

Câmeras de Vídeo

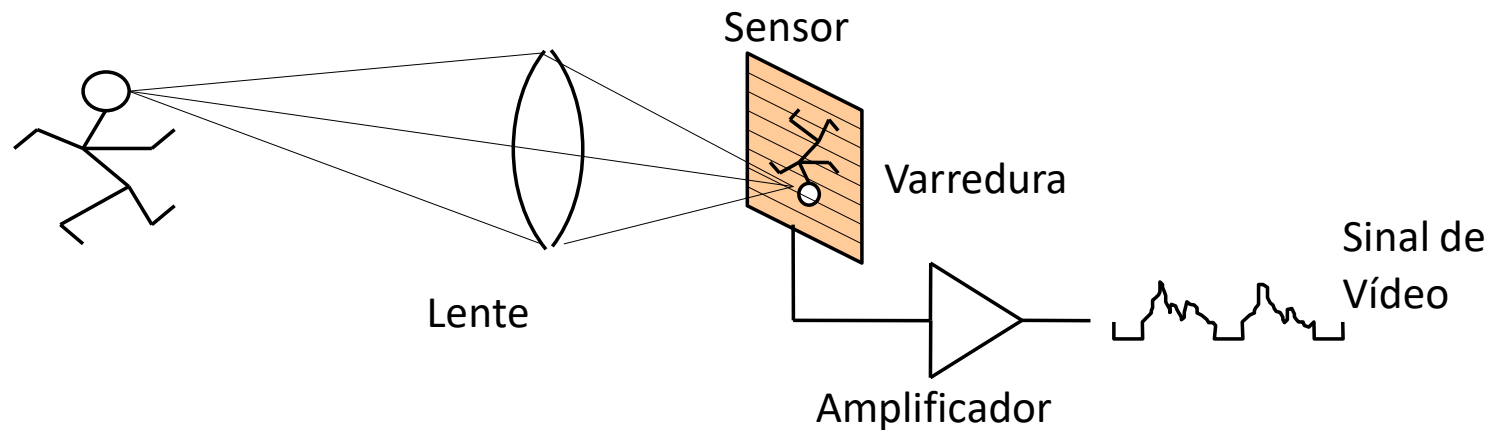
PTC3547 – Codificação
eTransmissão Multimídia
Guido Stolfi

EPUSP – 2025



- Parâmetros básicos de uma câmera de Vídeo
- Evolução dos Sensores
- Câmeras Tricromáticas
- Sensores CCD
- Processamento de Sinal
- Desafios e Tendências
- Estado da Arte

Sistema Óptico de uma Câmera



$$E = \frac{\pi B T}{4 F^2}$$

E = Iluminamento no anteparo (nits ou candelas/m²)

B = Luminância do objeto (lux ou lumens/m²)

T = Transmitância da lente

F = Abertura da lente (f / d)

Exemplo:



Sensor de 1/2" 3:4
Diagonal: 8 mm
Altura: $v = 4,8$ mm
Largura: $h = 6,4$ mm

Distância Focal = 35 mm
Abertura da Lente = 2

Campo de Visão Angular no infinito:

$\Theta_H = 10,4$ graus

$\Theta_V = 7,8$ graus

Diâmetro efetivo: $f/F = 17,5$ mm

$$\Theta_H = 2 \tan^{-1} \left(\frac{h}{2f} \right)$$

Parâmetros de uma Objetiva (ex.)

Distorção e Vinhetagem ("shading")

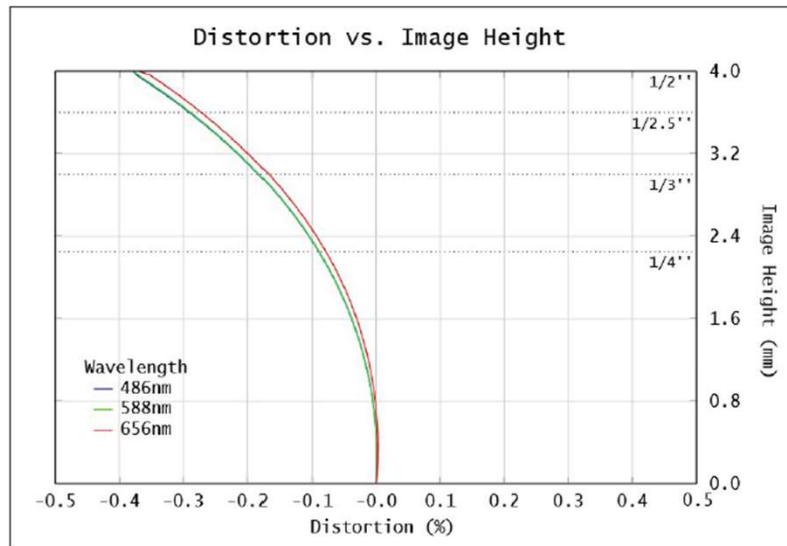


Figure 1: Distortion at the maximum sensor format. Positive values correspond to pincushion distortion, negative values correspond to barrel distortion.

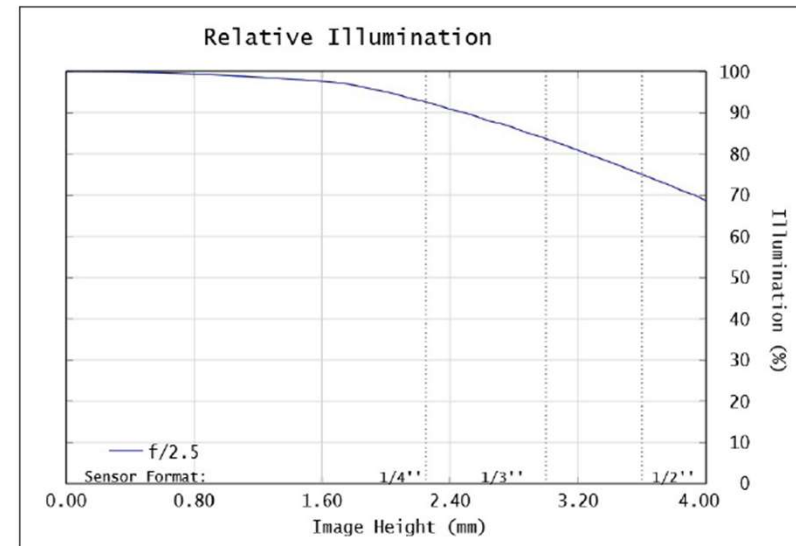
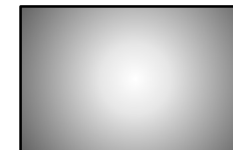
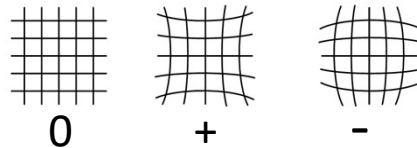
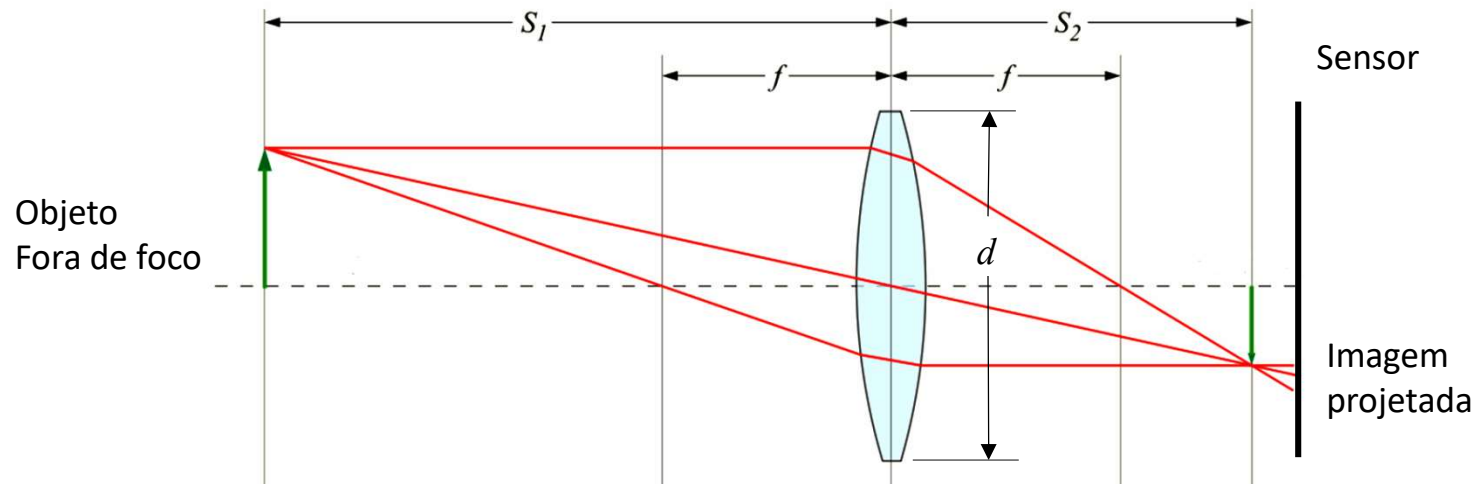


Figure 2: Relative illumination (center to corner)



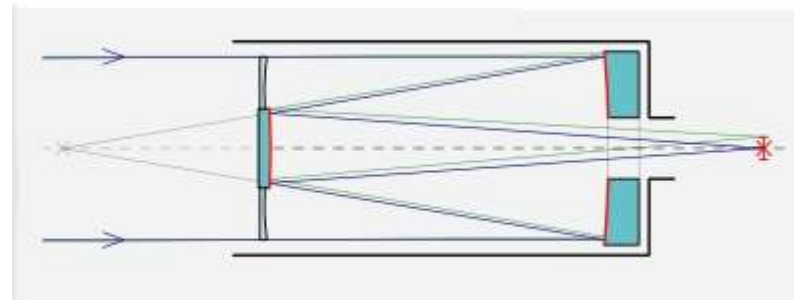
Disco de Confusão (“Bokeh”)



Disco de Confusão (“Bokeh”)



Objetiva catadióptrica (espelhos)



Parâmetros de uma Objetiva (ex.)

MTF e Profundidade de Campo

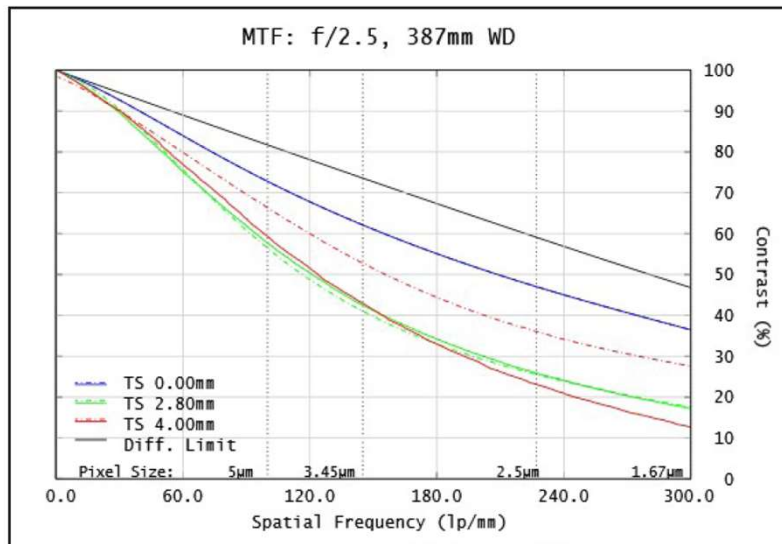


Figure 9: Image space polychromatic diffraction FFT Modulation Transfer Function (MTF) for $\lambda = 486\text{nm}$ to 656nm . Included are the Tangential and Sagittal values for field points on center, at 70% of full field and the maximum sensor format. Solid black line indicates diffraction limit determined by $f/\#$ -defined aperture. Frequencies corresponding to the Nyquist resolution limit of pixel sizes are indicated.

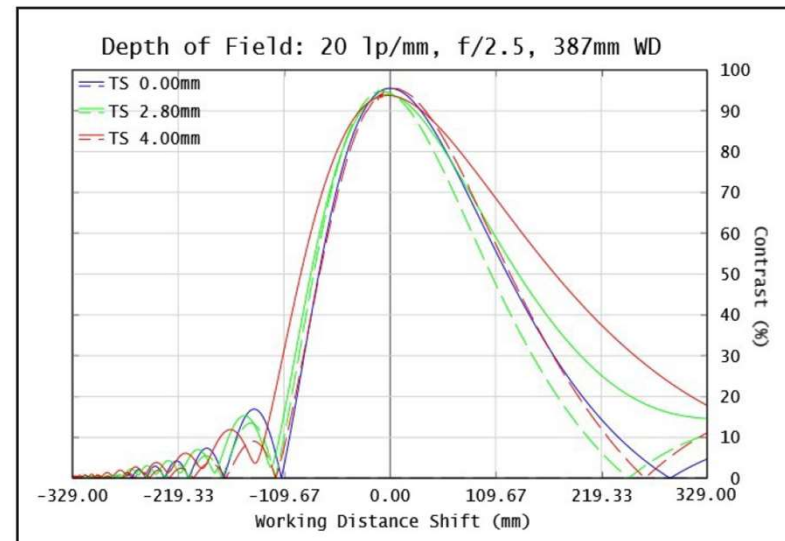
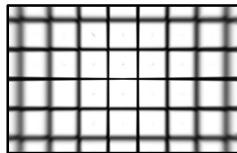
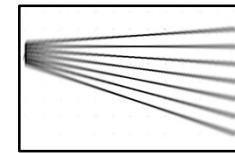
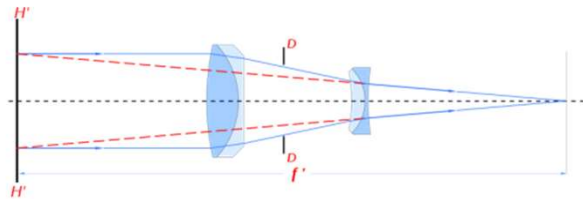


Figure 10: Polychromatic diffraction through-focus MTF at 20 linepairs/mm (image space). Contrast is plotted to two times the focus distance. Note object spatial frequency changes with working distance.

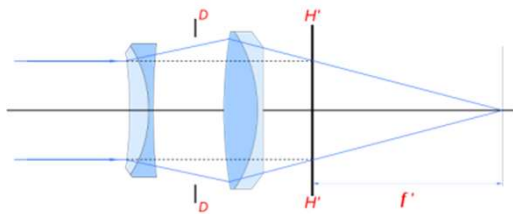


Tipos de Objetivas



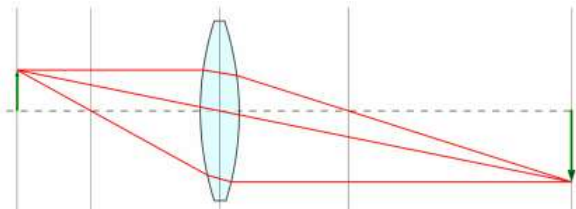
Teleobjetiva:

Conjunto de lentes com distância focal equivalente maior que a dimensão da objetiva



Grande-Angular:

Objetiva com distância focal menor do que uma lente normal à mesma distância do sensor



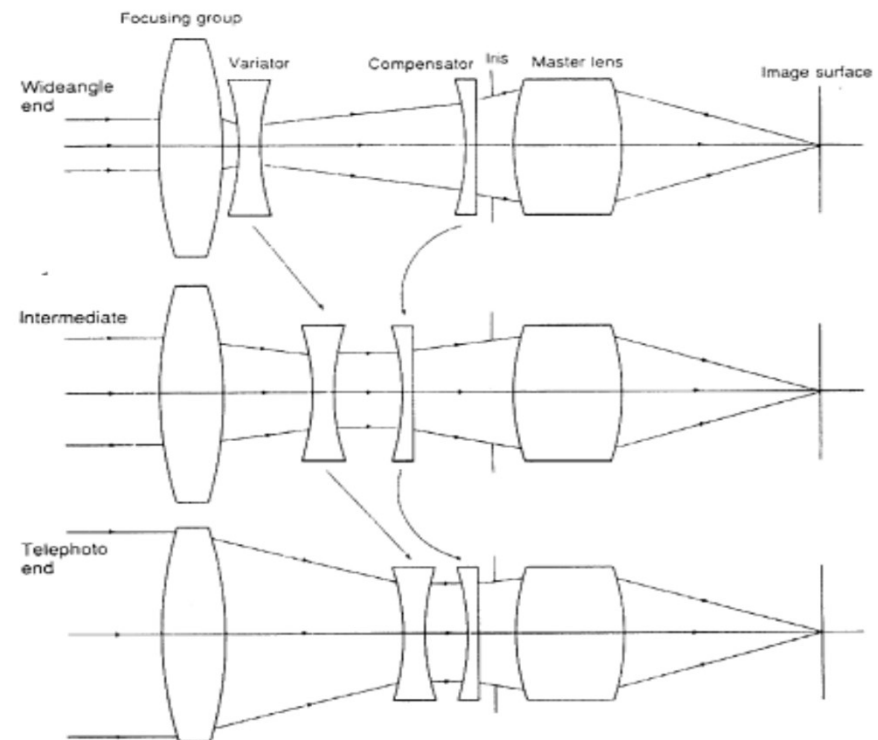
Macro:

Objetiva dimensionada para objetos próximos (imagem projetada é maior que o objeto real)

Lente “Zoom”

Zoom:

Objetiva com distância focal variável (e campo de visão angular idem)



- **Ganho:** Volts / lux, define o fundo de escala
- **Eficiência Quântica:** Porcentagem de fótons incidentes que provocam sinal elétrico no sensor, define a S/R
- **Índice de Exposição:** Equivalência com filme fotográfico

$$E_I = 280 \frac{F^2}{B \cdot T_X}$$

E_I = Índice de Exposição

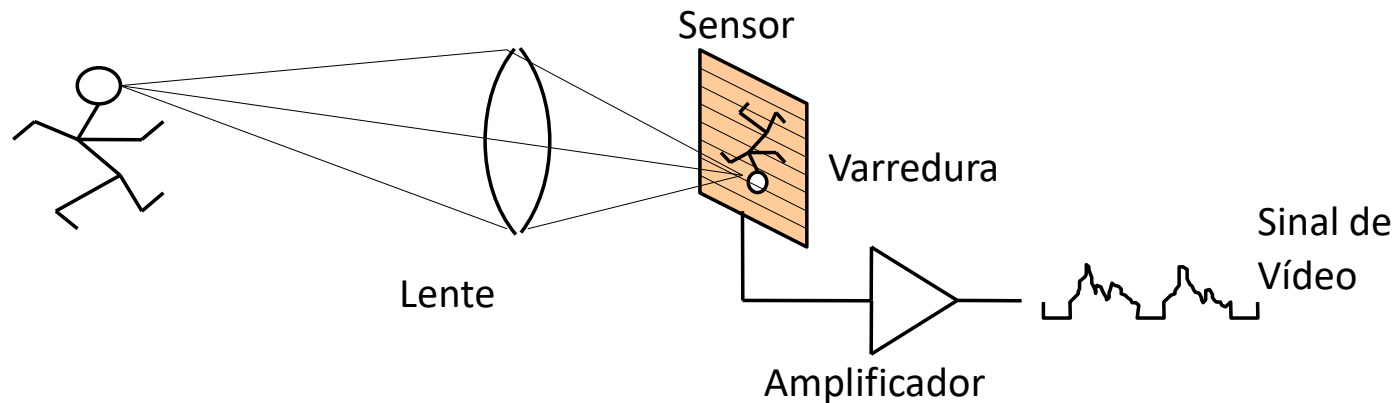
B = Luminância para produzir nível branco

