



Unidad 1 - Dispositivos para la captura de imágenes

UNR - TUIA - Procesamiento de Imágenes y Visión por Computadora

Docente teoría: Juan Pablo Manson

Docentes práctica: Lucas Bruge, Constantino Ferrucci

Cuaderno de práctica:

Google Colab

🔗 <https://colab.research.google.com/drive/1z-0bTU7lbpOkY9laAiEn-WdopaOmuKKI?usp=sharing>



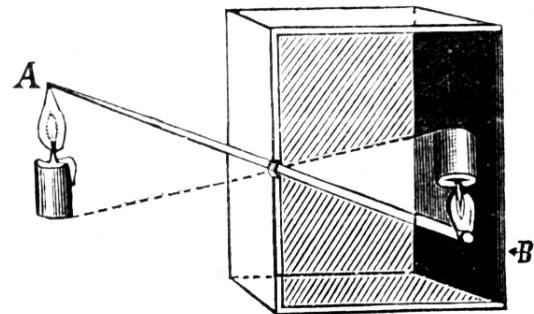
1. Arquitectura de dispositivos para la captura de imágenes

Cámara. Conceptos Básicos

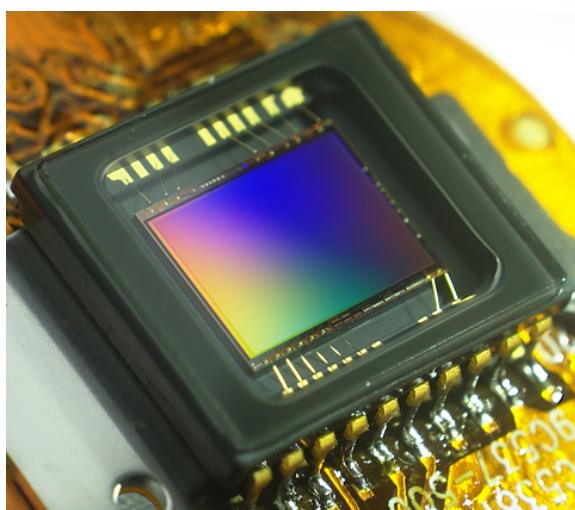
Una cámara es un dispositivo de detección remota que captura y almacena o transmite imágenes. La luz se recoge y enfoca a través de un sistema óptico sobre un sensor que convierte la luz en información mediante procesos químicos o electrónicos.

Cámara Oscura

La forma más simple de una cámara es la **cámara oscura**. Este sistema consiste en una habitación oscura o caja con un pequeño agujero que deja entrar la luz. La luz se enfoca en la pared opuesta, creando una imagen que puede ser vista o capturada en un material fotosensible. Este método antiguo dio lugar al término "cámara".



Avances Tecnológicos



La **tecnología de las cámaras modernas** ha avanzado significativamente con el desarrollo de los dispositivos de carga acoplada (CCD) y la tecnología CMOS.

Estas mejoras han aumentado la resolución de la imagen y la velocidad de adquisición, superando a las cámaras de tubo de vacío anteriores.

A continuación, se muestra un sensor de imagen CMOS típico. El chip del sensor se sostiene en un paquete con vidrio protector. El paquete tiene almohadillas de contacto que conectan el sensor a la PCB (Placa de Circuito Impreso).

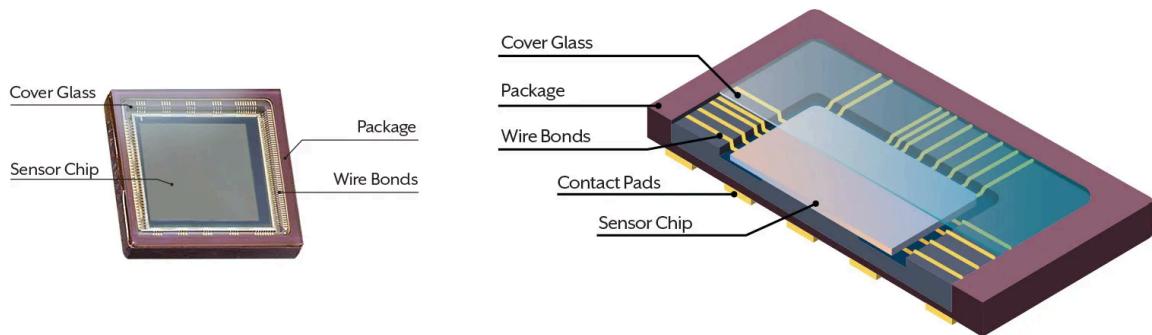


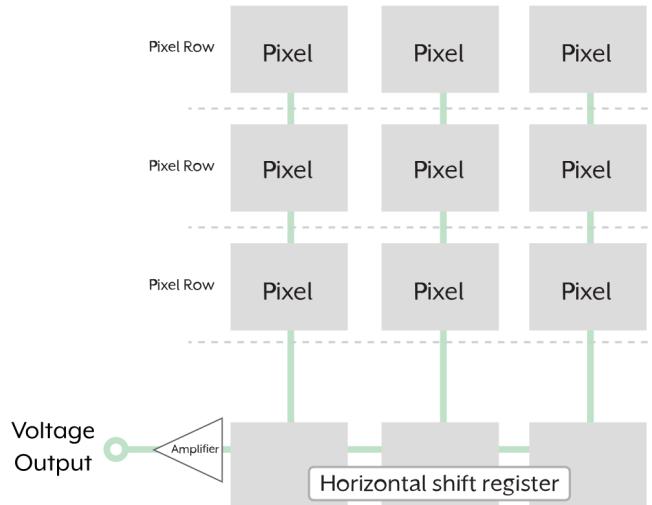
Diagrama de un sensor de imagen CMOS

El chip del sensor de imagen de estado sólido contiene píxeles que están compuestos por elementos sensibles a la luz, microlentes y micro componentes eléctricos. Los chips son fabricados por compañías de semiconductores y cortados de obleas. Los enlaces de cable transfieren la señal desde el dato hasta las almohadillas de contacto en la parte posterior del sensor. El empaquetado protege el chip del sensor y los enlaces de cable de daños físicos y ambientales, proporciona disipación térmica e incluye electrónica de interconexión para la transferencia de señales. Una ventana transparente en la parte frontal del empaquetado, llamada vidrio protector, protege el chip del sensor y los cables mientras permite que la luz llegue al área sensible a la luz.

Tecnologías de Sensores: CCD y CMOS

CCD: Los sensores CCD (Dispositivo de Carga Acoplada) inician y detienen la exposición de todos los píxeles al mismo tiempo. Esto se conoce como obturador global (global shutter). El CCD luego transfiere esta carga de exposición al registro de desplazamiento horizontal, donde se envía al amplificador de difusión flotante.

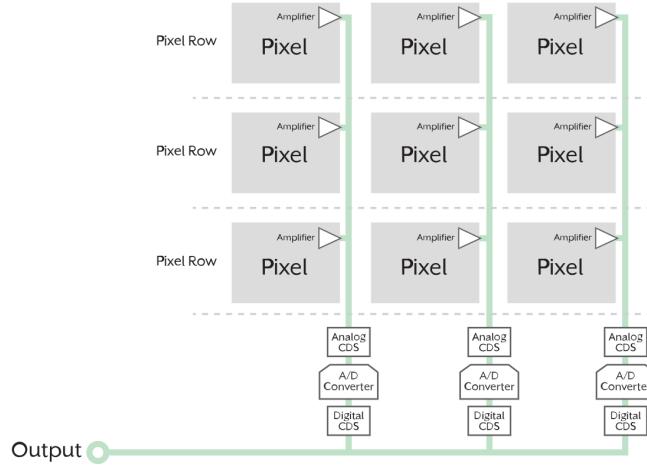
En 2015, Sony anunció planes para descontinuar la producción de CCD y finalizar el soporte para los CCDs en 2026.



- Compuesto por fotodiodos pasivos que integran carga durante la exposición.
- Las cargas se transfieren a la electrónica común para ser leídas como voltajes.
- Alta eficiencia cuántica, adecuada para condiciones de poca luz.
- Ofrece alta uniformidad de píxeles.
- La transferencia de carga lenta resulta en una baja velocidad de cuadro (<20fps).
- Tecnología no estándar, lo que las hace caras.

CMOS:

En el pasado, los sensores CMOS (Semiconductor Complementario de Óxido Metálico) solo podían iniciar y detener la exposición una fila de píxeles a la vez, lo que se conoce como obturador de rodadura (rolling shutter). Esto ha cambiado con el tiempo, y ahora hay muchos sensores CMOS de obturador global disponibles en el mercado. Los sensores CMOS utilizan convertidores analógico-digitales (ADC) más pequeños para cada columna de píxeles, lo que permite velocidades de fotogramas más altas que los CCD. Los sensores CMOS han experimentado importantes mejoras a lo largo de los años, haciendo que la mayoría de los sensores CMOS modernos sean iguales o superiores a los CCD en calidad de imagen, velocidad de imagen y valor general.



- Utiliza sensores de píxeles activos con electrónica a nivel de píxel.
- La electrónica a nivel de píxel traduce la carga acumulada en voltaje.
- Permite velocidades de cuadro más altas y adquisición de regiones de interés (ROI).
- Más propenso a un mayor ruido debido a los transistores de lectura y al ruido de patrón fijo.
- Generalmente más económico y versátil que los CCD.

Características del Sensor

Tamaño del Sensor: Esto indica las dimensiones del sensor de imagen, generalmente expresado en pulgadas. Las dimensiones reales difieren del valor fraccionario. Por ejemplo, un sensor de 1" tiene un tamaño diagonal de 16 mm. Es muy importante verificar las especificaciones del sensor, ya que los sensores con el mismo formato pueden tener diferentes dimensiones y relaciones de aspecto.

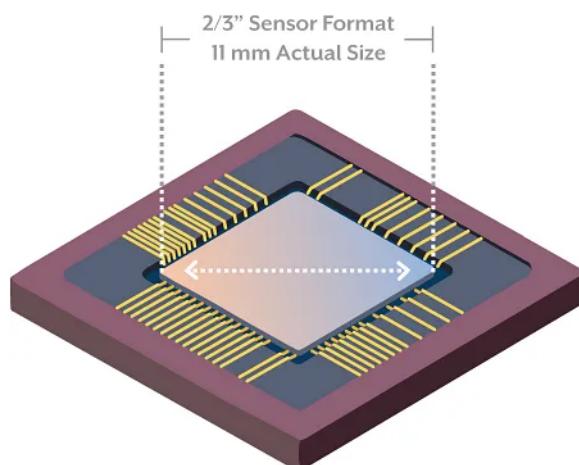


Image Sensor Format (Type)	1"	2/3"	1/1.8"	1/3"
Image Sensor Diagonal (mm)	16 mm	11 mm	8.9 mm	~6 mm



La designación en pulgadas de los sensores (como 1", 1/2.3", etc.) no indica directamente las dimensiones exactas de ancho y altura del sensor, pero resulta útil en una categorización del sensor dentro de una jerarquía de tamaños estandarizada, y para tener una referencia comparativa general (un sensor de 1" es más grande que uno de 1/2.3").

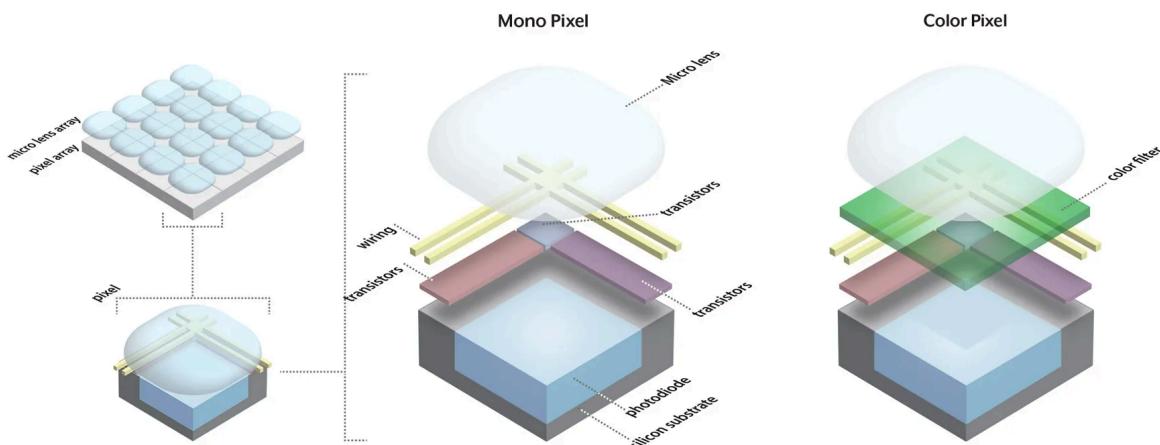
Para conocer las dimensiones exactas (ancho y alto en milímetros), siempre es necesario consultar las especificaciones técnicas detalladas del fabricante. Un sensor de "1 pulgada" típicamente mide aproximadamente 13.2×8.8 mm, pero no en todos los casos.

