en condiciones de fuerte iluminación.

Es posible cuantificar las relaciones entre todos estos parámetros y su incidencia sobre la profundidad de campo. Las ecuaciones más utilizadas para estimar la profundidad de campo vienen dadas en función del parámetro  $p$  que se define como:

$$p = \frac{4f \cdot \tan^2(\alpha_H / 2)}{N \cdot \left(\frac{W}{H}\right) \cdot b} \quad (5.11)$$

donde el número  $f$  representa la apertura del diafragma,  $\alpha_H$  el ángulo de visión horizontal,  $W/H$  la relación de aspecto,  $b$  la anchura del sensor y  $N$  la resolución vertical del sensor (número de líneas que pueden representarse).

La profundidad de campo disminuye cuando  $p$  tiende a cero y aumenta si  $p$  crece. La ecuación 5.11 relaciona como incide cada uno de los parámetros que hemos mencionado sobre la profundidad de campo. Así, un aumento del número  $f$  o del ángulo de visión (disminución de la distancia focal) produce un incremento de la profundidad de campo. Análogamente, un aumento de la sensibilidad del

sensor representa una disminución de la profundidad de campo. El único parámetro que parece contradictorio con los comentarios que hemos realizado es que un aumento del tamaño del sensor ( $b$ ) parece conducir a una disminución de la profundidad de campo. Para resolver esta aparente contradicción es conveniente expresar el ángulo de visión en función del tamaño del sensor y de la distancia focal:

$$\tan(\alpha_H / 2) = \frac{b}{2 \cdot F} \Rightarrow p = \frac{f \cdot b}{N \cdot F^2 \left( \frac{W}{H} \right)} \quad (5.12)$$

donde ahora resulta evidente que un aumento del tamaño del sensor conduce a una mejora de la profundidad de campo.

El parámetro  $p$  puede relacionarse con la distancia del objeto más próximo y más lejano que permanecerán enfocados. De acuerdo con el esquema de la figura 5.22, las distancias entre la lente y los límites de la profundidad de campo vienen dados por:

$$a_V = \frac{a}{1 + p \cdot a} \quad a_F = \frac{a}{1 - p \cdot a} \quad (5.13)$$

lo que resulta en una profundidad de campo total:

$$a_{campo} = a_F - a_V = \frac{p \cdot a^2}{1 - p^2 \cdot a^2} \quad (5.14)$$

que nos relaciona la profundidad de campo con la distancia del objeto y el parámetro  $p$ . Es usual que los objetivos de las cámaras incorporen en el propio anillo de diafragmas y rueda de enfoque una tabla simplificada que indica la profundidad de campo en metros y en pies.

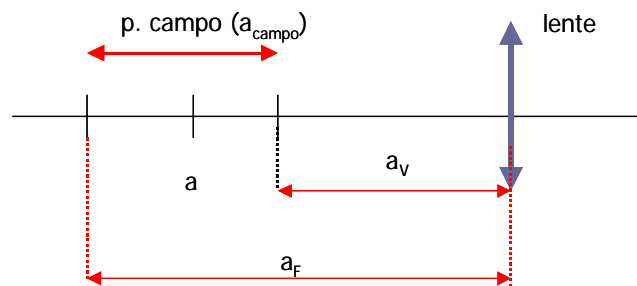


Fig. 5.22 Cálculo de los límites de la profundidad de campo

Evidentemente, las ecuaciones 5.13 y 5.14 sólo tienen sentido para denominadores positivos, puesto que en caso contrario no se producen imágenes reales sobre el sensor. Por otra parte el parámetro  $p$  es

generalmente pequeño y menor que la unidad, lo que conduce a que la profundidad de campo aumente cuando  $p$  crece. En la figura 5.23 se muestra la relación entre  $a_{campo}$  y  $p$  en la región de validez de este último.

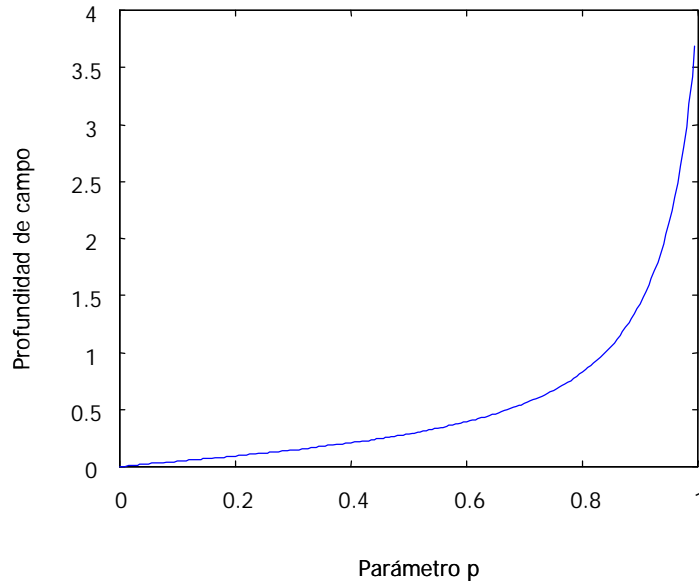


Fig. 5.23 Relación entre profundidad de campo y parámetro  $p$

## 5.4 Fotometría

La medida de la cantidad de luz en una escena es fundamental para determinar el tiempo de exposición y la apertura del diafragma, con el que conviene realizar la toma de imágenes. Prácticamente todas las cámaras actuales incorporan un fotómetro o exposímetro que realiza los cálculos automáticos de la apertura y diafragma con el que se recomienda tomar la escena. Estos exposímetros permiten seleccionar el tipo de medición que se desea realizar: global, para toda la imagen que se observa en el visor, o de una zona o región pequeña de la imagen, o incluso de un único punto de la escena. Estos exposímetros también pueden trabajar con prioridad de velocidad o de diafragma. En el primer caso, el fotógrafo especifica la velocidad de obturación con la que desea realizar la toma y el sistema calcula automáticamente, en función de la sensibilidad del sensor, el diafragma adecuado. En el modo de prioridad de diafragma se determina automáticamente la velocidad de exposición en función de la apertura seleccionada.

Las unidades fotométricas también se utilizan para especificar la sensibilidad de los sensores de imagen basados en tubos de imagen o células CCD, que generalmente se proporcionan en el mínimo número de *lux* con el que pueden trabajar. En el caso de película fotosensible la sensibilidad se suele expresar en unidades ASA (*American Standard Association*), que actualmente ya son de carácter universal (ISO). Una sensibilidad de 100 ASA permite realizar tomas en condiciones de luz ambiental

diurna. Doblar el número de ASA de la película significa doblar su sensibilidad, lo que permite aumentar en un paso o la apertura del diafragma o la velocidad de obturación. El aumento de la sensibilidad de la película supone, por lo general, una reducción de la resolución espacial (menor detalle) y una pérdida en matices y pureza de color. Casi todas las cámaras modernas incorporan un lector de sensibilidad de la película y realizan los cálculos de exposición y apertura en función de ésta.

En este apartado se exponen las unidades básicas que se utilizan para medir la intensidad o energía de la luz. El objetivo es comprender las relaciones básicas entre las unidades más utilizadas para medir la intensidad luminosa (*candela*), el brillo, el flujo luminoso (*lumen*), y la iluminancia de los objetos (*lux*). Estas unidades se utilizan para especificar las características de iluminación de focos de luz, monitores, iluminación incidente en los objetos de una escena e iluminación recibida. Su uso y sus relaciones resultan a menudo confusos.

#### 5.4.1 Intensidad luminosa: la candela

La intensidad luminosa proporcionada por una fuente puntual en cada dirección del espacio se mide en *candelas*. La definición formal de esta unidad establece que una *candela* (en la dirección  $\theta$ ) se corresponde con una fuente de luz monocromática de  $540 \times 10^{12}$  Hz que tiene una intensidad radiante en esa dirección de 1/683 Vatios (Watts) por estereorradián. Esta definición es bastante confusa y vamos a intentar esclarecer su significado examinando con detalle cada uno de los parámetros que intervienen y su interpretación en casos prácticos.

Históricamente, la definición de candela se basaba en la luz que emitía una llama. Posteriormente se redefinió en función del brillo emitido por  $1 \text{ cm}^2$  de platino fundido solidificándose. Actualmente se define como la potencia radiada en Vatios por una fuente de luz monocromática a la frecuencia de  $540 \times 10^{12}$  Hz. Esta frecuencia se corresponde con la longitud de onda de 555 nm, en la que el sistema visual humano medio presenta una mayor sensibilidad en condiciones de luz diurna. El uso de la frecuencia en vez de la longitud de onda pretende que la definición de la unidad sea independiente del medio de transmisión (la frecuencia no varía con el medio de transmisión pero la longitud de onda sí).

El uso de 1/683 Watts para definir una unidad de candela se debe a la intención de la nueva definición de candela coincidiera, aproximadamente, con la antigua (intensidad emitida por  $1 \text{ cm}^2$  de platino fundido).

La intensidad luminosa se mide en función de la potencia transmitida por ángulo sólido. Con ello se pretende que la medida caracterice la fuente de luz independientemente de la distancia a la que es observada. La unidad de ángulo sólido es el estereorradián, que se define como el ángulo subtendido por un cono que parte de la fuente de luz e intersecta a la esfera de radio unidad en una superficie de  $1 \text{ m}^2$ . En la figura 5.24 se representa esquemáticamente esta unidad. El ángulo sólido subtendido por cualquier otra porción de superficie situada sobre la circunferencia unidad puede determinarse directamente mediante proporcionalidad. Así, una superficie de  $0,25 \text{ m}^2$  sobre la esfera unidad equivale a un ángulo subtendido de 0,25 estereorradianes. Según esta definición, es evidente que la esfera de radio unidad completa, que tiene un área de  $4\pi$ , subtiende un ángulo sólido de  $4\pi$  estereorradianes. Los ángulos subtendidos por superficies que no se encuentran sobre la esfera unidad pueden determinarse proyectando la superficie de interés sobre la fuente de luz y calculando el área

resultante cuando esta proyección interseca sobre la esfera unidad. Los detalles asociados a este tipo de cálculos se ilustran en la figura 5.25, donde se considera la proyección de un diferencial de superficie situado a una distancia  $R$  del foco de luz y que forma un ángulo  $\theta$  con el vector unitario en la dirección radial. El diferencial de ángulo sólido subtendido por esta superficie viene dado por:

$$d\Omega = 4 \cdot \pi \cdot \frac{dS \cdot \cos \theta}{4 \cdot \pi \cdot R^2} = \frac{dS \cdot \cos \theta}{R^2} \quad (5.15)$$

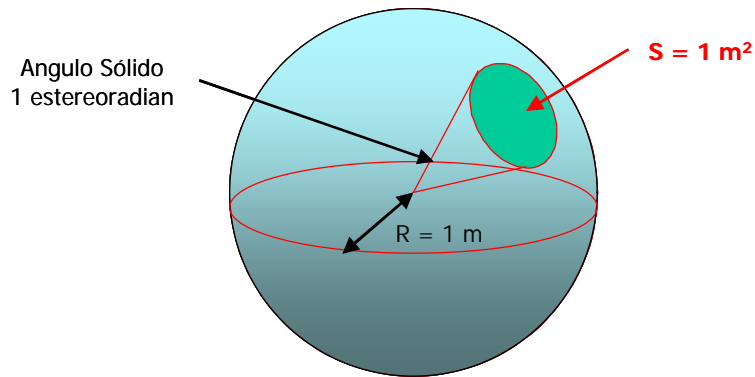


Fig. 5.24 Definición de estereorradian

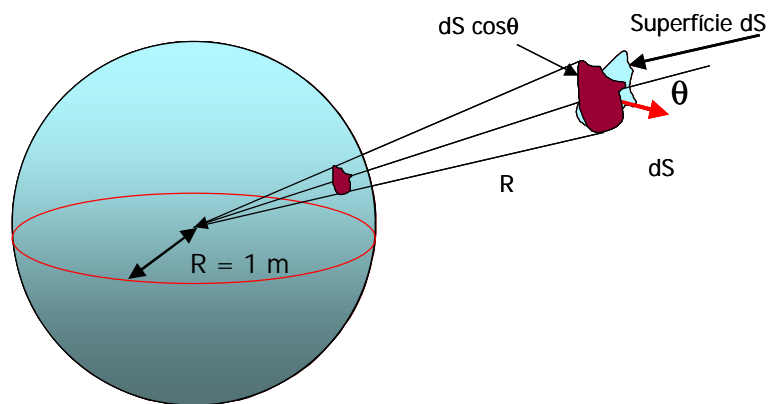


Fig. 5.25 Cálculo del ángulo subtendido por un diferencial de superficie situado a una distancia  $R$

La candela es una unidad que se utiliza para definir las características de distribución direccional de la luz emitida por una fuente puntual. Los fabricantes de lámparas, focos o reflectores suelen proporcionar un diagrama direccional que indica cómo se distribuye la energía luminosa en el espacio.