T_X = Tempo de Exposição (normalmente 1/30")

F = Abertura da Lente

- **Definição:** relacionada com a resolução espacial (MTF)
- **Reprodução de Tons:** fidelidade na reprodução de escalas de intensidade (Linearidade, fator Gama)
- **Reprodução Cromática:** limites e precisão das regiões de cromaticidade (luminância, tonalidade, saturação)
- **Latitude de Exposição:** faixa dinâmica (linearidade em regiões de luz alta e baixa)

Resposta Espacial e Resolução



MTF total =

MTF(sistema óptico)

×

MTF(sensor)

×

MTF(varredura)

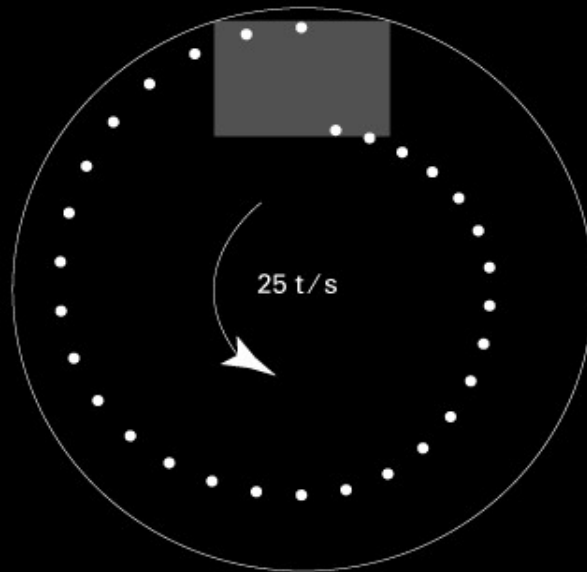
×

Resposta do Amplificador / digitalizador

Evolução dos Sensores

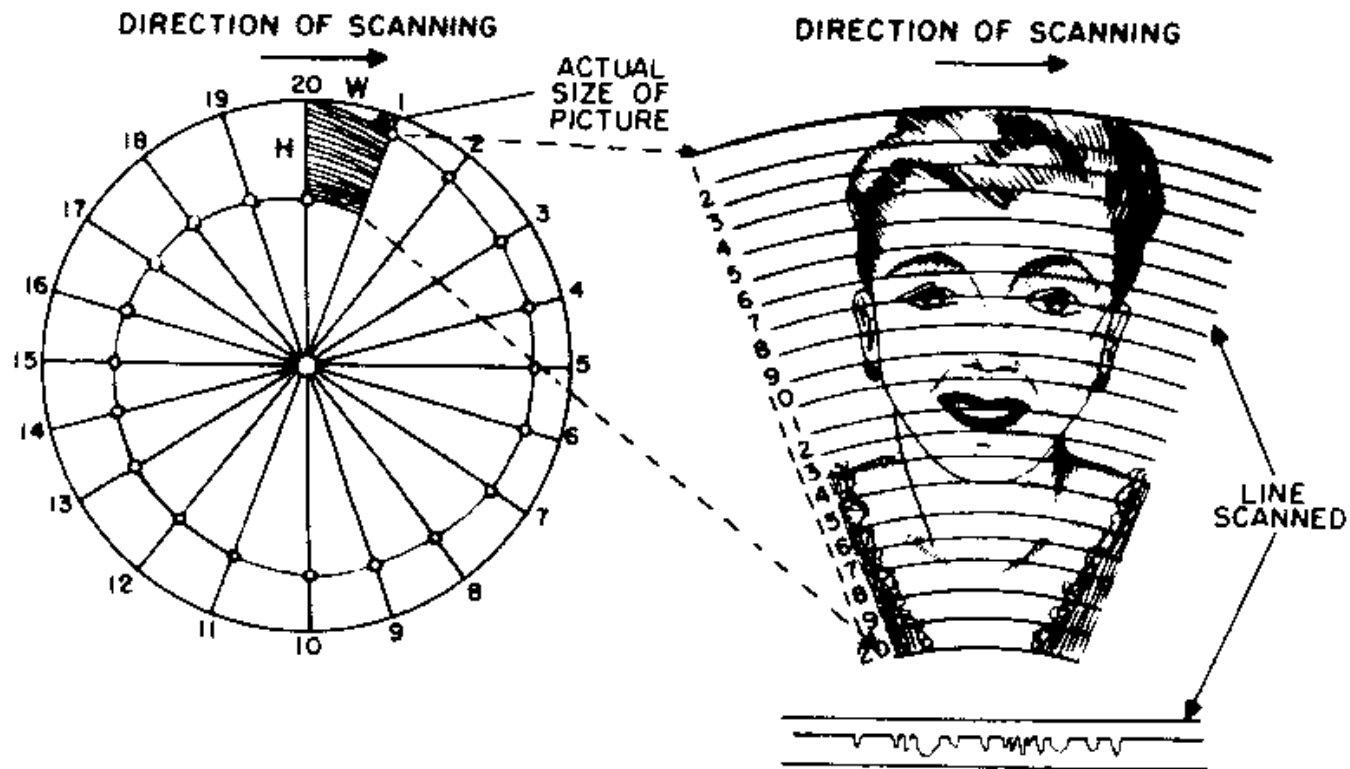
Disco de Nipkov

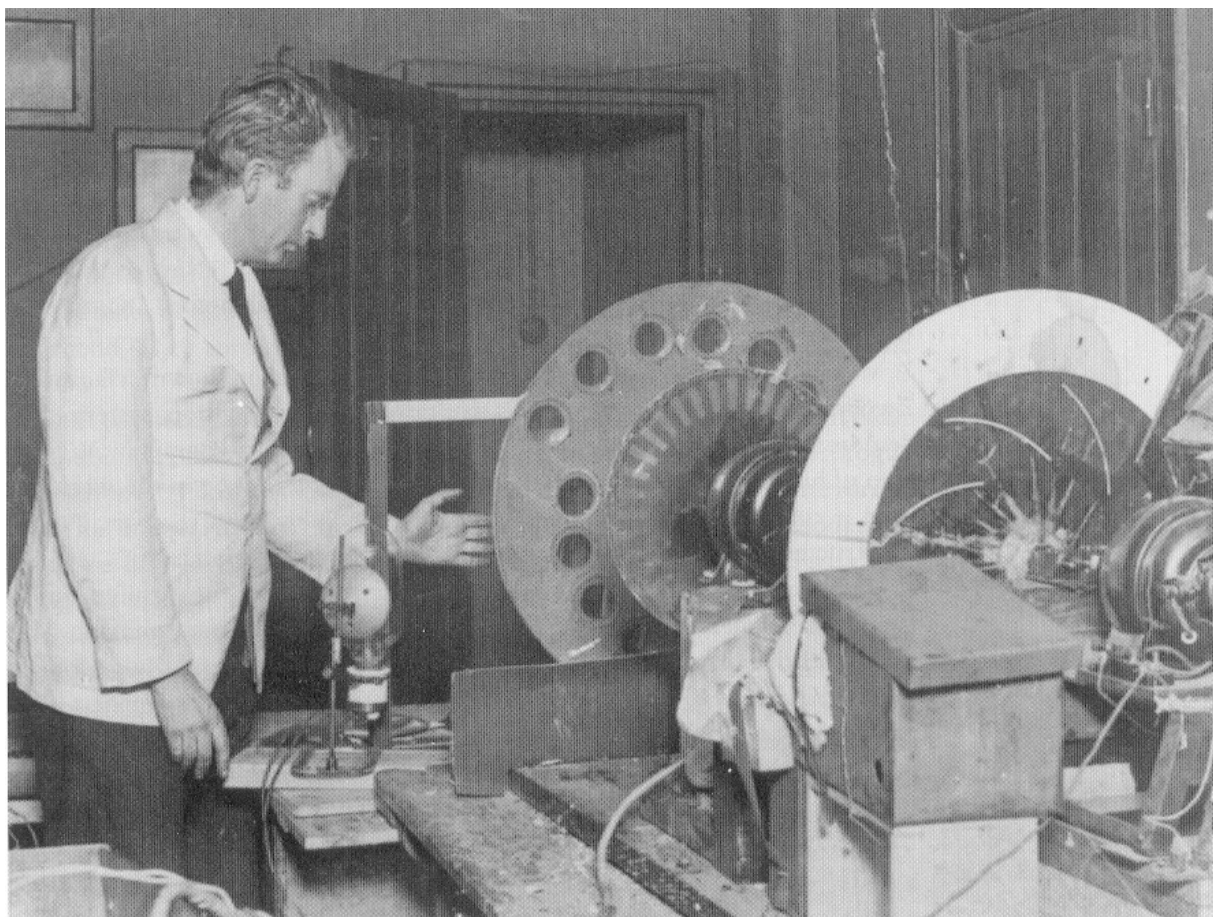
LCS
EPUSP



Varredura de Imagens por Disco Rotativo (Paul Nipkov -1884)

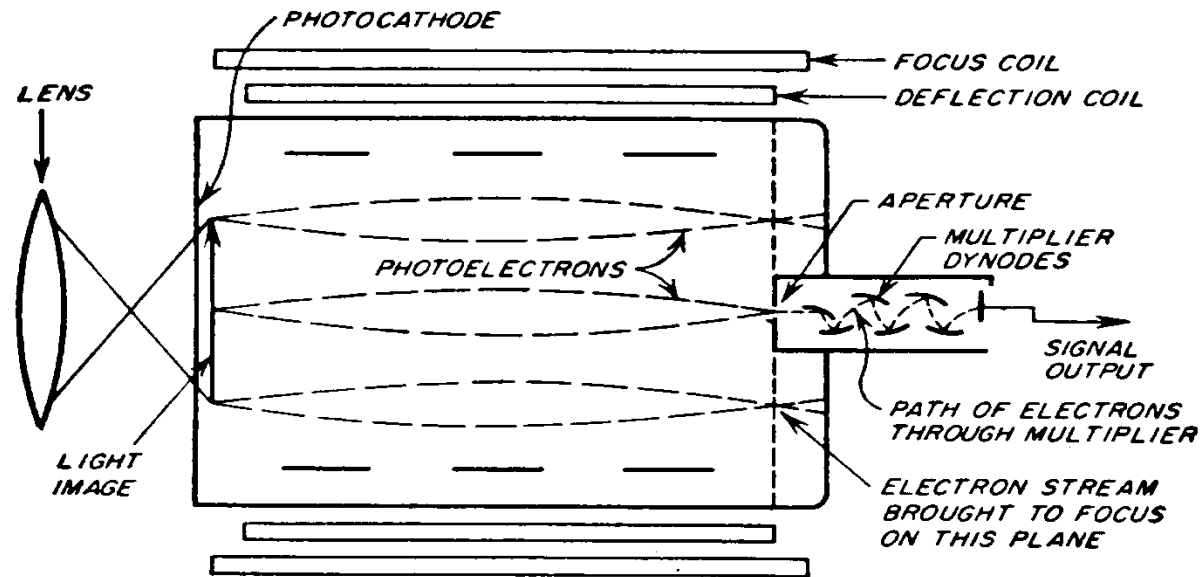
Varredura de uma Imagem por Disco de Nipkov





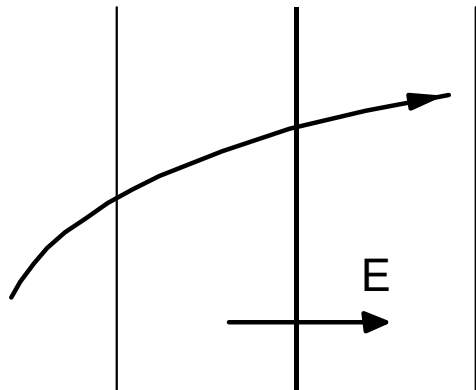
John Logie Baird com protótipo de Televisão (~1925)

- “Image Dissector” (Farnsworth, 1929)



Campo Elétrico:

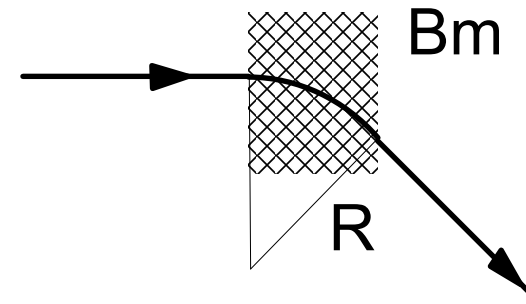
$$\overline{\Delta v} = \left(\frac{2e}{m} \vec{E} \Delta x \right)^{\frac{1}{2}}$$
$$\Delta v = 5,93 \times 10^5 \times \Delta V^{\frac{1}{2}}$$



$$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

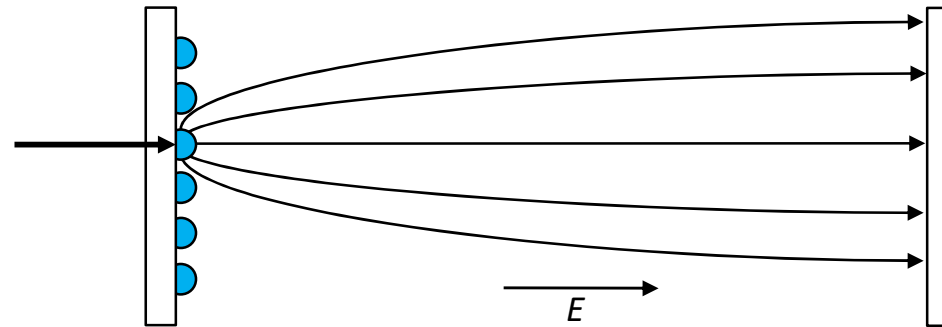
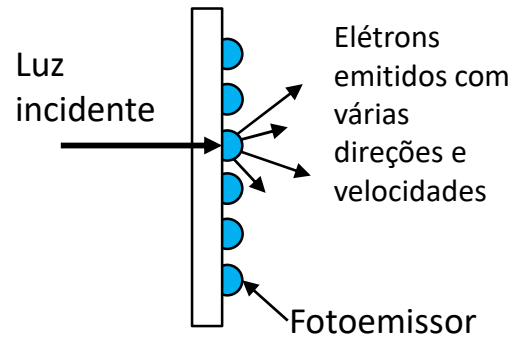
Campo Magnético:

$$R = \frac{3,38 \times 10^{-6} \times v^{\frac{1}{2}}}{B_m}$$

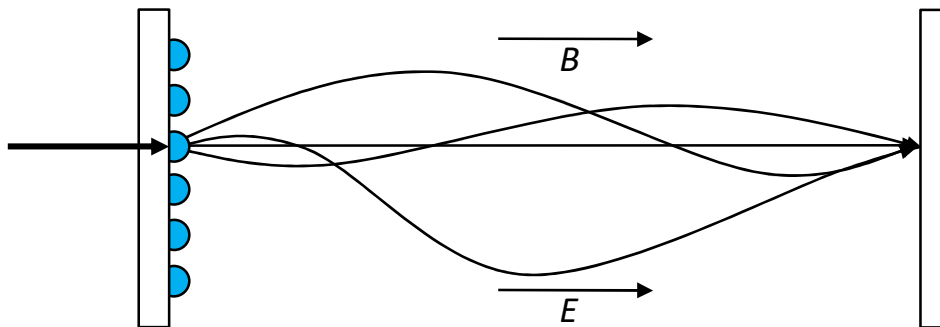


$$m = 9,1 \times 10^{-28} \text{ g}$$

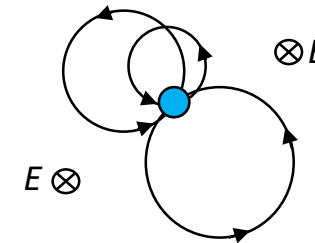
Trajétória de um Elétron



Aceleração dos elétrons por um campo elétrico uniforme



Deflexão por um campo magnético axial



Vista axial – foco magnético



Philo T. Farnsworth
e o seu "*Image Dissector*" (1929)

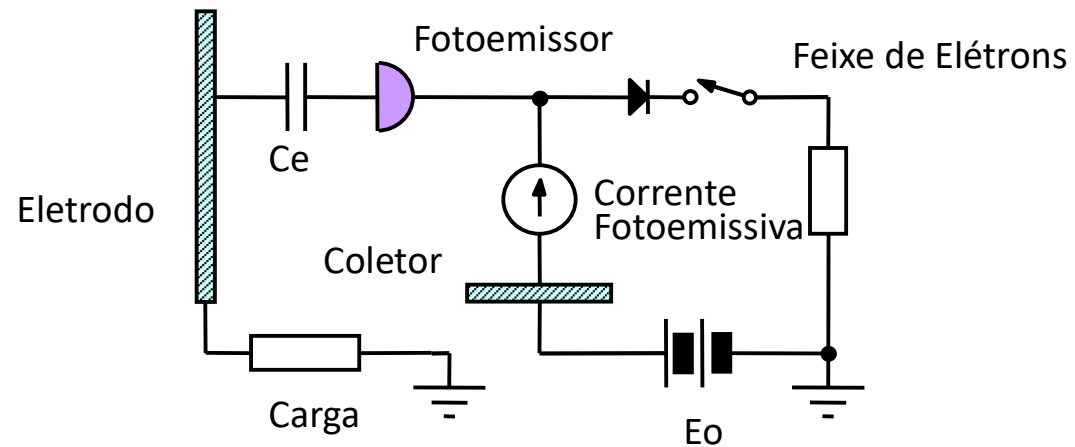
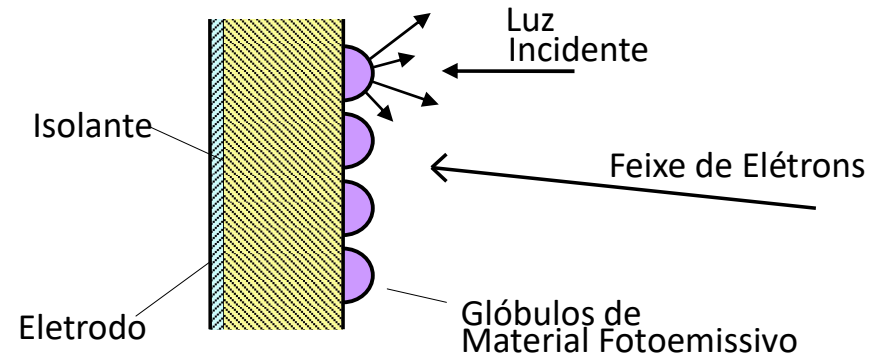
Problema: baixíssima eficiência luminosa

Transmissão: “Gato Félix” (1930)