Los sensores de imagen vienen en diferentes tipos de formato (también conocidos como clase óptica, tamaño o tipo de sensor) y empaques. La resolución y el tamaño de los píxeles determinarán el tamaño general de un sensor, siendo los sensores más grandes aquellos que tienen resoluciones más altas o tamaños de píxel más grandes que los sensores más pequeños. Conocer el formato del sensor es importante para elegir una lente y óptica para una cámara. Todas las lentes están diseñadas para formatos y resoluciones de sensores específicos. Cabe señalar que los formatos de sensor solo describen el área del chip del sensor y no todo el paquete del sensor.

Resolución Espacial: Esto se refiere al número de elementos activos (píxeles) en el área del sensor. Una mayor resolución significa un tamaño de píxel más pequeño, lo que permite detectar detalles más finos. Sin embargo, los píxeles más pequeños son menos sensibles a la luz y generan más ruido. La combinación adecuada de la resolución de la lente y el tamaño de los píxeles es esencial para un rendimiento óptimo.

El tamaño del píxel se mide en micrómetros (μm) e incluye toda el área tanto del fotodiodo como de la electrónica circundante. Un píxel CMOS consiste en un fotodiodo, un amplificador, una puerta de reinicio, una puerta de transferencia y una difusión flotante. Sin embargo, estos elementos pueden no

estar siempre dentro de cada píxel, ya que también pueden compartirse entre píxeles. El diagrama a continuación muestra un diseño simplificado de un píxel CMOS monocromático y en color.

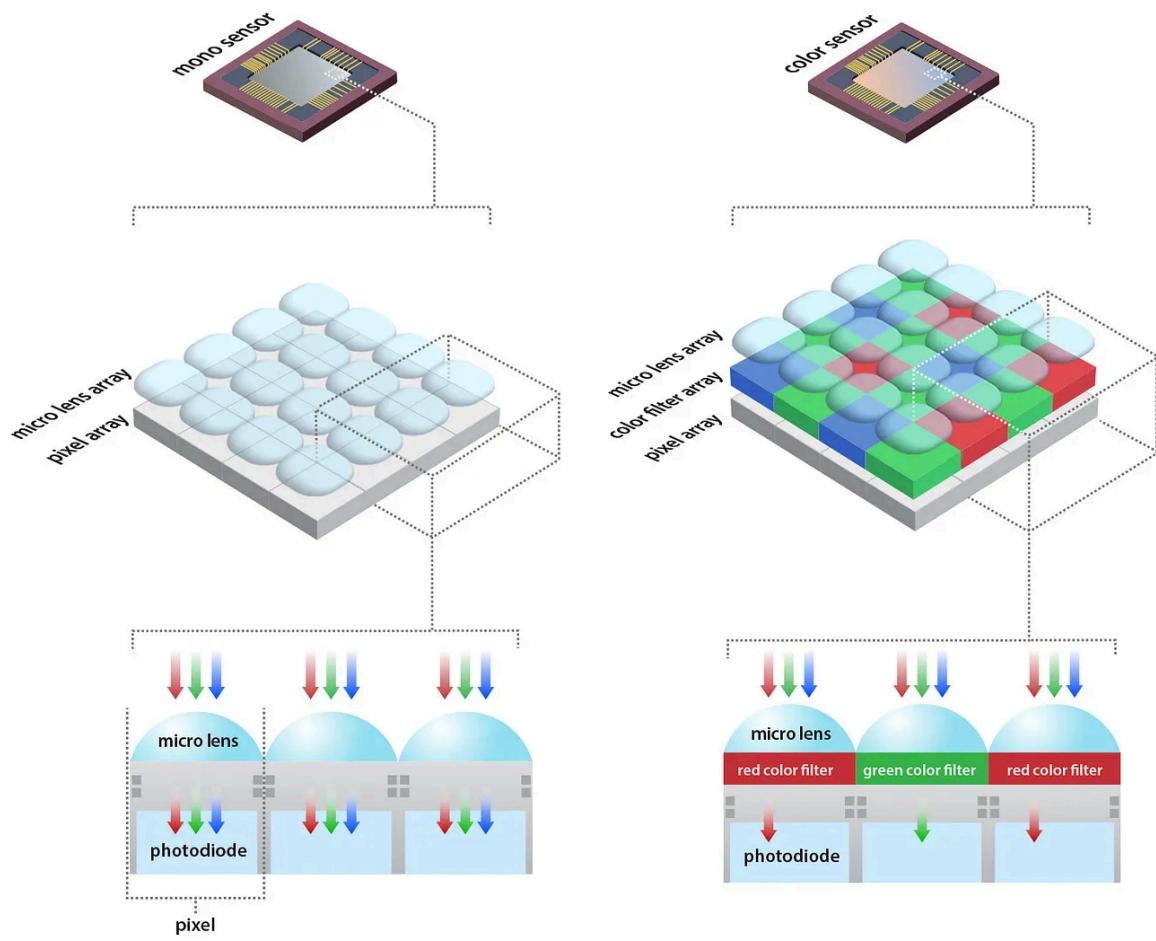


Arriba: Diseño simplificado de píxeles CMOS monocromáticos y en color

Típicamente, un tamaño de píxel más grande es mejor para aumentar la sensibilidad a la luz porque hay más área del fotodiodo para recibir luz. Si el formato del sensor permanece igual pero la resolución aumenta, el tamaño del píxel debe disminuir. Aunque esto podría disminuir la sensibilidad del sensor, las mejoras en la estructura del píxel, la tecnología de reducción de ruido y el procesamiento de imágenes han ayudado a mitigar este efecto.

Sensores Monocromáticos y Color

Para los sensores de luz visible (no infrarrojos, UV o rayos X) hay dos tipos principales: color y monocromático. Los sensores de color tienen una capa adicional que se encuentra debajo de la microlente, llamada filtro de color, que absorbe las longitudes de onda de color no deseadas para que cada píxel sea sensible a una longitud de onda de color específica. En los sensores monocromáticos, no hay filtro de color, por lo que cada píxel es sensible a todas las longitudes de onda de la luz visible.



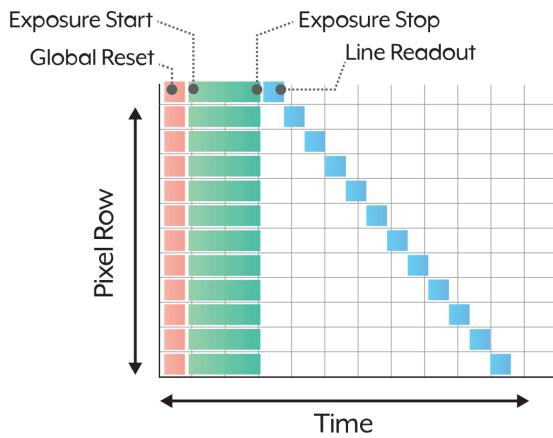
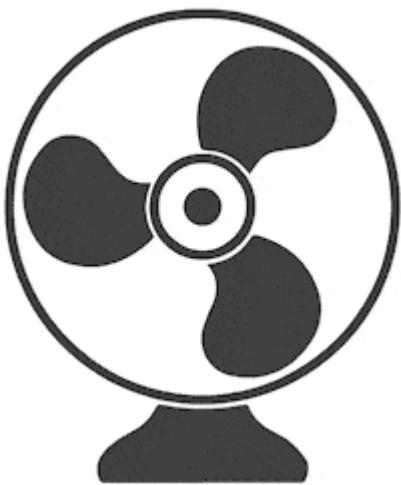
Arriba a la izquierda: Plano del sensor monocromático. Arriba a la derecha: Plano del sensor de color con patrón Bayer.

Para el ejemplo de sensor de color mostrado arriba a la derecha, la matriz de filtro de color empleada es un patrón de filtro Bayer. Este patrón de filtro utiliza una matriz con un 50% de verde, 25% de rojo y 25% de azul. Aunque la mayoría de las cámaras de color utilizan el [patrón de filtro Bayer](#), existen otros patrones de filtro disponibles que tienen diferentes arreglos de patrones y desgloses de RGB.

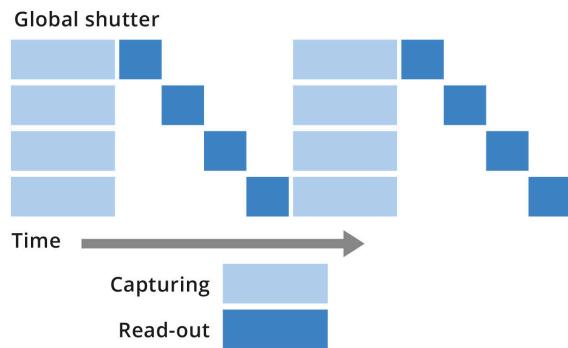
Tipos de obturador

Una función importante del sensor es su tipo de obturador. Los dos principales tipos de obturador electrónico son el obturador global y el obturador de rodadura. Estos tipos de obturador difieren en su funcionamiento y en los resultados finales de la imagen, especialmente cuando la cámara o el objetivo están en movimiento. Veamos en detalle cómo funcionan y cómo esto afecta la captura de imágenes.

Obturador Global:

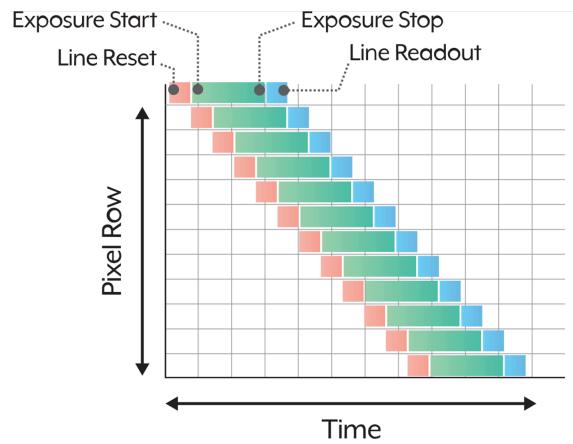
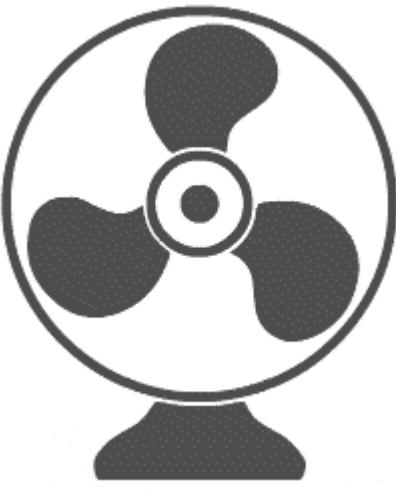


El diagrama de arriba nos muestra el tiempo de exposición de un sensor con obturador global. Todos los píxeles comienzan y terminan la exposición al mismo tiempo, pero la lectura aún se realiza línea por línea. Este tiempo produce imágenes sin distorsión, sin vibraciones ni deformaciones. Los sensores con obturador global son esenciales para capturar imágenes de objetos en movimiento a alta velocidad.

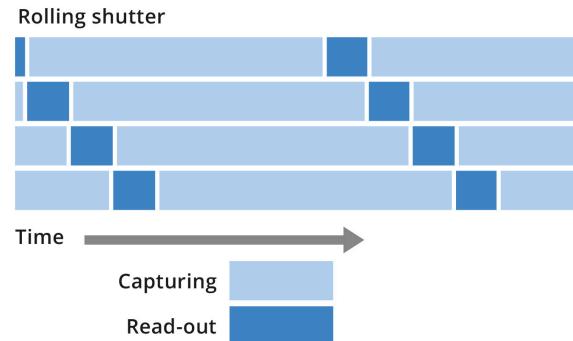


- Captura una imagen exponiendo todos los píxeles simultáneamente.
- Reduce los artefactos de movimiento pero puede ser más costoso.

Obturador de Rodadura (Rolling shutter):



El diagrama a la derecha muestra el tiempo de exposición de un sensor con obturador de rodadura. El comienzo de la exposición es diferente línea por línea, con el reinicio y la lectura ocurriendo en tiempos desplazados. Esta exposición fila por fila produce distorsión en la imagen si el objetivo o la cámara están en movimiento.