En la figura 5.26 se representa uno de estos diagramas, cuya interpretación resulta bastante simple. En este ejemplo, la intensidad luminosa en la dirección de  $60^\circ$  es de aproximadamente 300 cd. Esto significa que si nos situamos a una cierta distancia  $R$  de la fuente de luz en esta dirección y medimos la potencia que se recibe en una superficie  $dS$ , el resultado que obtendremos es:

$$dP = 300 \text{ (cd)} \cdot d\Omega = 300 \cdot \left( \frac{1}{683} \text{ (W/sr)} \right) \cdot \frac{dS \cdot \cos \theta}{R^2} \text{ (sr)} = \frac{300 \cdot \cos \theta \cdot dS}{683 \cdot R^2} \text{ (W)} \quad (5.16)$$

La correcta interpretación de estos cálculos proporciona mucha información sobre el significado de la candela como unidad de medida de la intensidad lumínica. Debe tenerse en cuenta que en esta ecuación el ángulo  $\theta$  representa el ángulo existente entre la perpendicular a la superficie en la que se realiza la medida y la dirección radial. Si suponemos que la superficie está orientada hacia la fuente la ecuación puede simplificarse a:

$$dP(\varphi) = \frac{C(\varphi) \cdot dS}{683 \cdot R^2} \text{ (W)} \quad (5.17)$$

donde hemos supuesto que  $C(\mathbf{j})$  representa el diagrama de intensidad luminosa expresado en candelas. El factor 683 que aparece en el denominador realiza la conversión a Vatios de la potencia lumínica. De acuerdo con esta ecuación, la potencia recibida en la superficie de medida disminuye a medida que nos alejamos de la fuente. Esto es debido a que el ángulo sólido subtendido por la superficie también disminuye. Si aumentáramos la superficie a medida que nos alejamos de la fuente, de manera que el ángulo sólido se mantuviera constante, la potencia recibida en la superficie también se mantendría constante. Esto indica que la radiación luminosa se dispersa a medida que nos alejamos del punto emisor de luz.  $C(\mathbf{j})$  caracteriza por tanto la intensidad luminosa que radia la fuente sin tener en cuenta los efectos de la distancia ni las características de la superficie sobre la que incide la luz.

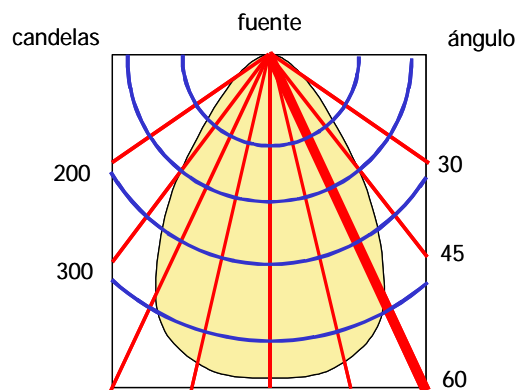


Fig. 5.26 Representación del diagrama de intensidad luminosa en candelas de una fuente de luz

Análogamente, podemos determinar  $C(\mathbf{j})$  a partir de las medidas que obtengamos en el sensor de potencia lumínica simplemente despejando esta función en la ecuación (5.17). Si el sensor tiene una

superficie total equivalente  $S_{sensor}$  y mide una potencia  $P$  expresada en Vatios, la intensidad luminosa  $C(\mathbf{j})$  que obtendremos cuando realizamos la medida desde una distancia  $R$ , con el sensor correctamente orientado hacia la fuente es:

$$C(\varphi) = \frac{683 \cdot P \cdot R^2}{S_{sensor}} \quad (5.18)$$

Hemos visto que la candela está definida para radiaciones monocromáticas en la región de máxima sensibilidad del sistema visual. No obstante, la mayoría de fuentes luminosas son espectralmente complejas, por lo que es necesario tener en cuenta todas las componentes espectrales radiadas para que la medida sea indicativa de la iluminación real que produce la fuente. La forma de tener en cuenta las diferentes componentes espectrales en que se descompone una fuente de luz real es ponderar su energía mediante la respuesta de sensibilidad relativa del ojo humano medio. Esta curva está especificada y tabulada por el CIE (*International Commission of Illumination*) y tiene una forma parecida a la de la figura 5.27. Según esta curva, una fuente que radie a una frecuencia monocromática de 510 nm (verde) tiene un rendimiento visual del 50% respecto a la frecuencia de 555 nm. Esto significa que deberá radiar el doble de potencia en Vatios para producir las mismas candelas. Todas las medidas fotométricas tienen en cuenta la respuesta psicofísica del sistema visual humano, por lo que no proporcionan una medida absoluta de la energía lumínica, sino de su percepción. Según lo expuesto, podríamos modificar la ecuación (5.18) para tener en cuenta las fuentes no monocromáticas sino que radian un espectro de potencia  $P(\lambda)$ . La ecuación resultante sería:

$$C(\varphi) = \frac{683 \cdot R^2}{S_{sensor}} \cdot \int_{visible} P(\lambda) \cdot F(\lambda) \cdot d\lambda \quad (5.19)$$

donde  $F(\lambda)$  representa la curva de sensibilidad relativa del sistema visual humano representada en la figura 5.27.

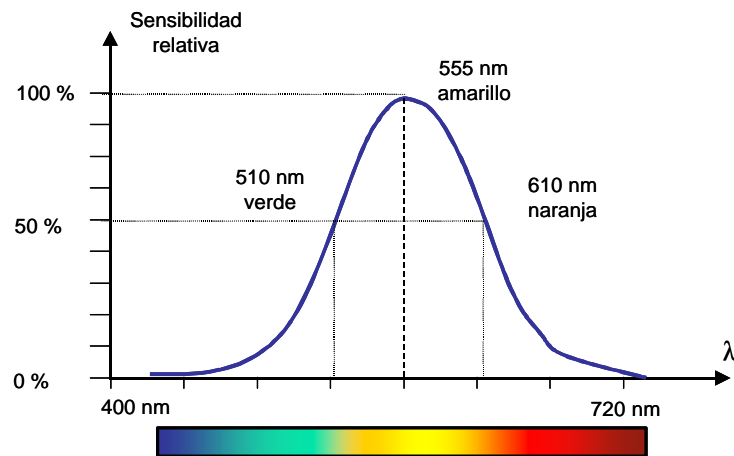


Fig. 5.27 Respuesta de sensibilidad relativa del sistema visual humano

La luz es una radiación electromagnética y, como tal, su potencia y energía puede ser medida con unidades de radiación convencionales. Esta forma de medir la intensidad, potencia y energía de las fuentes luminosas se conoce con el nombre de medidas radiométricas y, en contraposición con las medidas fotométricas que estamos presentando, no tienen en cuenta la respuesta del sistema visual.

La definición de la intensidad luminosa como candela supone que la fuente de luz es puntual o de reducido tamaño. El flujo de energía se define en función del ángulo sólido y, como hemos visto, es independiente de la distancia desde la que se realiza la medida. Si la fuente es puntual, la sensación de brillo (cuantificada como luminancia) que produce al observarla desde una cierta distancia puede ser muy fuerte, aunque su intensidad luminosa sea sólo de una candela. En cambio, si el tamaño de la fuente es algo mayor, aunque su energía total sea la misma, producirá una sensación de brillo más moderada. El brillo o luminancia de una fuente se mide en candelas por metro cuadrado ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ), de este modo, se tiene en cuenta la superficie real de la fuente de luz. Debe observarse que, en general, cualquier objeto visible puede interpretarse como una fuente de luz, independientemente de que realmente actúen como fuentes de luz o que reflejen la luz procedente de otro foco. De acuerdo con ello, el brillo o luminancia de un objeto depende de la iluminación a la que esté expuesto y de sus características para absorber y reflejar la luz.

#### 5.4.2 El flujo luminoso: lumen

Hemos visto que la candela, al ser independiente de la distancia, puede interpretarse como una propiedad de la fuente de luz. Por tanto, se requiere una unidad distinta para reflejar la luz que fluye en el espacio y que finalmente incide sobre los objetos o los sensores. Esta unidad es el *lumen* (lm) y de hecho ya la hemos estado utilizando cuando definíamos la relación entre la candela y la potencia recibida por un sensor de luz situado a una cierta distancia de la fuente.

El flujo luminoso de una fuente cuya intensidad son  $C(\varphi)$  candelas, en un ángulo sólido  $d\Omega$ , viene dado por:

$$dF = C(\varphi) \cdot d\Omega \quad (5.20)$$

la unidad de medida es el *lumen* que resulta equivalente a una candela por estereorradián ( $\text{cd sr}$ ).

Consideremos como ejemplo las dos fuentes de luz representadas en la figura 5.28. La primera fuente radia una intensidad de una candela hacia todo el espacio situado frente a ella (la mitad de una esfera, es decir,  $2\pi$  estereorradianes). La segunda fuente también radia una intensidad de una candela, pero distribuida únicamente sobre un ángulo sólido frontal de 1 estereorradián. Si determinamos el flujo total de la fuente radiado al espacio mediante la ecuación (5.20), obtendremos que la primera fuente emite un total de  $2\pi$  lm mientras que la segunda emite únicamente 1 lm.

Una medida muy utilizada en catálogos de fuentes de luz son los lumen por Vatio ( $\text{lm}/\text{W}$ ). Para una fuente que radia en distintas longitudes de onda, esta medida proporciona una idea de la eficiencia luminosa del dispositivo teniendo en cuenta la respuesta del sistema visual humano. Así, las lámparas de tungsteno, que se caracterizan por su luz cálida (mucho componente roja), tienen una eficiencia reducida (mucho consumo para la luminosidad que producen), debido a que la sensibilidad del sistema

visual humano a esta componente espectral es baja. En cambio, los fluorescentes radian mucha energía en las componentes del amarillo, verde y rojo, por lo que tienen una elevada eficiencia en lumen por Vatio.



Fig. 5.28 Relación entre candela y lumen para fuentes directivas

### 5.4.3 La iluminancia: lux

La iluminancia se utiliza para determinar la densidad de energía lumínica que incide sobre un objeto y se obtiene como el número de lumens por unidad de área. La unidad de medida es el *lux* que es equivalente a  $\text{lm}/\text{m}^2$ . Puede calcularse directamente a partir del diagrama de la fuente y depende de la posición relativa entre la fuente y el objeto y su distancia. Cuando un objeto es iluminado por varias fuentes, la iluminación total se obtiene mediante la superposición de todas la iluminaciones individuales (suponemos que las fuentes de luz son incoherentes). Existen paquetes de software que permiten determinar la iluminación que reciben los objetos dentro de un recinto a partir de la distribución y las características de las fuentes de luz.

Consideremos como ejemplo el cálculo de la iluminancia que reciben dos objetos A y B de una fuente de luz como la representada en la figura 5.29. En este ejemplo, es evidente que el objeto B, al estar situado fuera del diagrama de radiación de la fuente, no recibirá ninguna iluminación. Para determinar la iluminancia que recibe el objeto A deberemos tener en cuenta su distancia a la fuente y el área del objeto. El ángulo equivalente subtendido por el objeto es:

$$\Omega_{eq} = 4\pi \cdot \frac{A}{4\pi R^2} = \frac{A}{R^2} \quad (5.21)$$

Para determinarlo hemos tenido en cuenta la proporción entre el área del objeto A y el área de una esfera situada a la misma distancia, de la que sabemos que tiene un ángulo subtendido equivalente de  $4\pi$  estereorradianes. Una vez determinado el ángulo equivalente resulta trivial realizar el cálculo del flujo luminoso que incide sobre el objeto:

$$F = C(\varphi) \cdot \Omega_{eq} = \frac{A}{R^2} \quad (\text{lm}) \quad (5.22)$$

donde no ha sido necesario realizar la integración debido a que  $C(\varphi)$  es constante en la región de interés. Finalmente, podemos determinar la iluminancia teniendo en cuenta el área del objeto.

$$I = \frac{F}{A} = \frac{1}{R^2} \quad (\text{lux}) \quad (5.23)$$

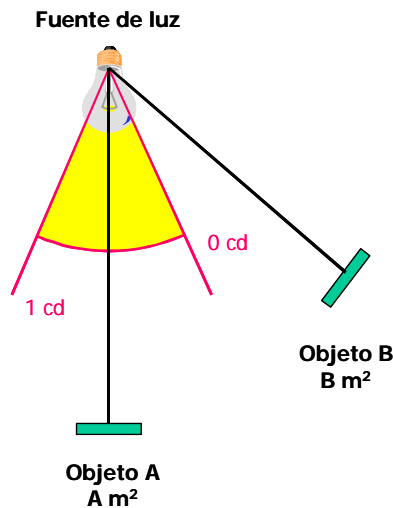


Fig.5.29 Cálculo de la iluminancia que reciben los objetos A y B

Es importante distinguir entre la iluminancia y la luminancia de un objeto. La primera está relacionada con la cantidad de luz que incide sobre el objeto, mientras que la segunda es una medida de la sensación de brillo, por lo que dependerá tanto de la luz incidente como de las propiedades de absorción y reflexión de la luz del objeto. Para medir la iluminancia se utilizan sensores electrónicos que evalúan la cantidad de luz incidente sobre el objeto. Deben situarse por tanto en una posición próxima y orientarse paralelos al objeto. La luminancia se mide usando el mismo equipo, pero con la superficie sensora encarada hacia el objeto. Entre ambas medidas hay un factor de escala y un cambio de unidades.

