

MEC2007 – Tópicos Especiais em Engenharia Mecânica

Técnicas de Medição Baseadas em Imagens

Introdução

Fabio J. W. A. Martins

fabiomartins@puc-rio.com

Departamento de Engenharia Mecânica



Pontifícia
Universidade
Católica do
Rio de Janeiro

21.08.2025

- O entendimento ou monitoramento de um processo físico é melhorado através da visualização de seus padrões e quantificação de suas grandezas físicas
- A visualização inicial de um processo pode auxiliar na escolha da técnica adequada para a medição das grandezas relevantes
- O conhecimento prévio de informações básica sobre o processo físico auxiliam no desenvolvimento de teorias, medições, simulações, monitoramento e otimizações
- Técnicas de medição baseadas em imagens além de oferecerem uma alternativa aos métodos tradicionais de medição, podem oferecer vantagens dependendo do problema

Aplicações práticas:

- Medicina: diagnóstico por imagem (raio-X, ressonância), análise de movimento humano
- Agronomia: monitoramento de culturas, avaliação de saúde de plantas
- Robótica e visão computacional: navegação autônoma, reconhecimento de objetos
- Ciências básicas: análise de fenômenos físicos, químicos e biológicos em laboratório
- Engenharia: **Análise de deformações em estruturas (*Digital Image Correlation*)**, **medição de velocidade de fluidos (*Particle Image Velocimetry*)**, **temperatura de fluidos (*Laser-induced Fluorescence*)**, **temperatura em superfícies (*Temperature Sensitive Paint*)**, **pressão em superfícies (*Pressure Sensitive Paint*)**, **densidade de gases (*Background-oriented Schlieren*)**, controle de qualidade em manufatura

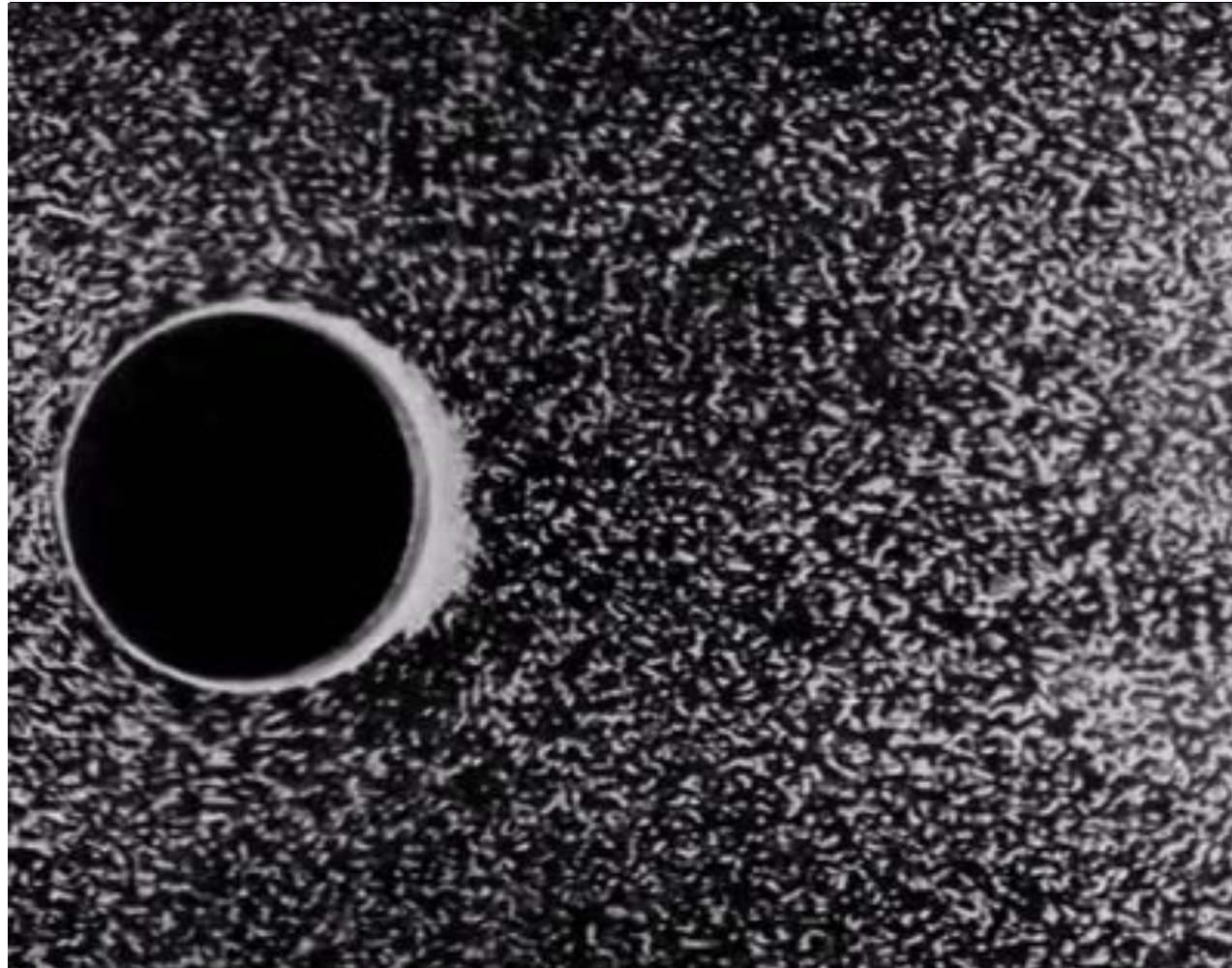


Primeiras visualização de escoamento turbulento: redemoinhos de água (L. Da Vinci, 1510)

“Observe the motion of the surface of the water, which resembles that of hair, which has two motions, of which one is caused by the weight of the hair, the other by the direction of the curls; thus the water has eddying motions, one part of which is due to the principal current, the other to random and reverse motion.”

Introdução

Visualização de separação no escoamento através de imagens de partículas (L. Prandtl et al., ca 1930)





Medição de campo de velocidade em escoamento de convecção natural através de Lagrangian Particle Tracking
(D. Schanz et al., PIV13, 2013 & Huhn et al., Exp. Fluids, 2017)

- Precisão e confiabilidade:
 - Detecção de detalhes microscópicos e imperfeições (crucial para componentes com tolerâncias mínimas)
 - Automatização de medições (redução de erros humanos, aumento da reprodutibilidade de resultados)
 - Medição de formas complexas utilizando múltiplos pontos simultâneos
- Eficiência e velocidade:
 - Inspeção em linha e em tempo real (controle de qualidade e tomada de decisão)
 - Informação espacial completa (análise de campos)
 - Medição de diversas grandezas simultâneas (correlação entre diferentes grandezas, eficiência)
 - Medição rápidas e dinâmicas (captura de eventos rápidos e transientes, automação, otimização, aumento de produtividade)

Introdução

- Medição sem contato (não invasiva ou destrutiva):
 - Interferência mínima no processo físico medido
 - Preservação do objeto medido (peças delicadas)
 - Inspeção de materiais moles
 - Medição de objetos em movimento
- Big Data:
 - Geração de grande massa de dados estatísticos (otimização de processos, prevenção de falhas e implementação de melhorias contínuas)
 - Rastreabilidade da peça (associando cada medição ao seu histórico)

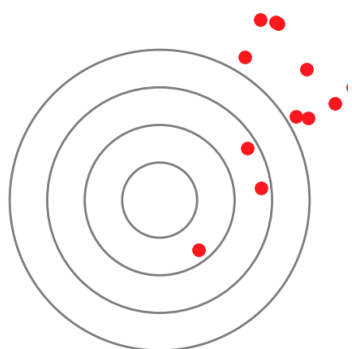
- Desafios:
 - Custo inicial (câmeras de alta resolução, lentes, sistema de iluminação, software de processamento de imagens)
 - Complexidade de implementação (calibração do sistema, acessibilidade ótica, condições de iluminação, necessidade de especialista)
 - Precisão das medições (condições desfavoráveis de medição, sinal tênue e presença de ruído, interferência do sinal de medida)

Princípio geral de técnicas de medição baseadas em imagens

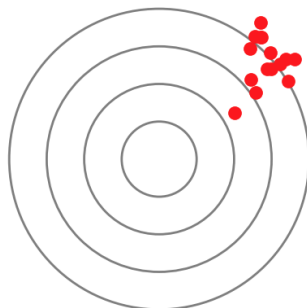
- Aquisição da imagem: a informação do mundo real é convertida em dados digitais
- Pré-processamento da imagem: as imagens são manipuladas para remoção de ruídos e realce de características de interesse
- Extração de características: identificação de pontos, linhas, contornos, padrões ou regiões de interesse
- Análise: conversão das características extraídas em grandezas físicas mensuráveis (distância, velocidade, deformação, etc.)
- Pós-processamento: extração de grandezas derivadas e cálculos estatísticos
- Interpretação: avaliação dos campos medidos levando em conta as incertezas de medição

Conceitos básicos

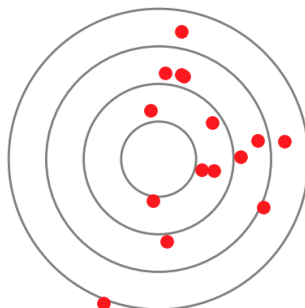
- **Medição:** conjunto de operações para determinação do valor de uma grandeza (mensurando)
- **Incerteza** de medição: variação das medições
- **Erro:** afastamento entre o valor medido e o valor verdadeiro
- **Repetibilidade:** variação devida ao dispositivo de medição (mesmo operador, mesmo medidor e mesmas condições)
- **Reprodutibilidade:** grau de concordância entre medições de um mesmo mensurando sob condições variadas de medição (diferentes dispositivos, métodos de medição, operadores, local e/ou longo intervalo de tempo)
- **Precisão vs. Acurácia**