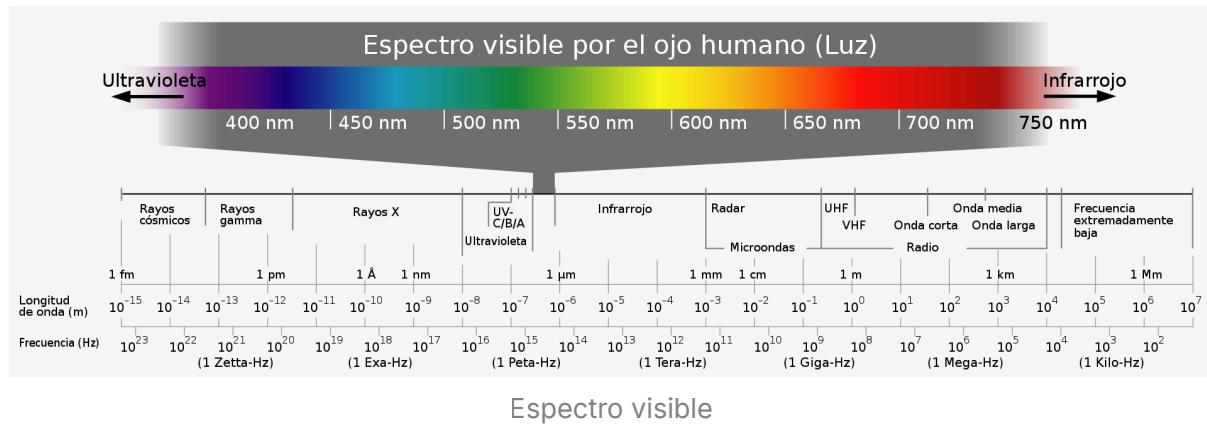
Los sensores con obturador de rodadura ofrecen una excelente sensibilidad para capturar imágenes de objetos estáticos o de movimiento lento.

- Expone y lee filas de forma secuencial, causando un retraso entre la exposición de cada fila.
- Más propenso a la distorsión en escenas de movimiento rápido, pero típicamente más barato y fácil de implementar.

Respuesta espectral

Se llama **espectro visible** a la región del **espectro electromagnético** que el **ojo humano** es capaz de percibir. A la **radiación electromagnética** en este rango de **longitudes** de onda se le llama **luz visible** o simplemente **luz**. No hay límites exactos en el espectro visible: el ojo humano típico responderá a **longitudes de**

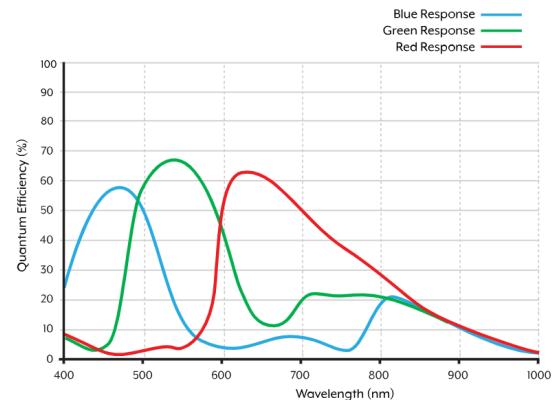
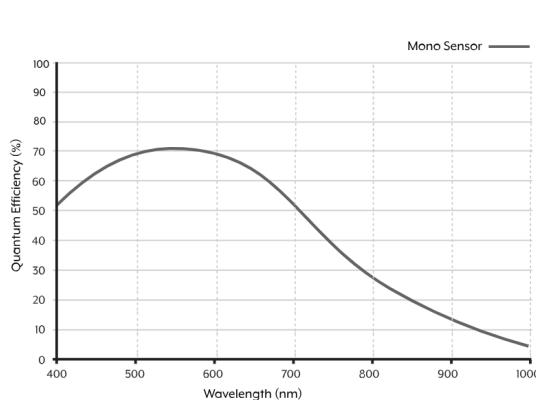
onda de 380 a 750 nm, aunque en casos excepcionales algunas personas pueden ser capaces de percibir longitudes de onda desde 310 hasta 1050 nm.



Espectro visible

Debido a las diferencias físicas entre sensores monocromáticos y de color, así como a las diferencias entre las tecnologías y estructuras de píxeles de los fabricantes de sensores, distintos sensores detectarán la luz en diversos grados. Una forma de obtener una comprensión más precisa de la sensibilidad de un sensor a la luz es mediante la lectura de su gráfico de respuesta espectral (también conocido como gráfico de eficiencia cuántica).

Los dos gráficos a continuación son las versiones monocromática y de color del mismo modelo de sensor. El gráfico de la izquierda muestra la respuesta espectral de un sensor monocromático y el de la derecha de un sensor de color. El eje X representa la longitud de onda (nm) y el eje Y representa la eficiencia cuántica (%). La mayoría de las cámaras de visión artificial en color tienen filtros de corte IR (infrarrojos) instalados para bloquear las longitudes de onda cercanas al IR. Esto elimina el ruido IR y el cruce de colores de la imagen, coincidiendo mejor con la interpretación del color por parte del ojo humano. Sin embargo, en varias aplicaciones puede ser beneficioso obtener imágenes sin el filtro de corte IR. Ya sea que se instale o no un filtro de corte IR, un sensor de color nunca será tan sensible como un sensor monocromático.



Dos ejemplos de curvas de respuesta espectral utilizando la misma familia de sensores.
Sensor monocromático (izquierda) y sensor de color sin filtro de corte IR (derecha)

Más información:

Ejemplo de un sensor comercial (datasheet):

[Sony IMX219](#)

Cameras - Opto Engineering Basics

Cameras - A comprehensive long-form introduction to the main concepts of Machine Vision: optics, lighting, cameras, AI vision systems and more!

CEE <https://www.opto-e.com/en/basics/cameras>

Lentes

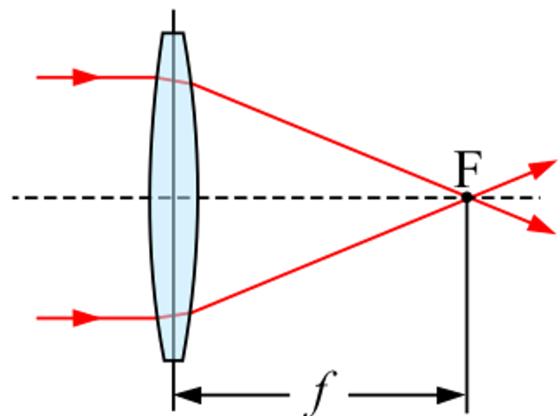
Una lente es uno de los componentes más críticos en una cámara, ya que determina la calidad y las características de las imágenes capturadas. Su función principal es enfocar la luz procedente de un objeto para formar una imagen nítida en el sensor de la cámara.

El tipo de lente más habitual en una cámara simple es la **lente convergente**, que son del tipo convexas. Las lentes convergentes son fundamentales en las cámaras debido a su capacidad para enfocar los rayos de luz que inciden sobre ellas hacia un punto focal.

La distancia focal (f) o longitud

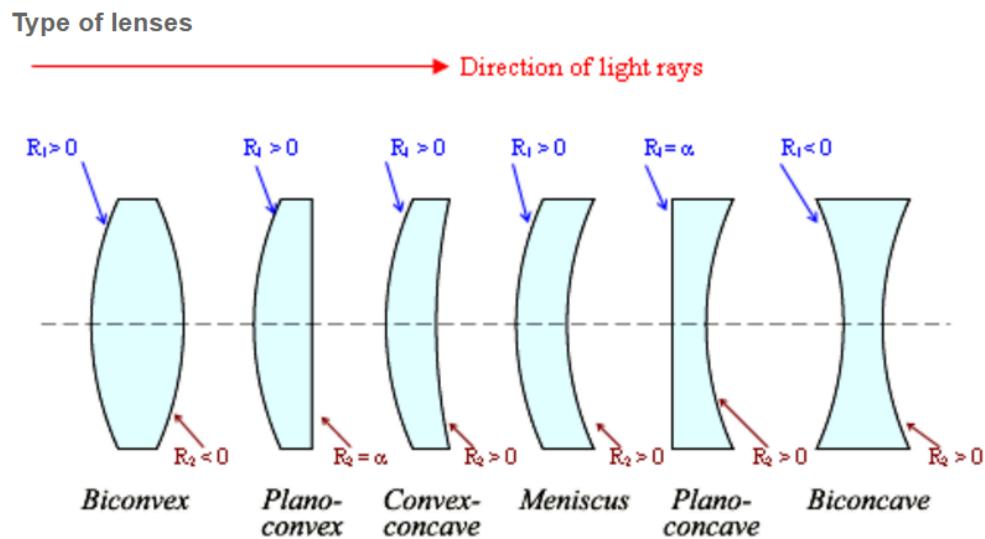
focal de un lente es la distanzia entre el centro óptico de la lente y el foco (o punto focal).

Para una lente positiva (convergente), la distancia focal es positiva. Se define como la distancia desde el centro óptico de la lente (lugar por donde los rayos incidentes no son desviados) hasta el lugar donde un haz de luz de rayos paralelos al eje óptico que atraviesa la lente se enfoca, llamado foco.

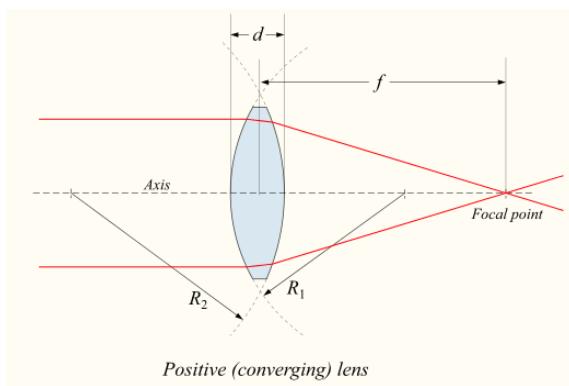


Tipos de lentes según su forma geométrica

Las lentes no suelen ser simétricas, sino que se diseñan de distintas formas según el objetivo buscado. El gráfico muestra diferentes tipos de lentes y su forma geométrica. Las lentes se clasifican según la curvatura de las dos superficies ópticas. Esta forma determina cómo refracta la luz. Aquí se explican los diferentes tipos de lentes mostrados en el gráfico:

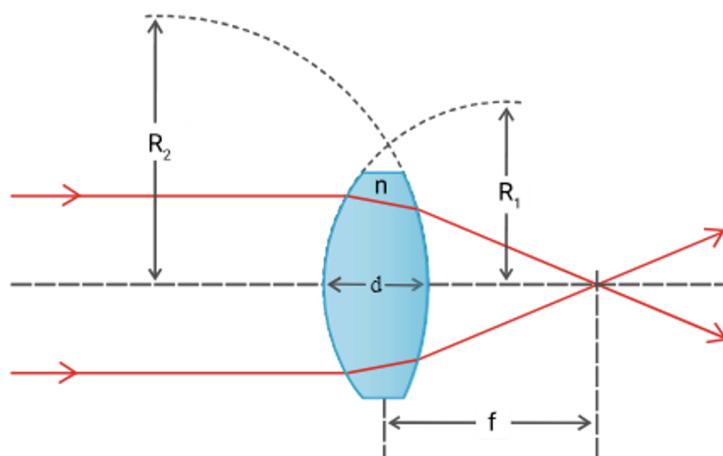


Una lente es biconvexa (o doble convexa, o simplemente convexa) si ambas superficies son convexas. Si la lente es biconvexa, un haz de luz que viaja paralelo al eje de la lente y pasa a través de ella se convergerá (o enfocará) en un punto del eje, a una cierta distancia detrás de la lente (es decir, la longitud focal). En este caso, la lente se llama lente positiva o convergente.



Cálculo de la distancia focal de una lente

La longitud focal de una lente f , mide la capacidad de un sistema óptico para converger (enfocar) o divergir la luz y se expresa típicamente en milímetros (mm). Una longitud focal positiva indica que los rayos de luz colimada serán convergidos por la lente y una longitud focal negativa indica la divergencia de los rayos colimados. Técnicamente, se define como el punto conjugado a un punto colocado en el infinito.



La longitud focal de una lente hecha de un material con índice de refracción n , se puede calcular utilizando:

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

donde R_1 y R_2 son los radios de curvatura de las superficies de la lente más cercanas y más alejadas de la fuente de luz, respectivamente, y d es la distancia a lo largo del eje de la lente entre los dos vértices de las superficies. Los radios de curvatura se toman como valores positivos para lentes convexas y negativos para lentes cóncavas. El último término en la ecuación es relevante para lentes gruesas con una curvatura sustancial en ambos lados, entonces en lentes delgadas se simplifica quitando el término:

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

2.5: Thin Lenses

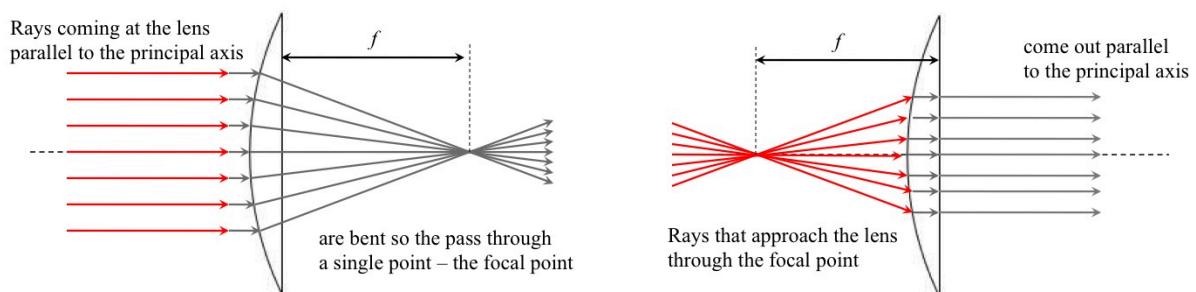
Two types of lenses are possible: converging and diverging.