Para medir la luminancia y la iluminancia de forma aproximada, puede utilizarse el exposímetro de una cámara *reflex* automática. Los lux pueden medirse colocando una hoja de papel o pantalla blanca en el punto en que deseamos medir la iluminancia, para que refleje toda la luz. Dejando la cámara en modo automático podemos utilizar la siguiente ecuación:

$$\text{Lux} = 50 \cdot f^2 / (T_{\text{exposición}} \cdot ASA_{\text{película}}) \quad (5.24)$$

donde tanto el número focal como el tiempo de exposición se obtienen de los valores que ha ajustado automáticamente la cámara. La medida suele tener un error considerable debido a que los pasos de números  $f$  y tiempos de exposición son logarítmicos, pero proporciona una primera aproximación a la medida de la iluminancia. La medida de la luminancia en  $\text{cd/m}^2$  puede obtenerse con una fórmula parecida:

$$\text{Luminancia} = 12,4 \cdot f^2 / (T_{\text{exposición}} \cdot \text{ASA}_{\text{película}}) \quad (5.25)$$

En este caso, no es necesario utilizar la superficie blanca, ya que lo que deseamos estimar es la sensación de brillo que producen los objetos. Si se dispone de una cámara que pueda realizar mediciones puntuales de los ajustes del exposímetro, resulta muy fácil estimar a distancia la luminancia de los distintos objetos de la escena.

### 5.5 Sensores de imagen de estado sólido

Actualmente, casi todos los tipos de cámaras de vídeo o de fotografía digital utilizan sensores de imagen de estado sólido, también conocidos como dispositivos de acoplamiento de carga (*CCD – Charge Coupled Device*). Estos dispositivos empezaron a desarrollarse a principios de la década de los 70 y aunque en sus inicios sólo permitían obtener resoluciones bajas, actualmente se han convertido en los sensores de imagen más populares y casi han desplazado completamente otros tipos de tecnologías. El principio de funcionamiento de los sensores CCD se basa en la estructura de los condensadores MOSFET que se representa en la figura 5.30. El electrodo de polisilicio tiene propiedades metálicas, pero, a diferencia de los condensadores MOSFET convencionales, es transparente permitiendo el paso de la luz y la por tanto de generación eléctrica a partir de los fotones incidentes sobre el semiconductor. El electrodo metálico está aislado del semiconductor tipo P mediante una película de dióxido de silicio. Si se aplica una tensión positiva al electrodo, gran parte de los electrones generados a partir de la descomposición de un fotón en un par electrón-hueco se concentrarán, por atracción eléctrica, bajo el electrodo positivo. Si no existiera esta tensión positiva los electrones y los huecos se recombinarían dando lugar a una carga neta nula. En consecuencia, la carga almacenada debajo del contacto de polisilicio es proporcional a la cantidad de luz incidente sobre la superficie del electrodo.

La estructura básica de una célula CCD consiste en una cadena de condensadores MOSFET, con un sustrato tipo N común a todos ellos y situados suficientemente próximos como para que pueda realizarse una interacción entre las cargas a partir del control electrónico de las tensiones aplicadas a los terminales. Es importante observar que la carga almacenada es un valor analógico que de alguna manera deberemos extraer de la estructura CCD para obtener su valor. Las células CCD se usan en multitud de aplicaciones, ya sea como dispositivos de almacenamiento de datos analógicos, memorias digitales de alta capacidad, unidades de retardo analógicas o elementos sensores de imagen. Únicamente en este último caso, los electrodos metálicos deben ser transparentes para permitir el paso de la luz.

El control electrónico de un sensor de imagen del tipo CCD se realiza en dos fases: adquisición de imagen y lectura de datos. Las tensiones aplicadas a los electrodos durante la fase de adquisición de imagen se representa en la figura 5.31 para una célula CCD de tres fases (las más populares). Nótese

que en esta configuración se aplica tensión positiva a uno de cada tres terminales, de modo que las cargas acumuladas quedan registradas bajo los contactos de estos electrodos. El tiempo durante el que se aplican las condiciones de adquisición de la imagen es equivalente al tiempo de exposición del sensor, ya que la carga total almacenada será proporcional al valor medio de la luz incidente durante este periodo de tiempo.

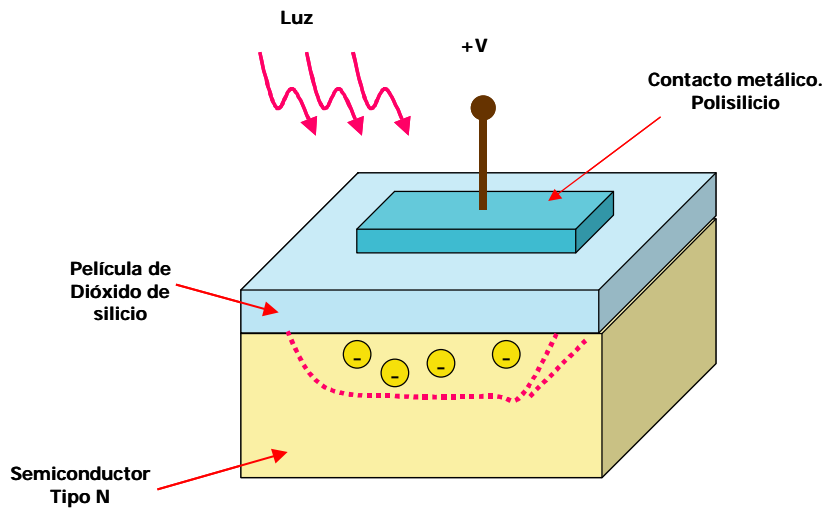


Fig. 5.30 Diagrama básico de un condensador MOSFET usado en células CCD

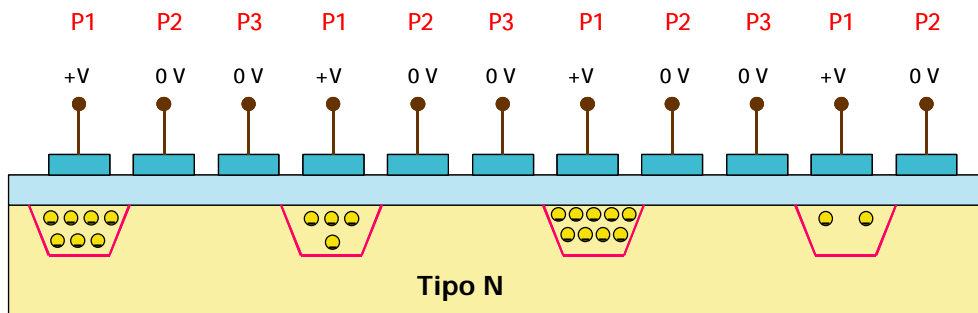


Fig. 5.31 Estructura CCD durante la fase de adquisición de imagen

Una vez registrada la luz incidente bajo la estructura CCD debe procederse a su lectura. El proceso de lectura se realiza modificando las tensiones aplicadas sobre los terminales P1, P2 y P3, de forma que externamente se provoca una transferencia de las cargas entre los condensadores adyacentes. Para que

la lectura sea factible es necesario incorporar en uno de los extremos de la CCD un elemento que pueda sensar la cantidad de carga desplazada. La forma en que se realiza esta lectura de la carga se representa también en la figura 5.32, donde se incluye un acabado con un dopado tipo P del sustrato de silicio. Esta terminación resulta equivalente a un transistor MOSFET donde, ahora, la tensión del penúltimo electrodo actúa como señal de puerta, permitiendo la lectura de la carga y su posterior amplificación.

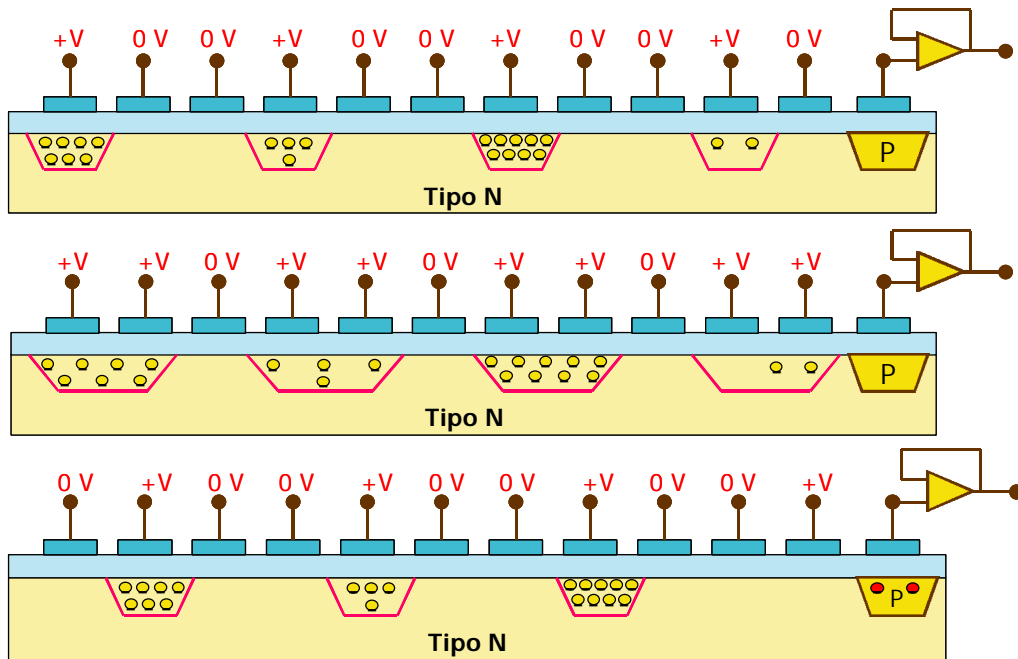


Fig. 5.32 Desplazamiento de las cargas para la lectura de la CCD

El desplazamiento de la carga se obtiene aplicando señales de reloj externas a los electrodos de la estructura. En la fase de adquisición la carga se encuentra bajo los contactos P1, que están a una tensión positiva. Para desplazar la carga al contacto P2 se aplica una tensión positiva a este electrodo, manteniendo constante la tensión del electrodo P1. Bajo estas condiciones, la carga almacenada bajo el contacto P1 se reparte ahora entre los contactos P1 y P2. Si ahora bajamos la tensión del contacto P1, toda la carga se situará bajo el terminal P2. De modo análogo, es posible desplazar la carga de P2 a P3 y de P3 a P1, desplazándose todas las cargas hacia la derecha hasta que son leídas en la célula de terminación de la estructura.

Normalmente, las señales de reloj para la lectura de la CCD se proporcionan desde un circuito integrado externo. Las cámaras actuales suelen integrar las funciones de relojes, drivers, control y acondicionamiento de señales en circuitos integrados externos al sensor CCD. La generación de las señales de reloj para la lectura no es trivial y requiere un circuito integrado especializado para proporcionar las formas de onda y niveles de tensión correctos. La mayoría de cámaras operan con baterías externas por lo que requieren diversos reguladores de tensión para generar internamente las

tensiones que requiere el desplazamiento de las cargas. En la figura 5.33 se representa un diagrama básico de las formas de onda que deben aplicarse a los terminales P1, P2 y P3 para el desplazamiento de las cargas. El caso que hemos considerado corresponde a las CCD de tres fases (por las tres señales de reloj independientes que son necesarias), Evidentemente, el desplazamiento de las cargas puede realizarse hacia la derecha o hacia la izquierda sin más que modificar la relación entre las señales de control. Existen configuraciones de CCD que pueden funcionar con dos fases de reloj, aunque su uso se restringe a aplicaciones muy específicas.

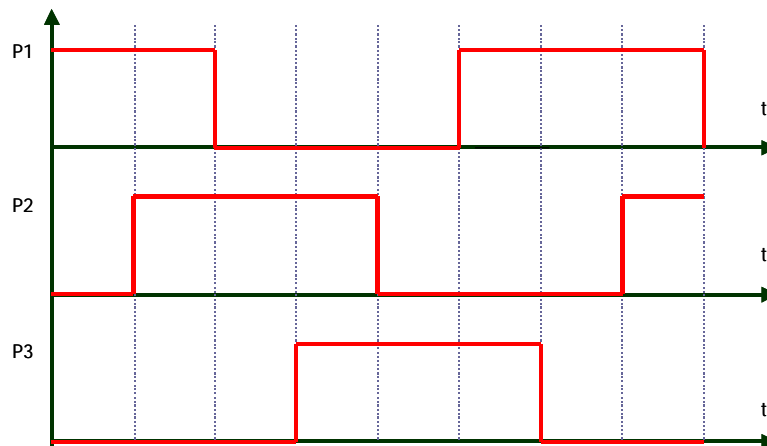


Fig 5.33 Diagrama de las señales de lectura en una CCD de tres fases

Las aplicaciones de los dispositivos CCD para memorias analógicas o células de retardo tienen una estructura análoga a la utilizada para los sensores de imagen. En este caso, no se permite que la luz incida en el interior de la estructura y las cargas se introducen externamente mediante una configuración de transistor MOSFET similar a la que se utiliza para la lectura. Las memorias suelen tener una configuración FIFO (primer dato en entrar – primero en salir), ya que los elementos de entrada y salida de cargas se sitúan en extremos opuestos. En las células de retardo el tiempo de retardo puede controlarse a partir de la frecuencia de las señales de desplazamiento de cargas. Si se aplican frecuencias altas, las cargas fluyen rápidamente entre el extremo de entrada y el de salida de la CCD, dando lugar a un retardo pequeño entre entrada y salida.