LCS
EPUSP



Sensor Fotoemissivo Cumulativo

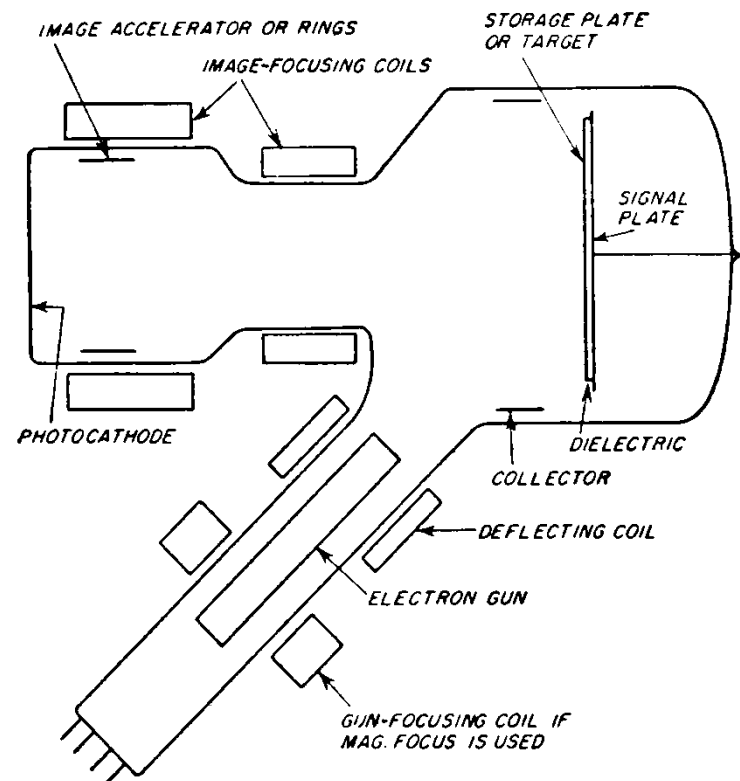


Iconoscópio



Iconoscópio com Amplificação

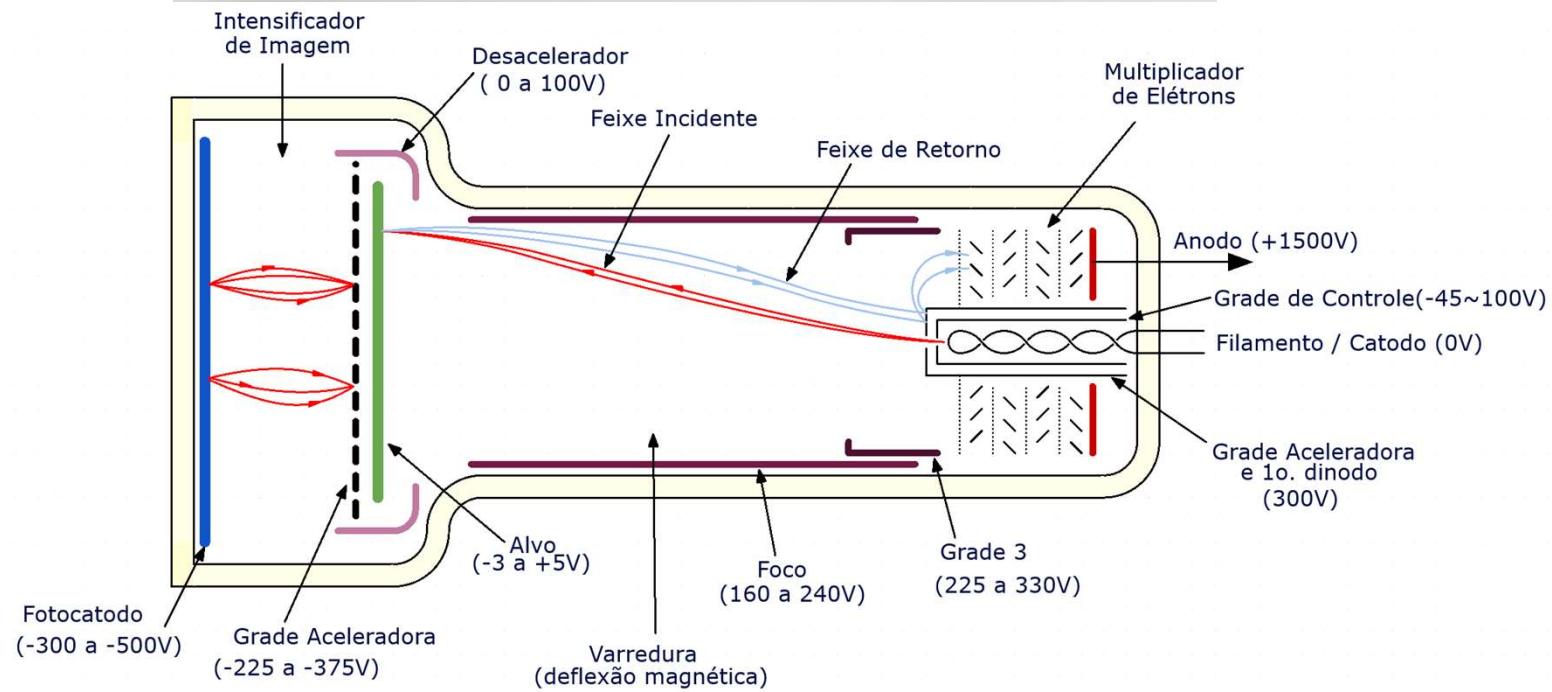
- Iconoscópio (Zworykin, 1939)



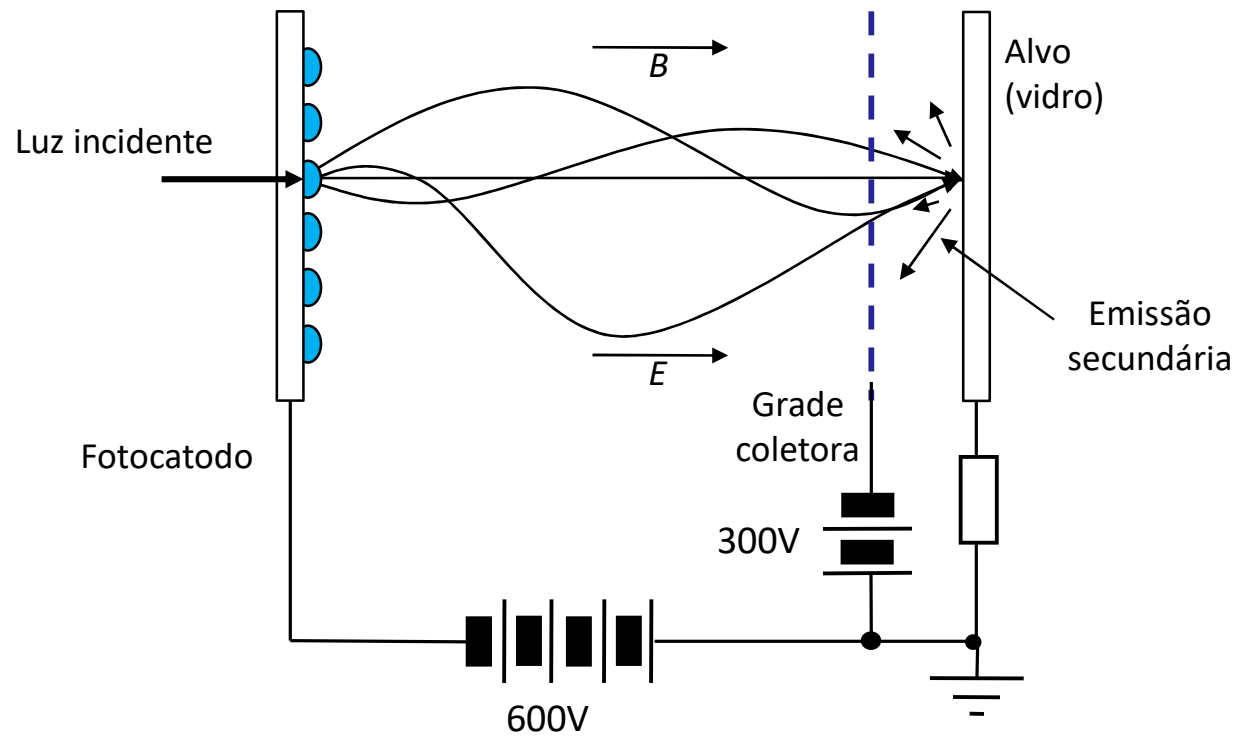


Vladimir Kosma Zworykin e seus Iconoscópios

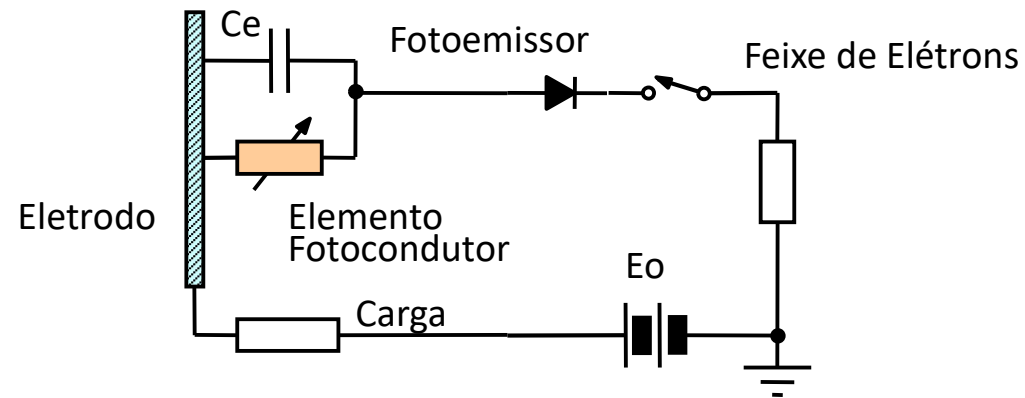
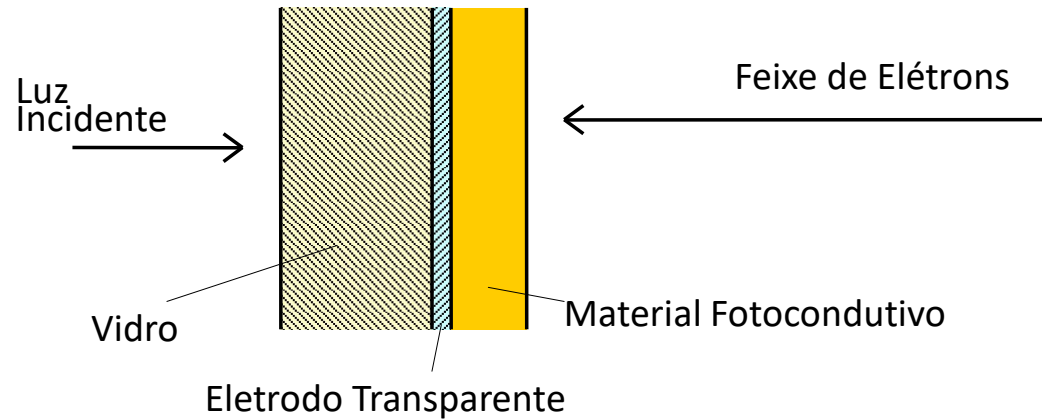
Orticon (*Image Orthicon*)



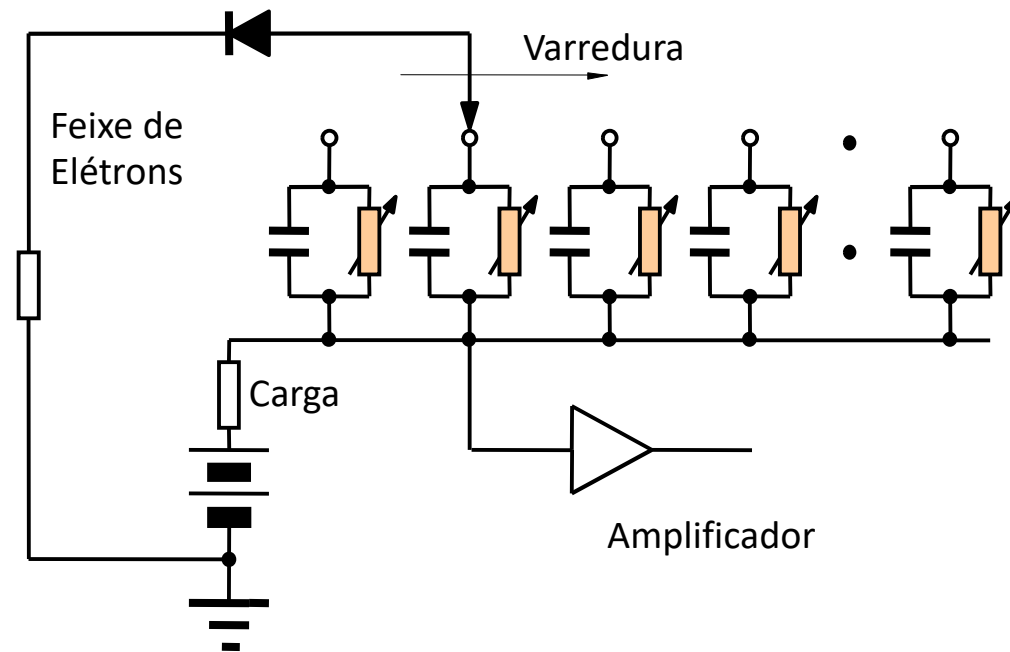
Intensificador de Imagem



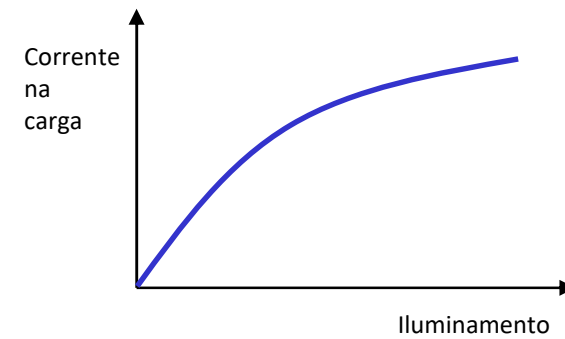
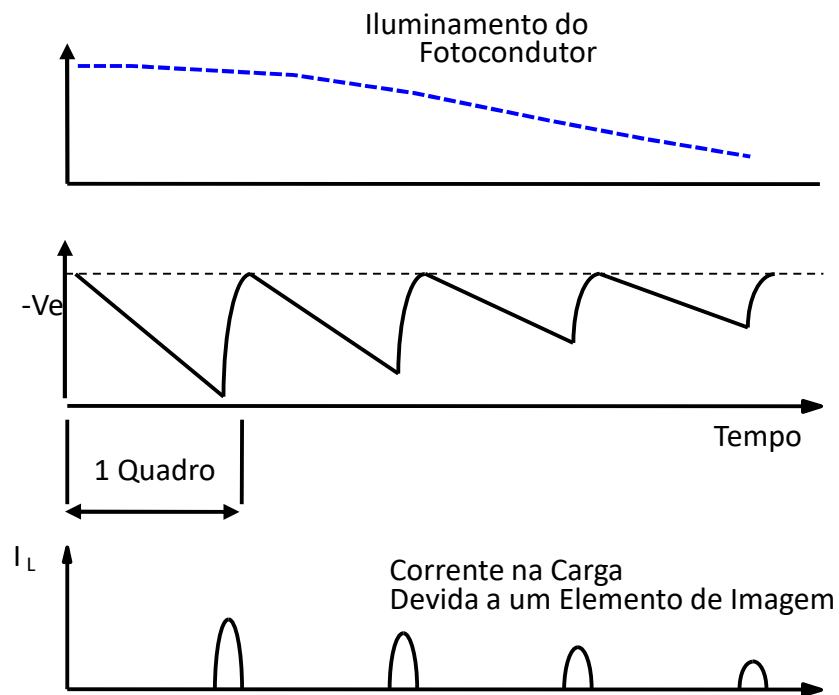
Sensor Fotocondutivo (*Vidicon*)



Câmera com Sensor Fotocondutivo



Câmera com Sensor Fotocondutivo



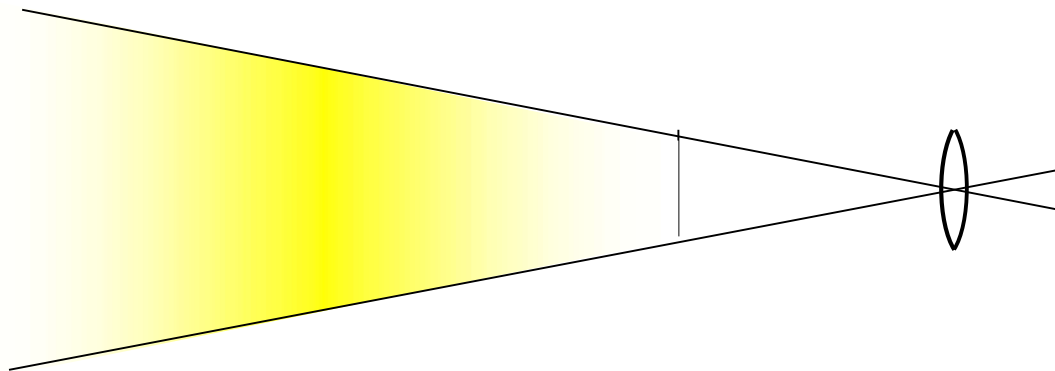
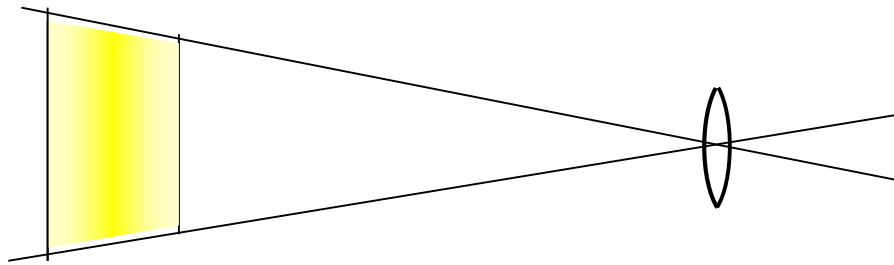
Iconoscópio, Orthicon e Vidicon