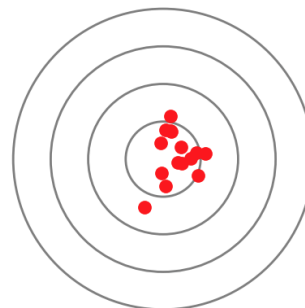
Poor Accuracy
Poor Precision



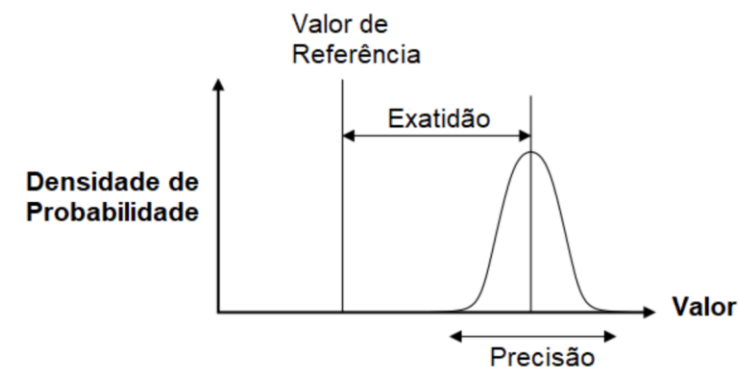
Poor Accuracy
Good Precision

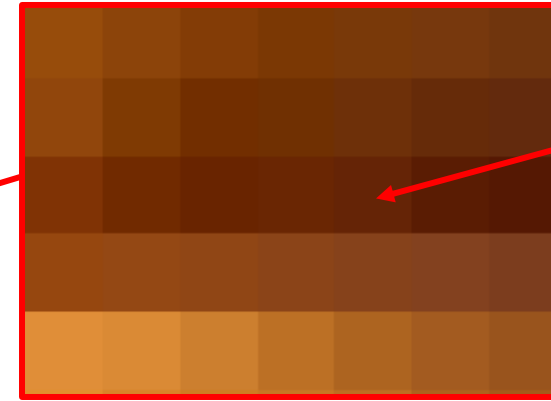
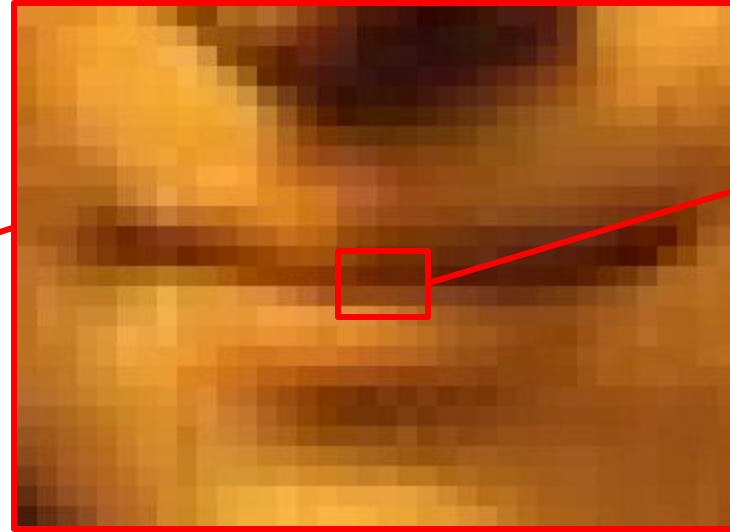
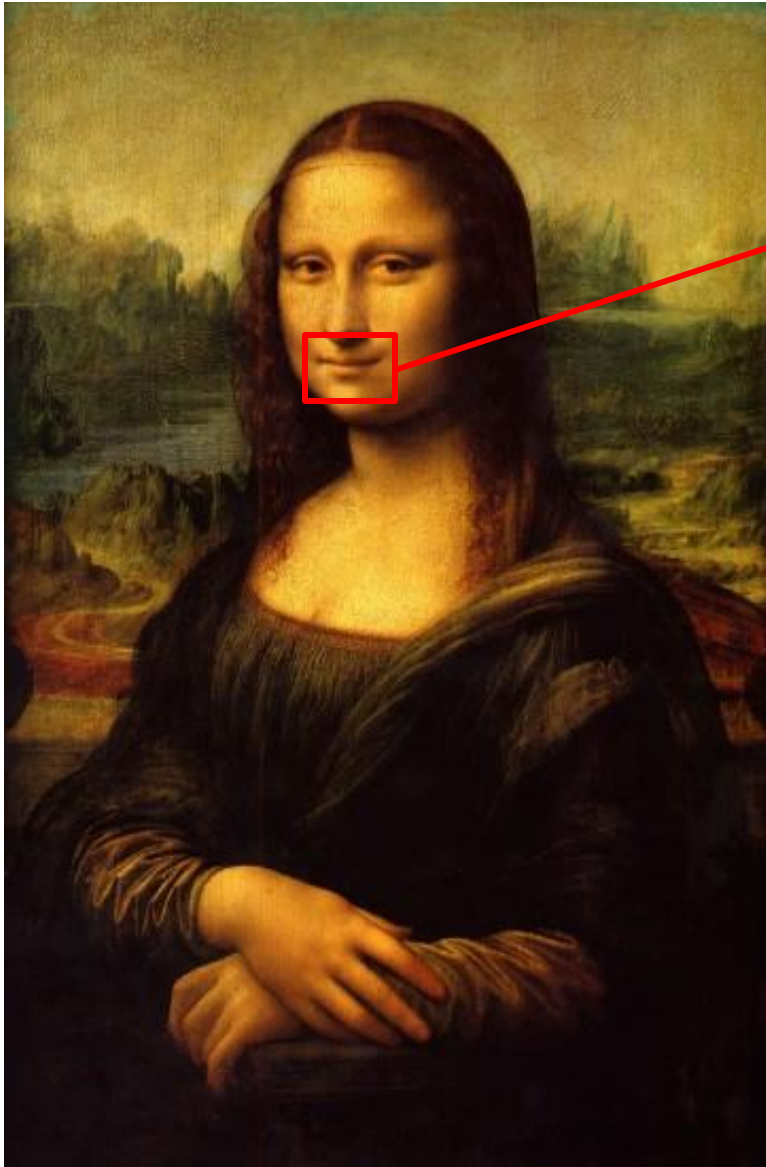


Good Accuracy
Poor Precision



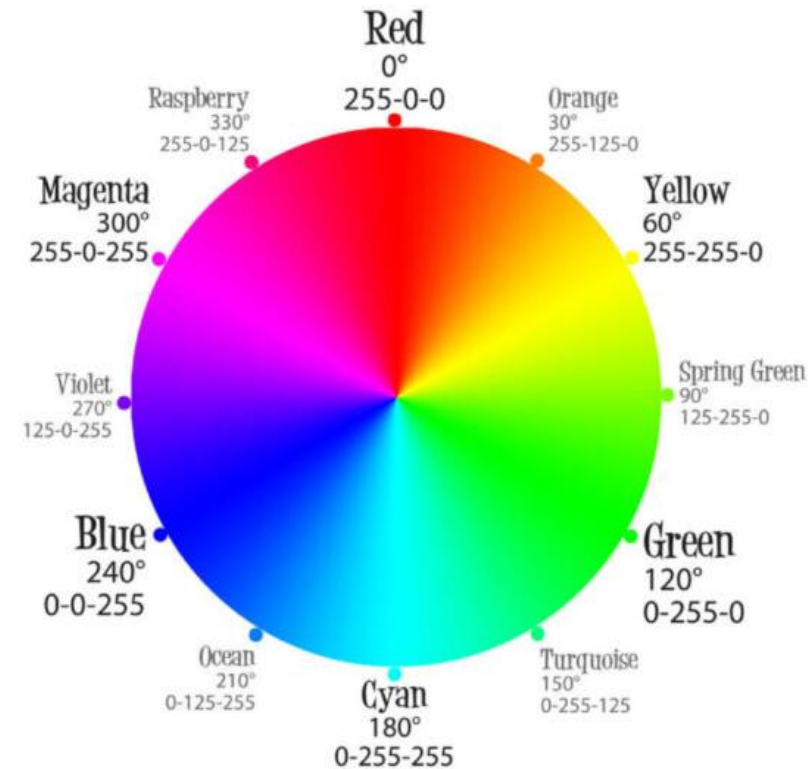
Good Accuracy
Good Precision





pixel

- Imagem digital composta por pixels
- Modelo aditivo de cores RGB
- Qualidade da imagem:
 - Quantidade de pontos (resolução)
 - Quantidade de cores (quantização)

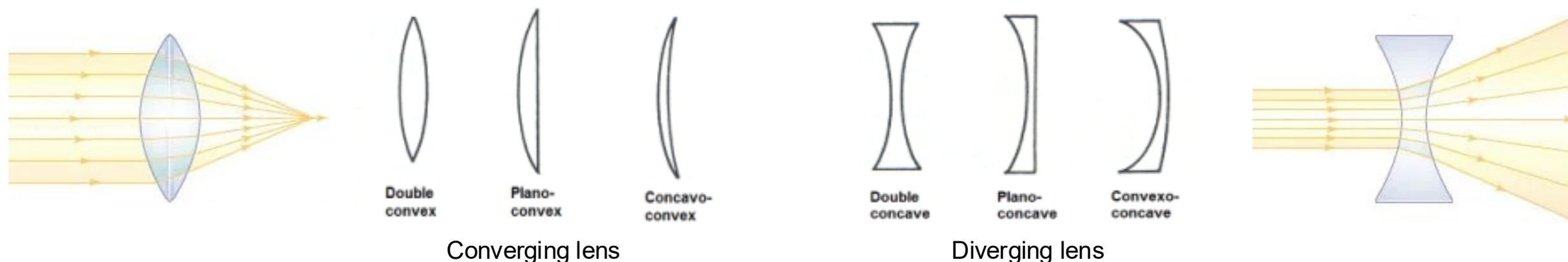


Imagem

- Formatos de arquivo de imagem
 - .tif ou .tiff (*tagged image file format*): robusto, genérico, multi-plataforma
 - .bmp (*bit map*): comum no Windows
 - .gif (*graphics interchange format*): comum na internet, permite animação
 - .jpg ou .jpeg (*joint photographic experts group*): comum na internet e fotos, formato comprimido com perda de informação, menor flexibilidade de edição, eficiente
 - .j2k ou .jpeg2000: formato mais moderno, eficiente, compressão com e sem perda
 - .raw: dados brutos
- Tamanho dos arquivos
 - 1 bit pode armazenar 2 valores diferentes: 0 e 1
 - 8 bits (1 byte) podem armazenar 2^8 (256) valores diferentes
- Compressão para redução do tamanho dos arquivos
 - *lossless*: sem perda de informação, arquivos maiores (.bmp, .tiff, .gif, .zip, .rar, etc.)
 - *lossy*: com perda de informação, arquivos menores, eficiente (.jpg, .j2k, etc.)

Formação da imagem

- Lentes convergentes (convexas) vs. divergentes (côncavas)



- Modelo de lente fina (simplificação)
 - A lente é rotacionalmente simétrica em relação ao seu eixo óptico
 - O raio refratado em uma borda é imediatamente refratado na borda oposta
 - Raios incidentes paralelos ao eixo óptico interceptam-se no ponto focal
 - Todos os raios de um ponto são focados em um único ponto da imagem
 - Todos os pontos da imagem estão contidos em um único plano
 - A ampliação é constante para mesma distância entre objeto e lente
 - Desvios dessas premissas ideais geram distorções ou aberrações ópticas

Formação da imagem

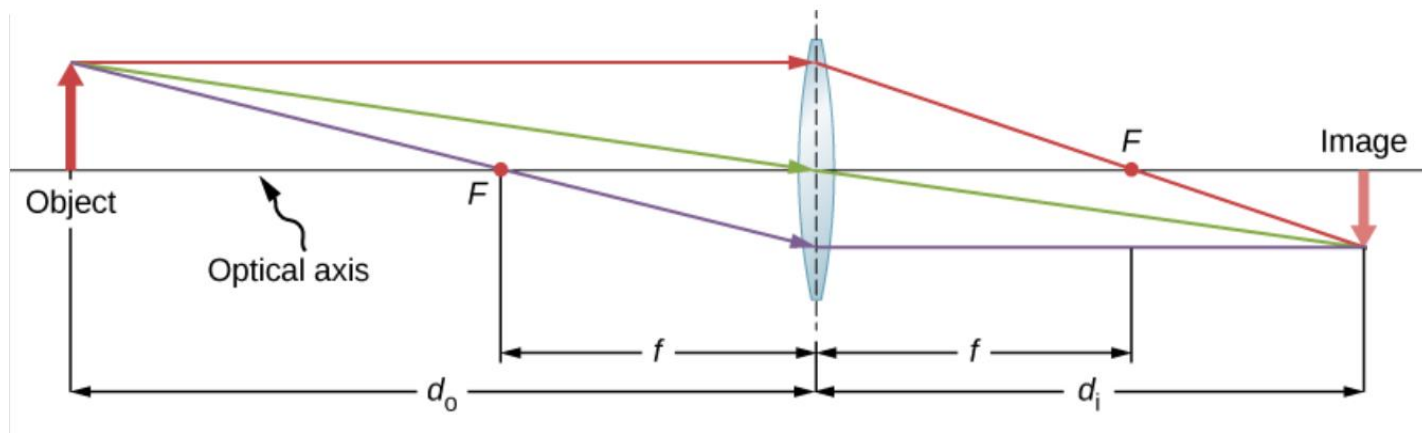
- Modelo de lente fina

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} \quad M = -\frac{d_i}{d_o}$$

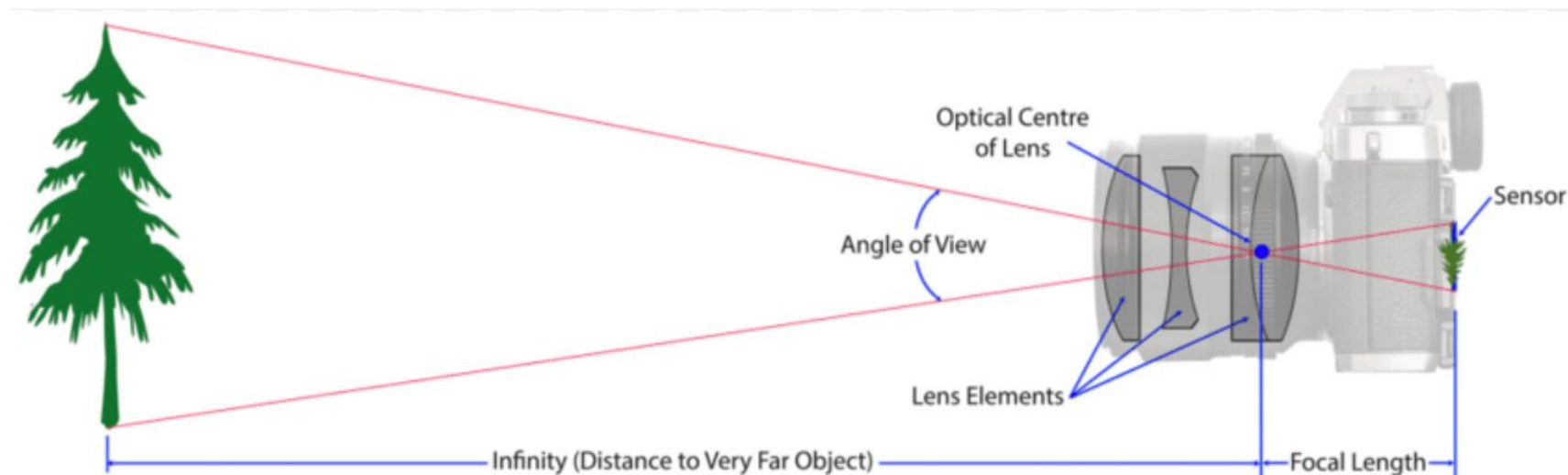
f — distância focal, d_o — distância entre objeto e lente,
 d_i — distância entre imagem e lente, M — magnificação

Convenção de sinais:

$d_i > 0$ imagem no lado oposto ao objeto (imagem real)
 $d_i < 0$ imagem do mesmo lado do objeto (imagem virtual)
 $f > 0$ lente convergente $f < 0$ lente divergente



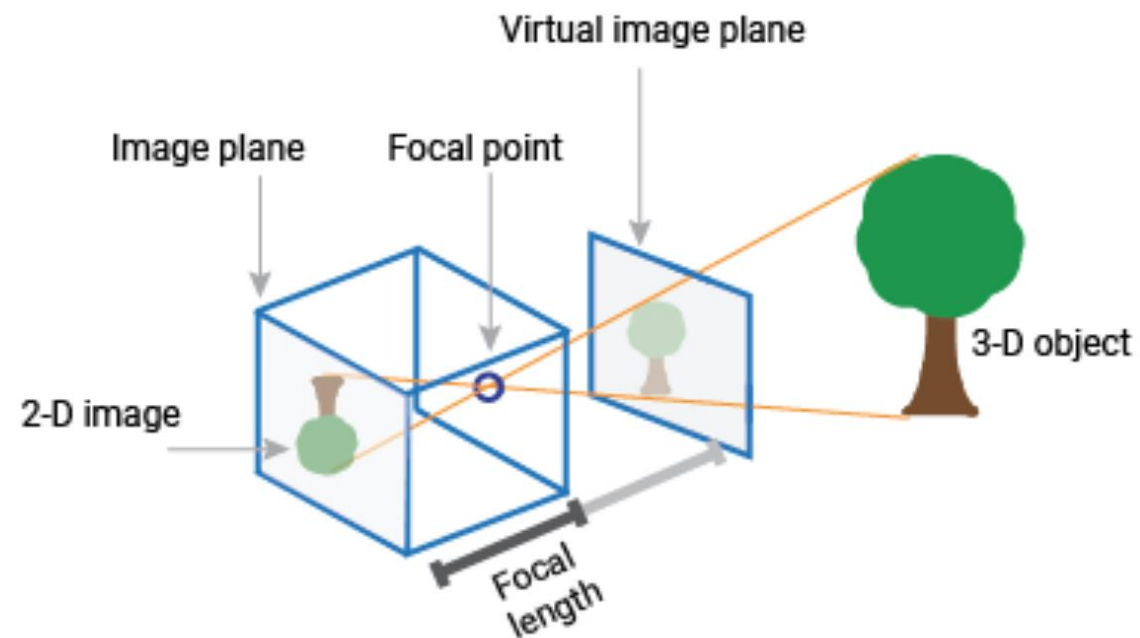
- Câmera real:
conjunto de lentes
com distorções
ópticas



Formação da imagem

Modelo de câmera *Pinhole*:

- Projeção de perspectiva
- Objetos distantes parecem menores
- Linhas paralelas se encontram (ponto de fuga)
- Propriedades: pontos vão para pontos
linhas vão para linhas



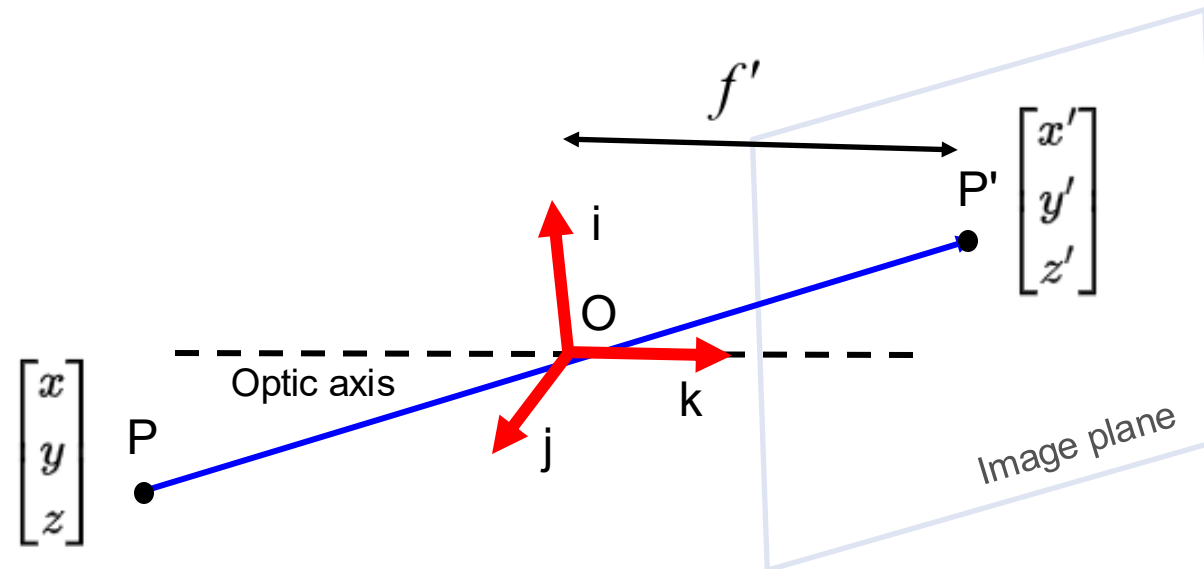
Formação da imagem

- Projeção perspectiva

$$\begin{cases} x' = \lambda x \\ y' = \lambda y \\ f' = \lambda z \end{cases} \Rightarrow \lambda = \frac{x'}{x} = \frac{y'}{y} = \frac{f'}{z}$$

- Então

$$\begin{cases} x' = f' \frac{x}{z} \\ y' = f' \frac{y}{z} \end{cases}$$



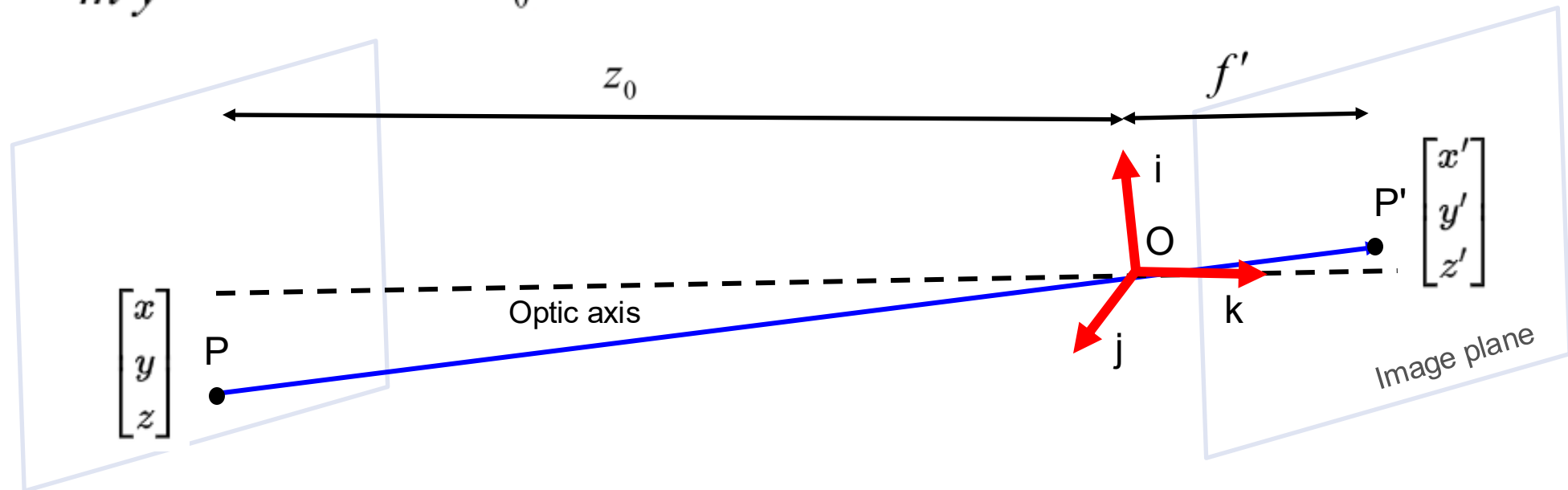
Formação da imagem

- Perspectiva fraca: quando a profundidade da cena é pequena em relação à distância média até a câmera