La configuración de CCD que hemos considerado hasta este momento se conoce como CCD de línea debido a que los sensores están situados uno al lado del otro formando una línea recta. Este tipo de estructuras se utilizan en *scanners*, fotocopiadoras, faxes y las denominadas cámaras lineales, que se utilizan en algunos sistemas de visión industrial por computador. Para obtener una imagen con este tipo de dispositivos es necesario que exista un desplazamiento relativo entre el objeto y el sensor CCD. La imagen se va explorando línea a línea y se reconstruye a partir del movimiento relativo existente entre el sensor y el objeto. En la figura 5.34 se representa esquemáticamente una CCD de línea donde cada cuadro representa un sensor de imagen y la terminación representa el elemento de lectura de la carga. Normalmente, se omite la representación de las señales de reloj para la lectura.

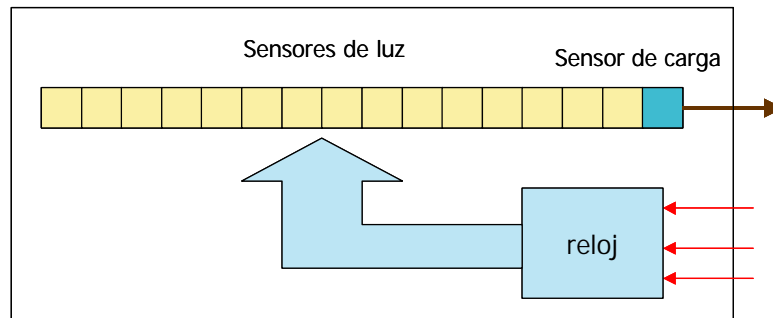


Fig.5.34 Representación de una CCD de línea.

Uno de los problemas inherentes al procedimiento de lectura de la CCD es que si la estructura se mantiene expuesta a la luz mientras se van desplazando las cargas, se va añadiendo una carga remanente a medida que éstas se desplazan hacia el terminal de lectura. El efecto es particularmente notorio cuando existe un punto de luz de gran intensidad. En este caso, todos los elementos situados a la izquierda de este punto de luz (suponemos que las cargas se desplazan hacia la derecha) adquirirán una carga adicional cuando pasen por debajo del contacto expuesto a una gran intensidad lumínica. El efecto se conoce con el nombre de *smear* y visualmente se observa como que el punto más brillante deja una estela de luz en todos los elementos de imagen situados a su izquierda y en su misma línea.

En las cámaras de vídeo actuales los sensores CCD tienen una estructura matricial, de modo que puede capturarse toda la imagen de forma simultánea sin necesidad de desplazar el sensor o el objeto. En los apartados siguientes se analizan los tipos de CCD matriciales más habituales. También se detallan los principios de algunas variantes tecnológicas de los sensores CCD que están empleándose para la captura de imágenes.

### 5.5.1 Sensores CCD matriciales

Un sensor matricial está formado por una agrupación de elementos CCD lineales dispuestos en forma de una matriz, tal y como se ilustra en la figura 5.35. El grupo óptico se encarga de formar la imagen sobre la superficie del sensor de modo que todos los elementos de la imagen son adquiridos simultáneamente. Una vez capturada la imagen, se efectúa la lectura de la información desplazando las cargas de cada CCD de línea hacia la salida. Normalmente, la lectura debe realizarse de forma coordinada con la señal de vídeo de salida, es decir, la lectura de una línea debe realizarse en el tiempo de línea de la señal de vídeo y la adquisición de una nueva imagen debe sincronizarse con el periodo de borrado de campo. Esta restricción impone una fuerte limitación en cámaras de vídeo que deben proporcionar una señal en tiempo real, ya que el sensor únicamente puede exponerse a la luz cuando la imagen ha sido completamente leída, con lo que no podrá iniciarse la adquisición de un nuevo campo hasta que se haya finalizado completamente la lectura del campo actual. Esta filosofía de lectura exige que el tiempo de exposición de la CCD sea inferior al tiempo total de borrado de campo, de esta forma las imágenes pueden fluir a la misma velocidad que la señal de vídeo. Por lo tanto, para cámaras de tipo PAL, el tiempo de exposición máximo coincide con el periodo de borrado

de campo, es decir,  $(25/312,5)*40\text{ms} = 3,2 \text{ ms}$ . Además, debe incorporarse un obturador mecánico que impida que la luz incidente modifique parte de la información de la imagen mientras se está realizando la lectura. El uso del obturador mecánico impide que aparezca el efecto de *smear* en la imagen que estaría presente si los contactos no estuvieran protegidos de la luz.

Este tipo de sensores se utiliza a menudo en aplicaciones de captura de imagen en las que no se requiere proporcionar una señal de vídeo en tiempo real, sino un único fotograma. Las aplicaciones más comunes son la obtención de imágenes de astronomía, donde pueden requerirse tiempos de exposición elevados, o aplicaciones industriales de visión por ordenador, en las que el reconocimiento de los objetos de interés puede realizarse a partir de un único fotograma.

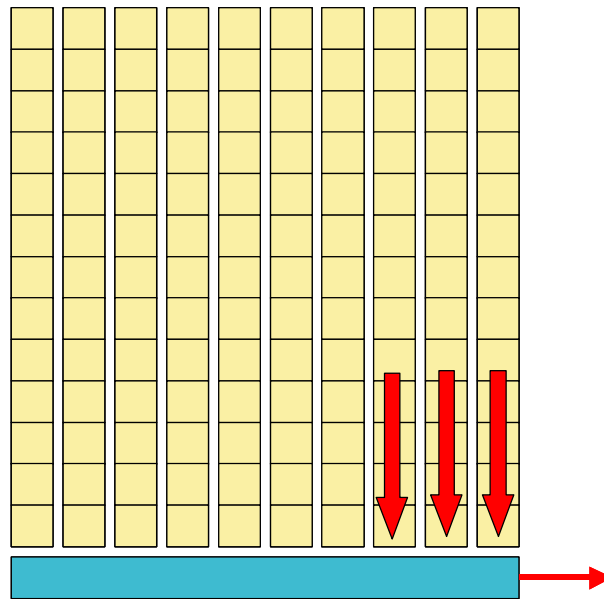


Fig. 5.35 Sensor CCD matricial

### 5.5.2 Sensores CCD de transferencia de cuadro (*Frame Transfer CCD*)

Las CCD de transferencia de cuadro son probablemente las más utilizadas en cámaras de vídeo. Conceptualmente son parecidas a las CCD matriciales, con la diferencia de que sólo la mitad de la estructura CCD está expuesta a la luz, mientras que la otra mitad está protegida. La idea básica de su funcionamiento consiste en adquirir la imagen utilizando la superficie expuesta a la luz y, una vez adquirida, desplazar las cargas rápidamente y en paralelo hacia la zona protegida. Con ello, es posible realizar los procesos de adquisición y lectura de los datos simultánea e independientemente. El tiempo máximo de exposición puede llegar a ser igual al periodo de campo, ya que una vez transferida toda la carga a la zona protegida puede iniciarse la captura de una nueva imagen, sin necesidad de esperar a que los datos hayan sido proporcionados a los sistemas exteriores. Además, no es necesario utilizar un obturador mecánico, ya que la imagen adquirida está protegida de la luz cuando se realiza la

conversión a señal de vídeo. Por otra parte, el *smear* depende del tiempo requerido para transferir la carga desde la región activa a la región de almacenamiento. Cuanto menor sea este tiempo menores son sus efectos sobre la imagen. En la figura 5.36 se representa la estructura de una CCD de transferencia de cuadro.

Es importante advertir que estamos asumiendo que las imágenes se están capturando a una velocidad igual a la frecuencia de campo, en vez de la frecuencia de imagen o cuadro. Esto significa que los dos campos de la señal de vídeo corresponden a instantes de muestreo distintos, lo que resulta ser habitual en muchos modelos de cámara. Este problema, y su incidencia en la resolución real de la imagen, fue considerado con cierto detalle en el primer capítulo. No obstante, en algunos modelos de cámara es posible trabajar a la frecuencia de imagen real (25 imágenes por segundo). En este caso, los dos campos pueden obtenerse a partir de las muestras de la CCD, realizando promedios entre líneas consecutivas. Así, en el campo par se promedian las líneas 1 y 2, 3 y 4, 5 y 6, etc, mientras que en el campo impar se promedian las líneas 2 y 3, 4 y 5, 6 y 7, etc.

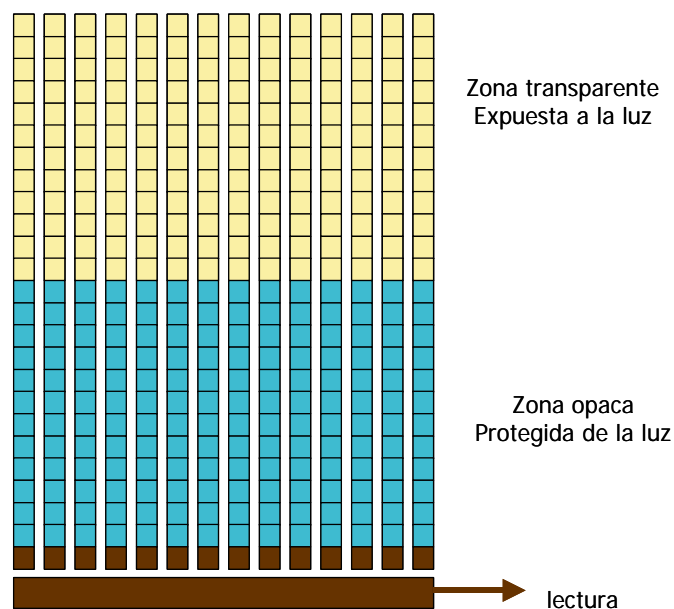


Fig. 5.36 Estructura de una CCD de transferencia de cuadro

### 5.5.3 Sensores CCD de transferencia de cuadro divididos (*Split Frame Transfer CCD*)

Esta arquitectura es similar a la de transferencia de cuadro convencional, con la salvedad de que la parte de almacenamiento esta dividida en dos secciones (superior e inferior). La parte central de la CCD es la que queda expuesta a la luz. Una vez capturada la imagen, su transferencia a las regiones de almacenamiento se realiza simultáneamente, la mitad superior hacia la mitad superior y la inferior hacia la inferior. Esta estrategia reduce el *smear* del sensor, ya que el tiempo de desplazamiento se

reduce a la mitad. No obstante, deben incorporarse dos registros de desplazamiento y dos sensores de carga en la CCD. El esquema simplificado de esta configuración se representa en la figura 5.37.

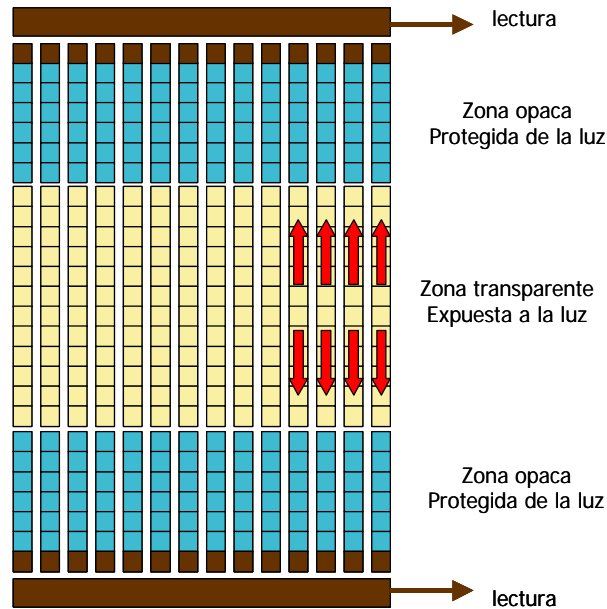


Fig. 5.37 Estructura de una CCD de transferencia de cuadro dividido

#### 5.5.4 Sensores CCD de transferencia interlínea (*Interline Transfer*)

La matriz de sensores está formada, tal y como se ilustra en la figura 5.38, por estructuras CCD lineales en las que se intercalan las filas expuestas a la luz y las protegidas. Esta configuración permite que el desplazamiento de la carga a la zona protegida pueda realizarse en un único paso, desapareciendo completamente el efecto de *smear*. Una vez protegida la información de la fuente de luz, puede procederse a su lectura de forma sincronizada con la señal de vídeo. El tiempo de exposición puede controlarse directamente a partir de las señales de control de adquisición de imagen, por lo que no es necesario ningún obturador mecánico.