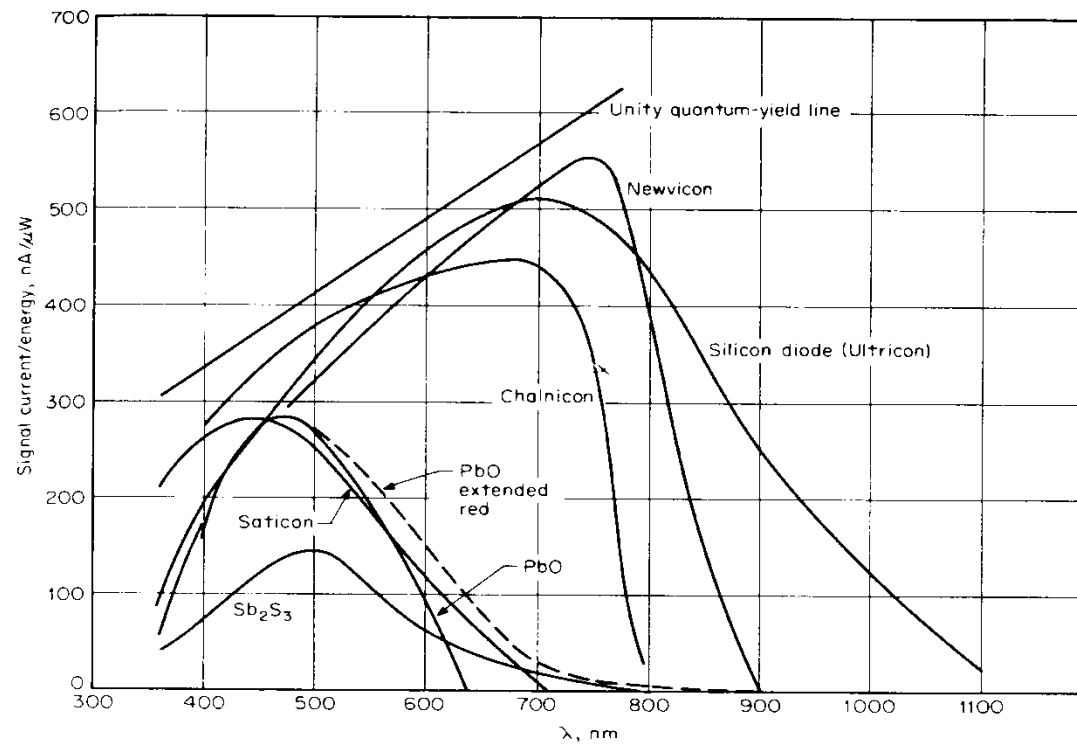
Profundidade de Campo



Profundidade de Campo



Sensibilidades Espectrais p/ Fotocondutores

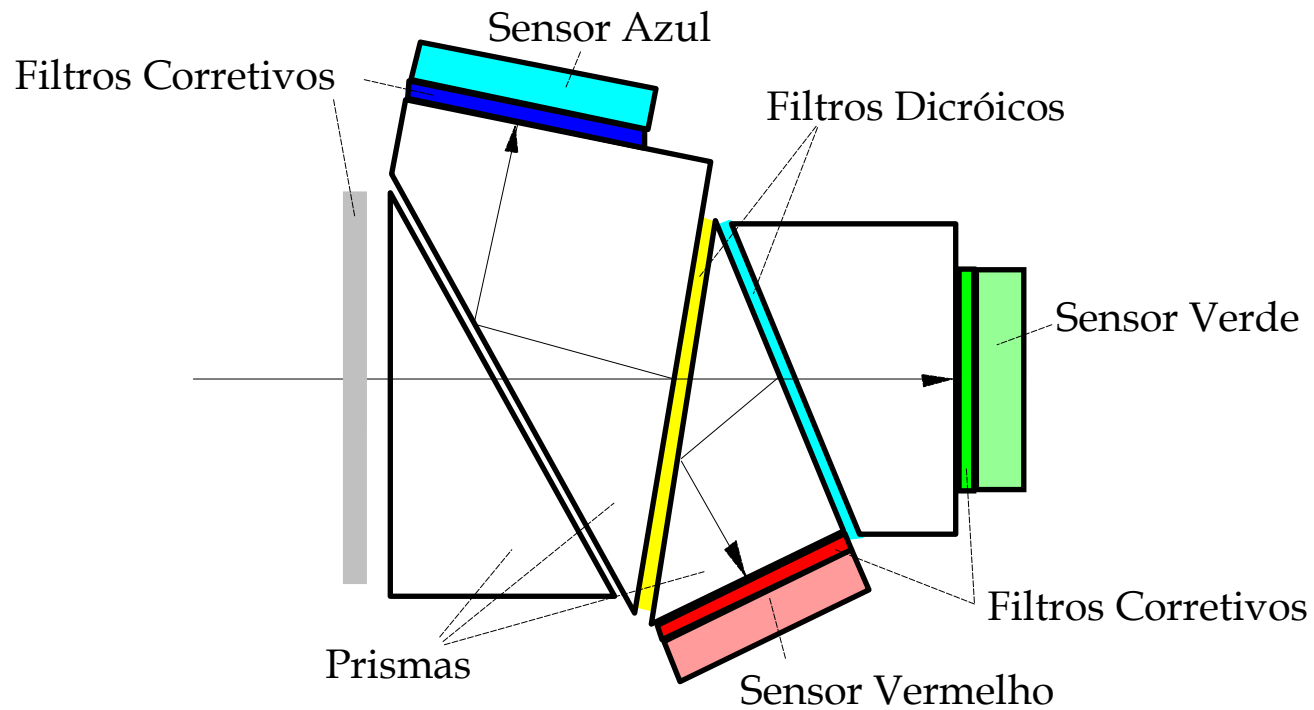


Câmeras Fotocondutoras

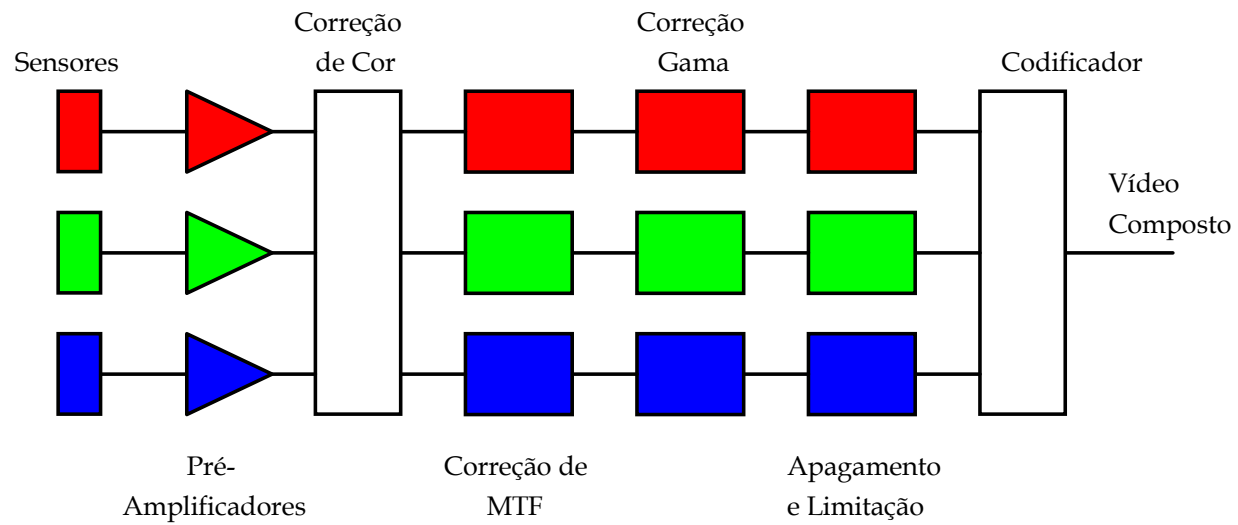
Tipo	Fotocondutor	Aplicações	Desvantagens
Vidicon	Trissulfeto de Antimônio	Telecinagem; Baixo Custo	"Lag" (Retardo)
Newvicon	Selenieto de Zinco	Alta Resolução; Intrum. Médica	alta corrente no escuro
Chalnicon	Selenieto de Cádmio	Sensível; Vigilância	"Lag"; alta corrente no escuro
Saticon	Liga de Selênio/Arsênico/Telúrio	Mais sensível ao azul; Câmeras RGB de Estúdio	
Ultricon	Matriz de Fotodiodos de Silício	Resistência a luz forte; Circuito Fechado P/B	"Blooming"
Plumbicon	Óxido de Chumbo	Tomadas ao Vivo	"Lag", pouca resposta no Vermelho

Câmeras Tricromáticas

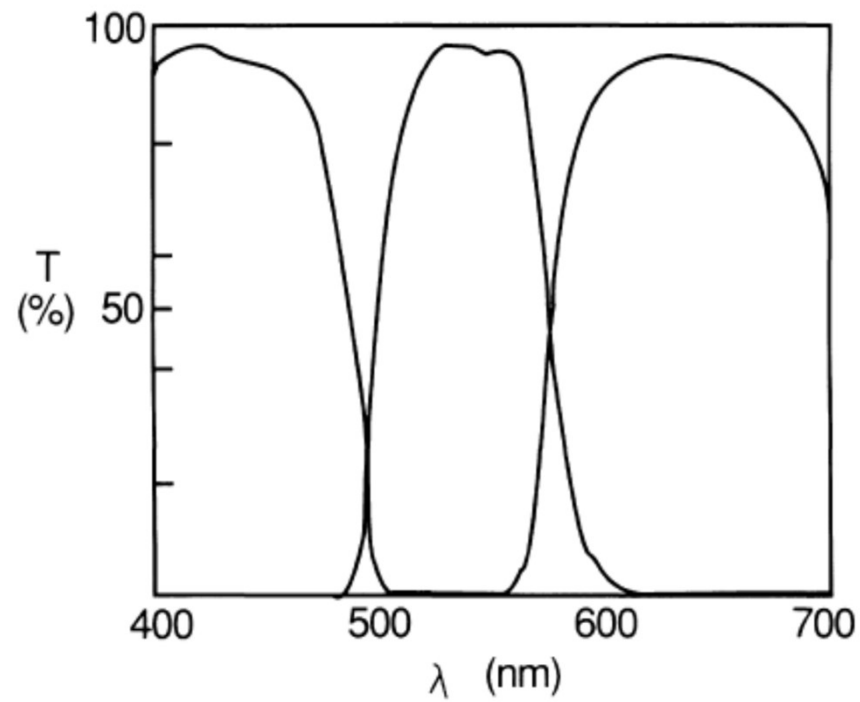
Câmera a Cores com 3 Sensores



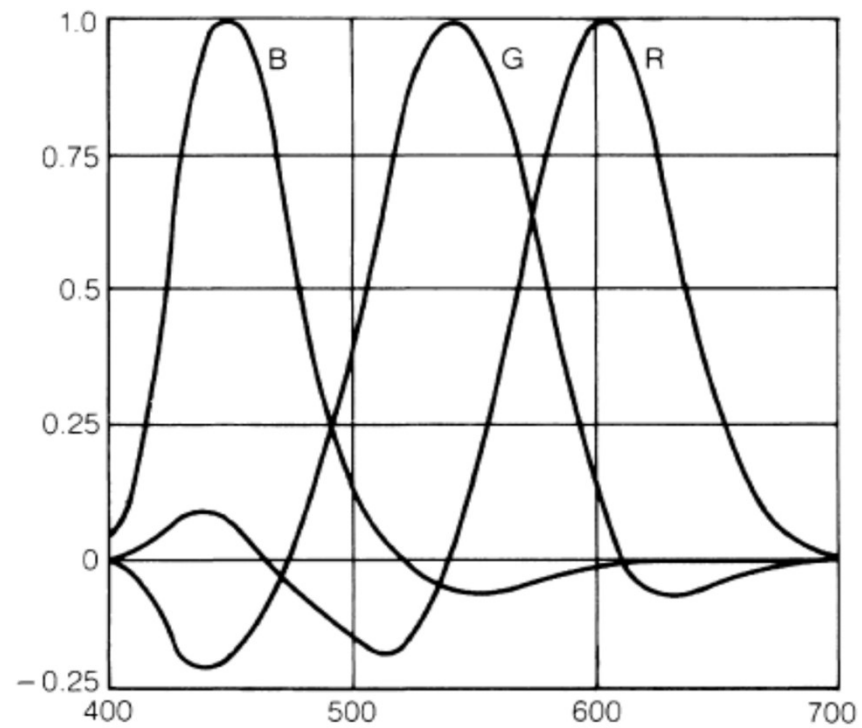
Processamento de Sinal na Câmera de 3 Sensores



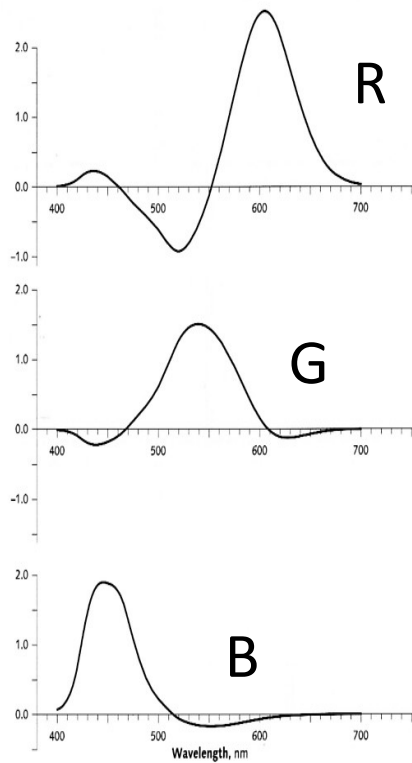
Filtros de Separação de Cor



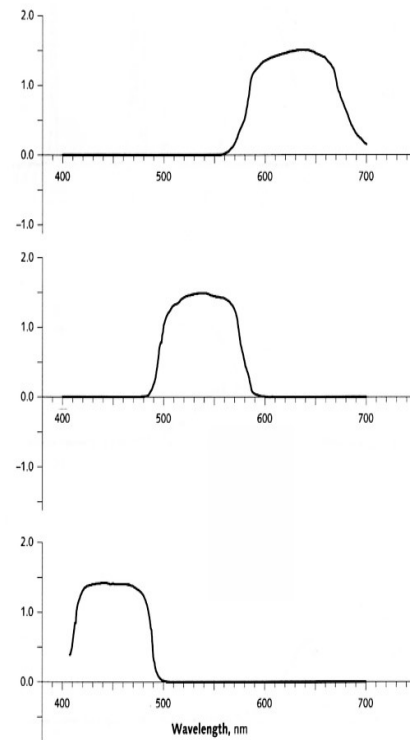
Características Ideais dos Filtros



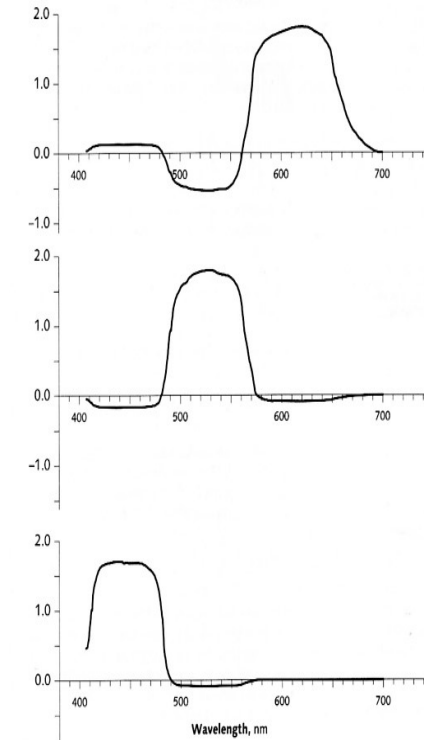
Características Aproximadas por Matrixagem



Resposta Ideal



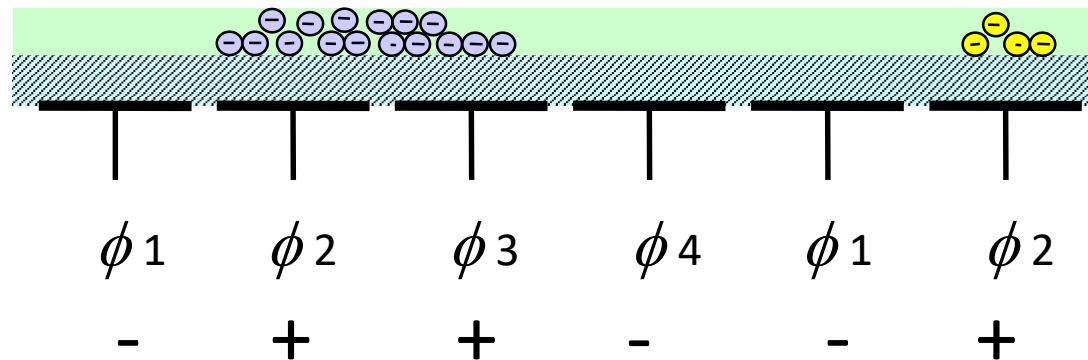
Resposta dos
Filtros ópticos



Resposta após
Matriz RGB

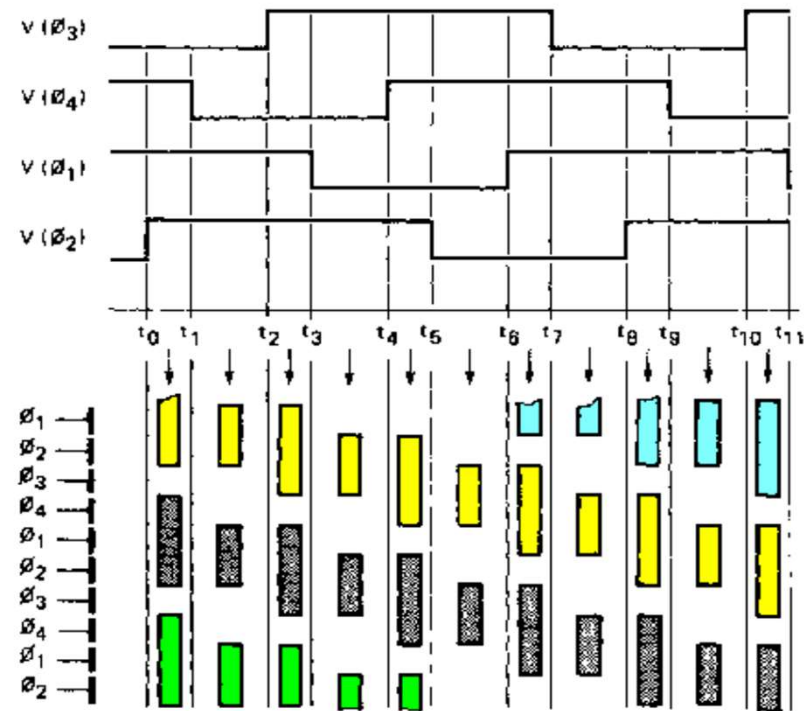
Sensores CCD

Dispositivo de Transferência de Carga



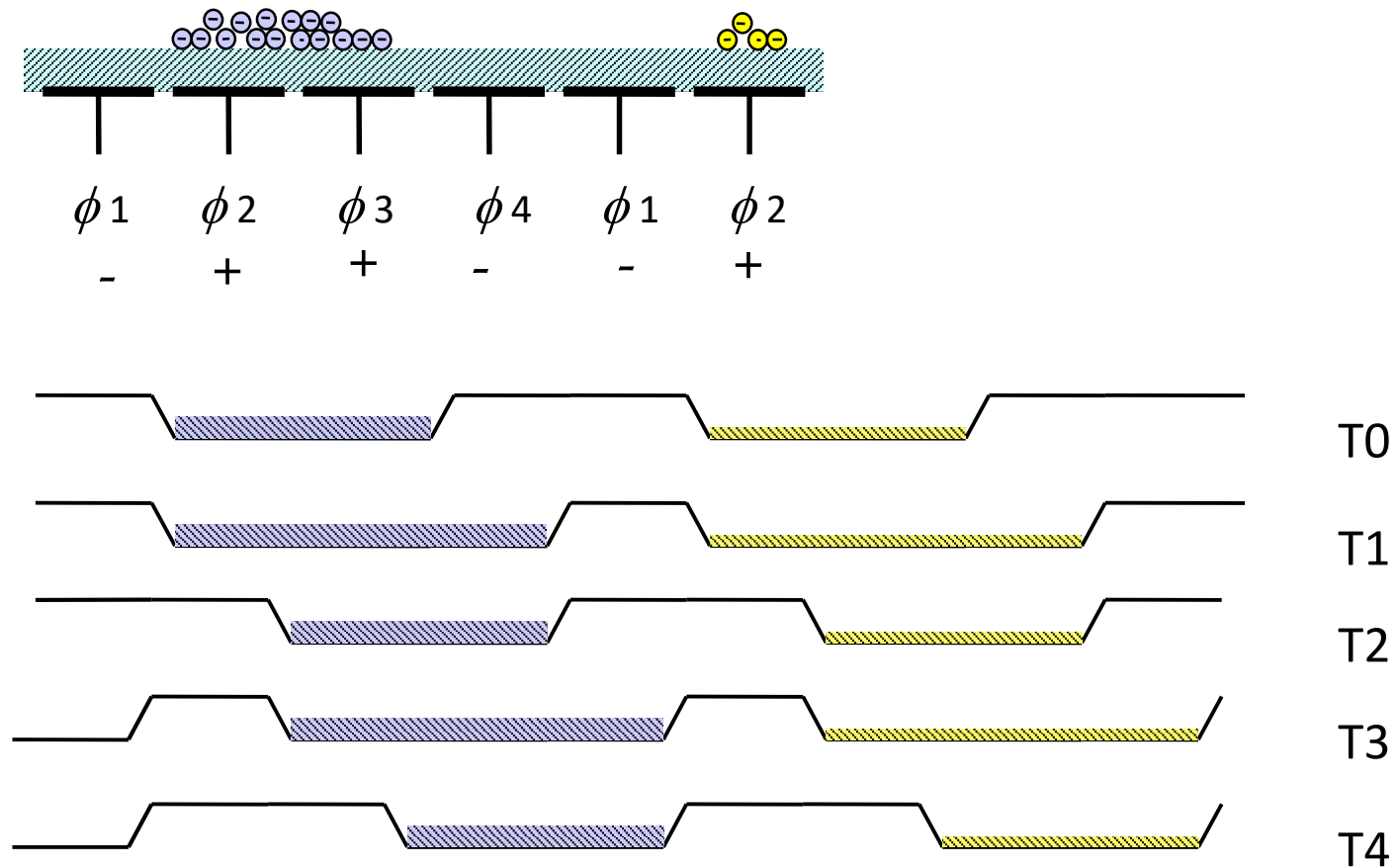
- CCD: Charge Coupled Device

CCD (Charge Coupled Device)