A lens that causes light rays to bend toward (away from) its optical axis is a converging (diverging) lens. By the end of

 [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics_\(OpenStax\)/University_Physics_III_-_Optics_and_Modern_Physics_\(OpenStax\)/02:_Geometric_Optics_and_Image_Formation/2.05:_Thin_Lenses](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics_(OpenStax)/University_Physics_III_-_Optics_and_Modern_Physics_(OpenStax)/02:_Geometric_Optics_and_Image_Formation/2.05:_Thin_Lenses)

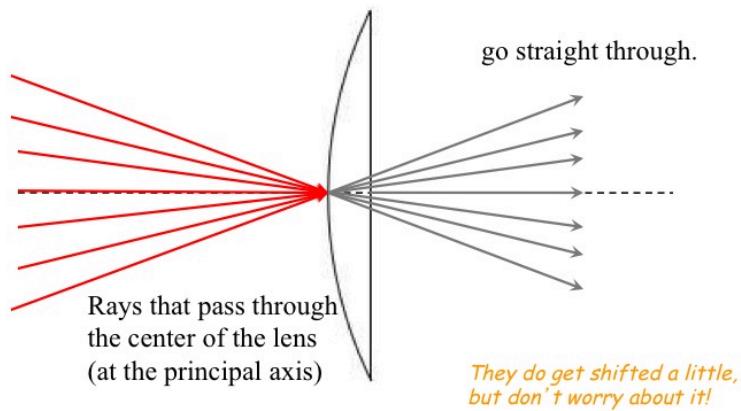
Comportamiento de una lente convergente

Cuando la fuente de luz está más lejos de la lente que el punto focal, se forma una imagen real. Para una lente delgada, no importa cómo esté orientada la lente, ya que hay un punto focal a ambos lados de la lente a distancias iguales (incluso si es plano-convexa). Los rayos que entran paralelos en un lado atraviesan la lente y se dirigen todos hacia el punto focal. Este patrón puede invertirse: un conjunto de rayos divergentes que llegan a la lente desde un punto focal son desviados por la lente de manera que todos salen paralelos.



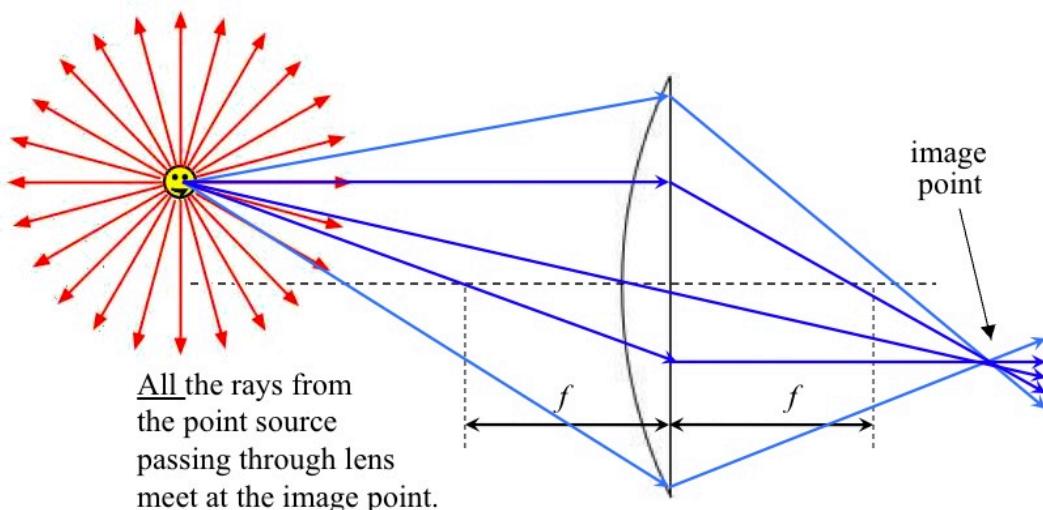
Por lo general, esto nos da dos rayos fáciles de identificar: el que va paralelo al eje central de la lente y el que pasa por el punto focal. El tercer rayo fácil de

identificar es el que pasa por el centro de la lente. Este, esencialmente, atraviesa la lente en línea recta.



(Los rayos se desplazan un poco, pero para una lente delgada este es un efecto pequeño.)

Estos tres rayos se pueden ver en la imagen de ejemplo. Para determinar dónde se forma la imagen, basta con trazar solo dos de ellos, ya que el punto donde se cruzan indica la posición de la imagen:

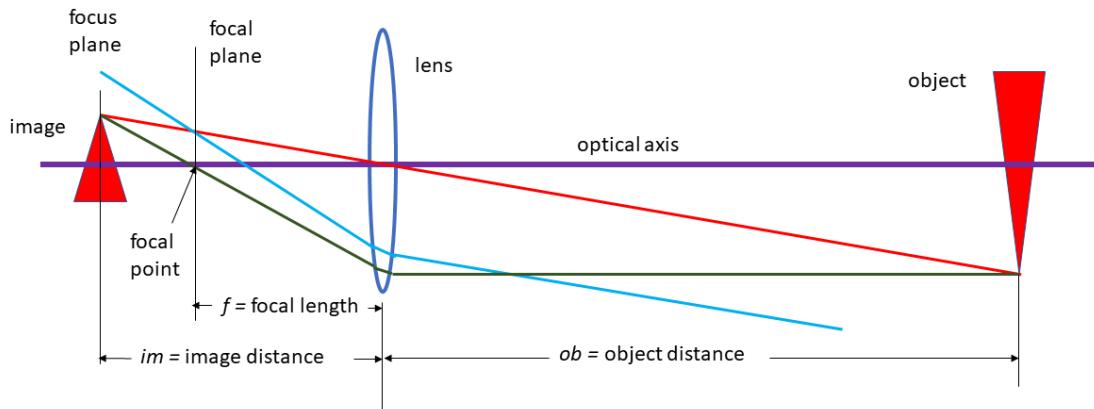


Los tres rayos fáciles de identificar se muestran en azul oscuro. Los rayos extremos del abanico que golpean los bordes de la lente se muestran en azul claro. Todos los rayos dentro del abanico, entre los rayos azul claro, atraviesan la lente, por lo que, en general, toda la lente recoge rayos de cada punto del objeto. Esto significa que cada punto de la lente está captando rayos provenientes de muchos puntos del objeto.

Los rayos que llegan al mismo punto de la lente desde distintos puntos del objeto provienen de diferentes direcciones y, al atravesar la lente, salen también en distintas direcciones. En esencia, cada punto de la lente está organizando los rayos entrantes de distintos puntos del objeto y redirigiéndolos hacia los puntos de la imagen correspondientes.

Objetos "en foco"

Una imagen de un objeto está "en foco" cuando la luz que proviene de un punto del objeto atraviesa una lente y vuelve a converger en el punto focal, como se muestra en la figura que analizaremos con más detalle a continuación.



Hasta ahora hemos visto que:

1. La luz que atraviesa el centro de una lente no se desvía.
2. La luz paralela al eje óptico pasa por el punto focal.
3. Toda la luz que entra en la lente desde una dirección determinada termina concentrada en un punto del plano focal.

El punto 1, se ilustra en la figura con dos rayos de luz: el eje óptico, representado por una línea púrpura, y la línea roja que parte de la punta del objeto. Ambos pasan por el centro de la lente sin desviarse.

Para el punto 2, es importante saber que el punto focal se encuentra sobre el eje óptico (línea púrpura), a una distancia

f de la lente. El rayo verde, que es paralelo al eje óptico, pasa por el punto focal. Esto es cierto para toda la luz que entra paralela al eje.

El punto 3 amplía este concepto a toda la luz que ingresa desde una dirección específica: todos los rayos se concentrarán en un solo punto del plano focal,

que es una superficie ubicada a una distancia f de la lente. Como ejemplo, la línea azul entra en la lente paralela a la línea roja y ambas se cruzan en el plano focal.

De estos comportamientos, deriva en la ecuación de enfoque o ecuación del fabricante de lentes ($1/f = 1/im + 1/ob$). Los rayos de color rojo y verde provienen de la punta del objeto y vuelven a converger detrás del plano focal, en el **plano de enfoque** (focus plane), donde se forma la imagen.

Cada punto en el **plano del objeto** se mapea a un punto en el **plano de enfoque**, formando así toda la imagen. Idealmente, el sensor debe ubicarse en el **plano de enfoque** para obtener una imagen nítida.

La distancia de la lente a la imagen (im) depende de la distancia focal f y de la distancia del objeto ob . Si el objeto está muy lejos (en el infinito), el plano de enfoque coincide con el plano focal.

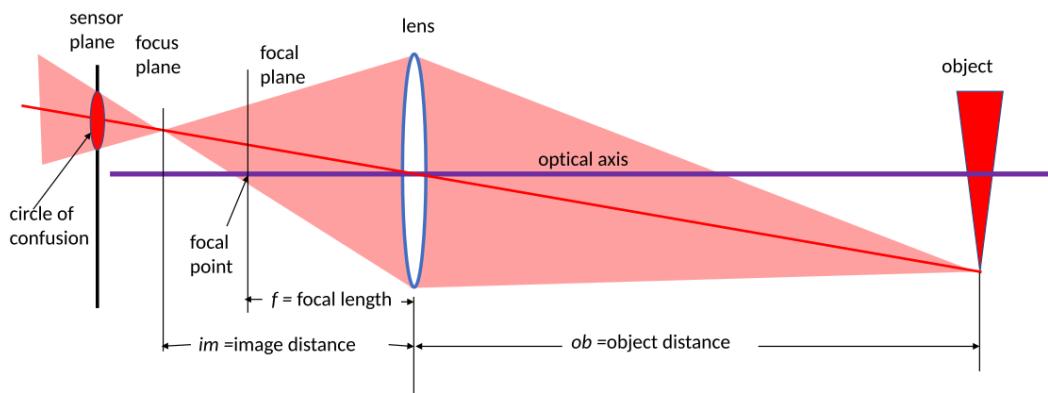
A medida que el objeto se acerca a la lente, el **plano de enfoque se aleja** de la lente. En una cámara, como el sensor está fijo, la lente debe moverse alejándose del sensor para enfocar un objeto cercano. La relación entre el tamaño de la imagen y el tamaño del objeto se llama **aumento** (m). Si la imagen es el doble del tamaño del objeto, entonces $m = 2$. Sin embargo, en una cámara, el aumento suele ser mucho menor, ya que hay un límite en la cantidad de aumento que se puede lograr.

Objetos "Fuera de foco"

Cuando el plano de enfoque coincide con el plano del sensor, la imagen del objeto se visualiza nítida. Pero cuando eso no sucede, y esos planos están distanciados, en lugar de formarse un punto preciso en el sensor, los rayos de luz crean un círculo difuso conocido como "círculo de confusión".



En el ejemplo de la izquierda, la imagen de la persona formada en el plano de enfoque, está más cercana al plano donde se encuentra el sensor de la imagen.



El tamaño de este círculo determina cuán desenfocado aparecerá el objeto en la imagen final: cuanto mayor sea el círculo de confusión, más borroso se verá el objeto. Este fenómeno es fundamental en fotografía y óptica, ya que explica por qué solo los objetos situados a ciertas distancias específicas aparecen nítidos, mientras que aquellos que están demasiado cerca o demasiado lejos aparecen progresivamente más desenfocados.



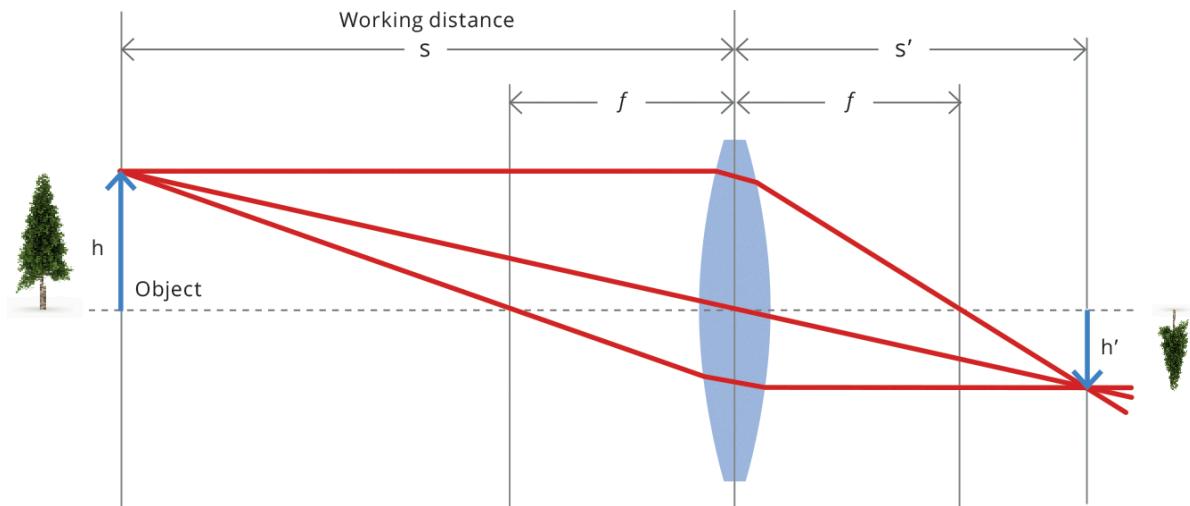
Distancia de trabajo

La distancia de trabajo (Working Distance o Dw) es un concepto importante cuando hablamos de lentes de cámaras. Se refiere a la distancia entre la lente y el objeto físico que se está fotografiando.