El problema principal de esta configuración, al compararla con las CCD de transferencia de cuadro, es que al intercalar líneas visibles con protegidas puede obtenerse una menor densidad de elementos sensibles y, por tanto, una menor resolución de imagen. Si se desea aumentar la resolución puede reducirse el área de cada elemento sensor, pero en este caso, también se disminuirá la sensibilidad de la CCD.

Las CCD de transferencia de cuadro y las de transferencia de línea son las más utilizadas en cámaras profesionales y domésticas. El uso de una u otra tecnología depende del fabricante y de las características con que se desee dotar la cámara: alta sensibilidad o *smear* reducido.

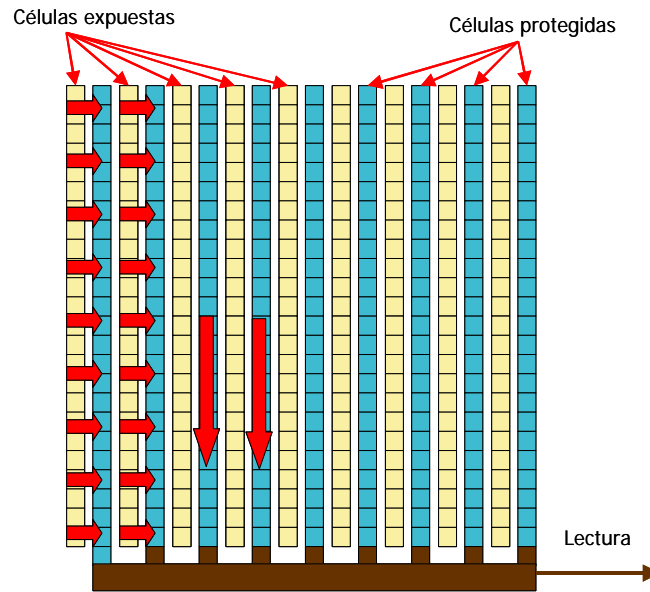


Fig. 5.38 Configuración de una CCD de transferencia interlínea

En general, todas las estructuras CCD descritas presentan una excelente fiabilidad y robustez, lo que las hace ideales para aplicaciones de vídeo y de captura de imágenes en cualquier condición. No presentan distorsión geométrica y su respuesta es muy lineal con la luz incidente.

Aparte de su aplicación en sistemas de vídeo se utilizan para la adquisición de imágenes en astronomía y microscopía de fluorescencia. Estas aplicaciones requieren tiempos de exposición muy elevados (desde varios segundos hasta horas) que pueden obtenerse manteniendo las condiciones de adquisición de imagen durante tiempos prolongados. Los dispositivos CCD utilizados para estas aplicaciones requieren que el sustrato semiconductor sea enfriado mediante sistemas externos para reducir la generación espontánea de pares electrón-hueco debida a la temperatura. Esta generación espontánea se denomina *corriente de oscuridad* y representa la carga que se almacenará en los electrodos en ausencia de luz y, por lo tanto, debida únicamente a la generación térmica de carga eléctrica. Resulta obvio que si deseamos capturar imágenes con muy poca iluminación, será necesario que la generación térmica de carga esté por debajo de la generación de carga a partir de la iluminación. Así, la temperatura del sustrato deberá reducirse más o menos en función de las condiciones de iluminación. Debido a las imperfecciones en la fabricación del dispositivo, la corriente de oscuridad depende del elemento de imagen, pudiendo obtener puntos de la estructura CCD donde ésta es relativamente elevada. La carga adquirida en condiciones de oscuridad total produce una imagen parecida a un campo de estrellas (donde los elementos de imagen con mayor corriente de oscuridad producen los puntos luminosos). Esta imagen es estacionaria y es característica de cada CCD, por lo que puede sustraerse de la imagen final para reducir la incidencia de la corriente de oscuridad sobre la imagen adquirida.

Los defectos en la estructura y fabricación del CCD pueden producir algunos píxeles muertos (*dead pixels*), que se caracterizan por ser contactos metálicos bajo los que no se almacena carga. La presencia de estos elementos defectuosos puede afectar a todos los elementos de la misma columna si se produce una pérdida de carga en estos terminales durante el proceso de lectura.

Los esquemas de CCD que hemos presentado son muy simplificados, pues no se han tenido en cuenta células y configuraciones de condensadores MOSFET que se utilizan para la eliminación de la carga indeseada o para iniciar la captura de una nueva imagen. Uno de estos circuitos son los sistemas de protección frente al *blooming*. Este fenómeno se produce cuando se sobreexpone la CCD o existe algún punto luminoso de gran intensidad. En estos casos, la carga generada bajo el contacto metálico próximo al punto luminoso es muy elevada y puede desbordar hacia las células adyacentes. Para evitar este problema suelen ponerse células que descargan a masa los excedentes de carga.

En toda esta exposición hemos supuesto que el sustrato de silicio es del tipo N, por lo que los portadores mayoritarios son los electrones. En la práctica, la mayoría de CCD se fabrican con un sustrato de silicio del tipo P. Esto significa que los portadores mayoritarios son en realidad los huecos y que las tensiones que realmente deben aplicarse a los contactos metálicos son negativas.

### 5.5.5 Dispositivos de inyección de carga (*Charge Injection Devices, CID*)

Los principios físicos para la captura de imagen de estos dispositivos son los mismos que en los CCD. La diferencia entre ambos estriba en la forma en la que se realiza la lectura de la carga. En este caso, los elementos de imagen pueden direccionarse de forma individual, especificando la fila y la columna de la matriz de sensores que se desea leer, proporcionando un acceso aleatorio a los píxeles de la imagen.

Cada uno de los elementos de imagen contiene dos condensadores MOS acoplados, uno dedicado a la captura de imagen y otro dedicado al almacenamiento de la información (protegido de la luz) mediante una configuración como la representada en la figura 5.39. La transferencia de carga entre el elemento expuesto a la luz y el elemento de almacenamiento se realiza seleccionando primero la fila y luego la columna en la que se desea realizar la lectura. Nótese que gracias a la configuración matricial de los sensores, sólo la carga asociada al elemento seleccionado será transferida. Por otra parte, la lectura de la información se realiza de modo no destructivo, mediante sensores de carga conectados a los buses de direccionamiento. Esto permite que la carga pueda volver a restablecerse al elemento sensor una vez leída.

Las aplicaciones de este tipo de sensores se concentran en utilidades donde el tiempo de exposición es un factor muy crítico y es conveniente controlarlo adaptativamente. Obsérvese que es posible utilizar tiempos de exposición diferentes para distintas partes de la imagen e incluso continuar exponiendo un elemento de imagen después de su lectura. Otra ventaja inherente a esta estructura es que no existe ninguna transferencia de carga entre sensores adyacentes, por lo que no es posible la aparición de efectos de *blooming* o de *smear*. Asimismo, la presencia de elementos defectuosos no tiene ninguna incidencia en los píxeles adyacentes.

El inconveniente principal de estas células es que, debido a su procedimiento de lectura, su nivel de ruido es bastante superior al de los CCD convencionales. La carga obtenida bajo el elemento sensor es

traspasada al bus de lectura mediante un divisor de capacidades. La propia resistencia del bus introduce un nivel de ruido significativamente mayor que en las CCD y reduce el ámbito de aplicación de estos elementos.

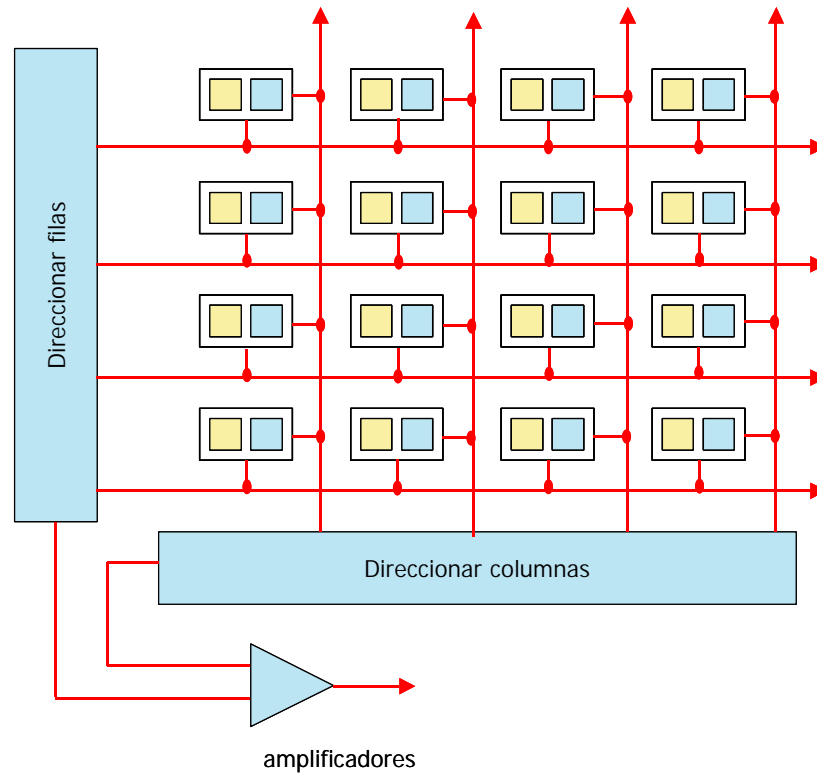


Fig. 5.39 Estructura de los sensores de inyección de carga

### 5.5.6 Sensores de píxel activo (*Active Pixel Sensors*)

Los *sensores de píxel activo* también pueden seleccionar los elementos de imagen de modo individual y no requieren que se realice una transferencia de las cargas entre los sensores. Se fabrican utilizando tecnología CMOS y utilizan un amplificador activo para cada elemento de imagen, eliminando los problemas de la capacidad y resistencia de los buses en los dispositivos CID.

Con la tecnología actual, los transistores que amplifican la carga de los sensores cubren aproximadamente un 75 % del área de imagen, lo que reduce el número de elementos activos del sensor. Debido a esta restricción, prácticamente sólo se utilizan en estructuras lineales. Aunque la tecnología debe mejorarse apreciablemente para poder competir con las densidades actuales de los dispositivos CCD, se usan con cierta frecuencia en juguetes o equipos de gama baja. Su principal ventaja es que al estar basados en tecnología CMOS pueden producirse en líneas convencionales, con

un coste reducido y con la posibilidad de integrar otras funciones lógicas o de conversión analógico digital en el mismo circuito integrado. El avance de esta tecnología permitiría introducir funciones avanzadas en los sensores de imagen sin necesidad de utilizar circuitos exteriores.

### 5.5.7 Captura de imágenes en color con un único sensor

En las cámaras profesionales o semiprofesionales suele utilizarse un sensor CCD para cada componente de color. La luz procedente del grupo óptico se descompone en tres componentes R, G y B mediante el uso de un prisma dicróico cuyos principios de funcionamiento ya han sido analizados en el primer capítulo. No obstante, en cámaras de gama baja, suele utilizarse un único sensor CCD para realizar la captura de la imagen en color. Con ello se reduce el coste de los sensores y, sobre todo, el coste del prisma de separación de las componentes de color.

Para realizar la captura de la imagen mediante un único sensor es necesario interponer filtros de color delante de los elementos de imagen del sensor de modo que sólo se permita el paso de las componentes de luz que interesen. La idea básica es distribuir sobre la CCD filtros de color de modo que las cargas de los elementos correspondan en unos casos al rojo, en otros al verde y en otros al azul. Si conocemos que tipo de filtro se ha utilizado en cada elemento de imagen podremos reconstruir las tres componentes de color. El coste de esta alternativa es, evidentemente, una pérdida significativa de resolución.

Podría pensarse en una alternativa que interpusiera un filtro de color delante de toda la CCD, que fueran cambiando con el tiempo y que permitiera la captura de las tres componentes de color multiplexadas en el tiempo. No obstante, esta alternativa supondría tener que incorporar sistemas mecánicos complejos para el cambio de filtro. Además reduciría el tiempo máximo de exposición en un factor 3 y significaría (esto es lo más importante) que las tres componentes de color asociadas a una imagen no se corresponden con el mismo instante de tiempo, dando lugar a distorsiones de color significativas en los objetos móviles de la escena.