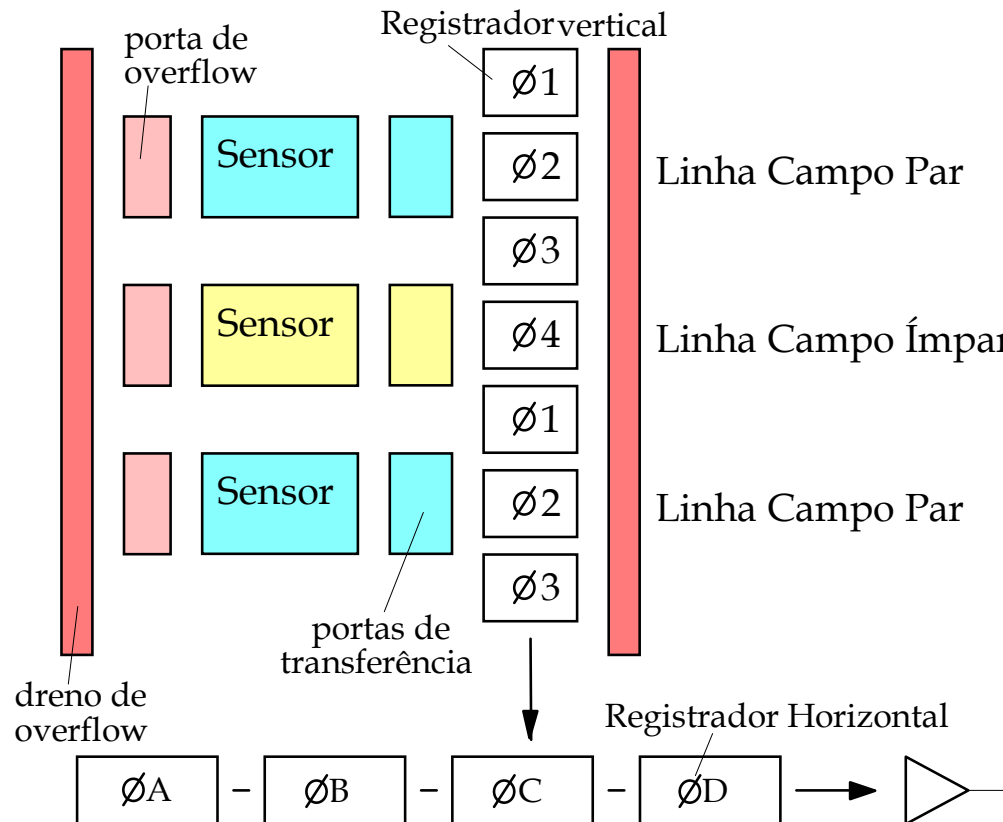


Bell Laboratories, 1970

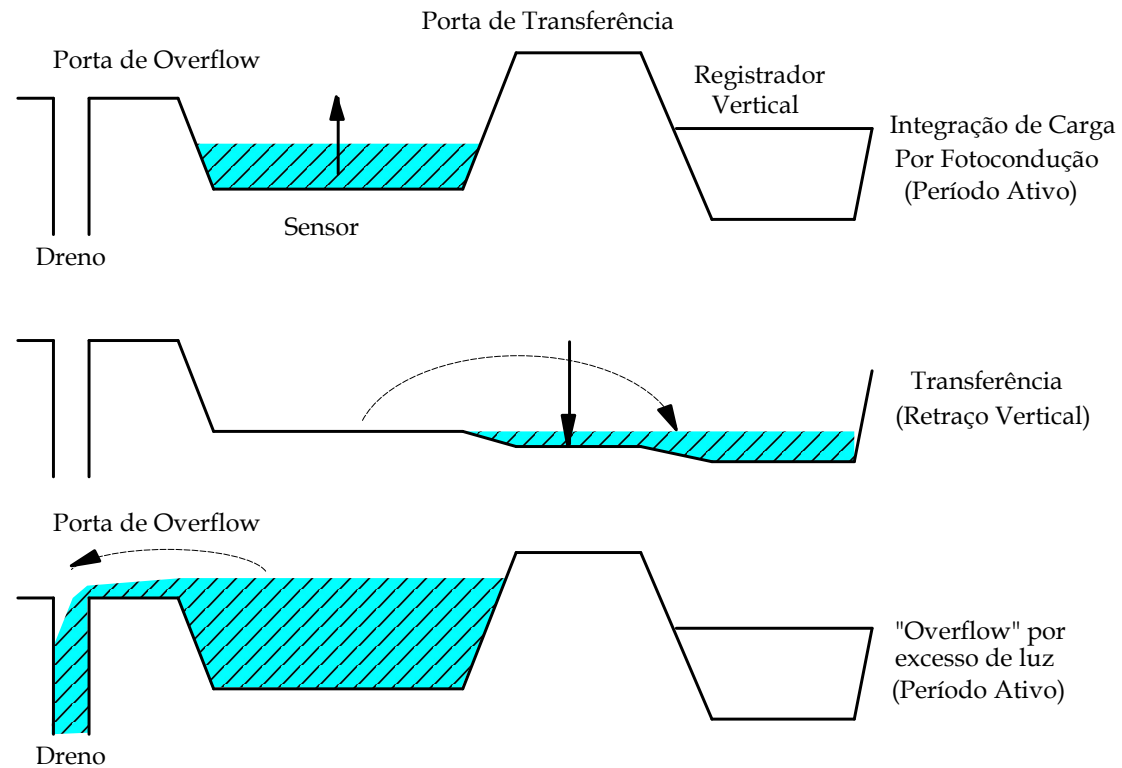
Deslocamento das Cargas no CCD de 4 Fases



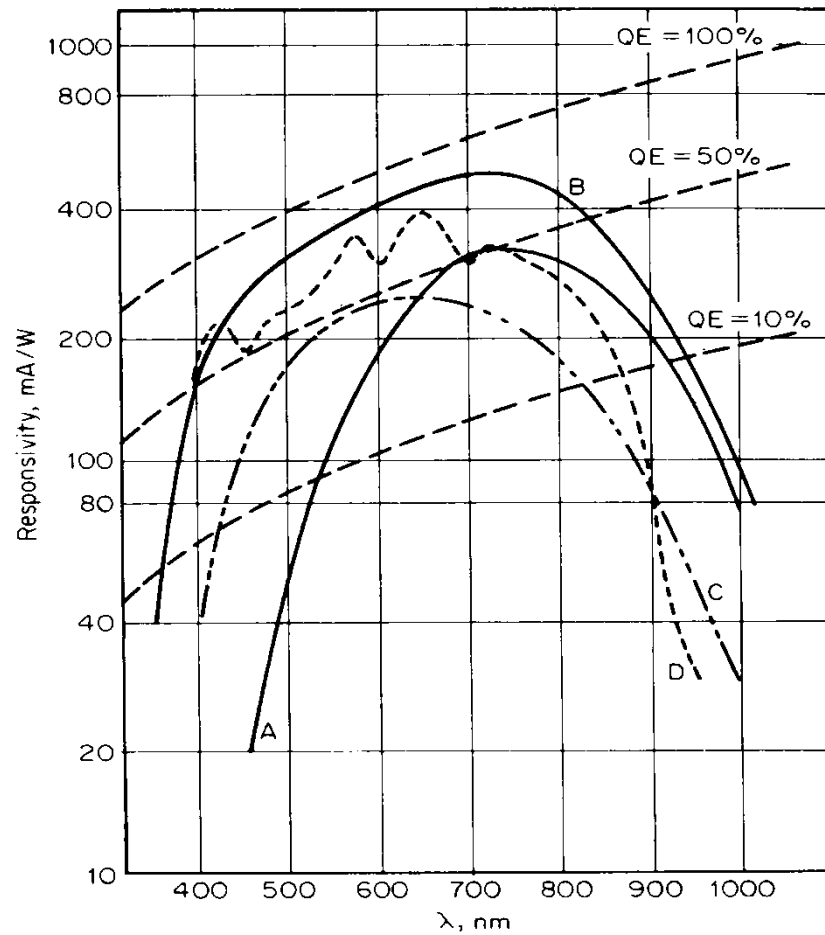
Estrutura de um Sensor CCD Entrelaçado



Operação do Sensor CCD

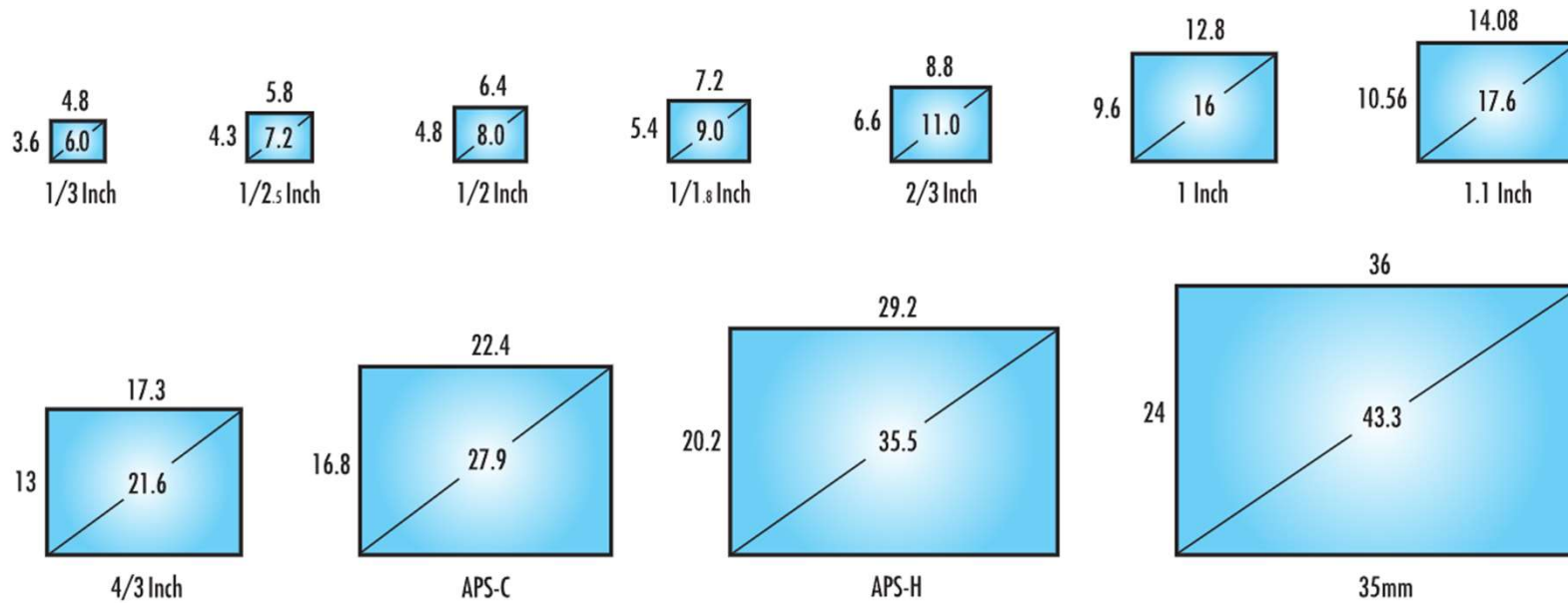


Sensibilidade Espectral de Sensores CCD



- A Iluminação Frontal c/ portas de Poli-Silício
- B Iluminação Posterior
- C Iluminação Frontal "fase virtual"
- D Iluminação Frontal c/ portas transparentes

Tamanhos de Sensores CCD

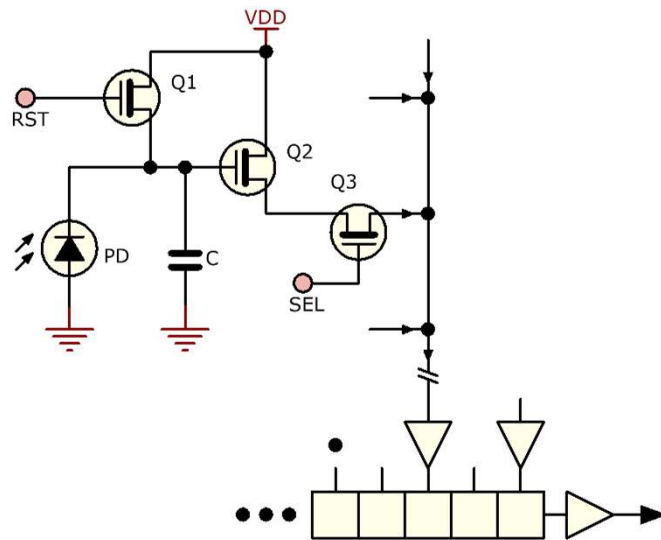


Área ativa - Sensores com proporção 3:4

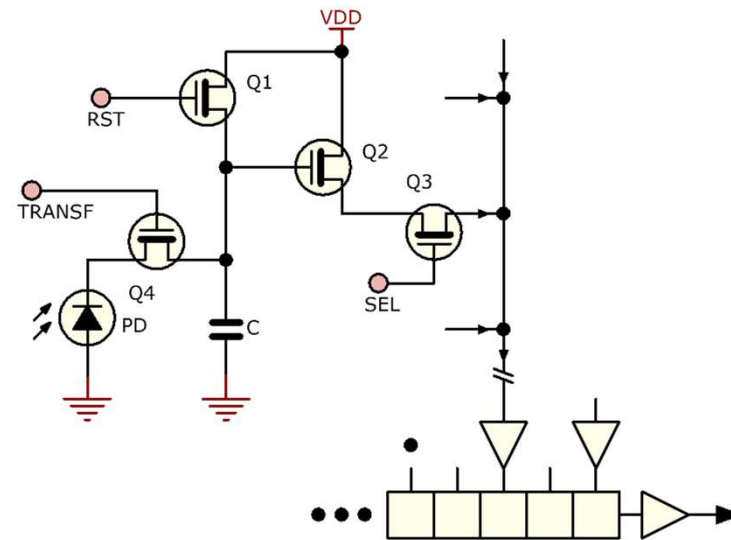
Comparações CCD x Tubo (Final Séc. XX)

	CCD	Tubo
Sensibilidade	f/8 @ 2000 lux	f/4 @ 2000 lux
Iluminamento Mínimo	7.5 lux	10 lux
Índice de Exposição	~540	~150
Resolução Horizontal	700 linhas	700 linhas
Relação S/R sem ponderação	60 dB	56 dB
S/R ponderada	68 dB	64 dB
Artifícios de Imagem	"Aliasing", defeitos lineares	Granulação
Colorimetria	Melhor resposta no Vermelho	-
Vida Útil	Indefinida	~10.000h

Sensor CMOS (APS – Active Pixel Sensor)



Célula 3T (Amostragem sequencial por linha)



Célula 4T (Permite amostragem simultânea)

Sensor CMOS (APS – Active Pixel Sensor)

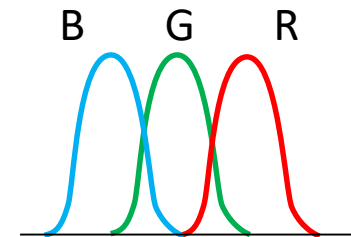
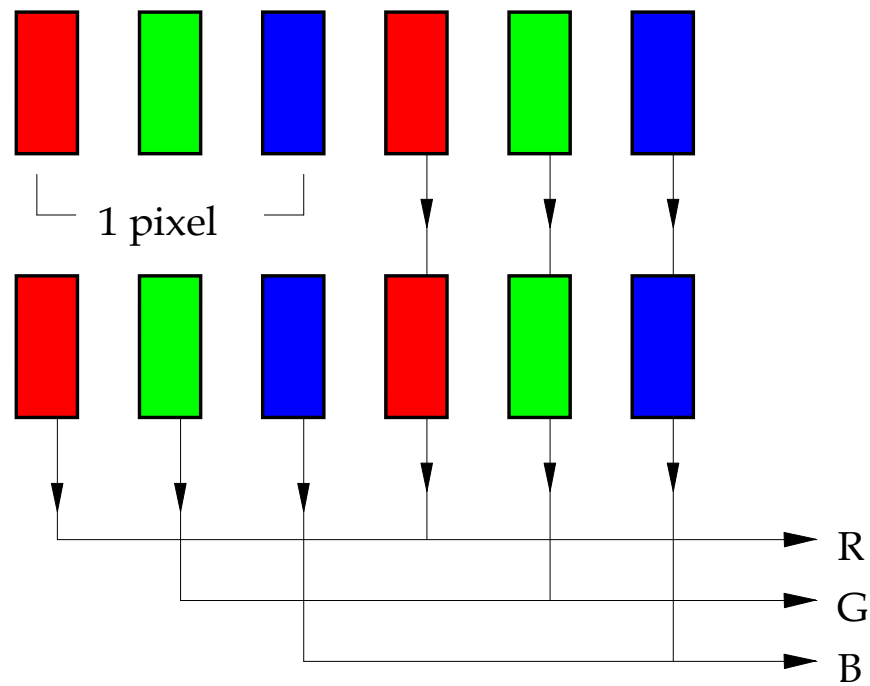