$$z \approx z_0$$

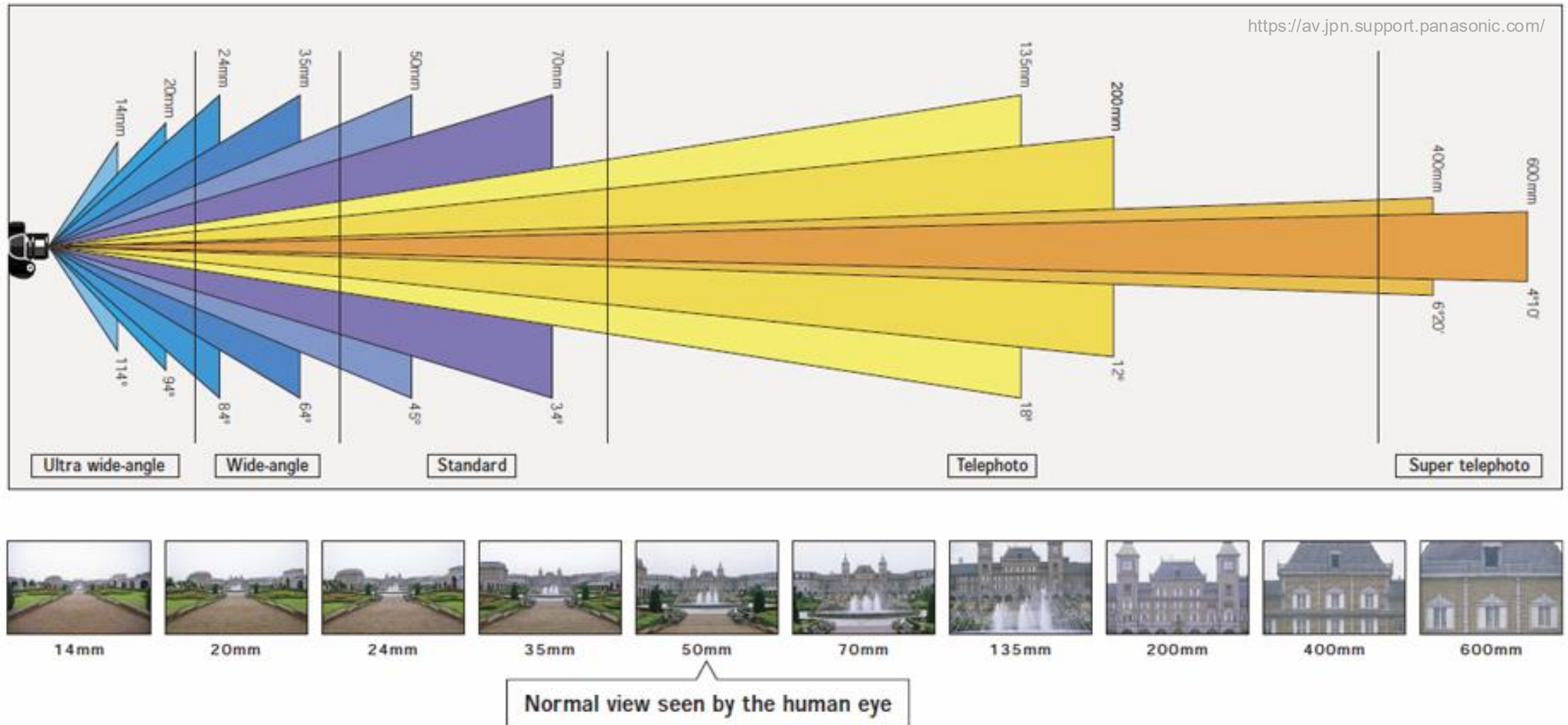
- Aproximação através da projeção afim

$$\begin{cases} x' = m x \\ y' = m y \end{cases} \quad m = \frac{f'}{z_0}$$



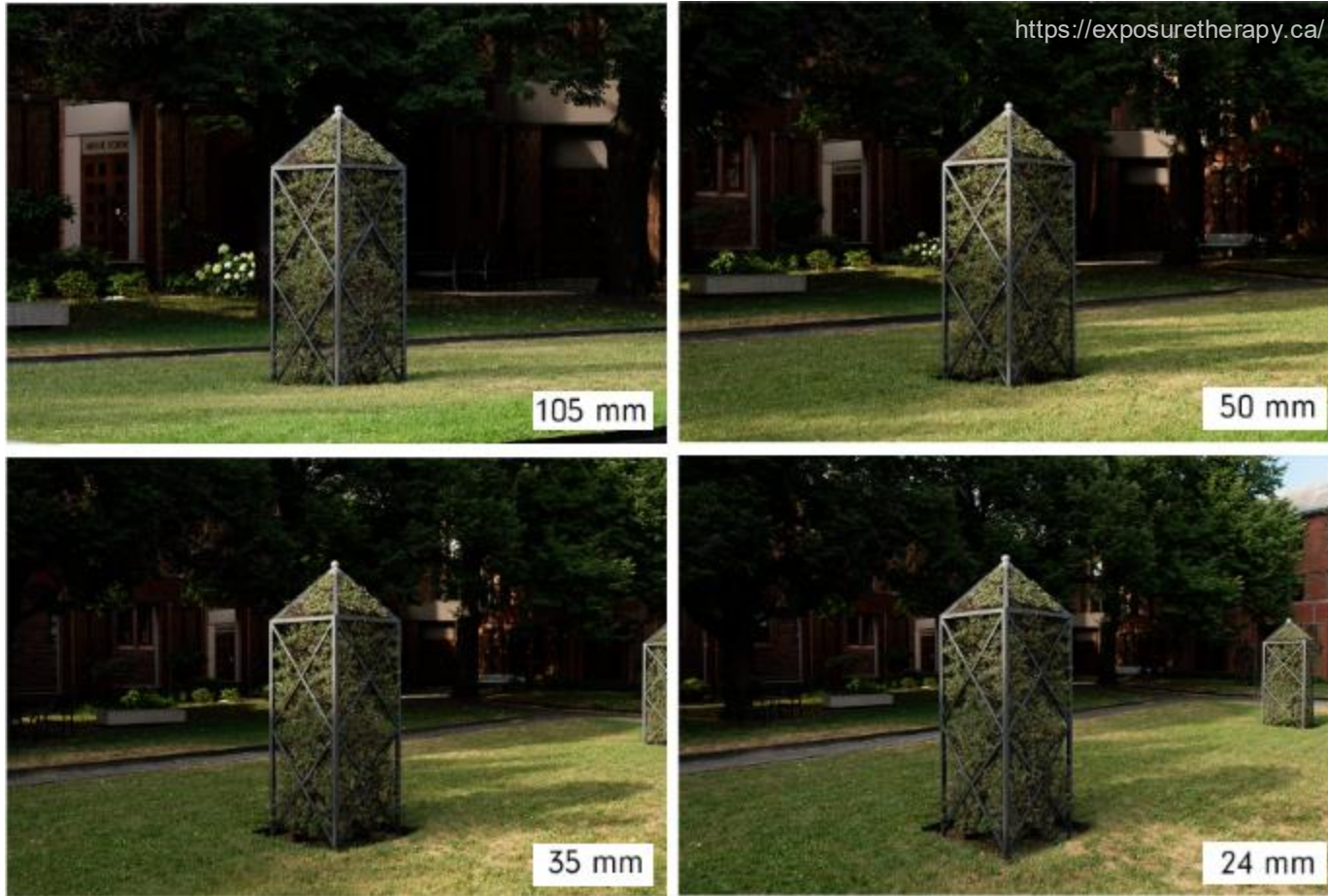
Formação da imagem

Distância focal vs. campo de visão



Formação da imagem

Distância focal vs. efeito de perspectiva



Distância focal grande comprime a profundidade na imagem



Distância focal pequena

Câmera próxima do objeto



Distância focal grande

Câmera distante do objeto

Formação da imagem

Distorções geométricas devido a perspectiva: alteração da escala aparente de elementos de uma cena devido à distância da câmera e ao ângulo de visão

<https://bakerdh.wordpress.com/2012/05/05/face-distortion-is-not-due-to-lens-distortion/>



85mm @ 200cm

35mm @ 85cm

16mm @ 40cm

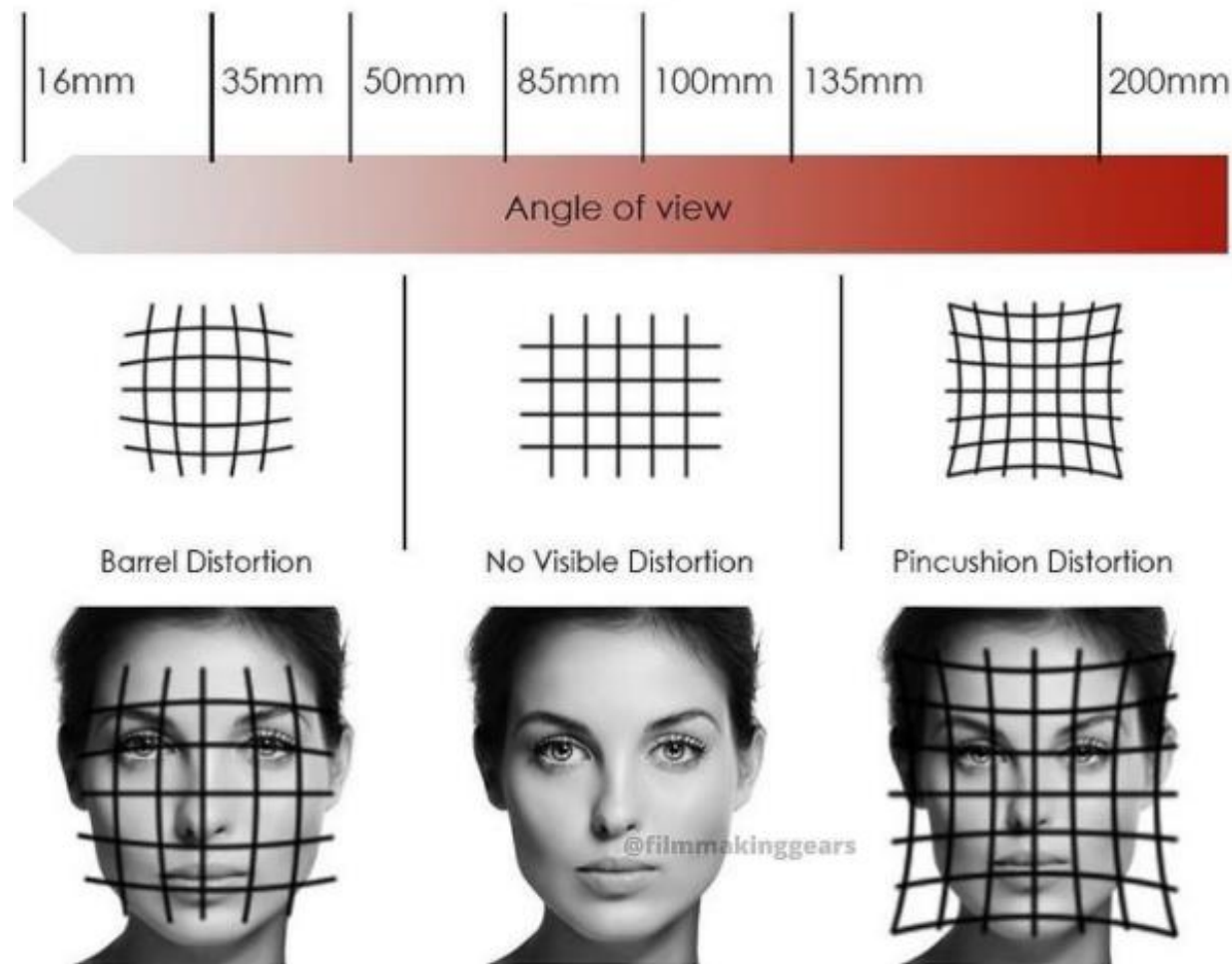
12mm @ 30cm

8mm @ 20cm

Elementos próximos parecem desproporcionalmente grandes enquanto elementos distantes parecem anormalmente pequenos

Formação da imagem

Distorções geométricas devido a lentes: magnificação diferente para diferentes ângulos de incidência da luz

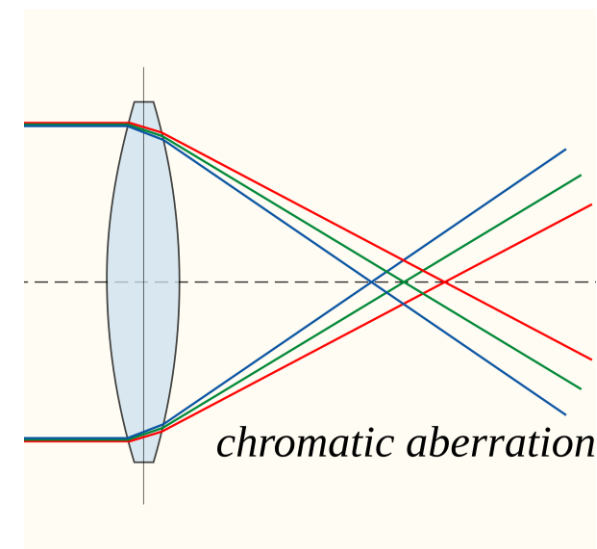
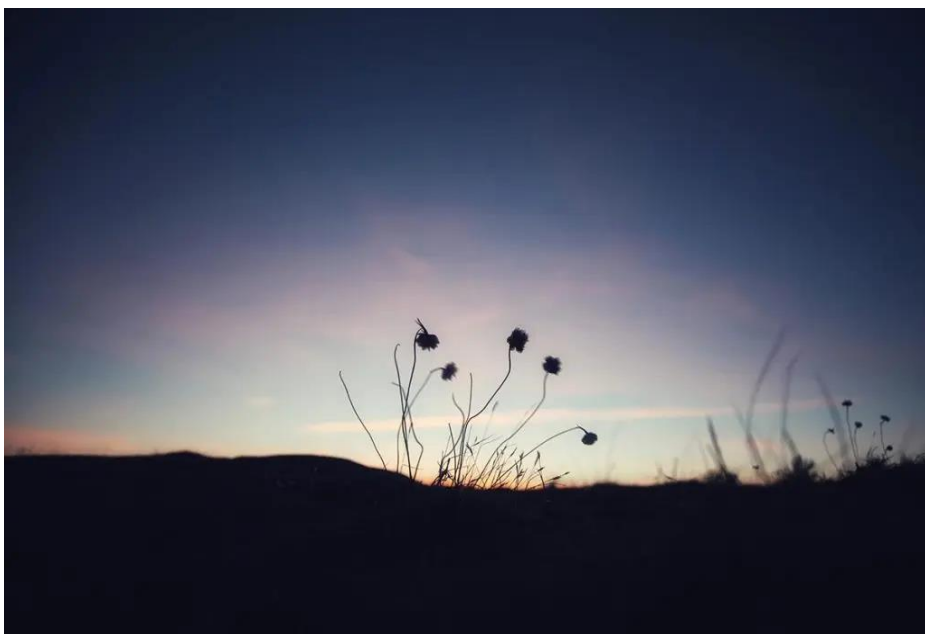


Linhas retas no mundo real aparecem curvas na imagem

Formação da imagem

Aberrações ópticas:

- Vinhetagem (*vignetting*): redução do brilho na periferia devido a montagem ou abertura da lente
- Aberração cromática: falha de uma lente em focalizar todas as cores no mesmo ponto devido à variação do índice de refração com o comprimento de onda da luz



Formação da imagem

- Desfocagem de abertura de lente (*aperture blur*)
- Profundidade de campo (*depth of field*, DOF)

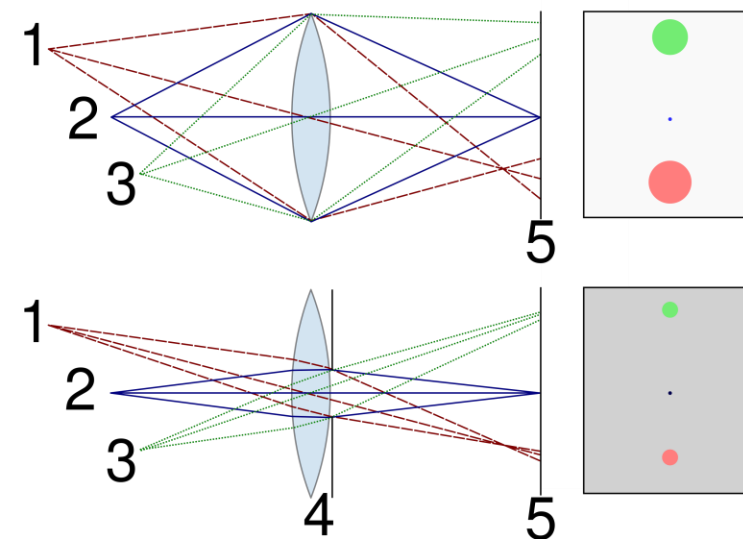
$$DOF \approx 2Nc \left(\frac{d_o}{f} \right)^2 \quad N = \frac{f}{D}$$

f — distância focal, d_o — distância entre objeto e lente, N — abertura (*f-number*),
 c — diâmetro do *circle of confusion*, D — diâmetro da abertura