En la práctica, durante el proceso de fabricación de las CCD que deben utilizarse en cámaras de un único sensor se aplica un revestimiento de filtros de colores que afectan a cada uno de los elementos de imagen. No obstante, los filtros que se utilizan no corresponden a los tres colores básicos, ya que obtendríamos un bajo rendimiento lumínico (y por tanto, mucha sensibilidad al ruido) en algunas componentes (rojo y azul). Los filtros que se suelen utilizar son el verde (G), amarillo (Ye), magenta (Mg) y ciano (Cy) y su disposición geométrica en la matriz de sensores es como la que se indica en la figura 5.40. En esta figura también se indica como se realiza la lectura de la imagen en dos campos. En el campo A se combinan los elementos de imagen obtenidos en las líneas A1, A2, etc. de la CCD mientras que en el campo B se combinan los elementos de imagen B1, B2, etc.

A partir de las señales obtenidas con estos filtros se determinan las componentes de luminancia y diferencia de color utilizando únicamente sumas y restas de píxeles. Los pares de elementos correspondientes a la misma columna son siempre sumados. Así, la información que podemos tratar correspondiente a los pares de línea A1 es  $(Cy+G)$  y  $(Ye+Mg)$ . En los pares de línea del tipo A2 disponemos de la información  $(Cy+Mg)$  y  $(Ye+G)$ . Esto significa que tanto las componentes de luminancia como de color sólo serán obtenidas de modo aproximado. La luminancia se determina para

todos los pares de líneas (A1, A2) mientras que las señales diferencia de color sólo se determinan en pares alternados (en A1 se estima R-Y y en A2 la componente B-Y).

La luminancia en el par de líneas A1 se obtiene a partir de la suma de (G+Cy) y (Mg+Ye), de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Y \approx \{(G + Cy) + (Mg + Ye)\} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{2}(2B + 3G + 2R) \quad (5.26)$$

La componente de croma se aproxima restando las combinaciones entre dos elementos de imagen sucesivos:

$$R - Y \approx \{(Mg + Ye) - (G + Cy)\} = (2R - G) \quad (5.27)$$

En la línea A2 la luminancia se obtiene sumando las dos componentes:

$$Y \approx \{(Mg + Cy) + (G + Ye)\} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{2}(2B + 3G + 2R) \quad (5.28)$$

y la señal (B-Y) se obtiene mediante la diferencia de las dos componentes

$$-(B - Y) \approx \{(G + Ye) - (Mg + Cy)\} = -(2B - G) \quad (5.29)$$

Los resultados que se obtienen para el campo B son parecidos. Tal y como se desprende de estos resultados, los valores de las componentes Y, (R-Y) y (B-Y) que realmente se utilizan en este tipo de cámaras son sólo valores aproximados a los colores reales.

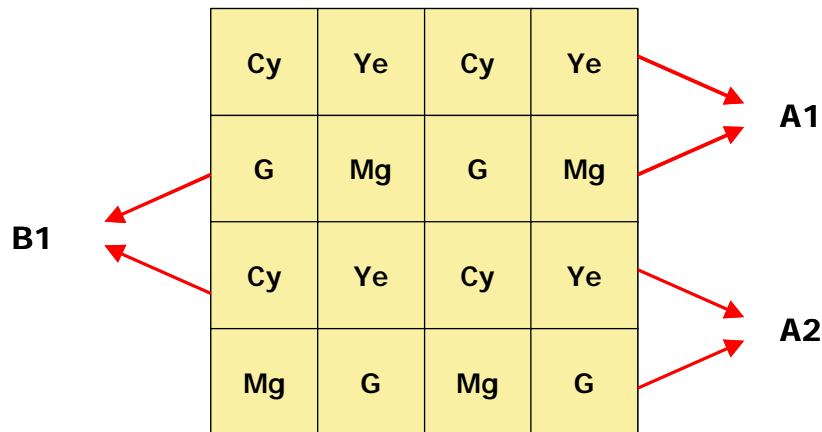


Fig. 5.40 Configuración de filtros de color en sistemas con un único sensor CCD

## 5.6 Sistemas automáticos y control de la señal de vídeo

En esta sección veremos los principios de funcionamiento de algunos subsistemas que usualmente se incluyen en cámaras de vídeo o de fotografía. Aunque veremos algunos controles que se utilizan sólo en cámaras profesionales, nos concentraremos principalmente en las cámaras domésticas, puesto que al estar orientadas a usuarios no expertos son las que incorporan un mayor número de sistemas de control automático.

### 5.6.1 Zoom óptico y zoom digital

El *zoom* o ángulo de visión de la cámara se controla directamente por el usuario que puede modificarlo accionando un botón o deslizador. En cámaras profesionales este control actúa directamente sobre el motor de *zoom* del grupo óptico, variando la distancia focal. El *factor de zoom* o número de aumentos del grupo óptico se define como la relación entre la distancia focal más grande y la más pequeña que pueden obtenerse. Son habituales factores de *zoom* de 20x en cámaras domésticas y de 10x en profesionales. Algunas cámaras incorporan también el llamado *zoom digital*, que consiste en utilizar sólo la parte central de la CCD para obtener la imagen final, interpolando el resto de muestras. El tipo de filtro interpolador que se utiliza puede ser tan simple como la repetición de la muestra anterior o la interpolación lineal entre elementos de imagen adyacentes. En general, si se utiliza un factor de *zoom* digital excesivamente grande, se observa una pérdida de calidad de imagen considerable que aparece como una imagen con un grado elevado de pixelado. Existen cámaras domésticas que con la acción conjunta del *zoom* óptico y el *zoom* digital pueden llegarse a factores de aumento superiores a 200. La toma de imágenes con este factor de aumento exige, evidentemente, el uso de trípodes muy estables.

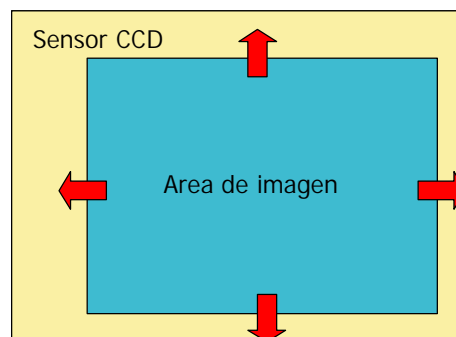


Fig. 5.41 Estabilización de imagen mediante sistemas electrónicos

### 5.6.2 Mecanismos de estabilización de imagen

Se utilizan básicamente en cámaras domésticas y en algunas cámaras de campo y tienen como objetivo reducir el movimiento involuntario de la cámara por parte del operador que produce imágenes poco estables. Existen dos alternativas para obtener la estabilización de la imagen. La

primera consiste en fijar la superficie donde se forma la imagen actuando directamente sobre el grupo óptico mediante sistemas mecánicos. Se trata de un sistema complejo y caro, pero con el que se obtienen excelentes resultados. La segunda alternativa es puramente electrónica y se basa en actuar sobre la imagen inestable obtenida en el sensor CCD. En este tipo de sistemas, la superficie de imagen del sensor CCD es mayor que la superficie de imagen útil, tal y como se ilustra en la figura 5.41. Un sistema electrónico se encarga de determinar el índice de la fila y la columna de la imagen capturada por la CCD que debe presentarse como primera fila y primera columna de la imagen útil. Los algoritmos de actualización de estos valores son específicos de cada fabricante y se basan en cálculos simples de correlación entre imágenes y predicciones de movimiento.

### 5.6.3 Sistemas de autoenfoco

Los sistemas de autoenfoco actúan sobre el motor de enfoque del grupo óptico con el objetivo de mantener el sujeto principal de la acción permanentemente enfocado, sin necesidad de que el operador actúe manualmente sobre el mando de enfoque. Pueden ser activos o pasivos en función de si utilizan una señal auxiliar para determinar la distancia a la que se encuentran los objetos o realizan el control de enfoque directamente a partir de las imágenes recibidas. Los sistemas activos más populares son los basados en ultrasonidos e infrarrojos.

En la figura 5.42 se ilustra el principio de funcionamiento de un sistema basado en ultrasonidos. La cámara transmite pulsos de corta duración y se mide el tiempo que transcurre entre la emisión y la recepción del pulso, enfocando el grupo óptico a esta distancia equivalente. Si no se detecta la recepción del pulso el sistema enfoca automáticamente hacia el infinito. Se trata de un sistema muy económico que se utiliza en cámaras de gama baja (normalmente cámaras miniatura de fotografía). Uno de los principales inconvenientes de los sistemas basados en ultrasonidos es que no pueden enfocar a través de un cristal (queda enfocado el cristal)

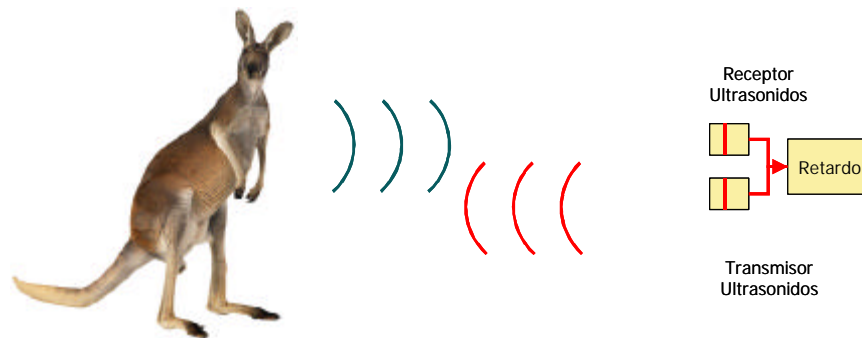


Fig. 5.42 Sistema de autoenfoco por ultrasonidos

Los sistemas basados en infrarrojos transmiten una señal continua en esta banda de frecuencia. La distancia del objeto principal se obtiene por trigonometría a partir del diagrama de la figura 5.43. La distancia entre el emisor y el receptor de infrarrojos ( $D$ ) es conocida. El sistema mide la distancia  $d$ ,

respecto al centro del array de fotodiodos, a la que se recibe el rayo transmitido. La distancia real del objeto puede determinarse a partir de estos dos parámetros. En general, los sistemas de autoenfoque basados en infrarrojos suelen proporcionar mejores resultados que los sistemas basados en ultrasonidos.

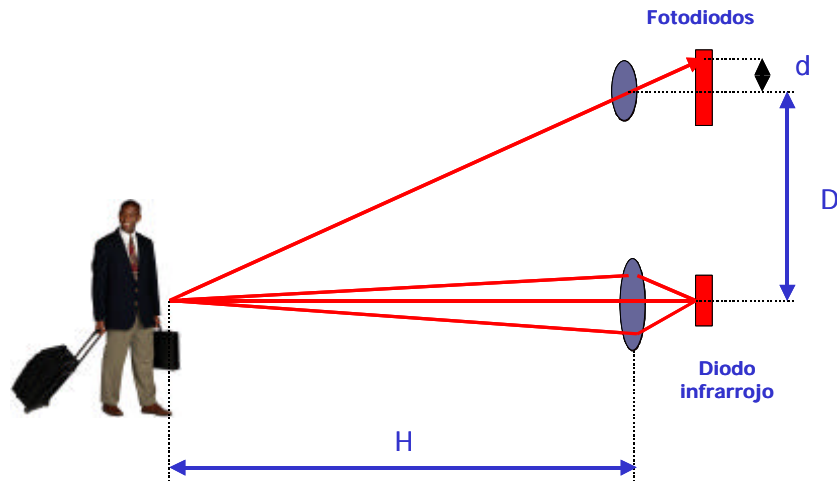


Fig. 5.43 Sistema de autoenfoque basado en infrarrojos

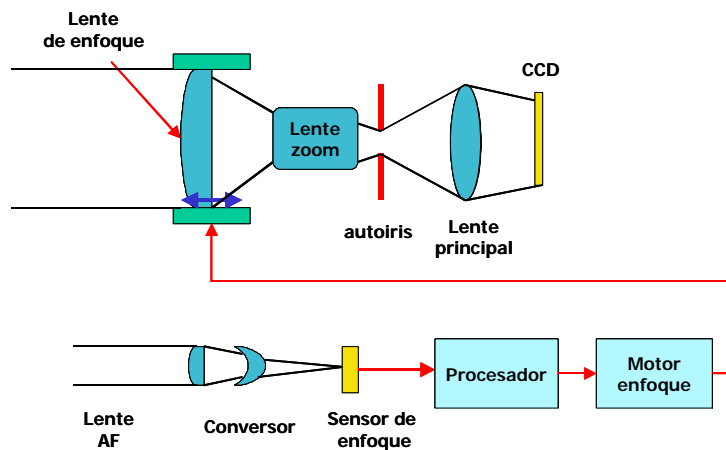


Fig. 5.44 Enfoque pasivo mediante sistema óptico auxiliar

Los sistemas pasivos suelen proporcionar una mayor precisión en el enfoque de las imágenes. Existen dos posibles variantes en función de la imagen que se utiliza para calcular el punto de enfoque. En las figuras 5.44 y 5.45 se representan estas dos alternativas. En el primer caso, la imagen utilizada para determinar el enfoque se obtiene mediante un sistema óptico auxiliar, independiente del grupo óptico que se utiliza para registrar la escena. La alternativa a este sistema consiste en integrar un prisma

separador de luz, que permite utilizar la misma imagen para el cálculo del foco. En cámaras reflex de 35 mm el propio espejo reflector del visor realiza esta función.