Distorção devida à amostragem sequencial por linha



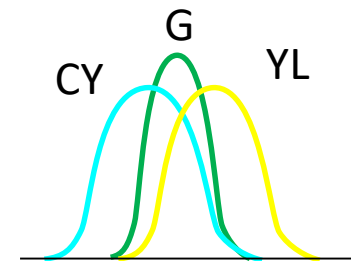
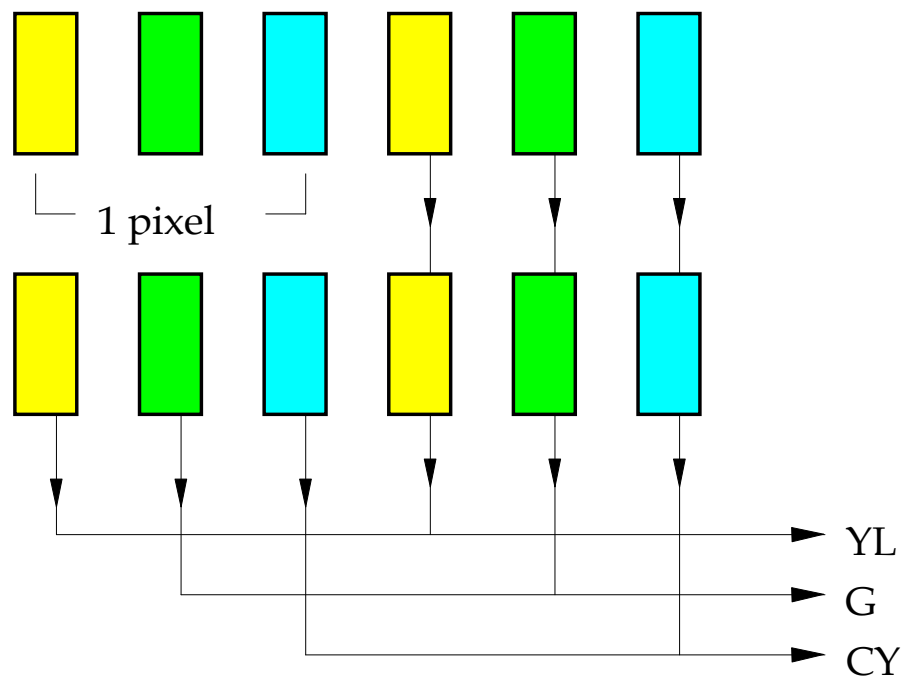
Foto: H. Lartigue (Obturador de cortina)

Sensor CCD Tricromático (RGB)

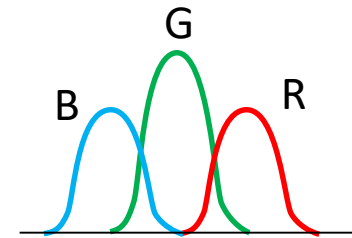
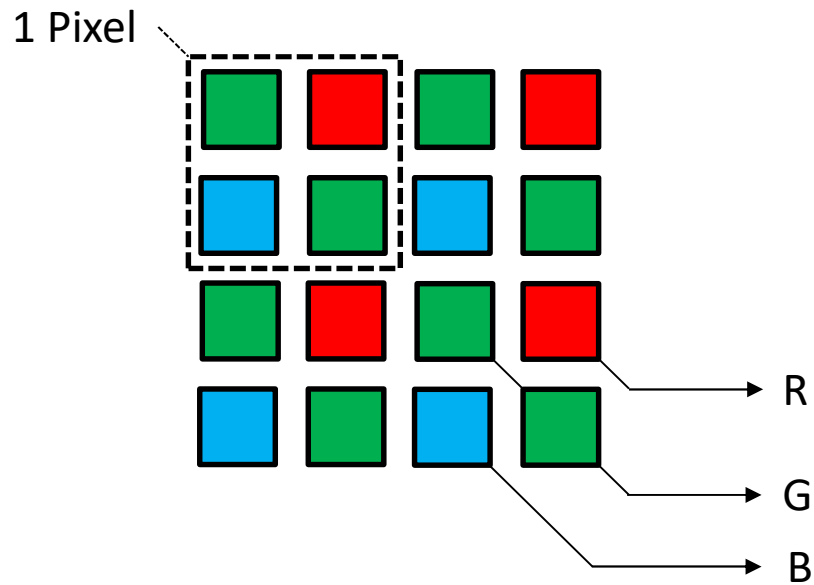


Filtros R, G e B depositados sobre o sensor

Sensor CCD Tricromático (YL - G - CY)



Sensor CCD Bayer (R G G B)



Resolução (MTF) do Sensor CCD

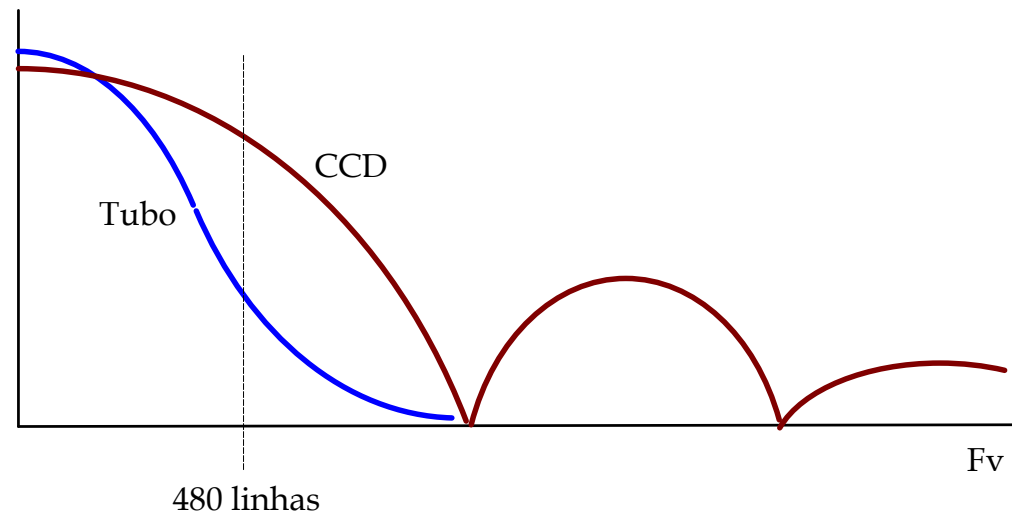
$$MTF(f_h) = \frac{\text{sen } \pi \frac{W_h}{F_h} f_h}{\pi \frac{W_h}{F_h} f_h}$$

- **Wh** = Largura do elemento sensor
- **Fh** = Frequencia de Amostragem no sentido horizontal (Sensores/largura da imagem)
- **fh** = Frequencia espacial (linhas de resolução) na horizontal

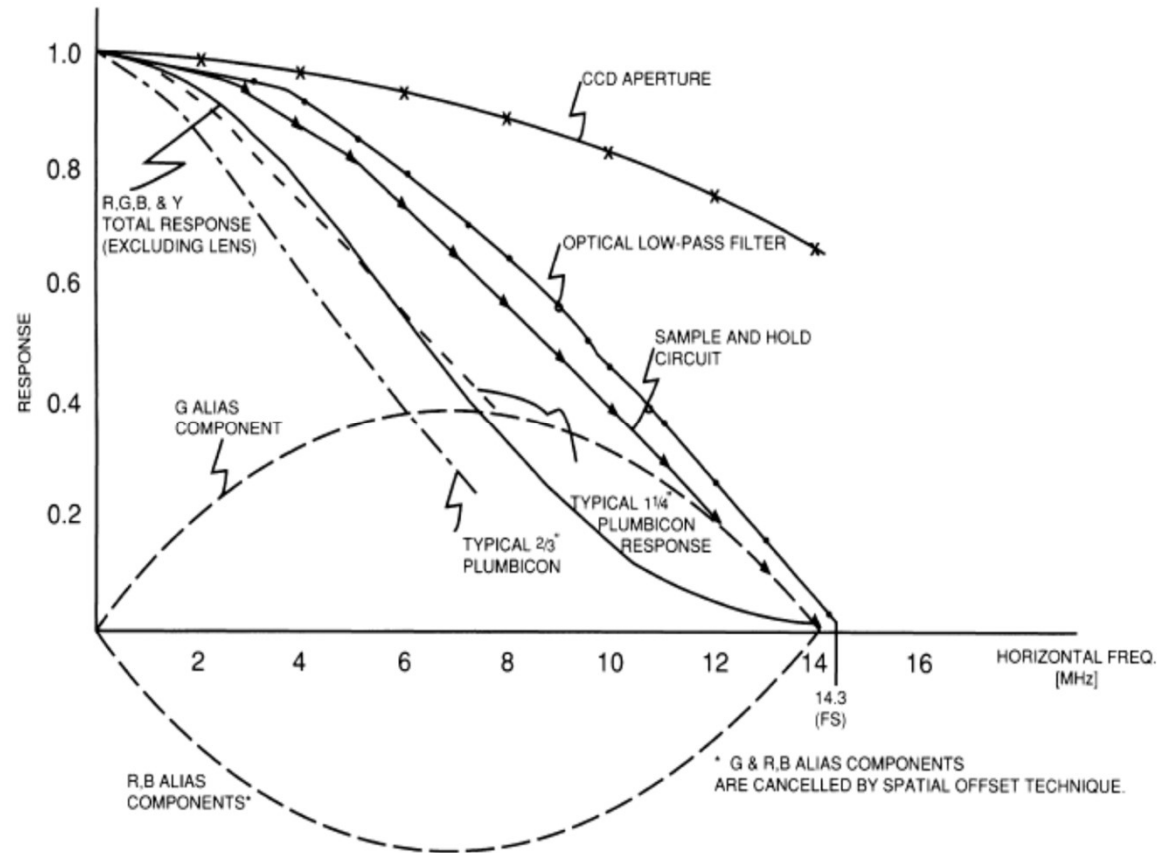
$$MTF(f_v) = \frac{\text{sen } \pi \frac{W_v}{F_v} f_v}{\pi \frac{W_v}{F_v} f_v}$$

- **Wv** = Altura do elemento sensor
- **Fv** = Frequencia de Amostragem no sentido vertical (Sensores/altura da imagem)
- **fv** = Frequencia espacial (linhas de resolução) na vertical

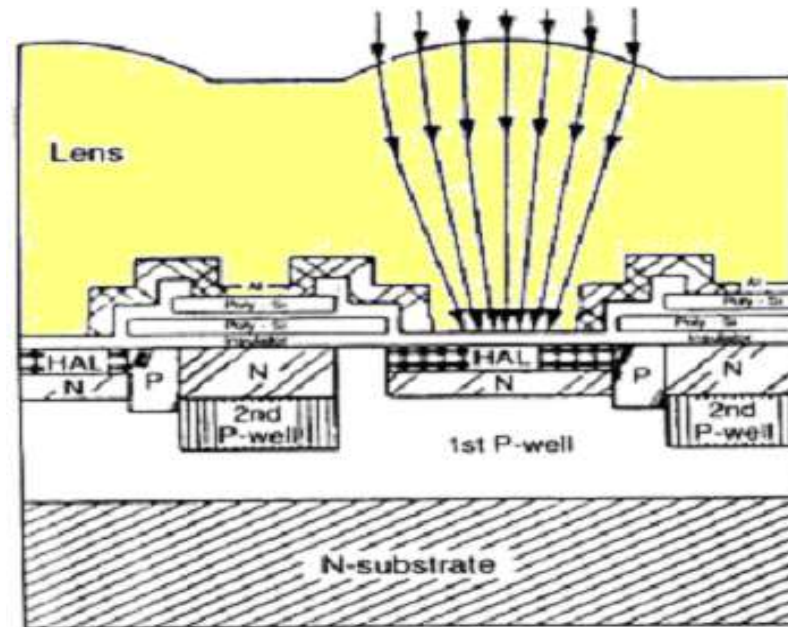
Resolução (MTF) do Sensor CCD



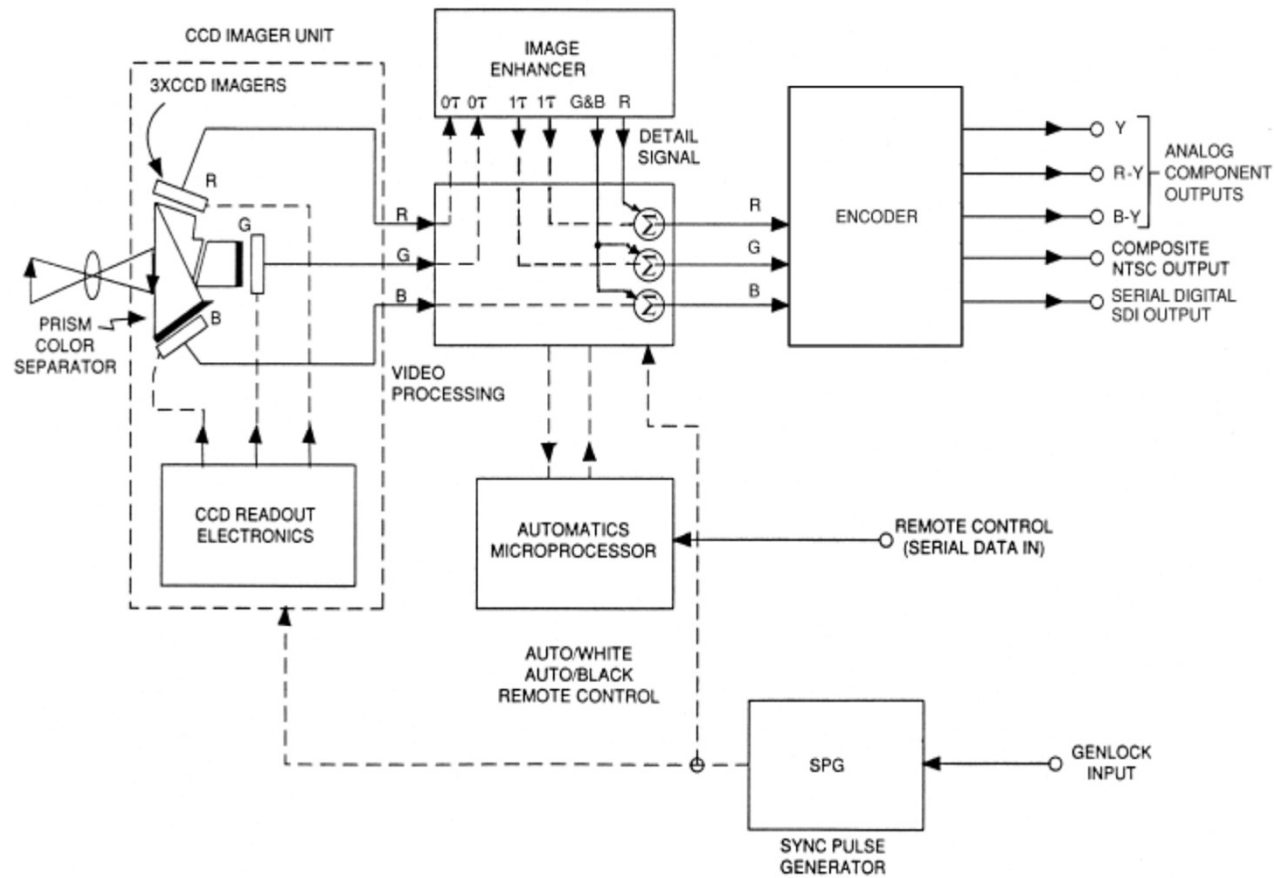
Resolução (MTF) do Sensor CCD



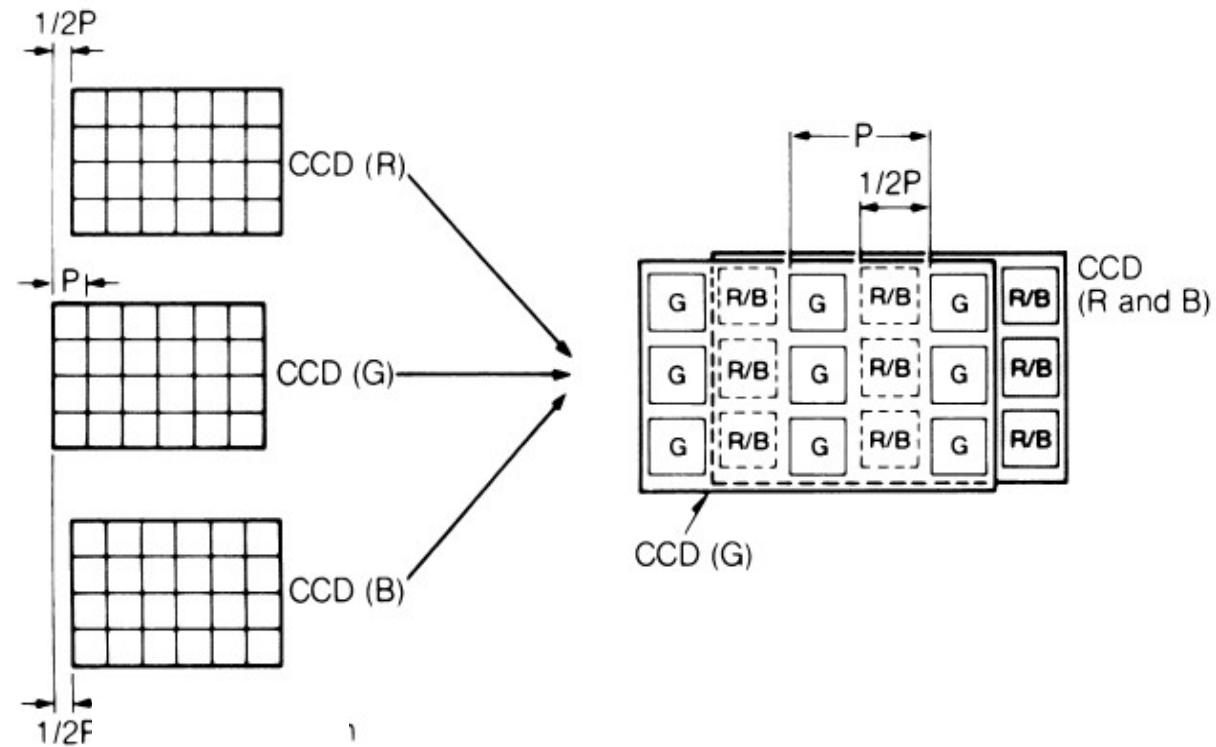
Sensor CCD com Micro-Lentes



Processamento de Sinal

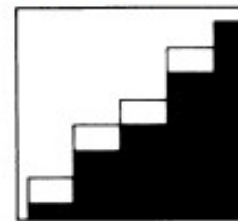


Deslocamento Espacial G / RB

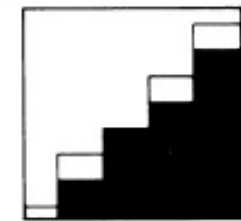


Deslocamento Espacial G / RB

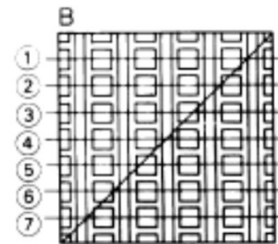
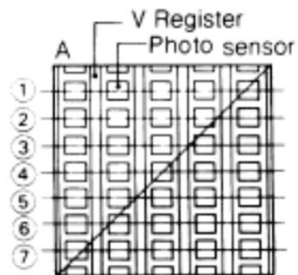
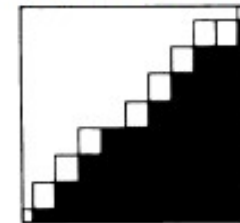
Sensor G