- Cálculo de DOF online

<https://www.dofmaster.com/dofjs.html>

<https://dofsimulator.net/en/>



Aperture = $f/1.4$. DOF = 0.8 cm



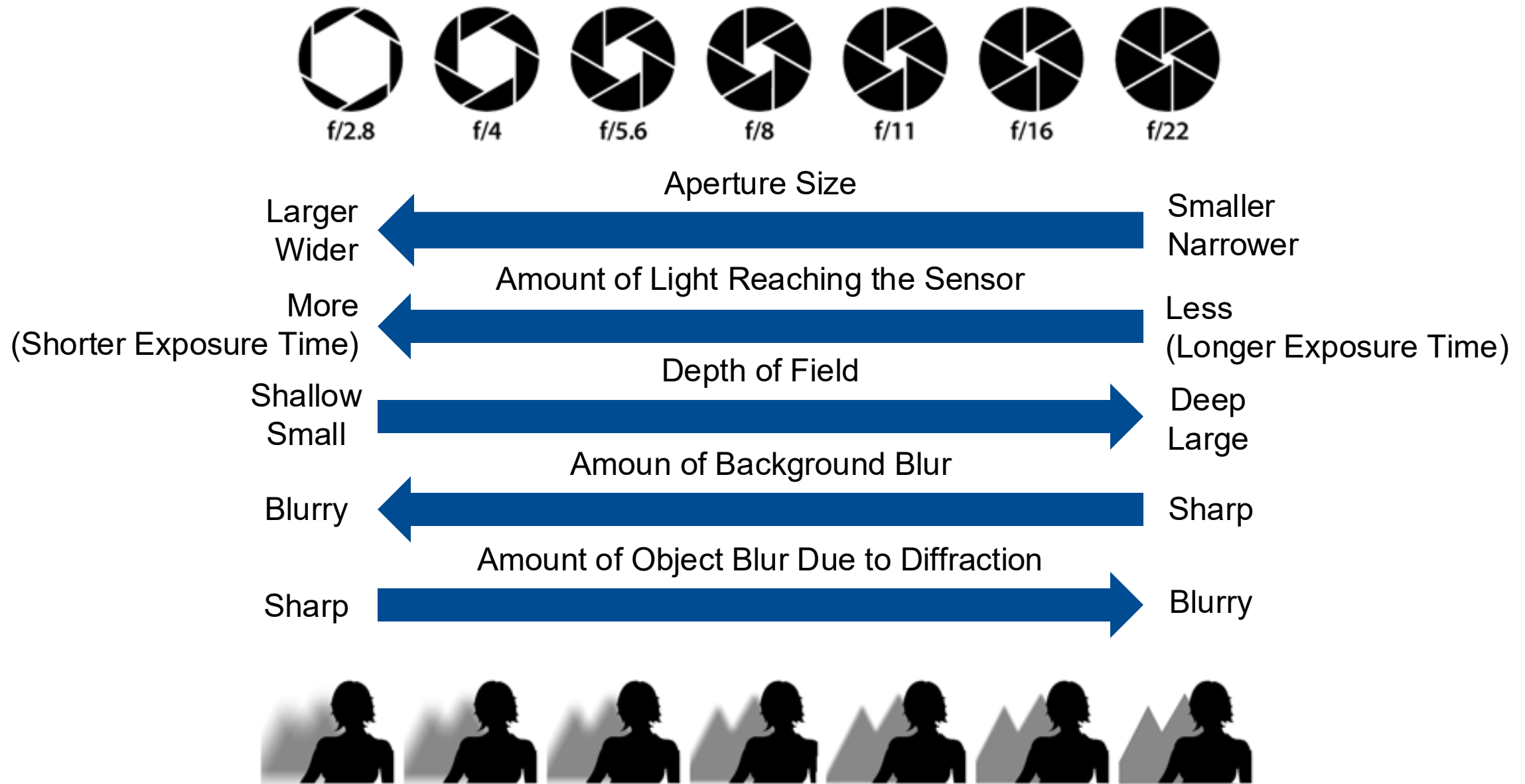
Aperture = $f/4.0$. DOF = 2.2 cm



Aperture = $f/22$. DOF = 12.4 cm

Wiki

Formação da imagem



Formação da imagem

Desfoque de movimento (*motion blur*): efeito de rastro (*streak*) de objetos em movimento devido à aquisição de imagens com longa exposição



Lentes

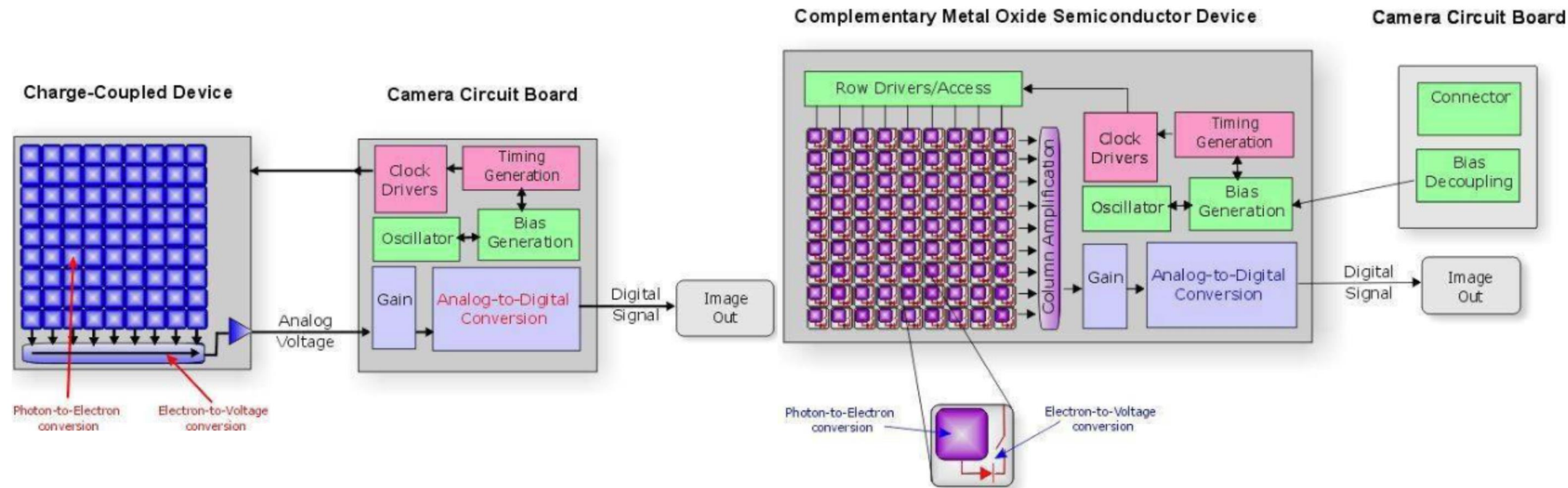
- Lentes macro: medição de detalhes
- Lente grande angular: aumento do campo de visão (distorções ópticas consideráveis)
- Lentes telecêntricas: eliminam efeitos de perspectiva (magnificação do objeto constante)
- Anéis/tubos de extensão: aumento da magnificação



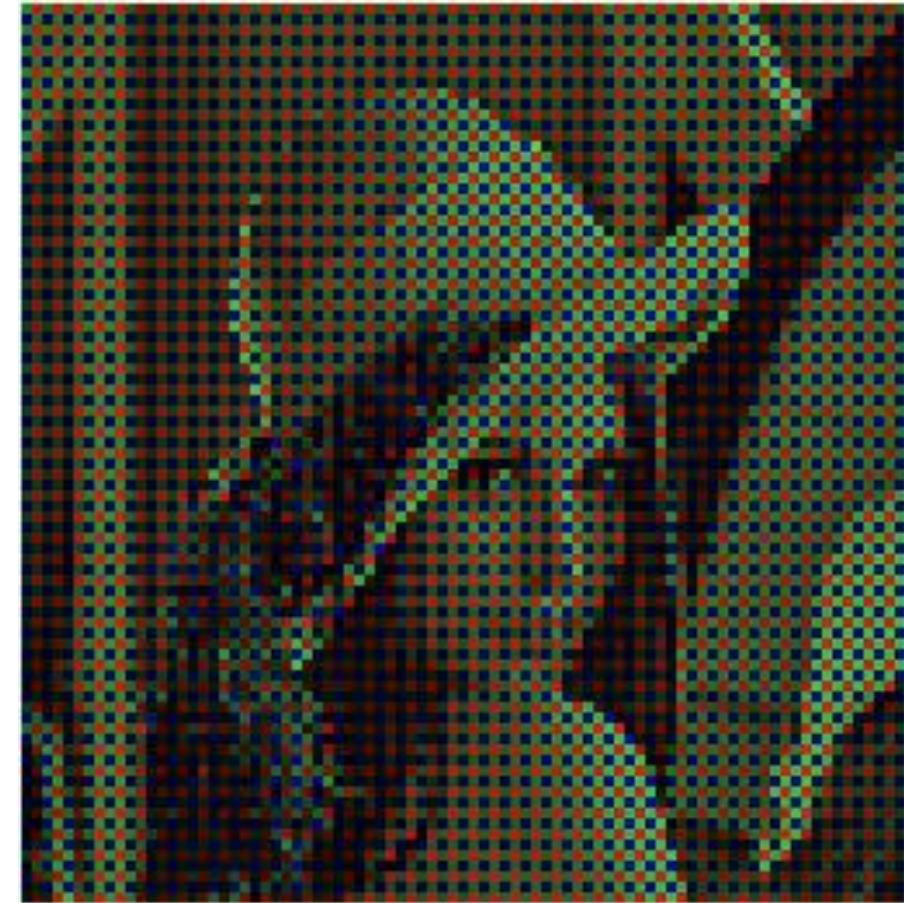
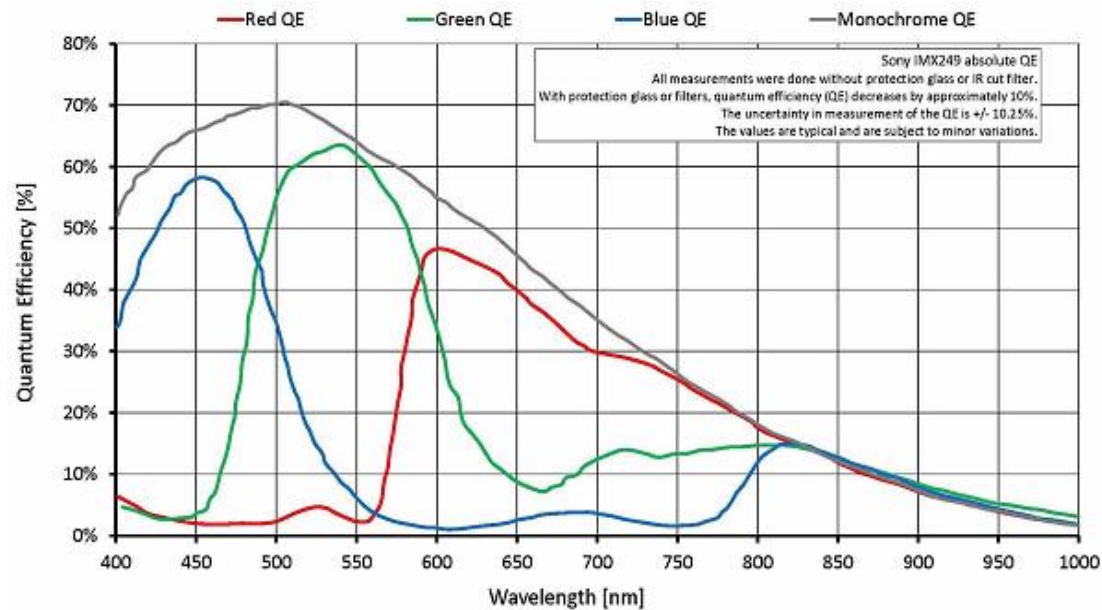
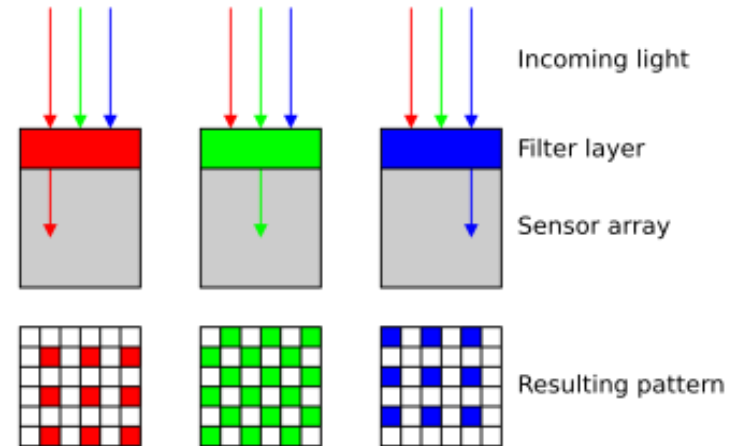
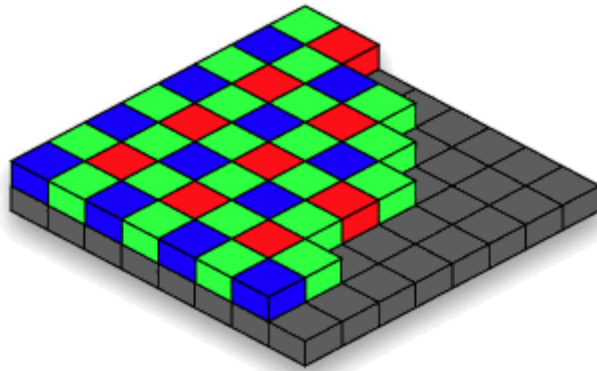
Câmeras