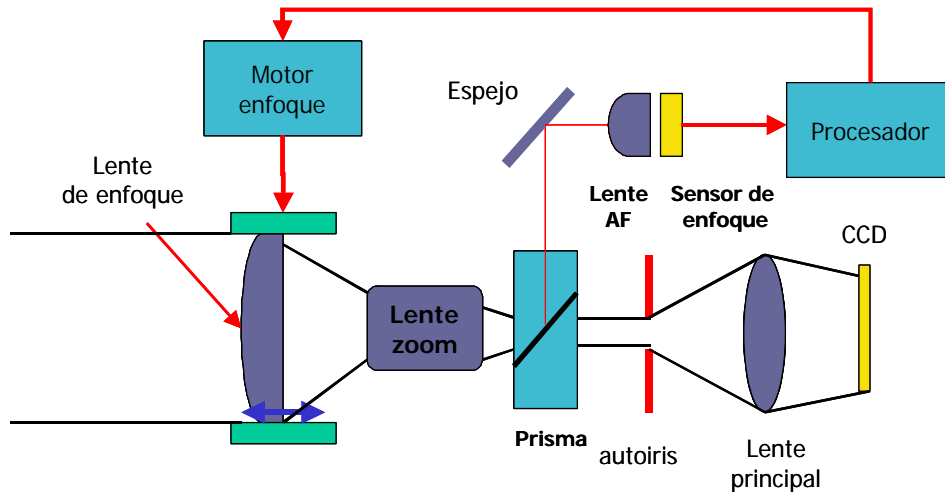


Fig. 5.45 Enfoque pasivo integrado dentro del propio grupo óptico

Para determinar el enfoque pueden usarse divisores ópticos de imagen parecidos a los que se utilizan en las cámaras de fotografía para el enfoque manual. Estos sistemas dividen la imagen en el sentido horizontal en dos partes, de forma que, tal y como se ilustra en la parte derecha de la figura 5.46, al modificar la posición del foco las imágenes resultantes se desplazan hacia la izquierda o hacia la derecha. La imagen sólo permanece correctamente enfocada cuando las líneas verticales de ambas subimágenes coinciden. Para realizar el ajuste automático de foco mediante este sistema, es necesario utilizar lentes lenticulares y pares de fotodiodos situados a ambos extremos de la imagen dividida. El sistema de control actúa sobre el motor de foco hasta que las señales recibidas por los pares de fotosensores coincidan.

Una alternativa a este sistema consiste en utilizar un sensor CCD lineal, que se sitúa en el centro de la imagen, tal y como se muestra en la figura 5.46. Incluso, para cámaras basadas en CCD matriciales, es posible aprovechar la información obtenida en los sensores centrales. El control de enfoque se realiza a partir del análisis de la energía de señal recibida en estos sensores, moviendo el motor hasta que se obtiene una señal en la que aparecen rápidas transiciones entre el fondo y los objetos. El principio de funcionamiento de este sistema se ilustra en la figura 5.47, donde se representa la señal obtenida en el sensor CCD para una imagen enfocada y una imagen desenfocada. Para determinar el foco correcto suele estimarse la derivada de la luminancia recogida en el sensor. Esta derivada se determina mediante diferencias entre los niveles de luminancia entre píxeles consecutivos y es una medida de lo abruptos que son los contornos y, por tanto, de la nitidez de la imagen. Nótese que en la figura 5.47 se obtiene una derivada con una energía mucho mayor para la imagen enfocada que para la imagen desenfocada. En general, la energía de la derivada es una buena medida del enfoque de la imagen.

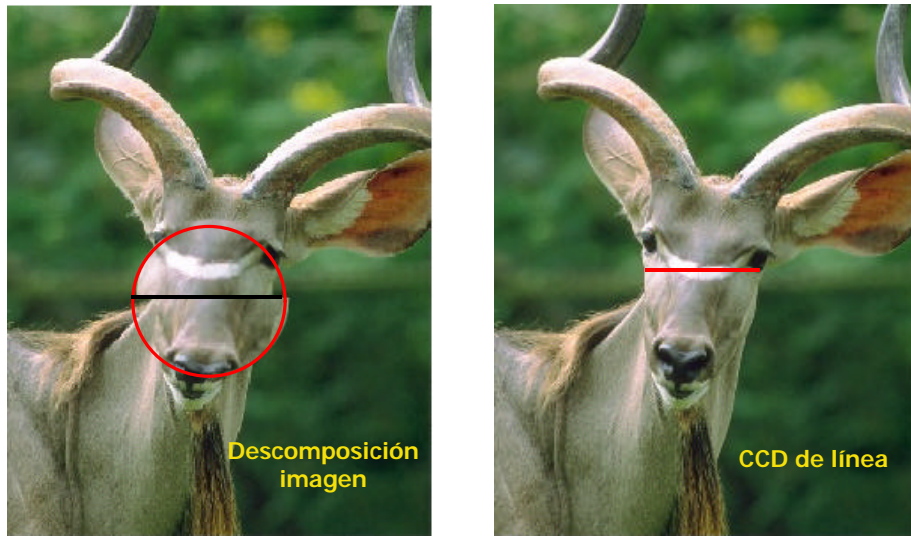


Fig. 5.46 Enfoque pasivo mediante descomposición de imagen y CCD de línea

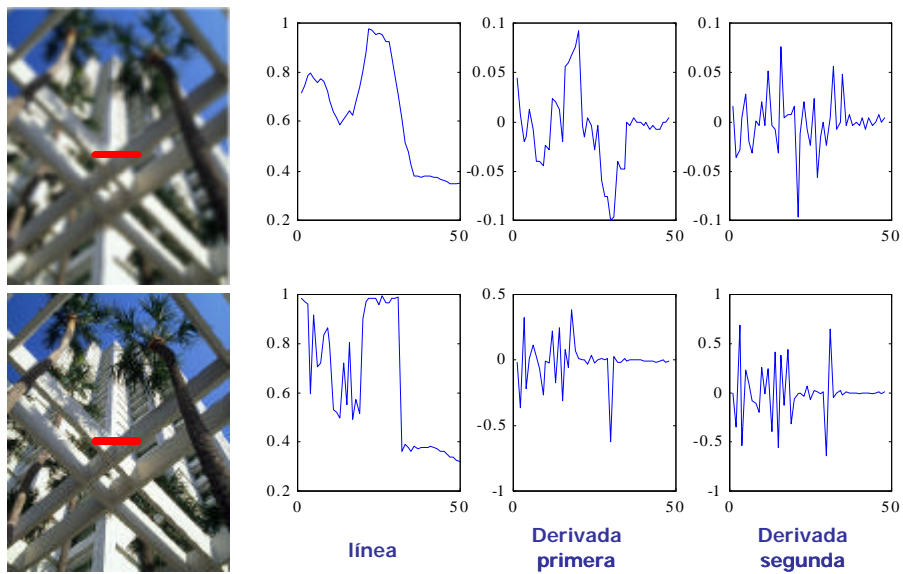


Fig. 5.47 Gradiente de la señal obtenida en el sensor CCD

Los principales problemas de los sistemas de enfoque pasivo es que sólo pueden enfocar en la zona central de la imagen y que es necesario que existan contornos verticales en esta zona para poder realizar un enfoque correcto. En cámaras de fotografía estos problemas se solucionan mediante un

botón que mantiene el ajuste de enfoque. Si desea realizarse una fotografía de un motivo que no tiene contornos en la parte central, deberemos enfocar primero sus contornos y posteriormente desplazar la cámara, con el enfoque fijado, hasta obtener el ángulo deseado. Si se requiere realizar fotografías de objetos que tienen sólo contornos horizontales se recomienda girar la cámara 90° (con lo que situamos el sensor perpendicular a los contornos), ajustar y fijar el enfoque y posteriormente realizar la toma. En cámaras de vídeo pueden utilizarse los mismos trucos, siempre que no se requiera registrar constantemente la escena, en cuyo caso, se recomienda utilizar el enfoque manual.

Algunos modelos de cámaras avanzadas disponen de varios sensores CCD con los que el usuario puede seleccionar la zona de la imagen en la que se realizará el cálculo de enfoque. Un ejemplo de estos sistemas es el MultiCam 1300AF de Nikon, cuya distribución de sensores CCD se representa en la figura 5.48. El subsistema de autoenfoque dispone de un total de 14 sensores CCD del tipo lineal. El usuario puede seleccionar cinco regiones distintas para el enfoque de la imagen (el centro y las cuatro direcciones principales). En las posiciones central, derecha e izquierda, los sensores están dispuestos en forma de cruz para poder detectar tanto los contornos horizontales como los verticales. Además de las CCD convencionales se integran unas CCD de mayor área, y por tanto mayor sensibilidad a la luz, que permiten realizar enfoques de gran precisión en condiciones de baja iluminación.

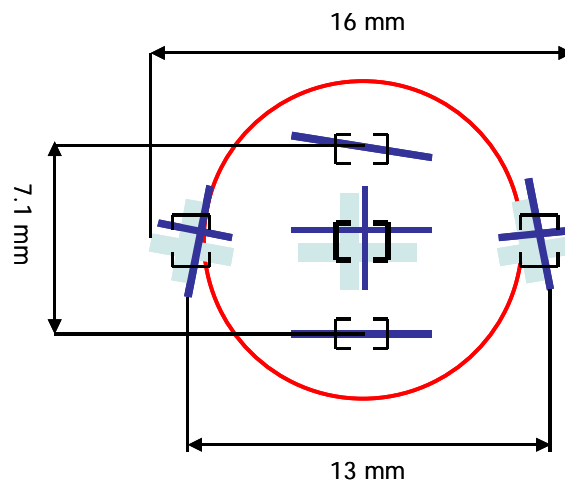


Fig. 5.48 Sistema de autoenfoque pasivo con múltiples sensores CCD

#### 5.6.4 Ajuste del balance de blancos

Los colores capturados por la cámara dependen, como es evidente, de la iluminación. En condiciones de luz natural diurna la energía lumínica está distribuida de forma aproximadamente igual en las tres componentes de color. Sin embargo, con iluminación artificial es muy probable que una de las componentes de color sea más importante que las otras. Así, para iluminación de tungsteno predomina la componente roja, lo que resulta apropiado en escenarios cálidos en los que predominan los tonos rojizos. Los efectos de la iluminación en la imagen pueden en principio compensarse actuando sobre

la ganancia de cada una de las componentes de color en la cámara. Este ajuste se conoce como el balance de blancos y es conveniente realizarlo antes de empezar un registro de imagen para adaptarnos a las condiciones de iluminación. El ajuste del balance blancos en las cámaras actuales se ha simplificado notablemente y basta con enfocar la cámara hacia una hoja de papel u objeto blanco y pulsar el botón de calibración de blancos. La ganancia de las tres componentes de color se ajusta automáticamente para que den el mismo nivel de señal en estas condiciones de iluminación. El ajuste de blancos se incorpora en todas las cámaras profesionales y en los modelos domésticos de gama alta.

### 5.6.5 Modos de exposición y efectos

La mayor parte de cámaras de vídeo domésticas incorporan programas que controlan la exposición y el diafragma de forma automática en función de las condiciones de iluminación y tipo de escenas que se estén registrando. Los modos de exposición más habituales son:

*Deportes:* Se utilizan velocidades de obturación elevadas (mayores que 1/400) para que los sujetos no queden borrosos debidos al movimiento. Esto significa que se proporciona prioridad al tiempo de exposición, de modo que en condiciones de baja iluminación el diafragma deberá abrirse resultando poca profundidad de campo.

*Retratos:* En este modo se pretende resaltar el sujeto principal dejando el fondo borroso. Por ello, se fuerza que el diagrama esté muy abierto para reducir la profundidad de campo.

*Playa y Nieve:* Se trata de un modo pensado para condiciones de iluminación intensa en los que es habitual que se produzca sobre-exposición si se utiliza un modo automático convencional.

*Puestas de Sol y Escenas Nocturnas:* En condiciones de baja iluminación los modos automáticos tienden a aumentar la ganancia de la señal proporcionada por el sensor reproduciendo escenas poco naturales.

*Baja Iluminación:* Este modo sólo se incorpora en cámaras digitales en las que se puede aumentar el tiempo de exposición del fotograma por debajo de la frecuencia de campo. En efecto, los fotogramas, tomados a velocidades lentas, se almacenan en memoria y se repiten durante varias imágenes, pudiendo capturar escenas en condiciones de baja iluminación. Evidentemente, la frecuencia de imágenes reales se reduce, por lo que se aprecia discontinuidad en el movimiento.

*Paisajes:* En este caso se fuerza que la cámara enfoque al infinito, por lo que pueden capturarse imágenes del paisaje a través de cristales de un automóvil o con la presencia de obstáculos en primer plano.