Sensores R,B

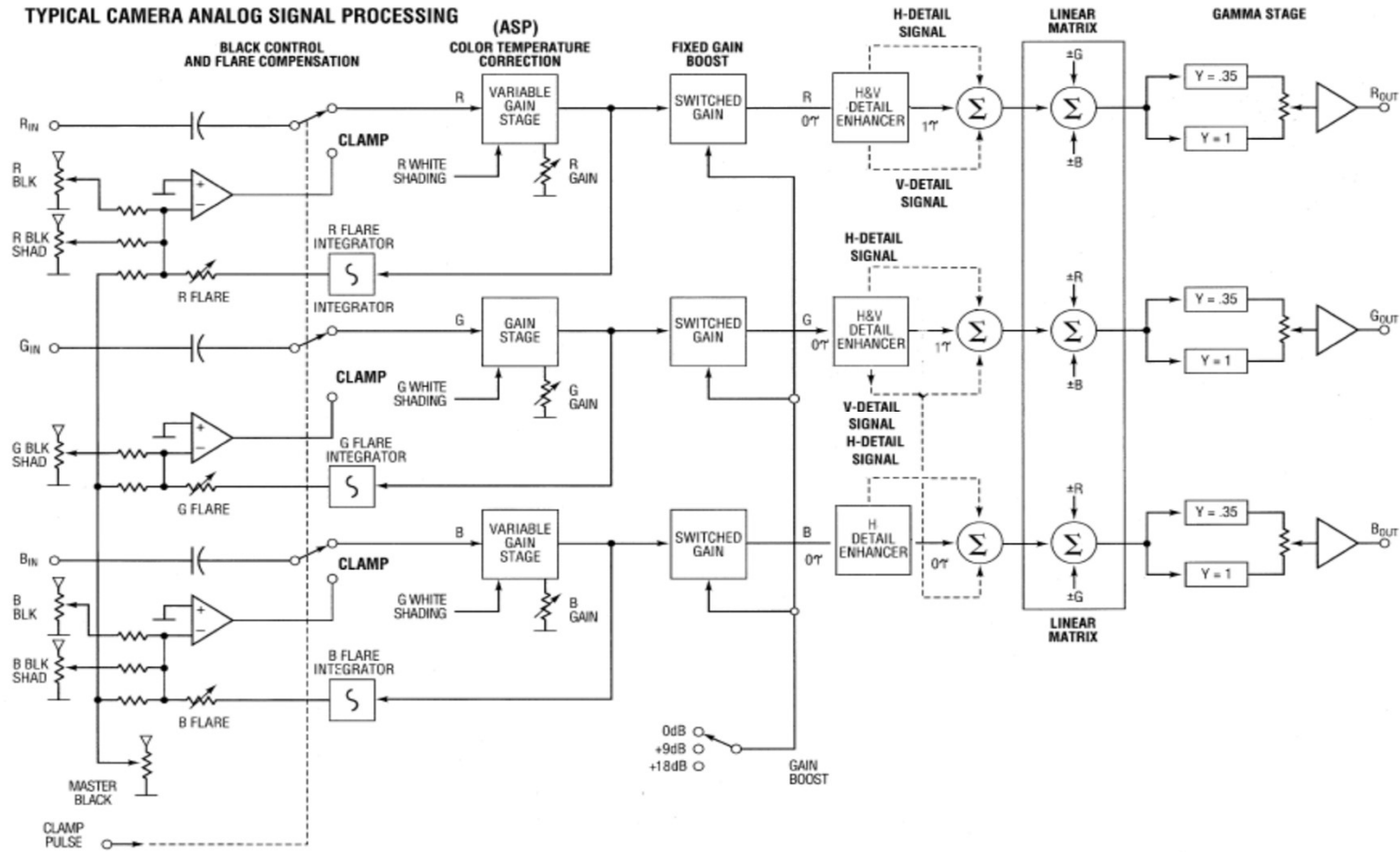


Luminância Resultante

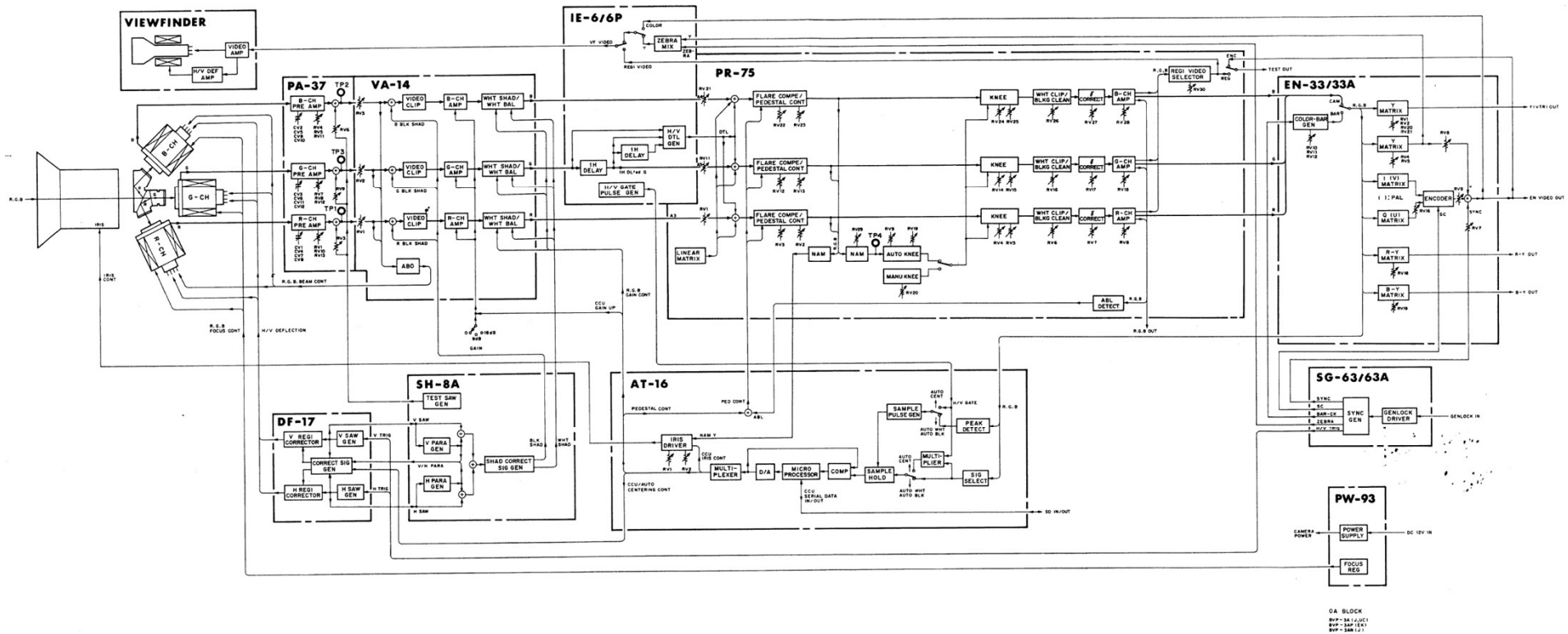


Processamento de Sinal

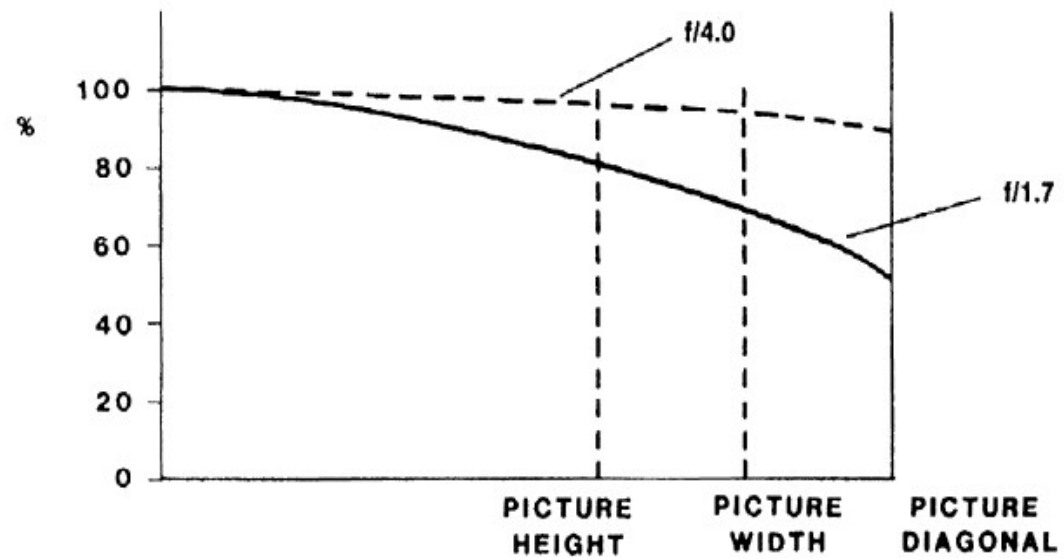
Processamento Analógico

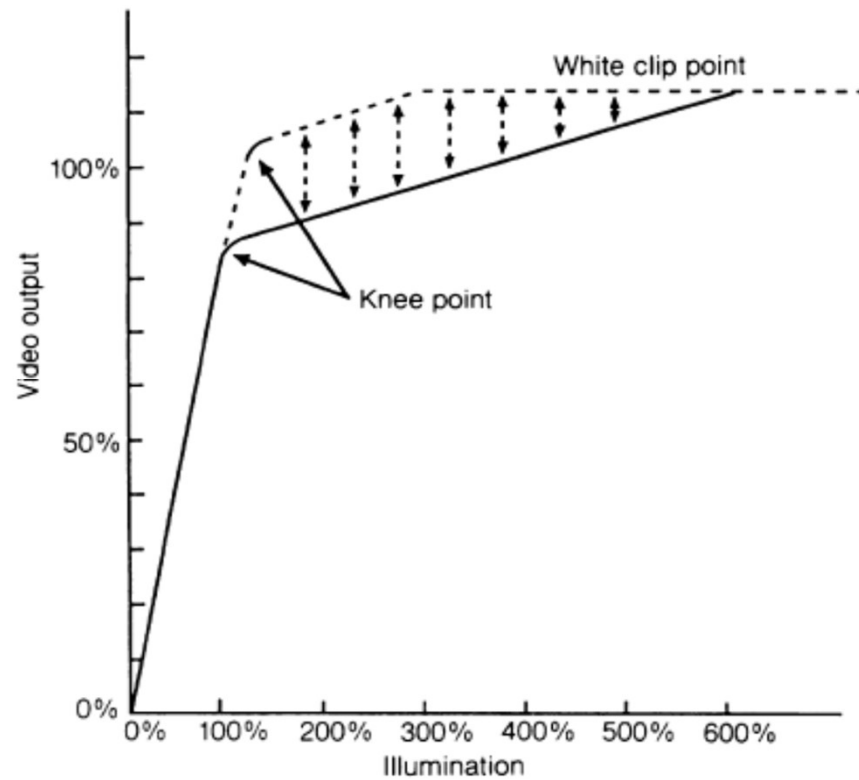


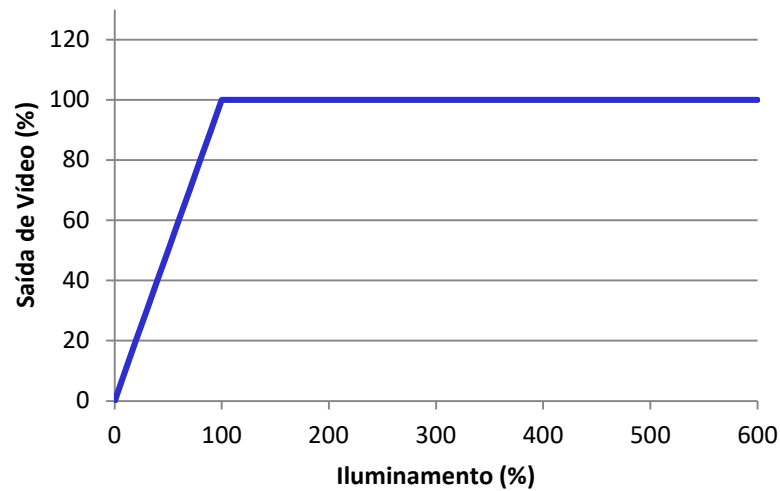
Ex.: SONY BVP-3AP



Uniformidade de Campo (“Shading”)

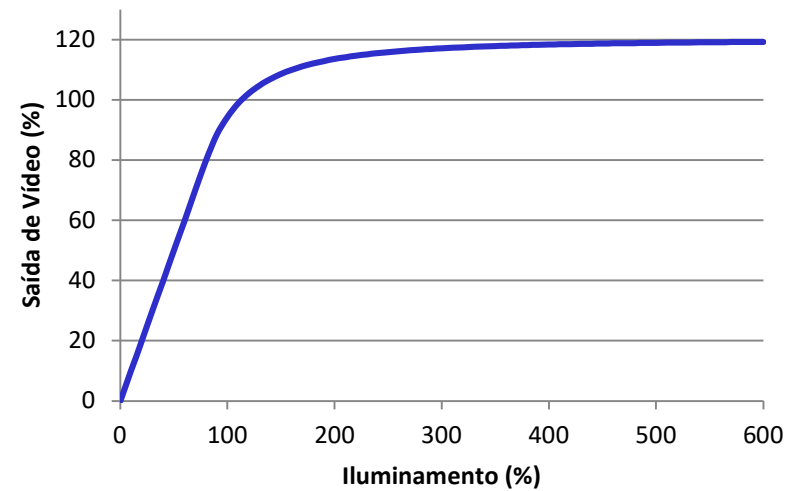






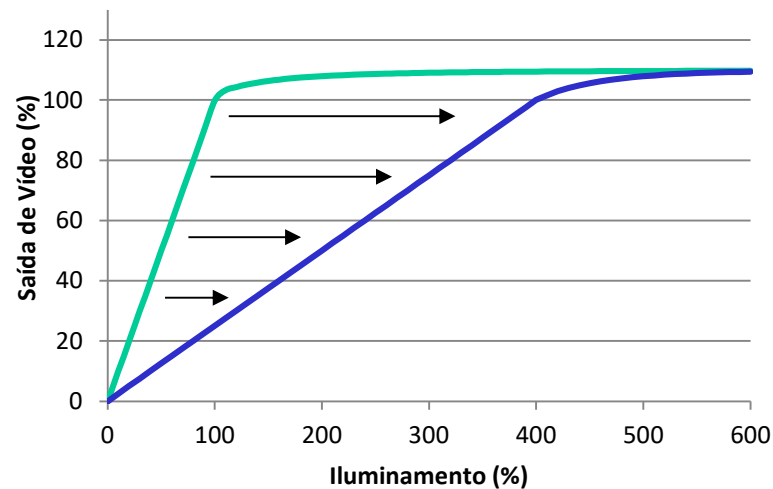
“Hard Clipping”

- Linear até 100%, saturação “dura”
acima disso



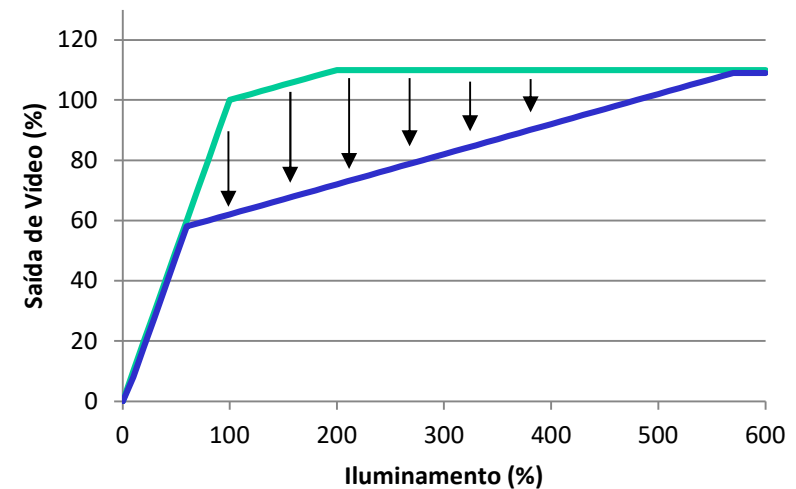
“Soft Clipping”

- Linear até ~100%, saturação
progressiva acima disso



“Peak AGC”

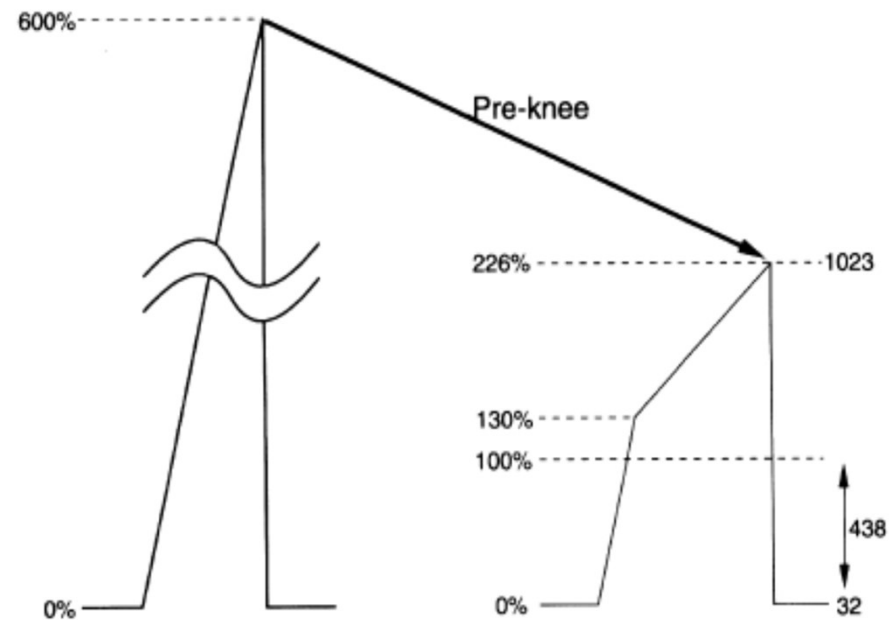
- Controle Automático de Ganho mantendo amplitude máxima de saída em 100%



“Dynamic Clipping”

- 2 faixas de ganho, com ponto de inflexão controlado para manter amplitude máxima em 100%

Faixa Dinâmica com Controle de Saturação



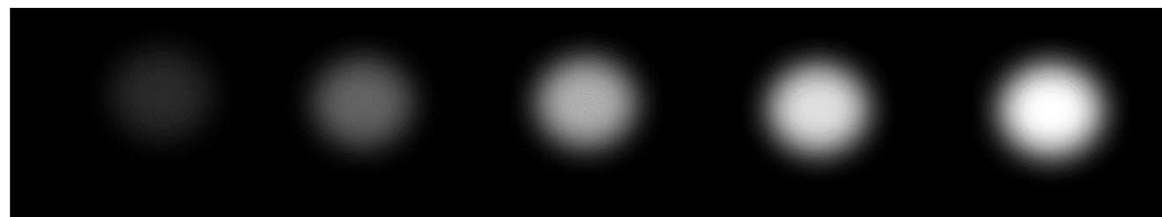
Efeitos de Saturação



“Peak AGC”