Tecnologias para captura de imagens digitalmente (conversão de photons em bits):

- Sensores CCD (*charge-coupled device*) movem a carga fotogerada de pixel para pixel e a convertem em tensão em um nó de saída
- Sensores CMOS (*complementary metal oxide semiconductor*) convertem a carga em tensão dentro de cada pixel



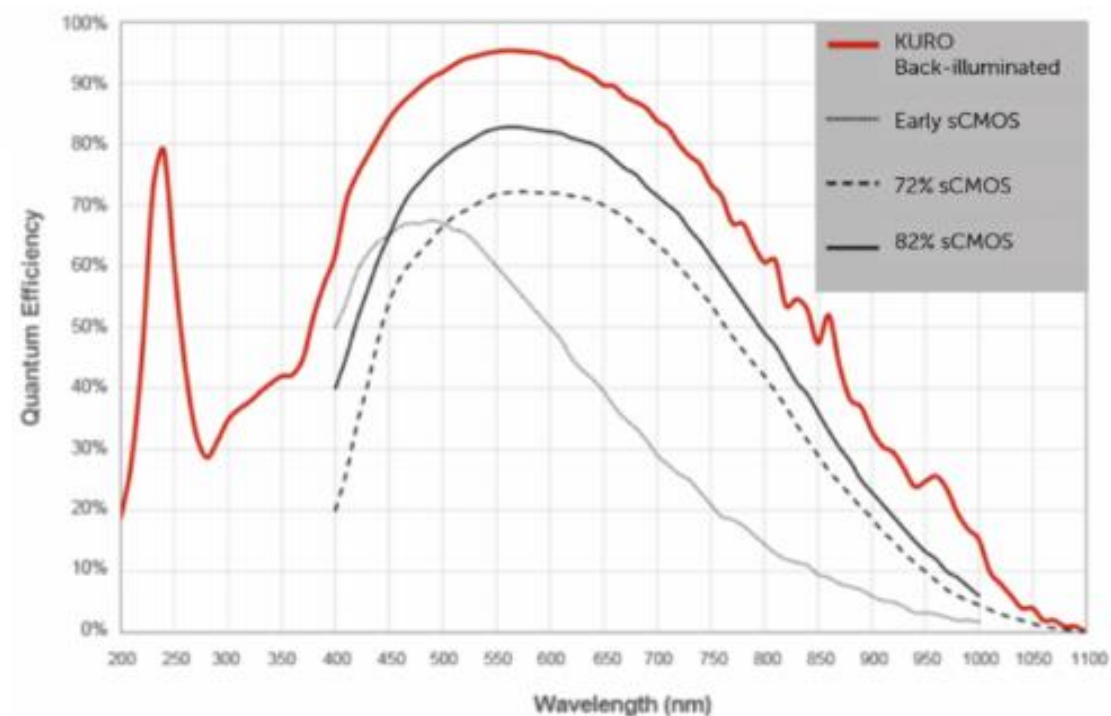
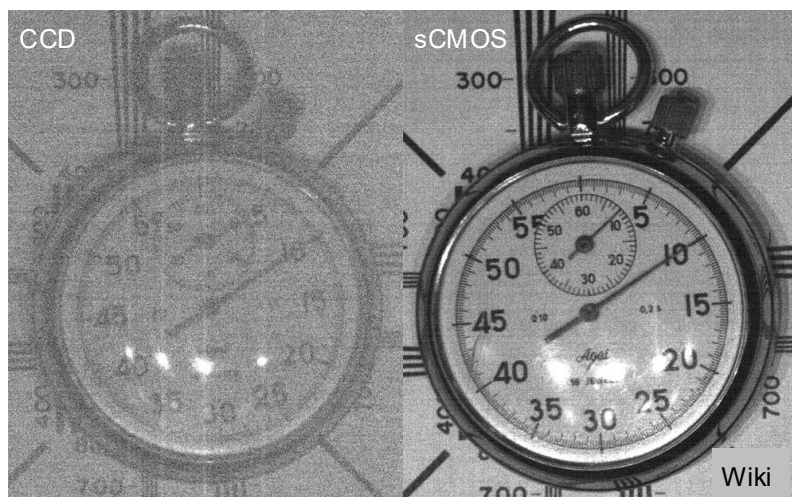
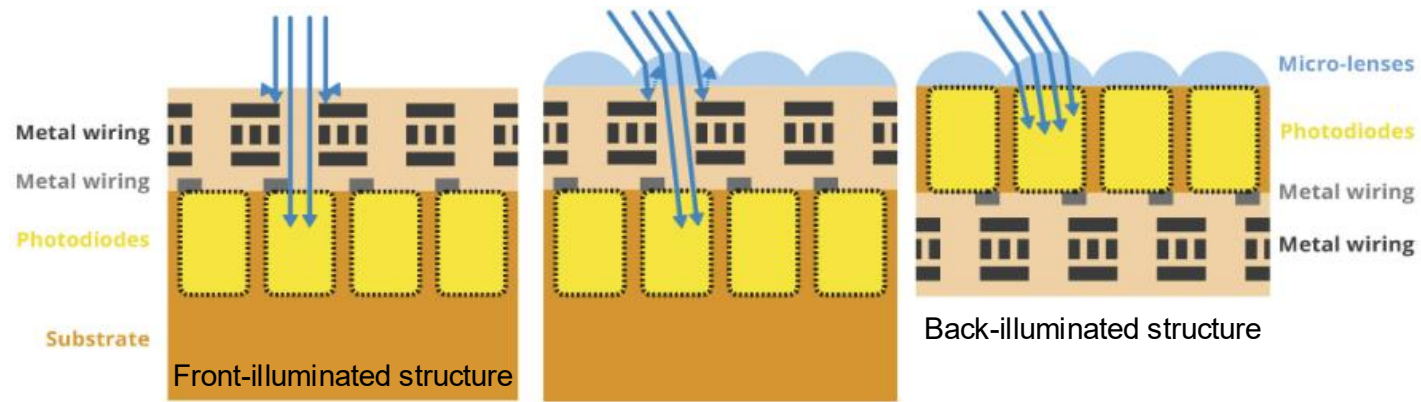
Imagens coloridas (RGB): filtro Bayer



Câmeras

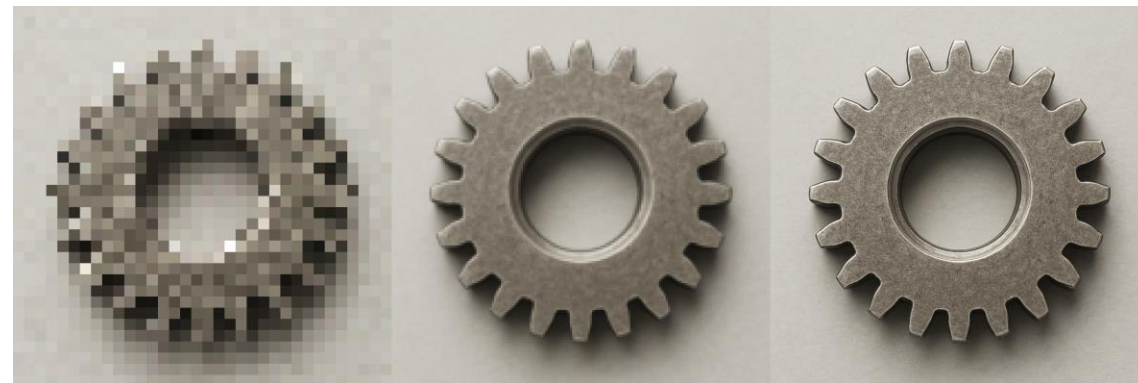
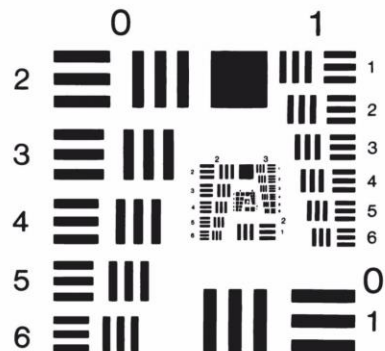
sCMOS (*scientific CMOS*):

- Bom equilíbrio entre sensibilidade, velocidade e resolução (híbrido entre CCD e CMOS)
- Geralmente utiliza sensor retroiluminado (*back-illuminated*), microlentes, resfriado e calibrado para maior eficiência quântica, redução de ruído térmico e diferença entre pixels

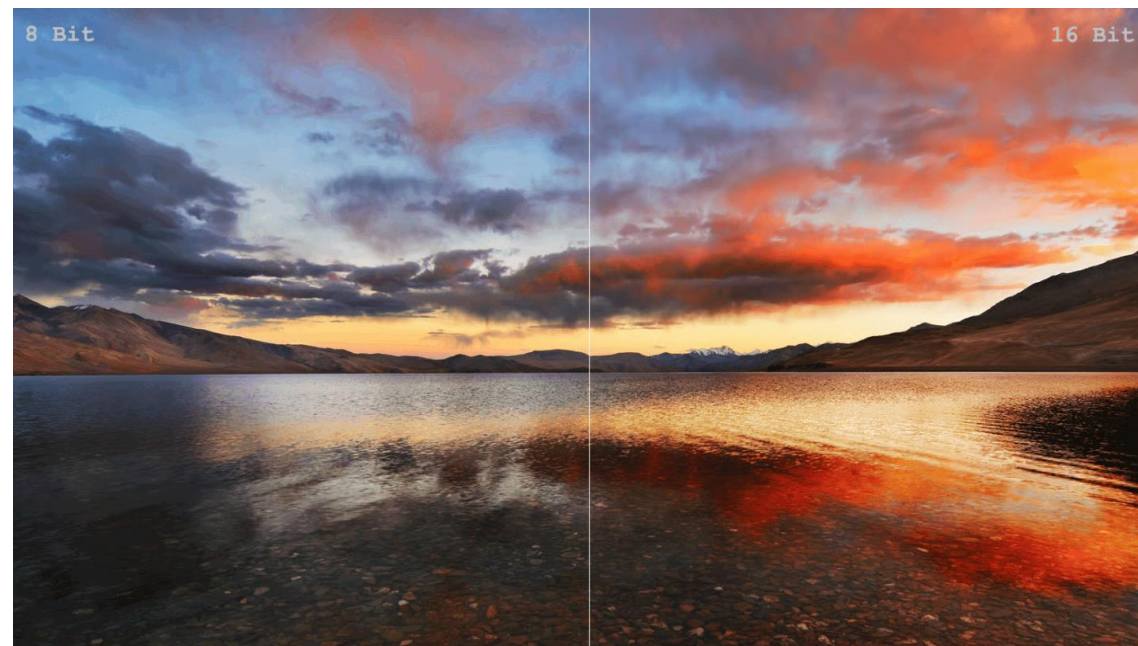
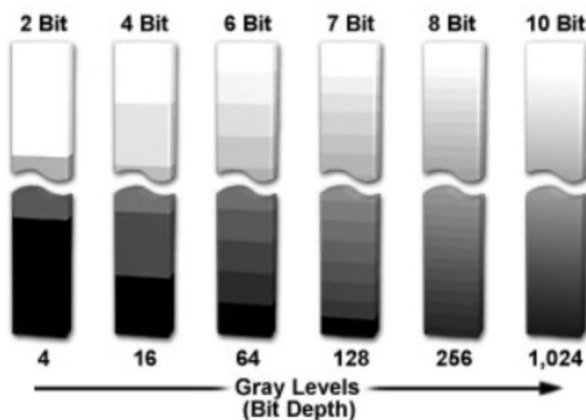


Câmeras

- Tamanho do sensor vs. resolução: percepção de detalhes

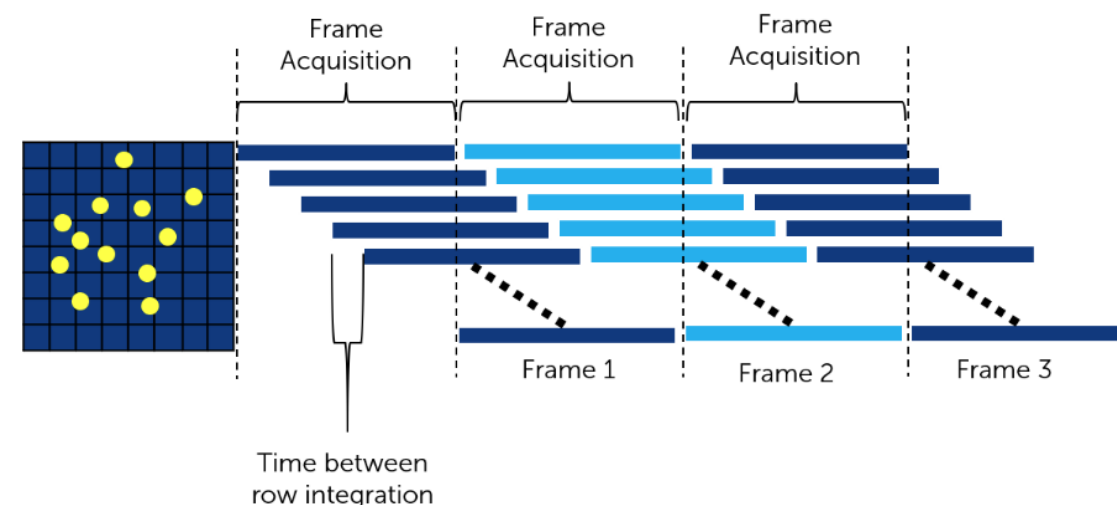
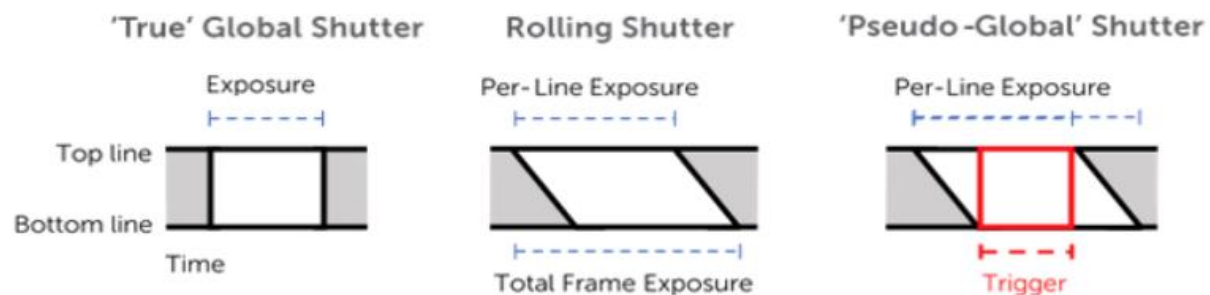


- Quantização, profundidade de bits ou níveis de cinza/cor: representação da intensidade luminosa (relacionada à faixa dinâmica)



Câmeras

- Aquisição de imagem: *global shutter vs. rolling shutter*
- *Global shutter*:
 - Exposição simultânea de todo o sensor
 - Imagem de processos rápidos
- *Rolling shutter*:
 - Aquisição linha por linha
 - Taxas de quadros (*frames per second, fps*) mais altas
 - Ruído de leitura mais baixo
 - Distorções de objetos em movimento rápido



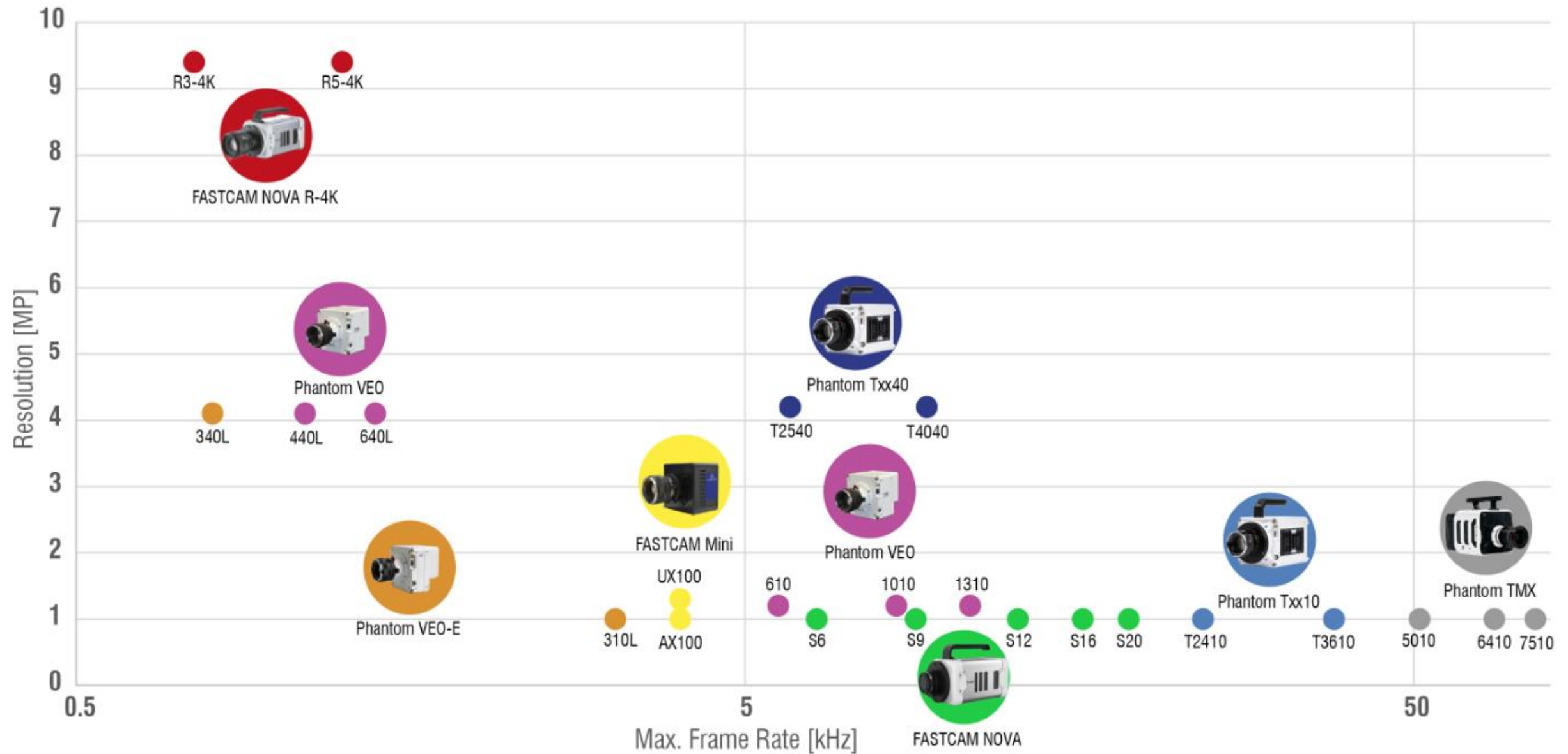
Câmeras

Comparação entre sensores (características podem desviar dependendo da câmera)

	CCD	CMOS	sCMOS
Resolução	Alta	Baixa	Moderada
Faixa dinâmica	Alta	Baixa	Alta
Sensibilidade	Alta	Baixa	Alta
Ruído	Moderado	Alto	Baixo
Qualidade da imagem	Alta	Baixa / Moderada	Alta
Velocidade de captura	Baixa	Baixa / Alta	Baixa / Alta
Consumo de energia	Alto (ca. 100x)	Baixo	Baixo
Custo	Moderado	Baixo	Alto

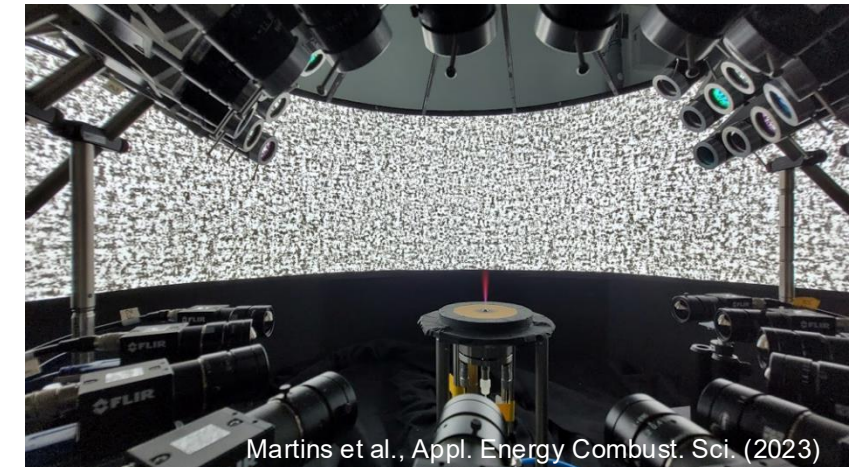
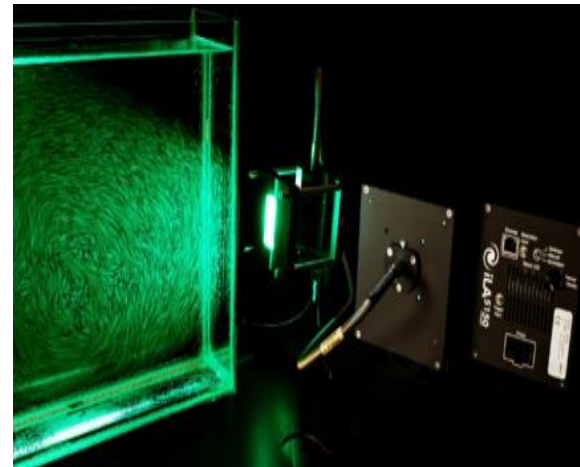
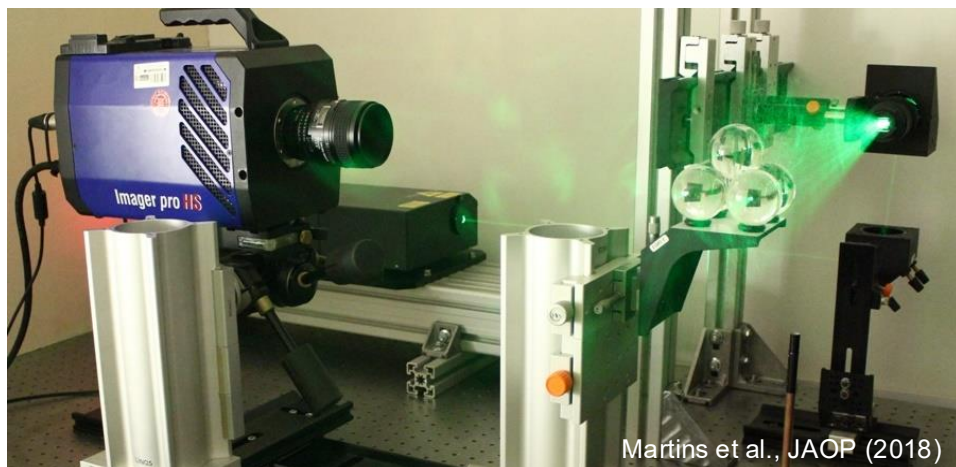
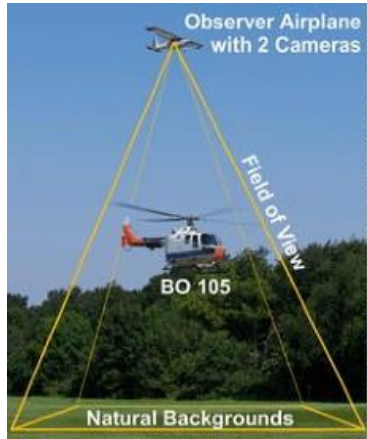


Câmeras



Iluminação

Natural, estruturada, laser, LED, retroiluminação (*backlight*)