Asumiendo que tanto el objeto como el espacio de la imagen están en el mismo medio (por ejemplo, aire), obtenemos la siguiente ecuación fundamental:

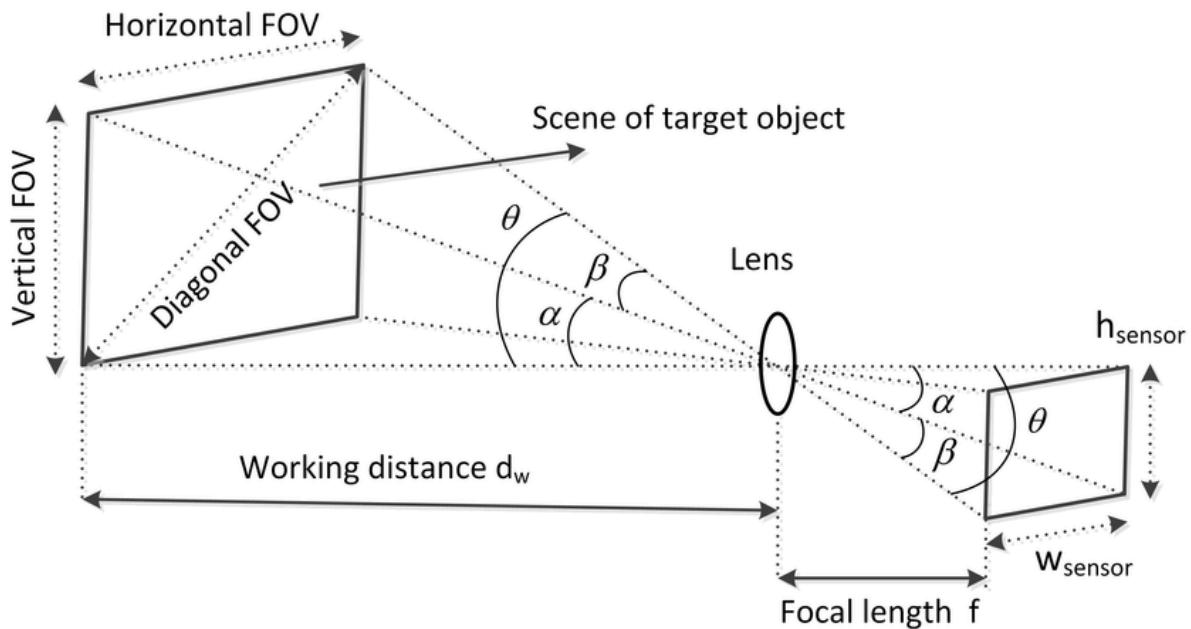
$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f}$$

donde s' es la posición del objeto (imagen) con respecto a la lente, s es la distancia entre la lente y el objeto físico, y f es la longitud focal del sistema óptico. La distancia s se llama **distancia de trabajo**.



Distancia focal (f) y campo de visión (FOV)

El campo de visión (Field Of View) se refiere al alcance observable, o la extensión de la escena, que una cámara es capaz de capturar en un momento dado. Este término es comúnmente utilizado en fotografía y cinematografía para describir el ángulo diagonal, horizontal o vertical que puede ser visto a través del lente de una cámara. El campo de visión puede ser ajustado modificando la distancia focal de la lente. Una menor distancia focal dará como resultado un FOV más amplio, lo que significa que se puede ver más de la escena, pero con un menor nivel de detalle. Por el contrario, una mayor distancia focal proporcionará un FOV más estrecho, lo que significa que se verá menos de la escena, pero con un mayor nivel de detalle.



El FOV se puede describir en términos de tres dimensiones principales:

1. β : El ángulo (HFOV) a través del cual se observa la escena en el plano horizontal.
2. α : El ángulo (VFOV) a través del cual se observa la escena en el plano vertical.
3. θ : El ángulo (DFOV) a través de la diagonal del sensor de la cámara.

En el diagrama, α , β y θ son los ángulos formados por los rayos de luz que pasan desde los bordes del sensor hasta el punto focal de la lente, extendiéndose hacia la escena observada. Estos ángulos determinan cuánta área de la escena frente a la cámara puede ser vista y capturada en una imagen.

Cálculo de FOV (angular)

El FOV se calcula utilizando la geometría básica de triángulos y la función trigonométrica arco tangente (arctan). Por ejemplo, para calcular cada FOV del diagrama, utilizamos las fórmulas:

$$\text{FOV}_{\text{horizontal}} = 2 \times \arctan \left(\frac{W_{\text{sensor}}}{2 \times f} \right)$$

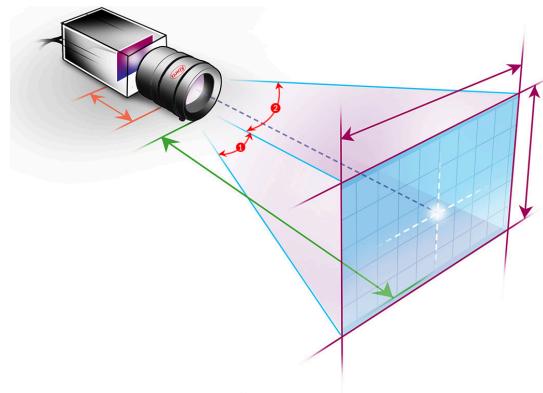
$$\text{FOV}_{\text{vertical}} = 2 \times \arctan \left(\frac{H_{\text{sensor}}}{2 \times f} \right)$$

$$\text{FOV}_{\text{diagonal}} = 2 \times \arctan \left(\frac{D_{\text{sensor}}}{2 \times f} \right)$$

Donde:

- **arctan** es la función arco tangente.
- f es la distancia focal de la lente.

Si podemos calcular los ángulos, y conocemos la distancia de trabajo (D_w), entonces podemos definir el área de la imagen que nuestra cámara podrá captar a esa distancia. Esto es fundamental en una aplicación de computer vision, como por ejemplo en aplicaciones industriales donde debemos asegurarnos de visualizar objetos de un tamaño específico.

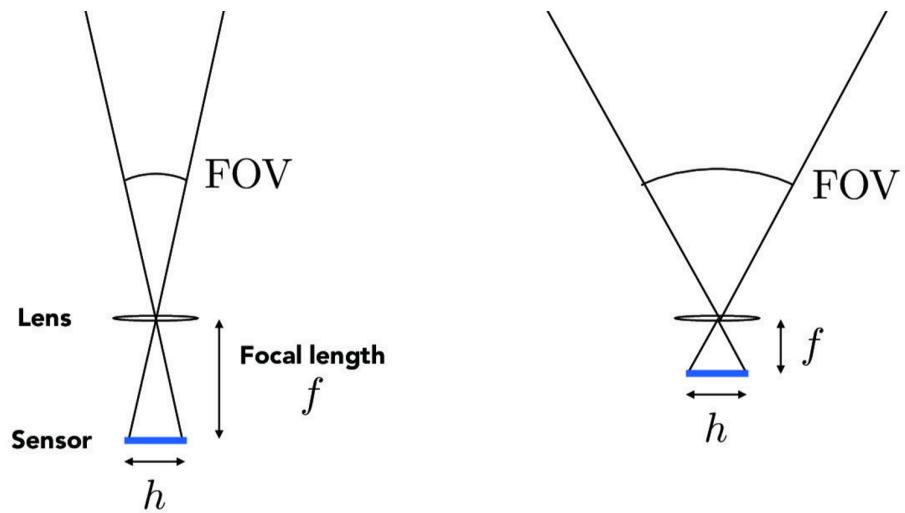


$$\text{FOV}_{\text{horizontal}} = 2 \times (\text{Distancia de trabajo}) \times \tan \left(\frac{\text{FOV}_{\text{angular horizontal}}}{2} \right)$$

$$\text{FOV}_{\text{vertical}} = 2 \times (\text{Distancia de trabajo}) \times \tan \left(\frac{\text{FOV}_{\text{angular vertical}}}{2} \right)$$



En general, en una aplicación industrial de visión, seleccionamos primero un tipo de sensor, y luego elegimos la lente adecuada para obtener un FOV determinado.



Para un tamaño de sensor fijo, disminuir la longitud focal aumenta el campo de visión.

Muchos proveedores y fabricantes de cámaras, ofrecen calculadoras que nos permiten indicar los parámetros para obtener la lente que necesitamos. Por ejemplo:

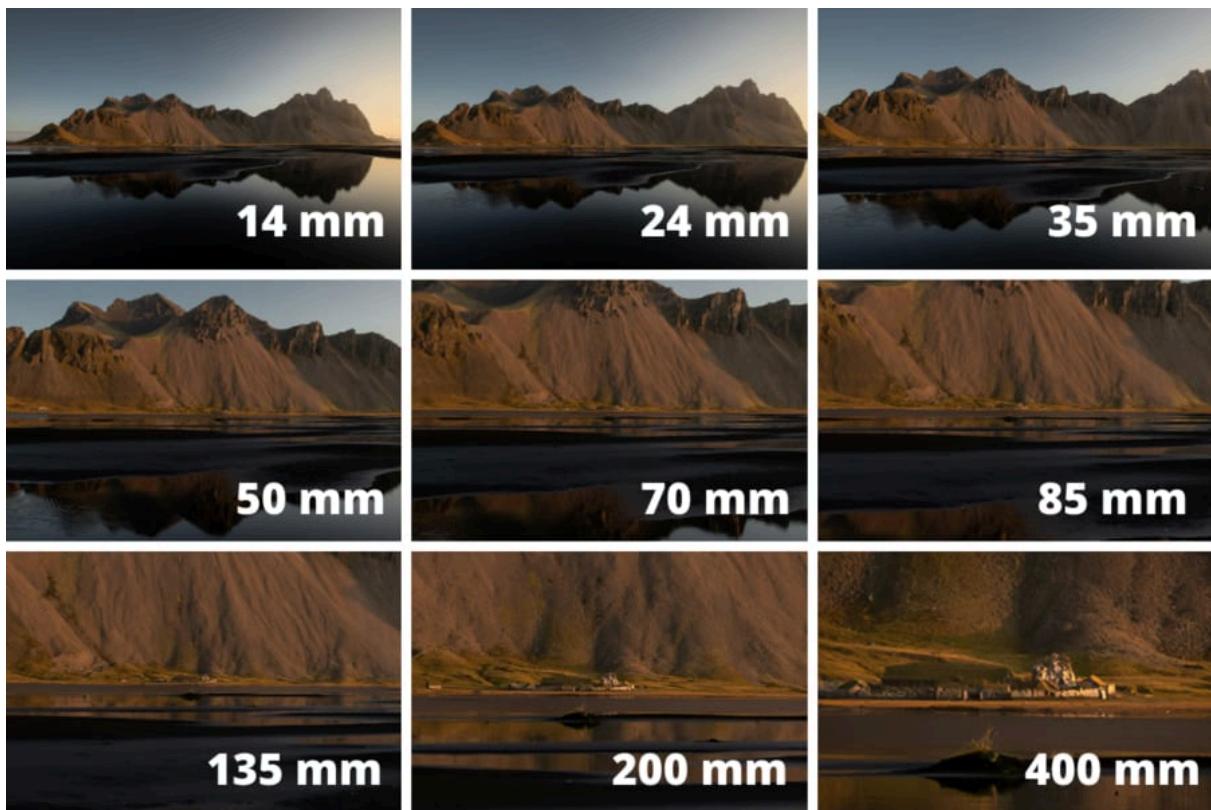
Imaging System Parameter Calculator

Custom and volume optical manufacturing with the expertise to guide you:

 <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/tech-tools/imaging-system-parameter-calculator/>



A continuación vemos como variando la distancia focal de la lente, modificamos el campo de visión (FOV):



Sistemas ópticos

Las lentes son componentes esenciales que definen la capacidad de una cámara para capturar imágenes. Tradicionalmente, se podría pensar en las cámaras como dispositivos equipados con un sistema de lente única y fija. Sin embargo, la realidad es mucho más compleja y diversificada. En la fotografía moderna, tanto profesional como de aficionados, las lentes zoom y varifocales representan una evolución significativa en la forma en que interactuamos con nuestro entorno visual. Estas lentes ofrecen flexibilidad y precisión que los sistemas de lente única simplemente no pueden proporcionar.