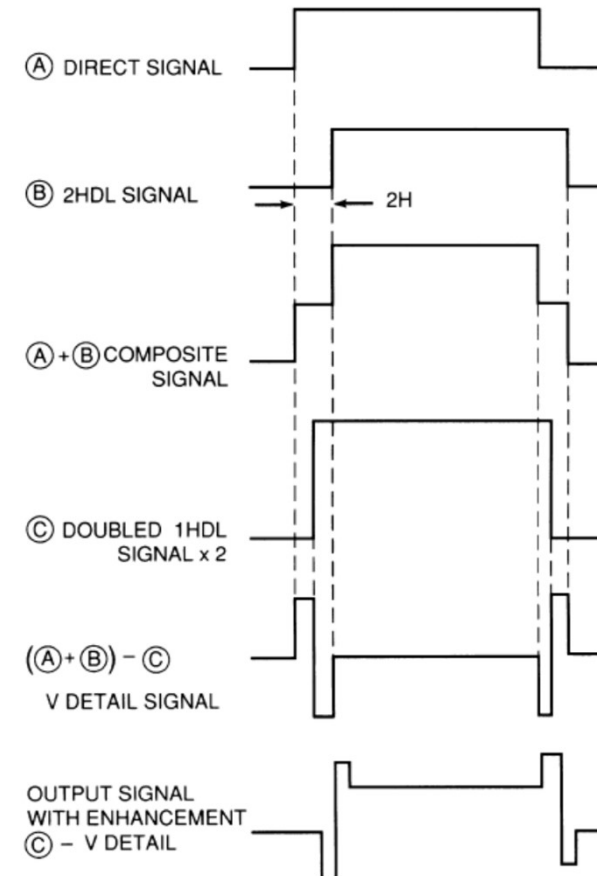
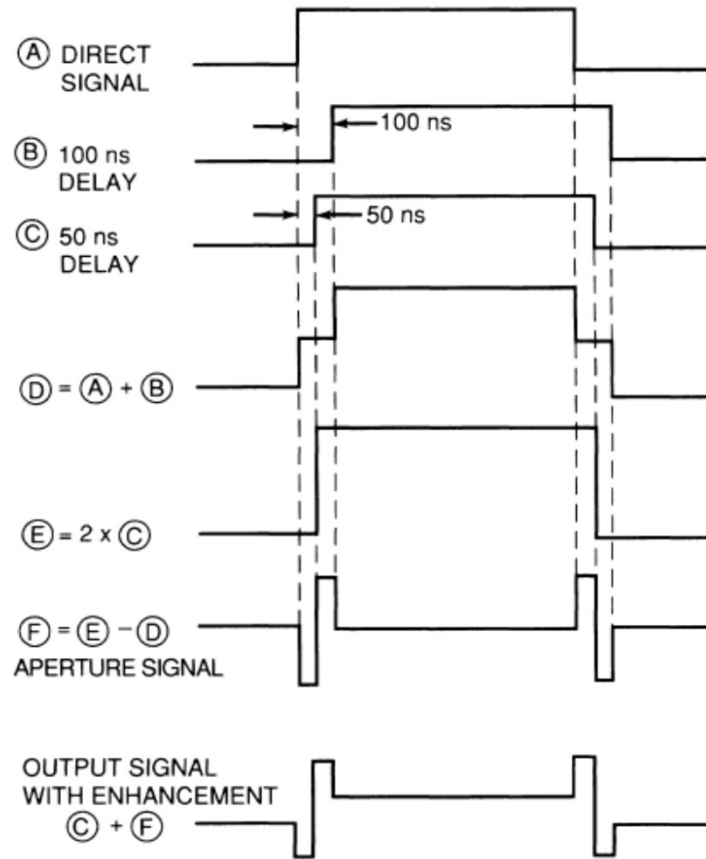


“Hard Clipping”



“Dynamic Clipping”

Controle de Nitidez (H/V Enhancement)



Desafios e Tendências

- Compatibilizar a resposta da câmera de TV com o processo de filmagem em película, para permitir a combinação simultânea de material produzido nesses meios.
- Maximizar a relação Sinal / Ruído apesar da redução das dimensões do elemento sensor
- Manter reprodução de tons mesmo com processamento digital

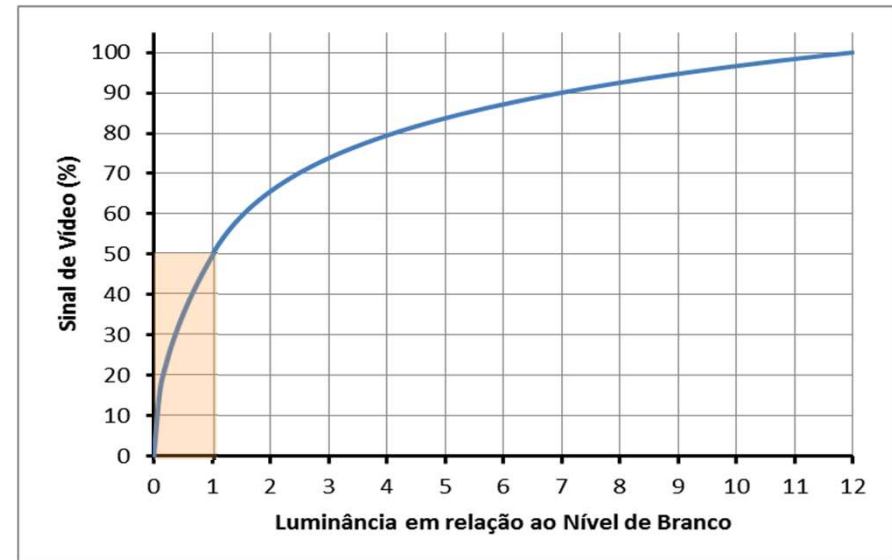
- “*High Dynamic Range*” (HDR)
 - Extensão da faixa dinâmica para níveis de luminância ~10x maiores do que o nível de branco de referência
 - Reprodução de altas luzes
 - HLG (*Hybrid Log-Gamma*):

$$E' = \begin{cases} 0,5\sqrt{L} & (0 \leq L \leq 1) \\ a \ln(L - b) + c & (L > 1) \end{cases}$$

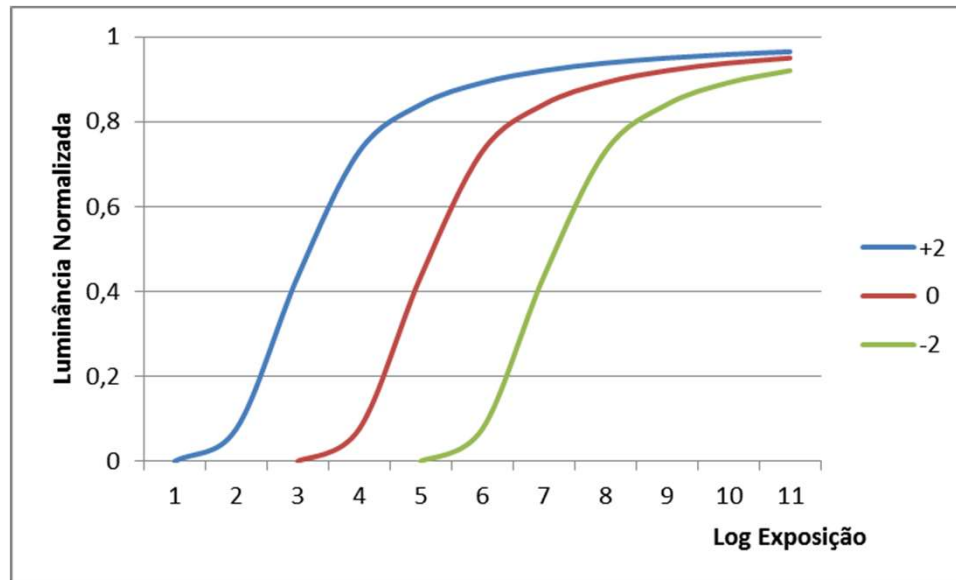
$$a = 0,17883277$$

$$b = 0,28466892$$

$$c = 0,55991073$$



HDR - *High Dynamic Range*



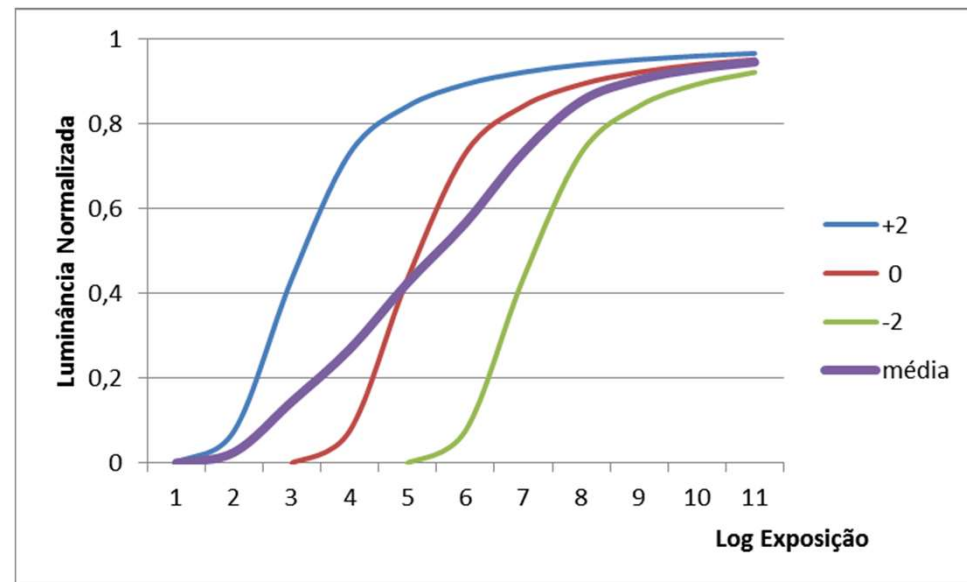
Captura com exposições
relativas +2, 0 e -2 pontos

Fotos: Klaus Herrmann

HDR - *High Dynamic Range*



Combinação das 3 capturas em uma imagem HDR, porém reproduzida com faixa dinâmica restrita ao projetor



Percepção de Faixa Dinâmica com Filtro Estrela



Original, captura com “soft clipping”



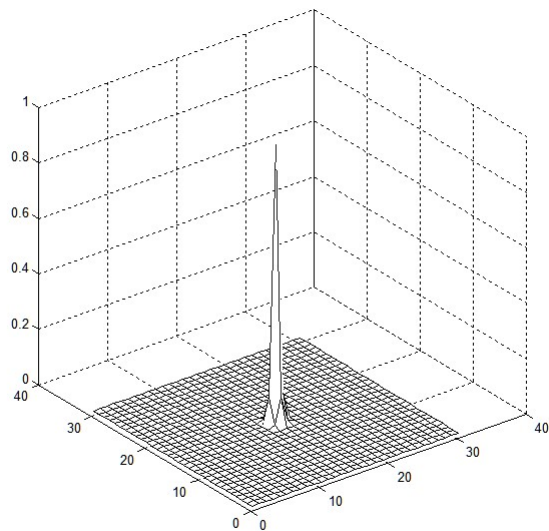
Filtro “estrela” aplicado antes da captura, com “soft clipping”

Filtro Estrela (*Star Flare*)

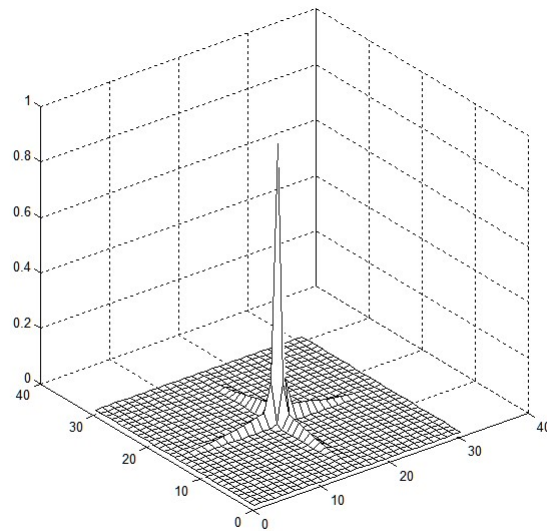
LCS
EPUSP



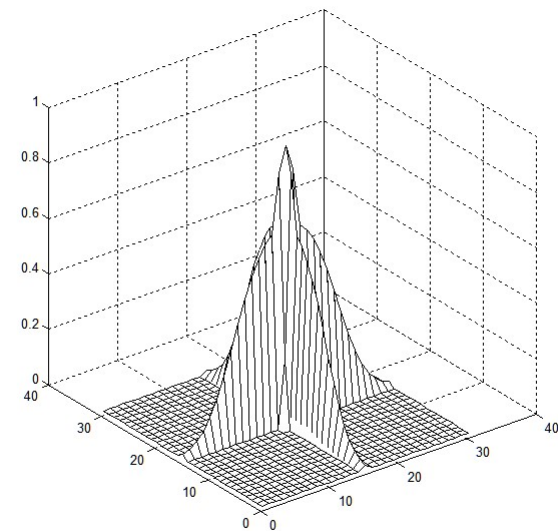
Resposta Impulsiva do Filtro Estrela



Resposta da câmera + lente,
 $Y_{MAX} = 1$



Resposta com Filtro “estrela” ,
 $Y_{MAX} = 1$



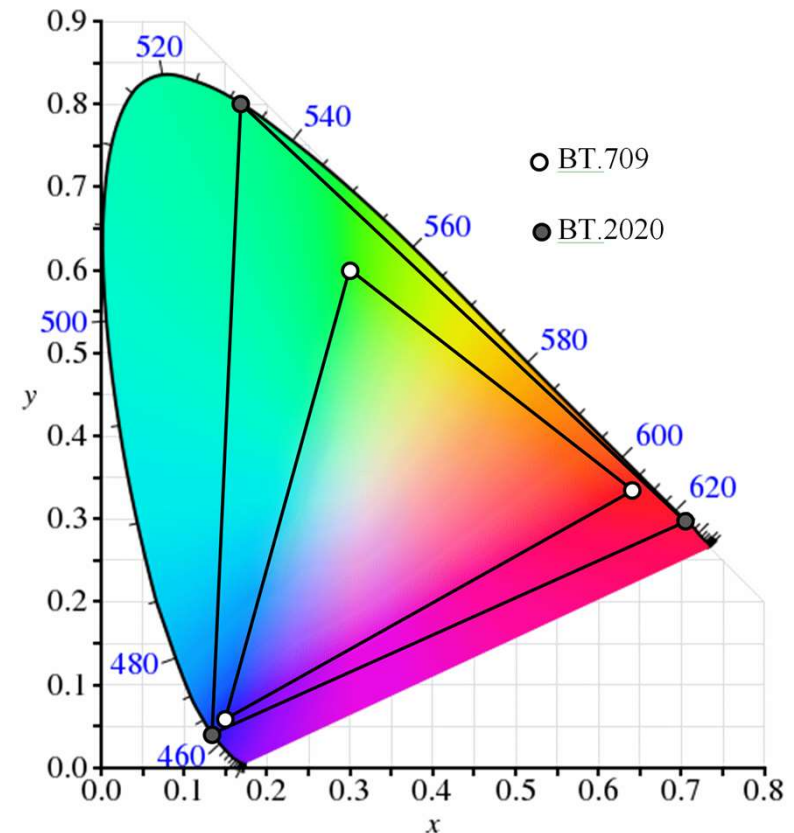
Resposta com Filtro “estrela”
e “soft clipping”, $Y_{MAX} = 40$

- “Wider Color Gamut” (WCG)
 - Extensão do espaço de Crominância
 - Reprodução de tons mais saturados
 - Padrão ITU-R BT.2020:

R: $x= 0,708, y=0,292$ ($\lambda= 630$ nm)

G: $x= 0,170, y=0,797$ ($\lambda= 532$ nm)

B: $x= 0,131, y=0,046$ ($\lambda= 467$ nm)



Controle da Profundidade de Campo



- Câmeras com sensores miniaturizados (típicas de Smartphones) possuem ampla profundidade de campo (esq.).
- A possibilidade de restringir a profundidade de campo, destacando o primeiro plano, é um recurso artístico desejado, característico de sensores maiores (dir.)

Fotos: IEEE Spectrum / Rajiv Laroya / Sue Tallon



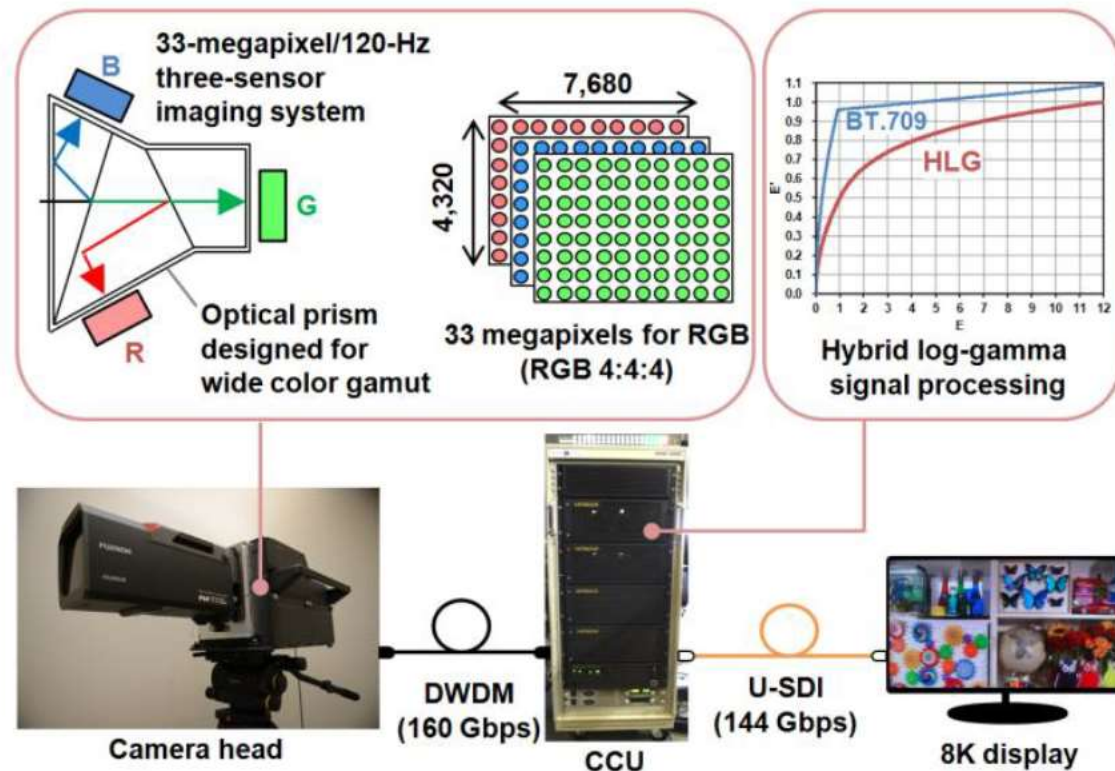
- Combinando vários sensores miniaturizados, com distâncias focais e posições diferentes, é possível simular câmeras com sensores maiores e lentes intercambiáveis em um espaço reduzido.



Fotos: IEEE Spectrum / Rajiv Laroya / Sue Tallon

Estado da Arte

- Câmera 8K – NHK (2016)
 - 7680 x 4320 pixels ativos
 - 7936 x 4412 pixels total
 - 120 quadros por segundo
 - Sensores: 30 x 26 mm, com microlentes
 - 8000 conversores A/D, 14 bits por cor
 - 12 bits pós-correção gama
 - HDR, padrão HLG com faixa de 1200%
 - WCG, padrão BT.2020
 - S/R de 45 dB



- Câmera 8K – SONY (2022)
 - 7680 x 4320 pixels (8k)
 - 120 quadros por segundo
 - Sensores: 16 x 12 mm
 - HDR, padrão HLG e SLog3
 - WCG, padrão BT.2020
 - S/R de 62 dB (1080/60)



Câmera



C.C.U.