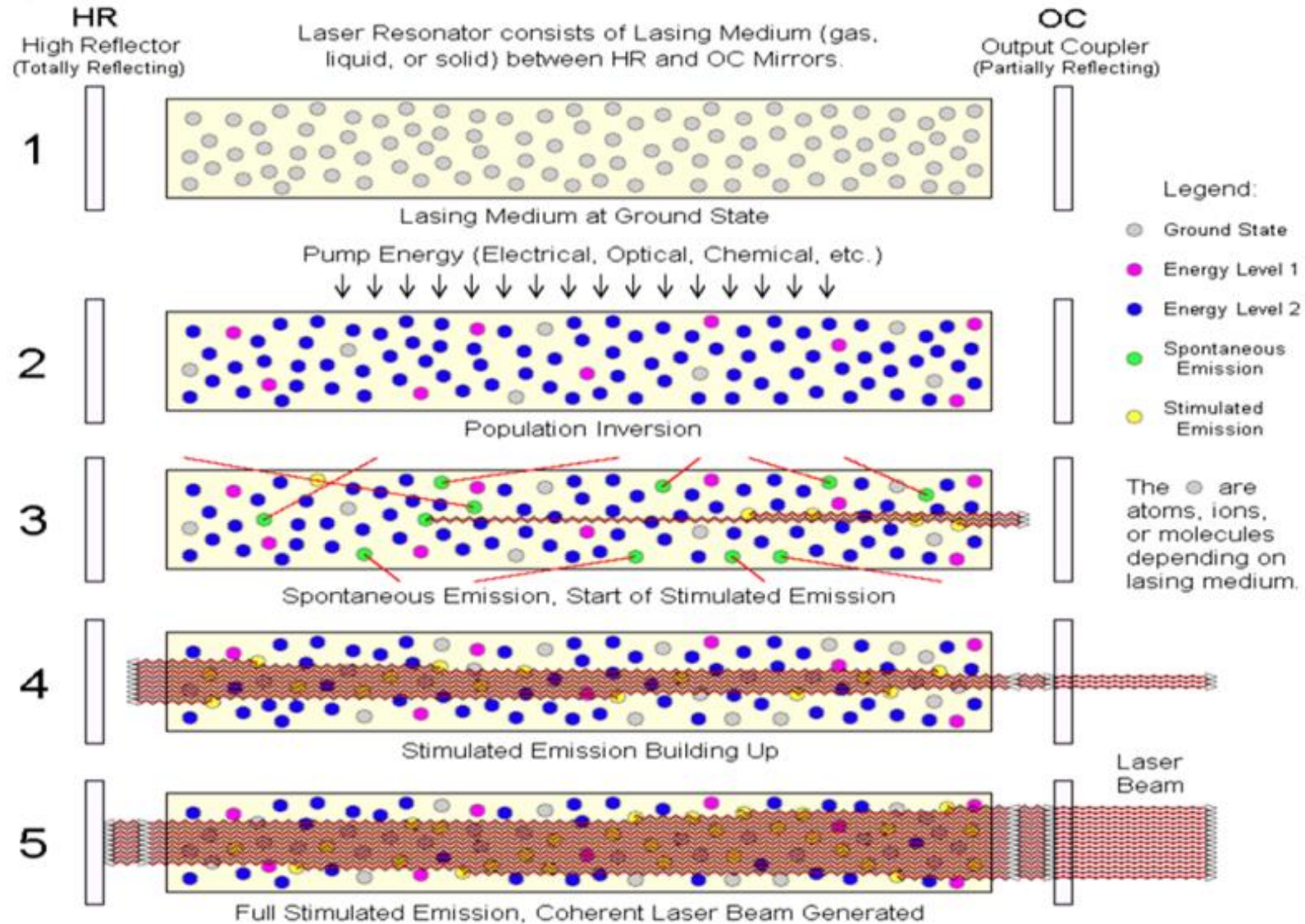
Iluminação

Laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*):

- Feixes de luz com direção bem definida e alta coerência espacial (baixa divergência)
- Luz monocromática e alta coerência temporal (campos elétricos oscilam em fase)
- Alta densidade de energia (luz contínua ou pulsada)
- Luz polarizada linearmente (o campo elétrico oscila em uma determinada direção)
- Tipos de laser: sólido (YAG, Rubi...), gás (He, Ne, CO₂...), líquido (*dye*), químico, semiconductor
- **Atenção:** medidas de segurança são necessárias na operação de lasers classe II-IV



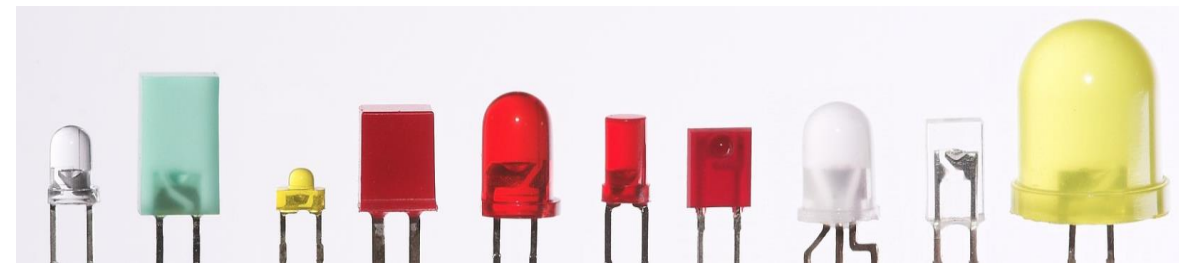
Laser



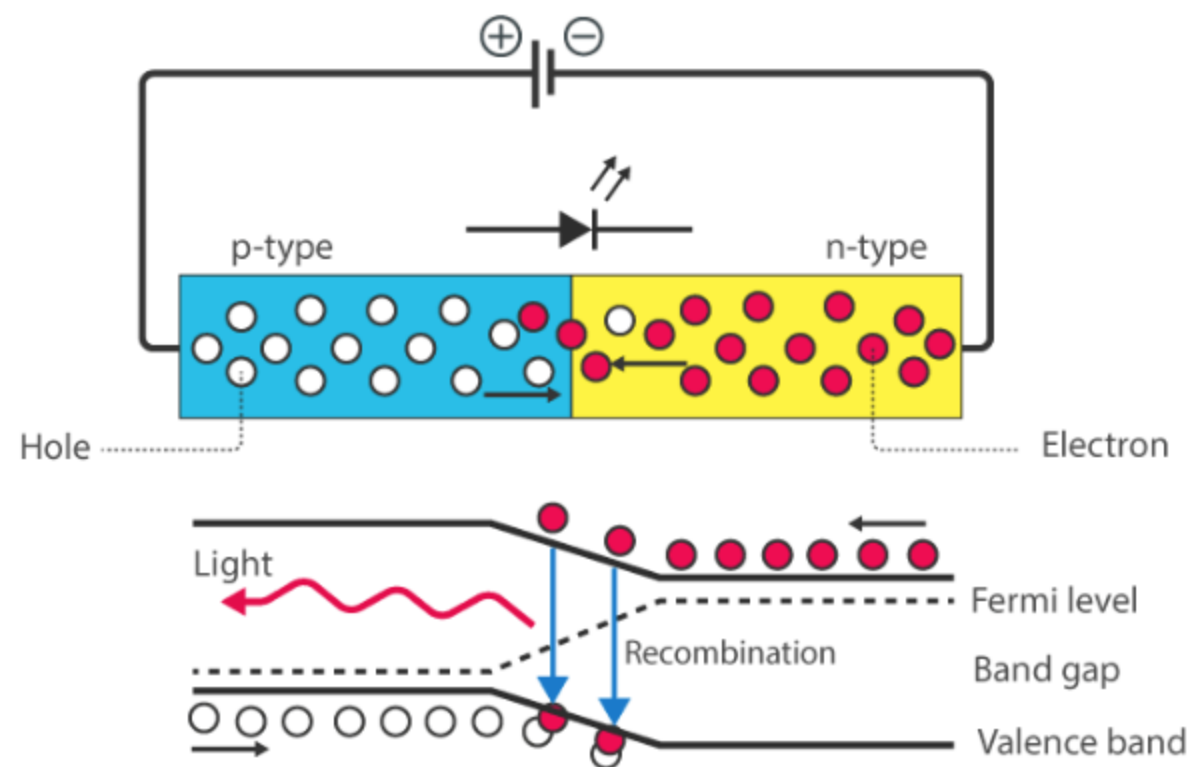
G F Verbeck, 2006

LED (*light emitting diode*)

- Dispositivo semicondutor com junção p-n altamente dopada que emite luz quando uma corrente elétrica passa por ele
- Sua cor (comprimento de onda espectral) depende do material semicondutor usado e na quantidade de dopagem
- Vantagens: consomem pouca energia e exigem baixa tensão operacional, não necessitam de tempo de aquecimento, luz monocromática, longa vida útil e robustez

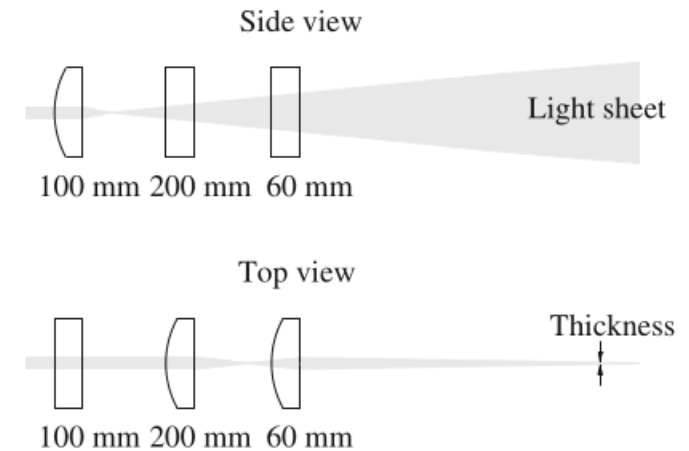
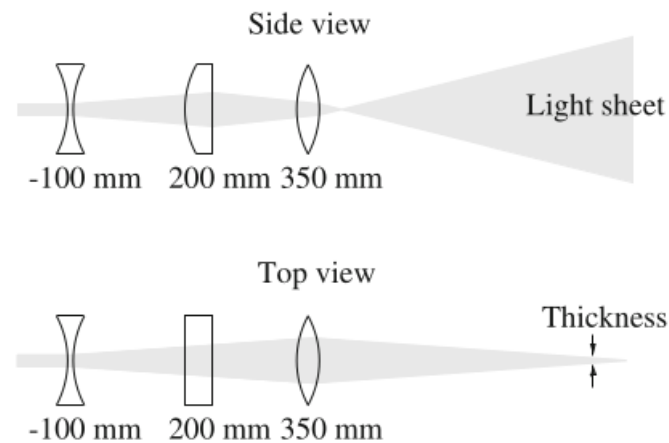
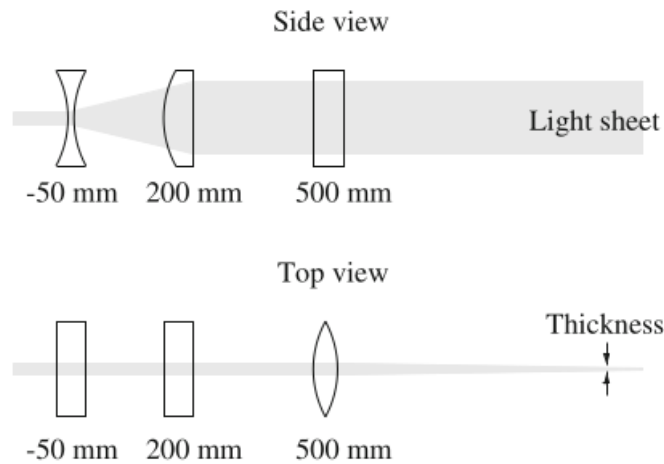
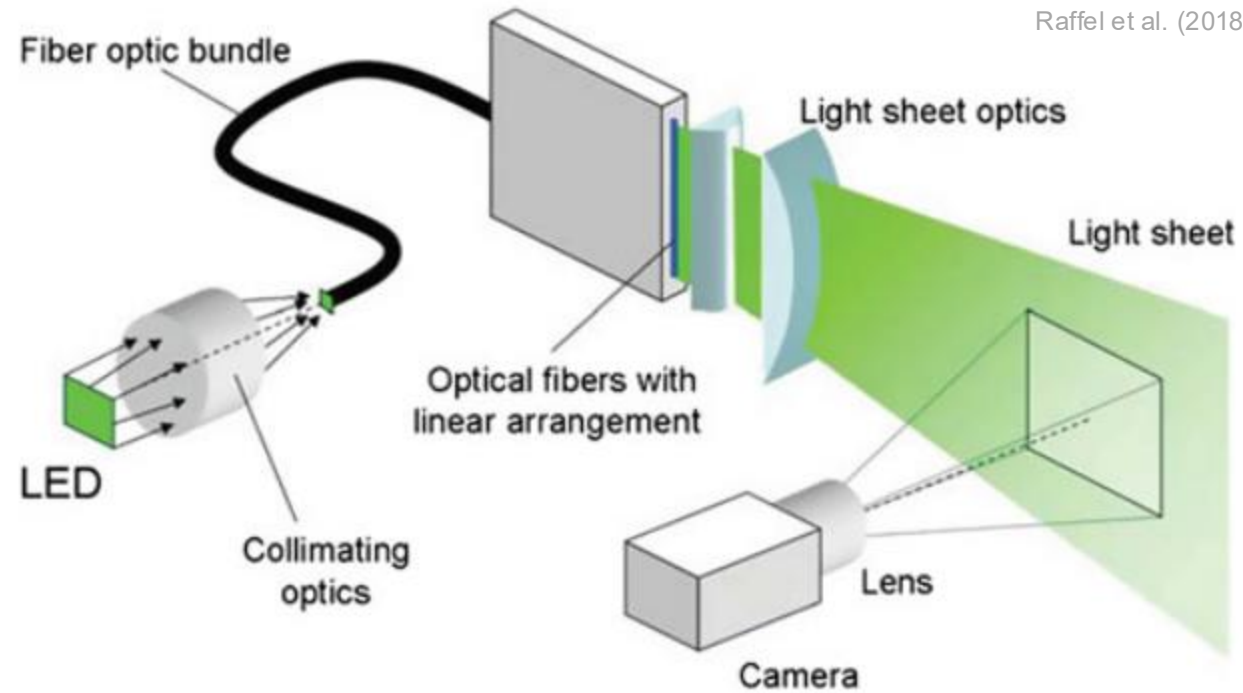


Wiki



© Byjus.com

Plano de luz



Importância do contraste