Lentes Varifocales

Las lentes varifocales permiten al usuario cambiar la distancia focal dentro de un rango predeterminado. Sin embargo, el enfoque debe ser reajustado manualmente después de cambiar la distancia focal para mantener una imagen nítida. Son comúnmente utilizadas en cámaras de seguridad y aplicaciones donde los cambios en la distancia focal no son frecuentes pero se requiere flexibilidad para ajustar el encuadre o el campo de visión.



Hay una gran diversidad de lentes con distintas funcionalidades incorporadas. La lente que usamos como ejemplo es una lente de longitud focal variable (varifocal) de 8 a 50mm. Posee tornillos de fijación, para evitar los movimientos una vez que estamos a gusto con los ajustes. En su cuerpo nos indica parte de sus especificaciones o funciones:

Wide, Tele:

- "Wide" indica el extremo gran angular del rango de zoom, correspondiente a la longitud focal de 8mm en este caso. Proporciona un ángulo de visión amplio.
- "Tele" indica el extremo teleobjetivo del zoom, correspondiente a 50mm. Ofrece un ángulo más estrecho y mayor aumento.

Near, Far (Regulación de foco):

- "Near" marca la posición de enfoque para objetos cercanos.
- "Far" señala la posición de enfoque para objetos distantes.

3 Mega pixel: Indica que el lente está diseñado para usarse con sensores de imagen de 3 megapíxeles (cuanto más alta la resolución requerida, mayor deberá ser la calidad del material y complejidad del proceso de fabricación, por lo que el precio también será mayor).

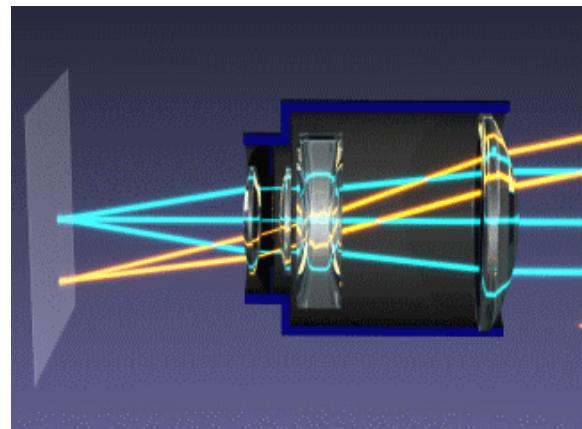
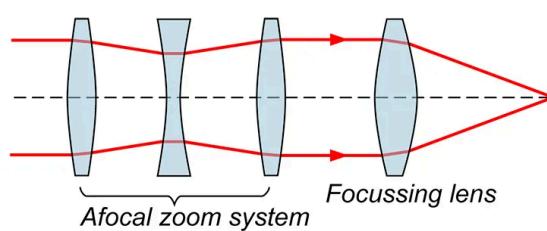
IR: Significa que el lente posee filtro infrarrojo.

F1.4: Representa la apertura máxima del lente de f/1.4, una apertura muy amplia que permite mucha entrada de luz.

C: Se refiere al tipo de montaje del lente, como el montaje C comúnmente usado en cámaras de seguridad.

Open, Close:

- "Open" indica la posición completamente abierta del iris o diafragma.
- "Close" marca la posición completamente cerrada del iris, que restringe la entrada de luz al mínimo.

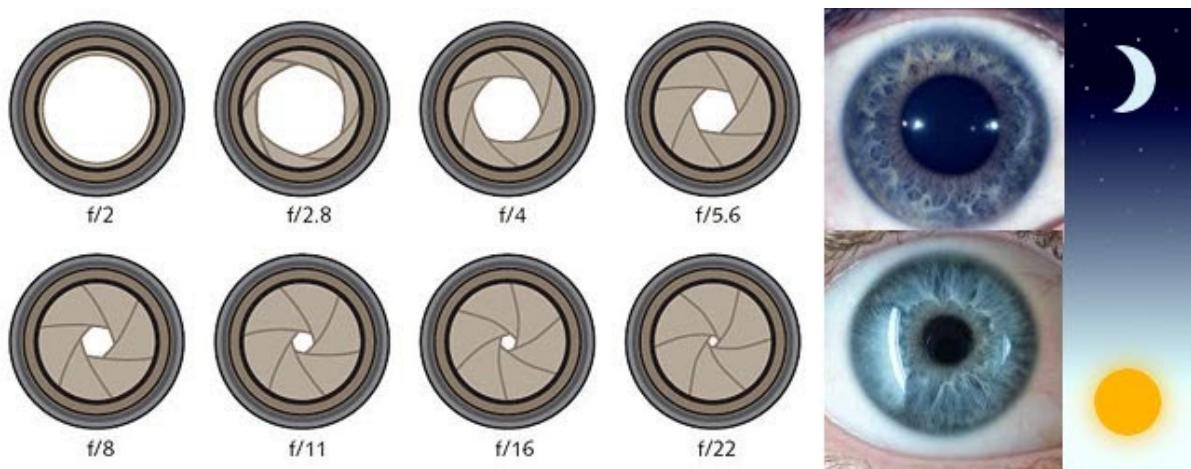


Diafragma

El **diafragma** es un dispositivo que le provee al objetivo la capacidad de regular la cantidad de luz que entra a la cámara. Suele ser un disco o sistema de aletas dispuesto en el objetivo de una cámara, de tal forma que limita la cantidad de luz que llega hacia el medio fotosensible en la cámara, generalmente de forma ajustable.

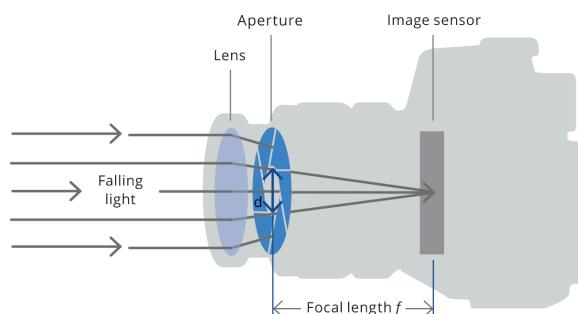


Diferentes aberturas del diafragma

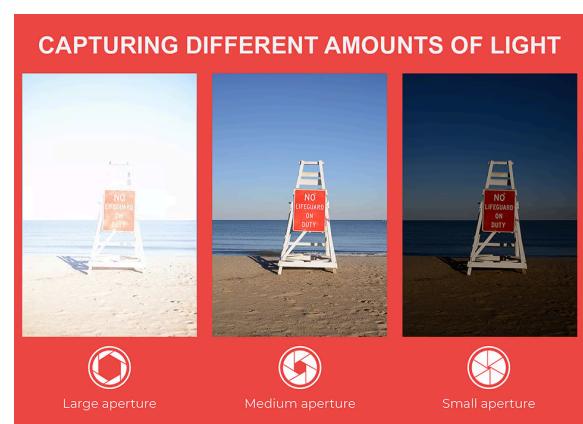


El diafragma y su comparación con las pupilas del ojo humano

Las progresivas variaciones de abertura o pupila del diafragma se denominan apertura, y se especifican mediante el número f o f-stop, que es la relación entre la longitud focal y el diámetro de abertura efectivo.



Relación entre la longitud focal y el diámetro de apertura



Efectos de la apertura sobre la imagen obtenida



El **f-stop** (o número f o la relación focal) es un valor que se puede ajustar en la cámara para controlar la apertura de la lente. Se refiere a la relación entre la distancia focal de la lente y el diámetro de la apertura. Se expresa como f/número (por ejemplo, f/2.8, f/5.6) y controla la cantidad de luz que entra en la cámara y la profundidad de campo de la imagen.

Un número

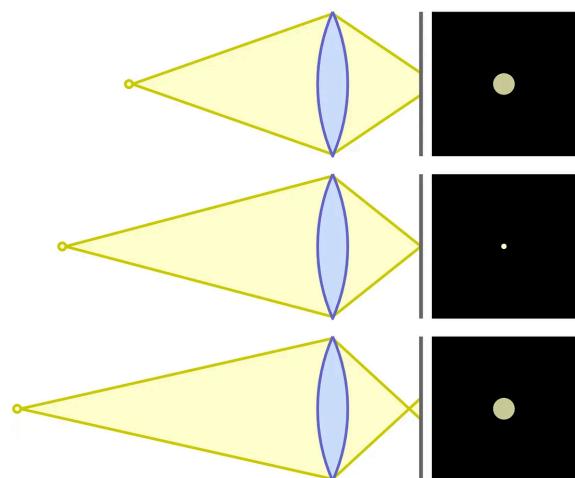
f-stop más bajo representa una apertura más grande (permitiendo más luz) y un número *f-stop* más alto representa una apertura más pequeña (permitiendo menos luz).

Profundidad de campo (DoF)

Por **profundidad de campo** se entiende tradicionalmente en óptica, y en fotografía en particular, la zona que comprende desde el punto más cercano y el más lejano de nuestro campo que sea aceptable en cuanto a nitidez. Para comprender el concepto de profundidad de campo, primero debemos entender el concepto de Círculo de confusión (CoC)

Círculo de Confusión

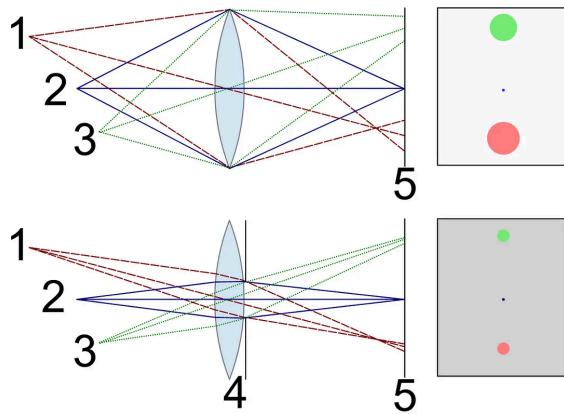
El círculo de confusión es una medida de cuánto se desenfoca un punto cuando un rayo de luz proveniente de él, pasa a través de una lente y llega al sensor de imagen. Cuando un rayo de luz está perfectamente enfocado, se captura como un punto. Vemos el objeto como nítido y detallado. En contraste, cuando una fuente puntual de luz está desenfocada, forma un disco, o un círculo de confusión, en el plano de la imagen. Cuando el CoC (círculo de confusión) es más pequeño que un límite aceptable predeterminado, nuestros ojos perciben el punto como nítido y enfocado. Es importante notar que el círculo aparece porque la apertura de la lente es circular.



Una lente simple se muestra en azul. El sensor de la cámara es una línea negra. Los rayos de luz provenientes del punto forman un cono de luz en amarillo. A la derecha está la proyección del punto en el sensor: (Arriba): Un punto está enfocado detrás del sensor y aparece como un círculo. (Medio): El punto está enfocado exactamente en el sensor y se ve nítido. (Abajo) Abajo: Un punto está enfocado delante del sensor y aparece como un círculo.

Papel de la Apertura

Una apertura más grande (representada por un número f-stop más bajo) resulta en una profundidad de campo menor debido a un ángulo más amplio de los rayos de luz entrantes. Por el contrario, una apertura más pequeña (representada por un número f-stop más alto) hace que los rayos de luz entren en la lente en un ángulo más estrecho, lo que a su vez aumenta la profundidad de campo.



Cuando la apertura es grande (número f-stop pequeño), la luz entra en la lente desde un rango más amplio de ángulos. Si consideramos una fuente puntual de

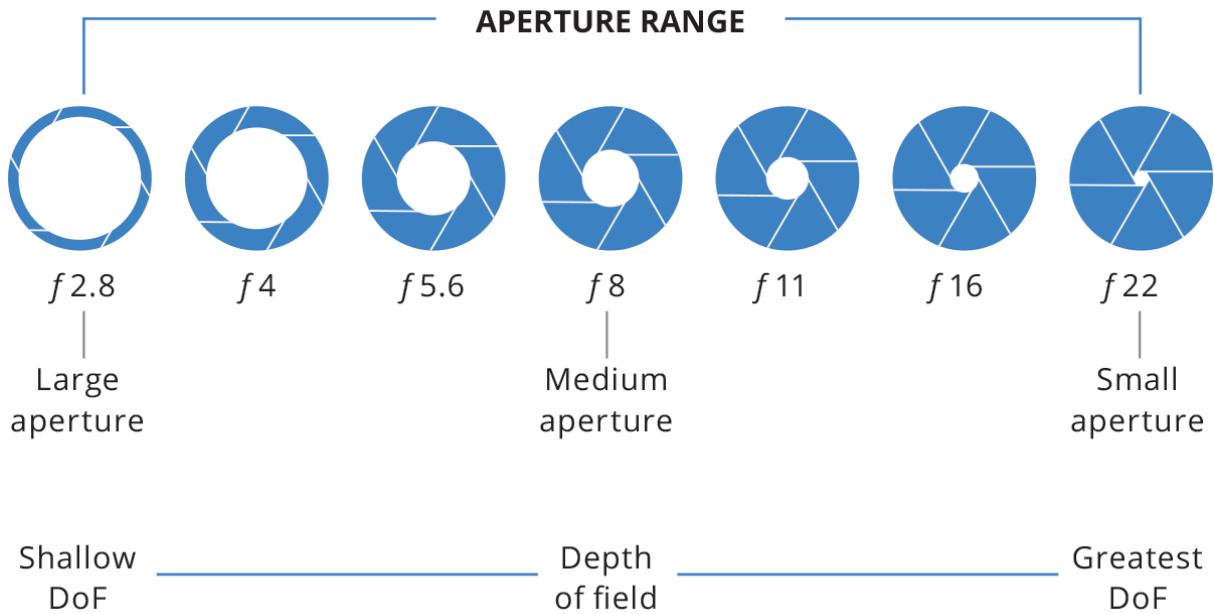
luz que está fuera del plano de enfoque, los rayos de luz de este punto, al entrar a través de la apertura más amplia, convergerán y divergirán sobre un área mayor en el sensor de imagen. Esta divergencia crea un círculo de confusión más grande, que percibimos como un desenfoque más significativo.