La mayoría de cámaras portátiles también integran efectos de imagen simples que proporcionan al usuario cierta flexibilidad para producir vídeos domésticos con buenos acabados sin necesidad de realizar ediciones posteriores. Entre estos efectos son especialmente importantes los fundidos entre escenas, el registro de imágenes en blanco y negro, sepia o muy baja resolución (efecto mosaico), la

mezcla de imágenes en memoria con imágenes de vídeo real, etc. Algunos modelos incorporan incluso utilidades de titulación.

## 5.7 Tipos de cámaras

En este apartado revisaremos, de forma muy breve, los diferentes tipos de cámaras de vídeo que pueden encontrarse en el mercado, así como sus características y sus aplicaciones. El objetivo es proporcionar una idea general de los criterios que deben utilizarse para seleccionar un determinado tipo de cámara en función de la aplicación.

### 5.7.1 Cámaras de estudio

Estas cámaras están orientadas a estudios de grabación y suelen ser de un tamaño y peso considerable, por lo que, generalmente, están montadas sobre soportes estables o carriles móviles. Existen algunos modelos portátiles que pueden ser transportados por el operador para realizar tomas móviles. Proporcionan como señal de salida las tres componentes de color independientes, aunque el formato de estas señales puede variar en función de las características de la cámara y los equipos del estudio. Existen modelos en que las señales se transmiten en banda base por cables independientes, modelos en los que se realiza una multiplexación temporal; otros emplean transmisiones bidireccionales mediante cables del tipo Triax o incluso transmisiones analógicas o digitales vía fibra óptica.

La característica principal de estas cámaras es que están conectadas a una unidad de control de cámara externa (*CCU-Camera Control Unit*), que es donde generalmente se realiza la compensación de la matriz de color, el ajuste de ganancia de las componentes de color, la mejora de imagen, la corrección de gamma y las conversiones a señal de luminancia y componentes diferencia de color. El cable que une el cabezal de cámara con la unidad de control de cámara se utiliza también para proporcionar diversas señales de retorno al operador de cámara, como por ejemplo la señal de audio del ayudante de realización, la señal de vídeo que se observa por el visor, etc. También se proporcionan señales de control del diafragma y foco así como la alimentación de la cámara. Debe tenerse en cuenta que, generalmente, el operador de cámara sólo controla el enfoque y el *zoom* de la cámara. El diafragma o iris, los tiempos de exposición, la ganancia de las componentes de color, etc., se controlan desde paneles de control independientes. Al centralizar el control de todas las cámaras en un único punto, permite obtener un equilibrado perfecto de todas las cámaras que intervienen en la producción.

Los formatos de señal de vídeo proporcionados por las cámaras de estudio son muy diversos y dependen de las características de la cámara. Así, en una cámara de alta definición los tiempos de línea o de campo dependen del número de líneas de la cámara y del número de imágenes por segundo. Análogamente, en modelos pensados para la captura de escenas en cámara lenta, el formato de salida suele depender del número de fotogramas por segundo. En general, la conversión a formatos estándar puede realizarse en la unidad de control de cámara.

### 5.7.2 Cámaras de campo (*Electronic News Gathering – ENG*)

Estas cámaras también están orientadas al mercado profesional. Se trata de cámaras portátiles pensadas para la realización de reportajes en exteriores y se caracterizan por incorporar un subsistema de registro de la secuencia de vídeo sobre soporte magnético (magnetoscopios). Existen modelos en los que el cuerpo principal de la cámara (óptica y captura de señales) es independiente del sistema de registro de la señal, que puede intercambiarse en función de las necesidades. Generalmente, disponen de múltiples formatos de salida de la señal de vídeo (vídeo compuesto, componentes, formatos digitales, etc).

### 5.7.3 Cámaras de circuito cerrado de TV o de video vigilancia

Generalmente son cámaras en miniatura que proporcionan una señal de vídeo compuesto PAL o NTSC estándar. Existen modelos en blanco y negro y en color y tienen un coste relativamente bajo. En algunos modelos es posible controlar el foco y el *zoom* del grupo óptico a distancia. La mayoría disponen de un sistema de autoiris que regula la cantidad de luz incidente en función de las condiciones de iluminación, que, en algunos modelos, también puede controlarse manualmente. En la mayoría de instalaciones las cámaras se distribuyen en distintos puntos del edificio y las señales se dirigen a un centro de control, donde un multiplexor de entrada permite seleccionar al operador la cámara que se visualiza. Existen paquetes de *software* específicos para video vigilancia que gestionan la inspección automática de las cámaras y el registro de las imágenes en disco duro o en magnetoscopios convencionales en función de las alarmas que se producen en el edificio. En edificios de dimensiones considerables es probable que deban incorporarse moduladores de vídeo para cable, para que las imágenes puedan ser recibidas con calidad desde el centro de control. Algunos modelos de cámaras para video vigilancia son de tamaño muy reducido, por lo que pueden disimularse en el entorno y pasar fácilmente desapercibidas. Este tipo de cámaras se utilizan con frecuencia en centros comerciales.

### 5.7.4 Cámaras industriales y de visión

Se engloban dentro de este apartado todas las cámaras que se utilizan en aplicaciones de reconocimiento automático de formas y visión por computador. Las características de las cámaras dependen del tipo de aplicación y pueden encontrarse tipos muy distintos. Normalmente la cámara está conectada a una tarjeta de digitalización de imagen que puede realizar la adquisición de la secuencia de vídeo en tiempo real o adquirir un único fotograma cada vez que se produzcan las condiciones de la imagen que debe reconocerse. Este segundo caso es el más extendido en la mayoría de aplicaciones, utilizándose tarjetas de digitalización que se denominan capturadoras de imagen (*frame grabber*), que generalmente aceptan distintos formatos de señal de cámara y que disponen de puertos para controlar algunos de los parámetros de la cámara.

En las aplicaciones más simples pueden utilizarse cámaras de vídeo vigilancia que proporcionan una señal PAL estándar en color o, en la mayoría de los casos, en blanco y negro. La adquisición de la imagen se realiza cuando se producen las condiciones en las que se requiere realizar un reconocimiento de la imagen. Generalmente estas condiciones son controladas por circuitos externos que producen una señal de inicio de captura. Una vez la imagen ha sido digitalizada, se realiza la

identificación o reconocimiento de los objetos produciendo señales externas de control y quedando el sistema en condiciones de capturar una nueva imagen. Así, en una aplicación de reconocimiento de matrículas en un *parking*, la señal de inicio de captura la produciría un sensor que detecta la presencia de un automóvil en la barrera de entrada al *parking*. Una vez adquirida la imagen y procesada se procede a actuar sobre el sistema proporcionando el *ticket* de entrada y abriendo la barrera del *parking*. Es evidente que, en función de las características del problema puede resultar necesario que las características de la señal PAL no proporcionen suficiente resolución de imagen para resolver el problema de reconocimiento de formas. En estos casos, se suelen utilizar cámaras de alta definición que proporcionan señales de vídeo no estándar pero cuyo formato debe ser interpretado correctamente por la tarjeta digitalizadora.

Aparte de las cámaras convencionales, las más utilizadas son las progresivas, las lineales y las denominadas cámaras inteligentes. En cualquier caso, es posible que la señal proporcionada sea analógica o directamente digital. Las señales digitales suelen entregarse mediante un cable específico en el que todos los bits del elemento de imagen se suministran en paralelo. También existen versiones que utilizan protocolos serie estándar a través de un puerto RS-232 o RS-422. La lectura de la información de los datos proporcionados por la cámara requiere el uso de programas adaptados a estos formatos.

Las cámaras progresivas proporcionan todas las líneas que constituyen la imagen en un único campo. Con ello, aumenta la calidad y resolución de la imagen, sobre todo cuando se realiza la captura de objetos móviles. Existen modelos de alta definición que pueden entregar imágenes de hasta 2000 líneas. Generalmente, estas cámaras pueden controlarse mediante una interfaz digital en la que es posible variar el tiempo de exposición, la apertura del diafragma, el enfoque y el ángulo de visión. Como generalmente no es necesario que la cámara proporcione señales de vídeo en tiempo real, también es posible controlar el instante en el que se realiza la captura de la imagen en el sensor CCD. Asimismo, el tiempo de exposición puede superar los 1/50 segundos de las cámaras convencionales, ya que la frecuencia de imagen puede controlarse externamente e incluso, trabajar basándose exclusivamente en fotogramas. En estos modelos, el tiempo mínimo entre dos fotogramas viene determinado por el tiempo de transferencia de la imagen desde la cámara a la tarjeta digitalizadora.

Las cámaras lineales están basadas en una CCD de línea en vez de una CCD matricial. La ventaja principal de este tipo de cámaras es que pueden obtener un gran número de elementos de imagen por línea (hasta 4000 píxeles). No obstante, la captura de la imagen debe realizarse línea a línea, por lo que es preciso que exista un desplazamiento relativo entre la cámara y el objeto que se está capturando. La velocidad de desplazamiento entre ellos determina la resolución de la imagen en el sentido ortogonal a la línea de CCD. Es importante que esta velocidad sea lineal para reducir las posibles distorsiones geométricas de imagen que obtendríamos si el movimiento relativo no es uniforme. Generalmente, el movimiento del objeto se realiza con sistemas de posicionamiento mecánicos de gran precisión que son controlados directamente por el sistema encargado del reconocimiento de imagen. Los formatos de señal que se obtienen en la salida de la cámara pueden ser analógicos o digitales, aunque estos últimos son los que más predominan en los modelos actuales. La tasa de transmisión de bits entre la cámara y la tarjeta de digitalización depende del modelo de cámara, el número de píxeles, si es en color o en blanco y negro, etc. Las tarjetas de digitalización suelen poder configurarse para adaptarse a las características de las cámaras.

Algunas cámaras incorporan la posibilidad de realizar tratamiento de datos interno, por lo que se denominan cámaras inteligentes. Entre las operaciones que pueden realizar estas cámaras destaca la estimación de gradiente, el ajuste digital de contraste o la transformada de Fourier de la imagen. La ventaja de estos sistemas es que proporcionan una información previamente tratada, por lo que simplifican la tarea del procesador durante el reconocimiento de formas. En algunos casos el tratamiento puede realizarse directamente por métodos ópticos (transformada de Fourier) utilizando lentes especialmente diseñadas para que proporcionen este tipo de información. En general se trata de cámaras de precio muy elevado cuyo uso sólo se ha popularizado en aplicaciones muy concretas.

### 5.7.5 Cámaras de vídeo domésticas

También se denominan cámaras portátiles y se caracterizan por ser equipos de tamaño reducido en los que se integra el cabezal de la cámara y un sistema de registro de señal en cinta magnética (*camcorders*). Al orientarse al mercado doméstico suelen incorporar sistemas electrónicos de ajuste automático de las componentes de color, ganancia de la cámara, control de iris, selección de modos de exposición en función del tipo de escena, etc., con objeto de simplificar el control de la cámara a usuarios no expertos. Los sistemas de registro de la señal de vídeo más utilizados actualmente son el Hi-8 y el Video8, en formatos analógicos, y el miniDV o el Digital8 en digital. Existen algunos modelos, denominados semiprofesionales, de altas prestaciones, que se utilizan en ocasiones para la captura de imágenes en exteriores en sustitución de las cámaras ENG. Su calidad es bastante aceptable y su reducido coste las hace más rentable para estudios de TV local o productoras pequeñas.

### 5.7.6 Cámaras para aplicaciones científicas

En este apartado englobamos un gran número de sistemas de adquisición de imagen que cubre los campos de la medicina, la microscopía, la astronomía, etc. Las características de estas cámaras son muy diversas y quedan fuera del alcance de este texto. En la mayoría de aplicaciones se utilizan cámaras convencionales o de alta definición en las que se incorporan sistemas ópticos que adaptan la imagen que se desea adquirir. Así, es habitual en medicina disponer de sofisticadas sondas de inspección controladas electrónicamente que proporcionan una imagen que posteriormente es capturada por una CCD externa. En microscopía suelen utilizarse adaptadores de la cámara de vídeo al microscopio. En astronomía se utilizan CCD de grandes dimensiones (para tener una excelente resolución) y de alta sensibilidad a la luz.

### 5.7.7 WebCams

Reciben este nombre las cámaras que se utilizan en aplicaciones de videoconferencia por internet. En principio, puede utilizarse cualquier cámara de vídeo convencional conectada a una tarjeta de digitalización de vídeo siempre que se utilice un software de codificación de la señal de vídeo y audio adecuado al ancho de banda que proporciona el sistema. No obstante, la característica fundamental de una *WebCam* es su inmediata integración al ordenador personal. Normalmente se conectan directamente al puerto serie RS-232 o al puerto USB sin necesidad de disponer de tarjetas de digitalización genéricas, por lo que facilitan notablemente las tareas de configuración del sistema. La cámara suele ser de reducidas dimensiones, con una óptica del tipo gran angular, y pueden fijarse

sobre el monitor o la mesa de trabajo con facilidad. Algunos modelos disponen de una memoria interna que permite utilizarlas como cámaras de fotografía digital cuando se desconectan del ordenador.