Por otro lado, cuando la apertura es pequeña (número f-stop grande), los rayos de luz entran en la lente desde un rango más estrecho de ángulos. Por lo tanto, incluso si la fuente puntual de luz está fuera del plano de enfoque, los rayos convergerán y divergirán sobre un área menor en el sensor de imagen, creando un círculo de confusión más pequeño y un desenfoque menos perceptible.

Entonces, en esencia, los números f-stop pequeños (aperturas grandes) resultan en una profundidad de campo menor con un círculo de confusión más grande, lo que significa más desenfoque para los objetos que no están en el plano de enfoque. Esto se usa a menudo para crear un efecto de 'bokeh' en fotografía, donde el sujeto permanece nítido y enfocado mientras el fondo (o a veces el primer plano) se desenfoca artísticamente.



Una apertura más grande (número f-stop más bajo) produce una profundidad de campo más reducida, lo que hace que solo una pequeña parte de la escena esté nítida mientras el fondo y el primer plano se desenfocan. Por el contrario, una apertura más pequeña (número f-stop más alto), aumenta la profundidad de campo, haciendo que una mayor parte de la escena, desde el primer plano hasta el fondo, esté enfocada y nítida.



Efectos de la Longitud Focal sobre el DoF

Cuanto mayor sea la longitud focal de una lente (por ejemplo, 200 mm), menor será la profundidad de campo (DoF, por sus siglas en inglés), y cuanto más corta sea la longitud focal (por ejemplo, 18 mm), mayor será la profundidad de campo. Aquí están las razones por las cuales esto sucede:

- **Magnificación:** Una lente con una longitud focal más larga magnifica la imagen más que una lente con una longitud focal más corta. Esta magnificación hace que el sujeto parezca más grande en el encuadre y también magnifica el desenfoque, haciendo que parezca que hay una profundidad de campo más reducida.
- **Distancia al Sujeto:** Cuando usas una lente con una longitud focal más larga, generalmente estás más lejos de tu sujeto para lograr el mismo encuadre que tendrías con una longitud focal más corta. A medida que aumentas tu distancia del sujeto, la profundidad de campo se vuelve más reducida.
- **Ángulo de la Luz:** Con una longitud focal más larga, la luz entra en la lente en un rango más estrecho de ángulos, y estos ángulos más estrechos hacen que la luz se disperse más después de pasar a través de la lente. Esta dispersión de la luz da como resultado un círculo de confusión más grande para los puntos que no están en el plano de enfoque, lo que contribuye a una profundidad de campo más reducida.

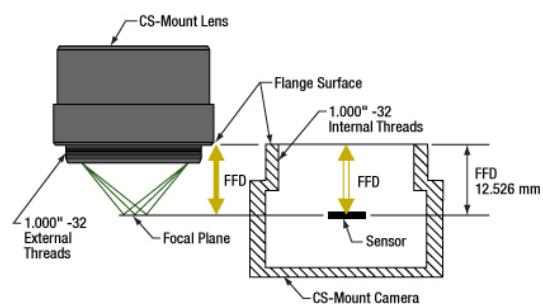
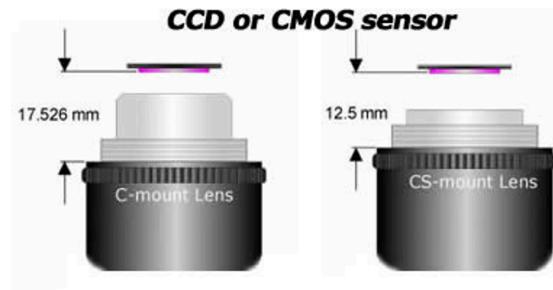
Montaje

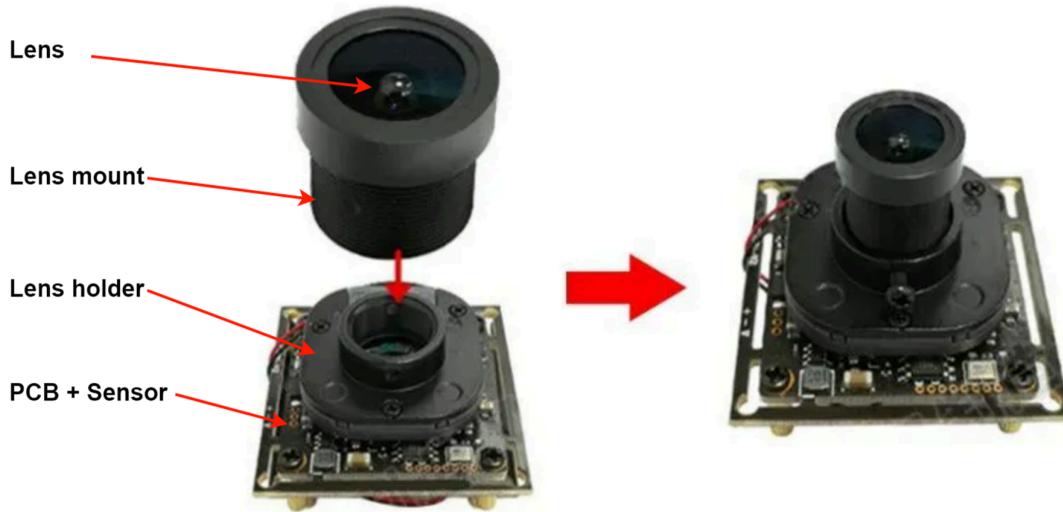
El montaje de un lente (lens mount) se refiere al sistema de interfaz física y mecánica que permite conectar el lente al cuerpo de la cámara de manera segura y precisa.

Cada fabricante de cámaras tiene su propio sistema de montaje patentado, como el montaje F de Nikon, el montaje EF de Canon, el montaje E de Sony, etc. Los lentes deben tener el mismo tipo de montaje que el cuerpo de la cámara para ser compatibles.

Existen diversos accesorios a las lentes como adaptadores o separadores, para conseguir una adaptación adecuada. Es importante entender que estos accesorios deben tener las especificaciones adecuadas, ya que influyen en la distancia entre la lente y el sensor. Dado que usualmente las lentes tienen rosca como tornillos, la distancia entre el sistema óptico y el sensor varía de acuerdo a las vueltas que hagamos al enroscar la lente.

La lente se enrosca contra un "lens holder", que es su contraparte para asociarse con el sensor.





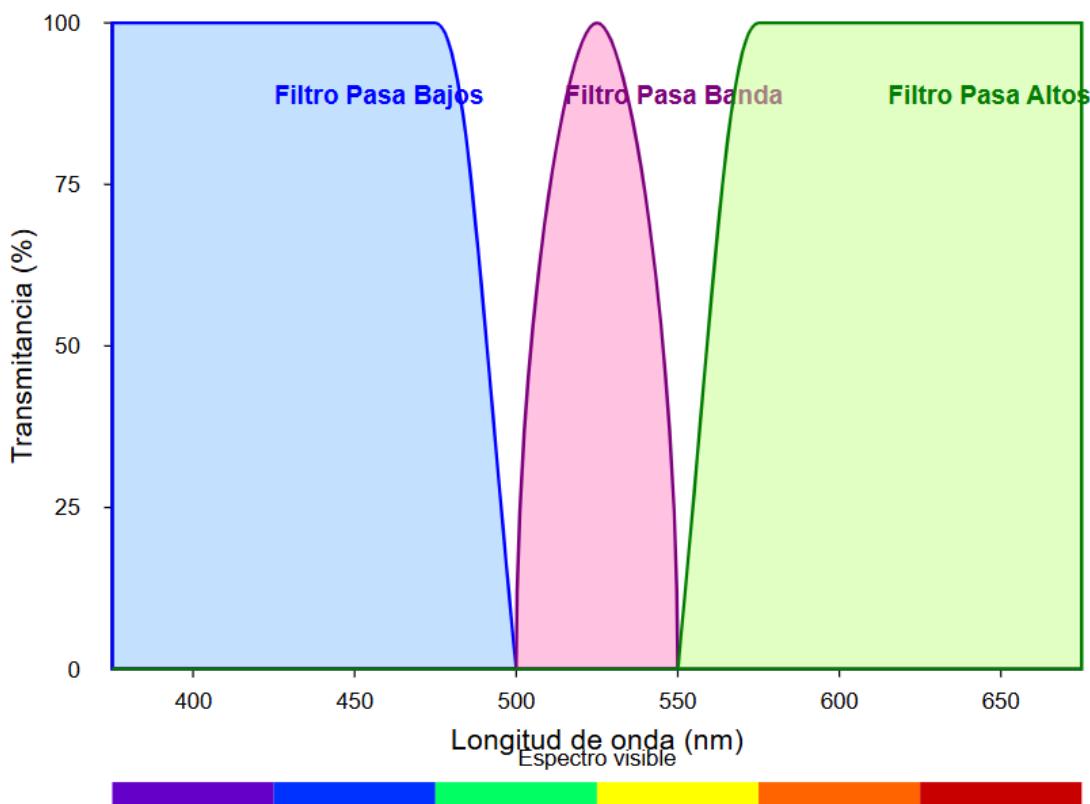
Filtros ópticos

Un **filtro óptico** es un medio que sólo permite el paso a través de él de luz con ciertas propiedades, suprimiendo o atenuando la luz restante. Los filtros ópticos más comunes son los filtros de color, es decir, aquellos que sólo dejan pasar luz de una determinada longitud de onda. Si se limitan a atenuar la luz uniformemente en todo el rango de frecuencias se denominan filtros de densidad neutra.



Según su procedimiento de acción pueden ser de absorción, si absorben parte de la luz, o bien reflectivos si la reflejan. A este último grupo pertenecen los filtros dicroicos. Los usos de los filtros ópticos incluyen la fotografía, iluminación y numerosos usos científicos. Los filtros de absorción se elaboran depositando sobre la superficie de un sustrato transparente o mezclado en él, una sustancia con propiedades absorbentes de la luz.

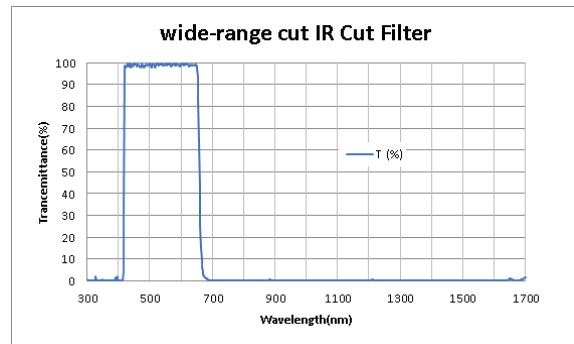
Según el rango de frecuencias que dejan sin filtrar, se clasifican en filtros de paso alto o de paso bajo, según si dejan sin filtrar las radiaciones de frecuencia superior o inferior respectivamente a cierto valor, denominada frecuencia de corte. En los filtros de paso de banda se filtran las frecuencias por encima y por debajo de ciertos límites.



La atenuación de la señal filtrada se mide mediante la transmitancia óptica del medio filtrante o su inversa, la absorbancia.

IR-CUT

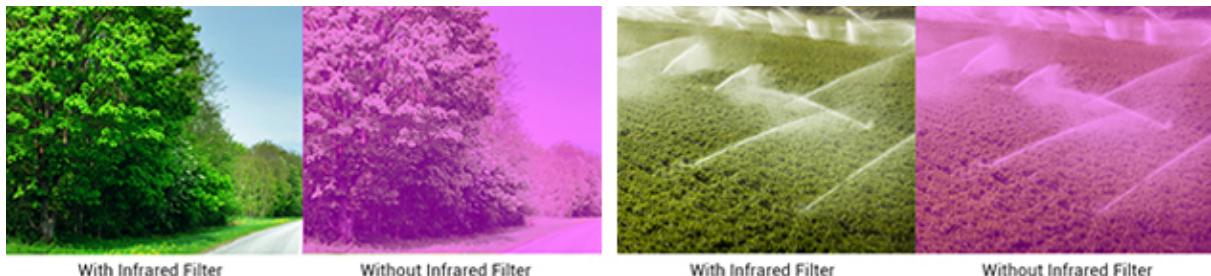
El filtro IR-Cut (Infrared Cut Filter) es uno de los filtros más comunes utilizados en cámaras digitales, especialmente en cámaras de videovigilancia y cámaras fotográficas. Su función principal es bloquear la luz infrarroja (IR) mientras permite que la luz visible pase a través del filtro y alcance el sensor de imagen. A continuación vemos los aspectos más importantes sobre el filtro IR-Cut y su función:



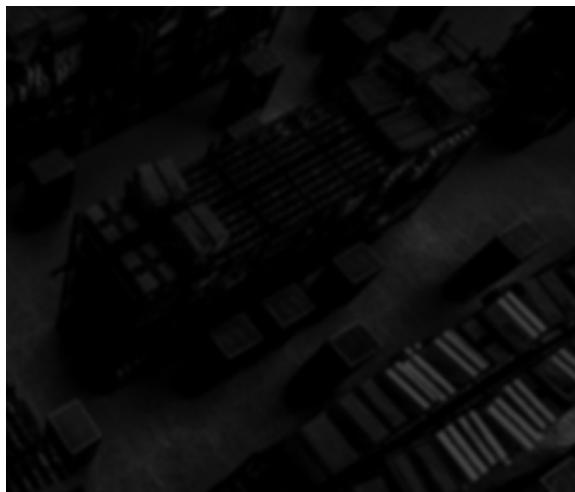
El filtro IR activado, bloquea las longitudes de onda por encima de la luz visible (transmitancia en cero).

- Bloqueo de la luz infrarroja:** Los sensores de imagen digital, como los sensores CMOS o CCD, son sensibles tanto a la luz visible como a la luz infrarroja. Sin embargo, la luz infrarroja puede interferir con la reproducción

precisa de los colores y crear un efecto de neblina o desenfoque en la imagen, y distorsiona los colores, provocando imágenes "violetas". El filtro IR-Cut bloquea la mayor parte de la luz infrarroja, evitando que llegue al sensor.



2. **Mejora de la calidad de la imagen:** Al bloquear la luz infrarroja, el filtro IR-Cut ayuda a mejorar la claridad, el contraste y la precisión del color en las imágenes capturadas. Esto es especialmente importante en la fotografía diurna o en situaciones con iluminación brillante, donde la luz infrarroja es abundante.
3. **Filtro automático:** En muchas cámaras, especialmente en cámaras de videovigilancia, el filtro IR-Cut es automático. Esto significa que el filtro puede moverse físicamente dentro y fuera de la trayectoria óptica según las condiciones de iluminación. Durante el día, el filtro IR-Cut está en su lugar para bloquear la luz infrarroja. Sin embargo, en condiciones de poca luz o durante la noche, el filtro se retira automáticamente, permitiendo que la cámara sea más sensible a la luz infrarroja.
4. **Uso con iluminación infrarroja:** Cuando se retira el filtro IR-Cut, la cámara puede capturar imágenes en condiciones de poca luz utilizando iluminación infrarroja. Muchas cámaras de videovigilancia están equipadas con LED infrarrojos que proporcionan iluminación activa en entornos oscuros. Al quitar el filtro IR-Cut, la cámara puede aprovechar esta iluminación infrarroja para capturar imágenes claras en blanco y negro durante la noche.



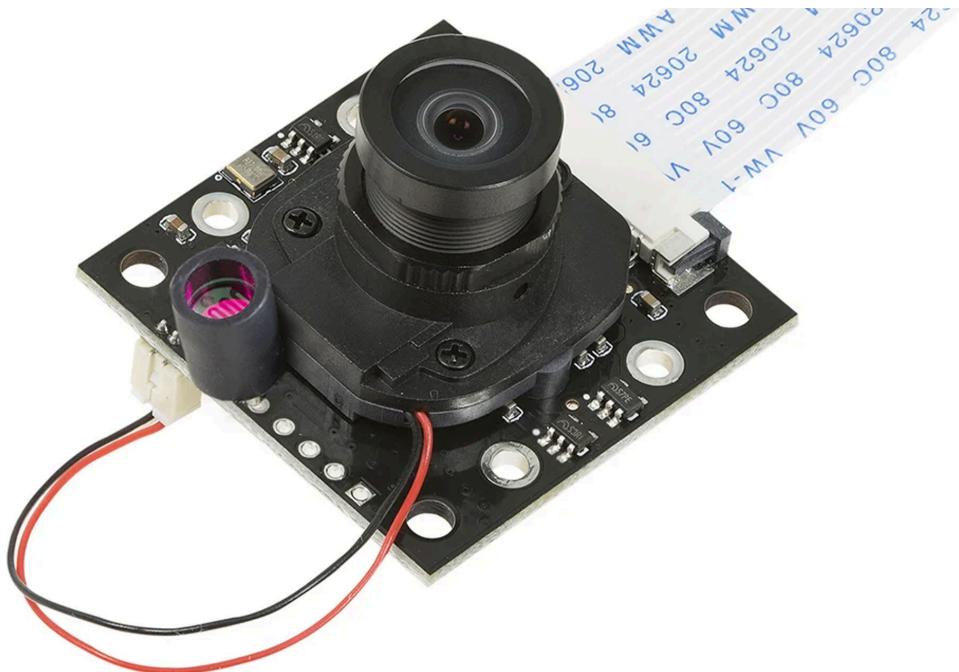
Standard lens (night)



IR - corrected lens (night)

En uso nocturno, es importante desactivar el filtro IR, para dejar pasar la luz infrarroja. Es importante iluminar la escena con luz infrarroja. Normalmente una cámara preparada para uso nocturno, incluye LEDs infrarrojos para iluminar durante la noche.

1. Consideraciones de color: Cuando el filtro IR-Cut está en su lugar, la cámara captura imágenes en color con una representación precisa. Sin embargo, cuando se quita el filtro para la captura con iluminación infrarroja, las imágenes suelen ser en blanco y negro, ya que el sensor es más sensible a la luz infrarroja que a los colores visibles.



Cámara con IR-Cut: El lens holder incluye en su interior, un filtro infrarrojo que de forma electromecánica se controla su activación. A la izquierda del holder, se puede ver el sensor de luz visible (LDR), que cuando la luz está por debajo de un umbral, desactiva el filtro IR.

Tipos de cámaras

Clasificación según uso

Hay una diversidad muy grande de tipos de cámaras digitales disponibles en el mercado, cada una diseñada para diferentes aplicaciones y necesidades específicas. Aquí hay una lista de algunos de los principales tipos de cámaras digitales:

- **Cámaras de seguridad y vigilancia:**

- Cámaras de red (IP) para interiores y exteriores
- Cámaras analógicas (CCTV) con grabadores de video digitales (DVR)
- Cámaras PTZ (Pan-Tilt-Zoom) para cobertura de áreas amplias
- Cámaras térmicas para detección basada en calor
- Cámaras con reconocimiento facial y de matrículas



- **Cámaras industriales y de visión artificial:**

- Cámaras de inspección de alta resolución para control de calidad
- Cámaras de línea para inspección de productos en movimiento
- Cámaras con sensores especializados (por ejemplo, infrarrojos, ultravioleta)
- Cámaras inteligentes con procesamiento de imágenes integrado
- Cámaras resistentes para entornos industriales exigentes



- **Cámaras médicas y de ciencias de la vida:**

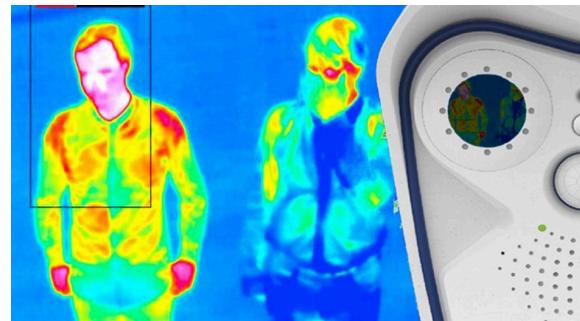
- Cámaras de microscopía para imágenes de alta ampliación
- Cámaras endoscópicas para procedimientos mínimamente invasivos
- Cámaras de patología digital para análisis de muestras
- Cámaras de fluorescencia para imágenes de células y tejidos



- Cámaras especializadas para imágenes de retina y oftalmología
- **Cámaras para fotografía y videografía profesional:**
 - Cámaras DSLR (Digital Single-Lens Reflex) de formato completo y APS-C
 - Cámaras sin espejo (mirrorless) con sensores de formato completo y APS-C
 - Cámaras de video profesionales para producciones cinematográficas
 - Cámaras de acción para deportes y aventuras
 - Cámaras de medio formato para fotografía de paisajes y estudios
- Cámaras de consumo y aficionados:
 - Cámaras compactas de bolsillo para uso diario
 - Cámaras bridge con zoom óptico largo para mayor versatilidad
 - Cámaras instantáneas para impresiones inmediatas
 - Cámaras deportivas y de acción para actividades al aire libre



- Cámaras web para videoconferencias y transmisión en línea
- Cámaras especializadas:
 - Cámaras de alta velocidad para capturar movimiento rápido
 - Cámaras térmicas portátiles para inspección y mantenimiento
 - Cámaras multiespectrales para agricultura de precisión y teledetección
 - Cámaras de realidad virtual (VR) y 360 grados para contenido inmersivo
 - Cámaras de trampa para observación y seguimiento de la vida silvestre



Cámara térmica



Cámara 360 de Google Street View

Comunicación

Medios físicos de transmisión

Clasificar las cámaras según el tipo de conectividad es una manera efectiva de entender sus capacidades, usos y aplicaciones. A continuación se presenta una clasificación común de las cámaras basada en los tipos de conectividad más populares:

- **Cámaras con Conectividad Ethernet/WiFi**
 - **Ethernet:** Conectadas a través de un cable Ethernet, estas cámaras transmiten datos directamente a una red local (LAN). Son comunes en sistemas de videovigilancia.
 - **WiFi:** Similar a las cámaras IP con Ethernet, pero utilizan una conexión inalámbrica para transmitir datos a una red. Ofrecen mayor flexibilidad

en la instalación.

Aplicaciones: Videovigilancia, monitoreo remoto, sistemas de seguridad.

- **Cámaras con Conectividad USB**

- **USB 2.0:** Ofrecen una velocidad de transferencia de datos de hasta 480 Mbps. Adecuadas para aplicaciones donde las altas velocidades de datos no son críticas.
- **USB 3.0 y superiores:** Proporcionan velocidades de transferencia de datos significativamente más rápidas (hasta 5 Gbps o más), lo que permite transmitir video de alta resolución en tiempo real.

Aplicaciones: Microscopía digital, videoconferencias, captura de imágenes en PC, inspección de calidad.

- **Cámaras con Conectividad GigE, 5GigE, 10GigE**

- **GigE:** Utilizan la infraestructura de red Gigabit Ethernet para transmitir datos a velocidades de hasta 1 Gbps. Son ideales para aplicaciones industriales donde se requiere una alta velocidad de transferencia de datos y largos cables de transmisión.
- **10GigE, 5GigE:** Son actualizaciones de GigE, que proporcionan velocidades de transferencia de hasta 5 o 10 Gbps. Adecuadas para aplicaciones de visión artificial que requieren aún mayores tasas de transferencia de datos.

Aplicaciones: Visión artificial, automatización industrial, inspección de calidad, procesamiento de imágenes de alta velocidad.

- **Cámaras con Conectividad FireWire**

- **FireWire 400 (IEEE 1394a):** Ofrecen velocidades de transferencia de hasta 400 Mbps.
- **FireWire 800 (IEEE 1394b):** Duplican la velocidad de transferencia hasta 800 Mbps.

Aplicaciones: Anteriormente populares en grabación de video profesional y aplicaciones de visión industrial, pero han sido reemplazadas en gran medida por USB y Ethernet.

- **Cámaras con Conectividad Thunderbolt**

Ofrecen velocidades de transferencia extremadamente altas (hasta 40 Gbps con Thunderbolt 3). Utilizan el conector USB-C y proporcionan baja latencia y alta eficiencia en la transmisión de datos.

Aplicaciones: Edición de video profesional, transmisión en vivo de alta calidad, captura de video en alta resolución.

- **Cámaras con Conectividad HDMI**

Utilizadas para transmitir video y audio de alta definición directamente a monitores o grabadoras. No suelen ser utilizadas para transmisión de datos en red, pero son comunes en aplicaciones de grabación y transmisión en tiempo real.

Aplicaciones: Producción de video, transmisión en vivo, conferencias y presentaciones.

El tipo de tecnología de conectividad, entre otras cosas, determina el ancho de banda, y también la longitud máxima de los cables entre las cámaras y las computadoras que procesan las imágenes:

