Câmeras de TV

PTC2547 – Princípios de TV Digital

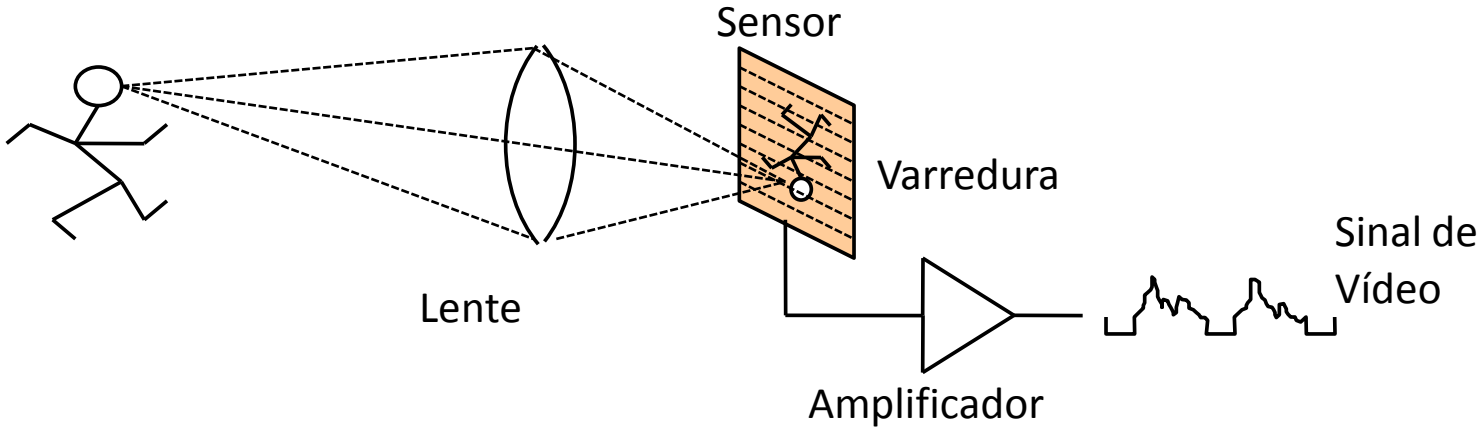
Guido Stolfi

EPUSP - 2016

Tópicos Abordados

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

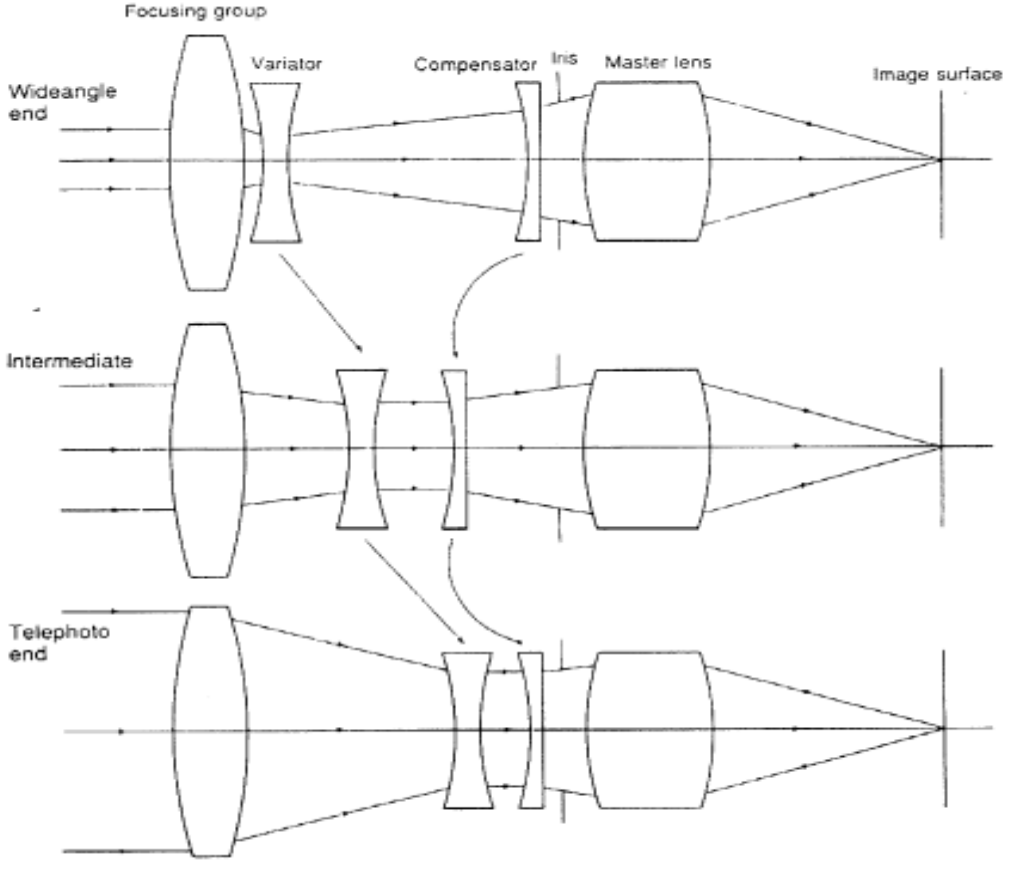
Sistema Óptico de uma Câmera de TV



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

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)

Lente "*Zoom*"


Focusing group
Variator
Compensator
Iris
Master lens
Image surface
Wideangle end
Intermediate
Telephoto end

- **Eficiência Quântica**: Porcentagem de fótons incidentes que provocam sinal elétrico no sensor

- **Índice de Exposição** (Fotografia):

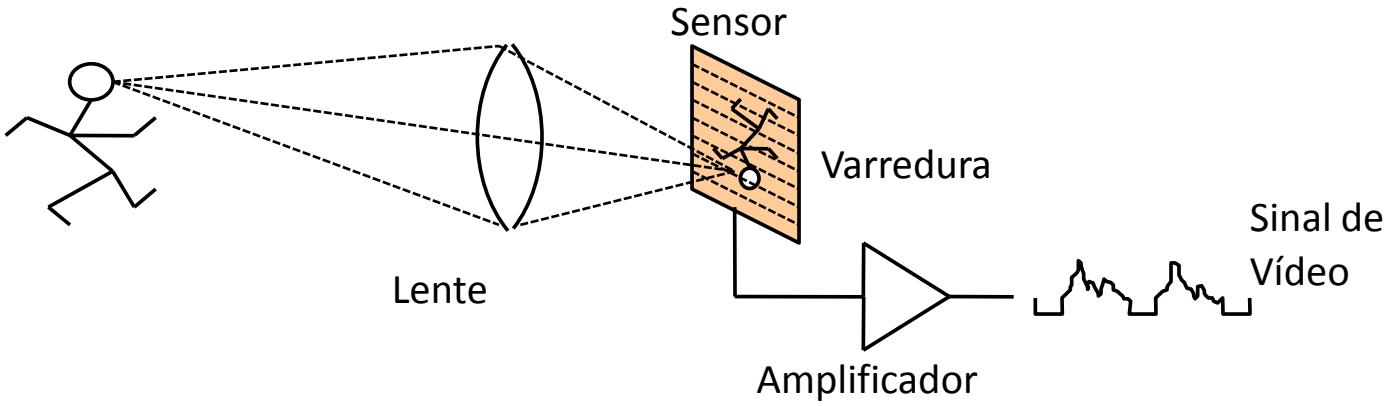
$$E_I = 280 \frac{F^2}{B \cdot T_X}$$

B = Luminância para produzir nível branco
Tx = Tempo de Exposição (normalmente 1/30")
F = Abertura da Lente

Características Qualitativas de uma Câmera

- **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)

×

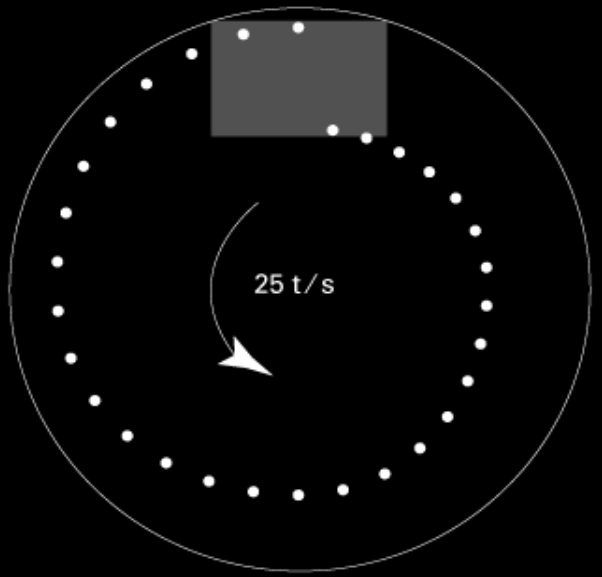
MTF(varredura)

×

Resposta do Amplificador / digitalizador

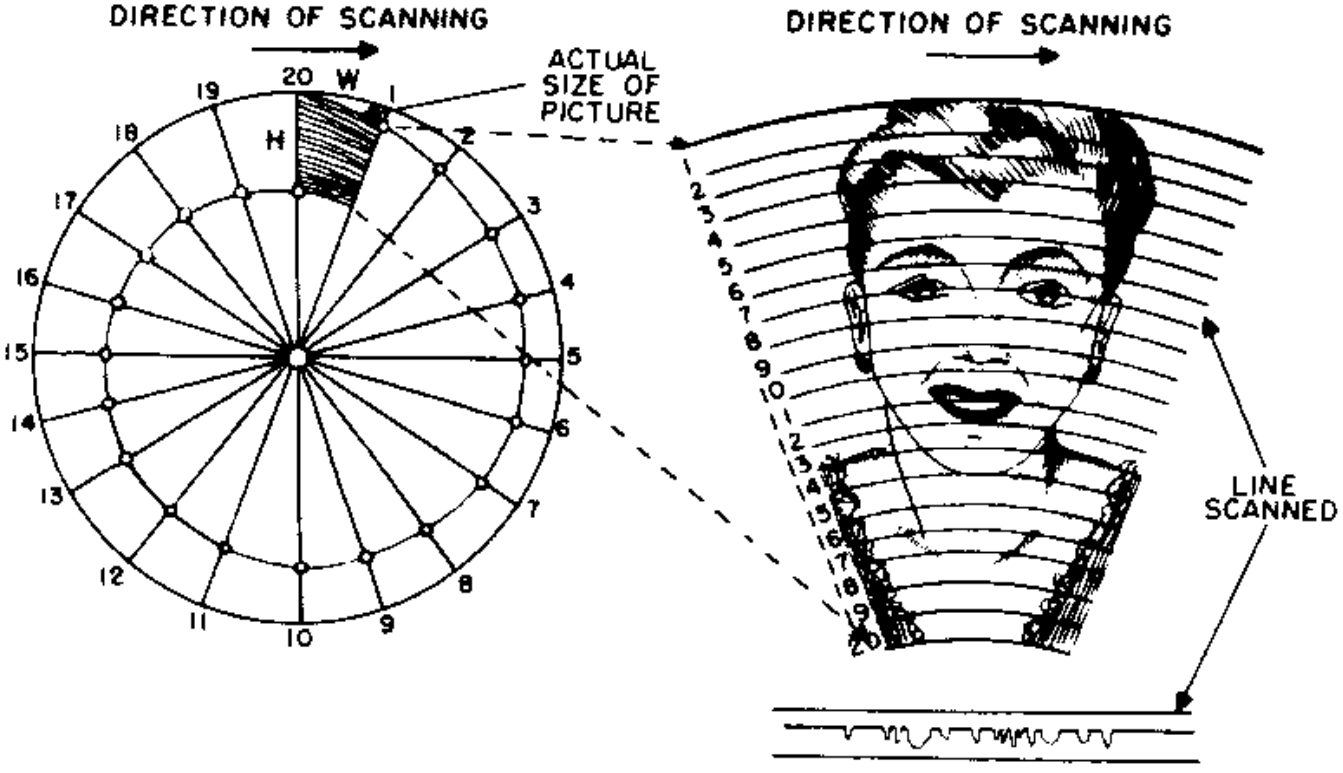
Evolução dos Sensores

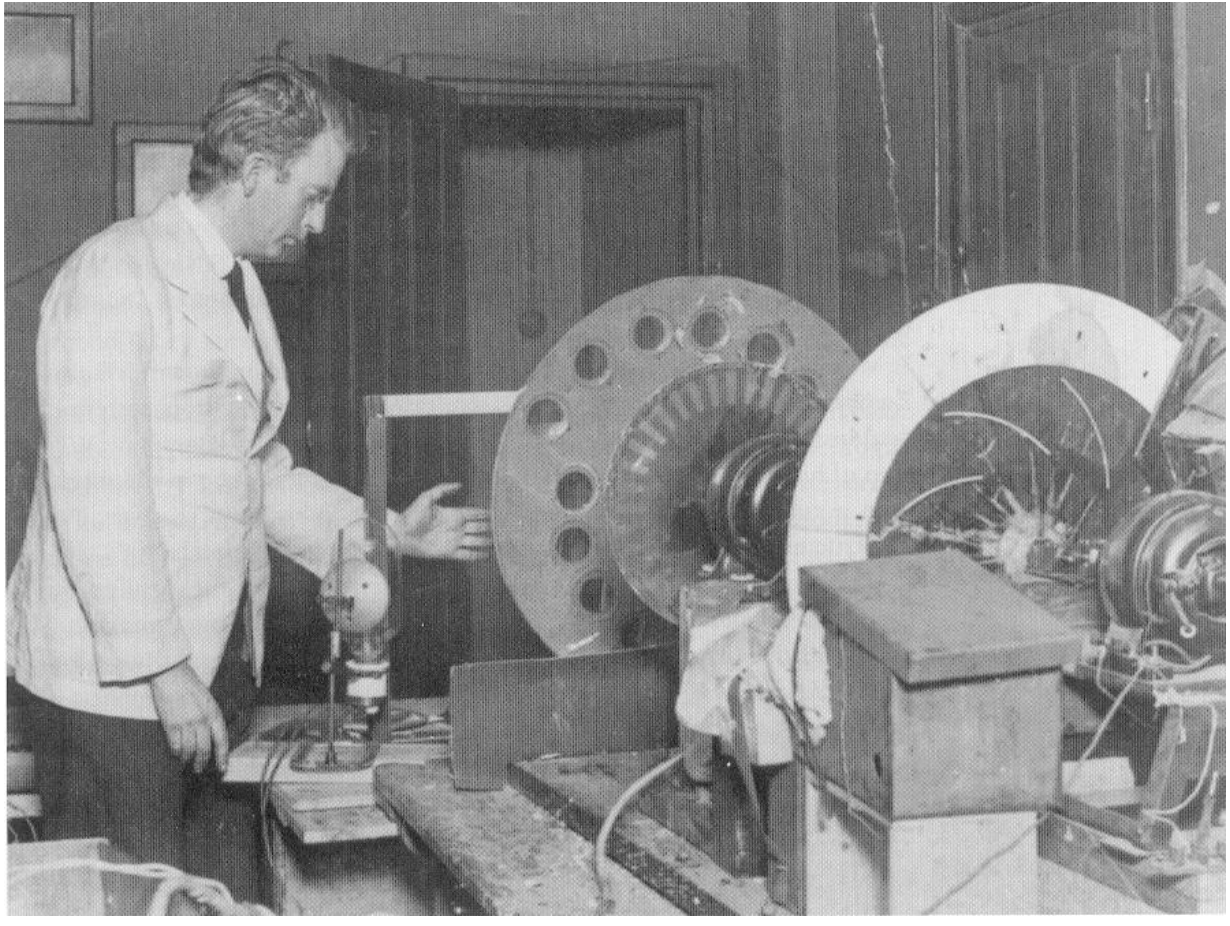
Disco de Nipkov



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

Varredura de uma Imagem por Disco de Nipkov

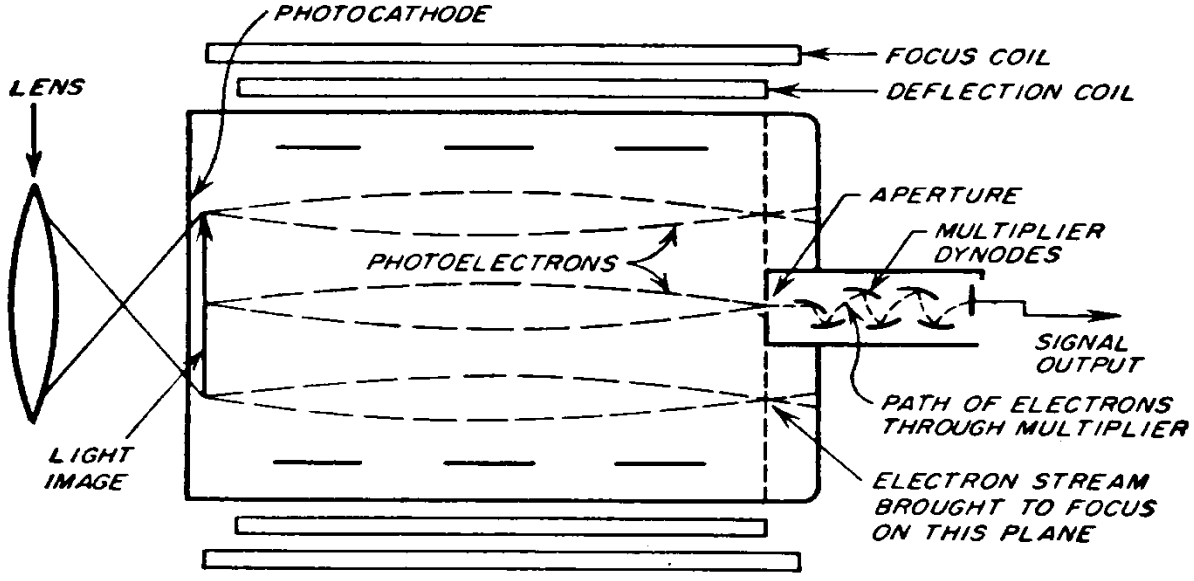




John Logie Baird com protótipo de Televisão (~1925)

Câmera de Varredura Pontual

- "*Image Dissector*" (Farnsworth, 1929)



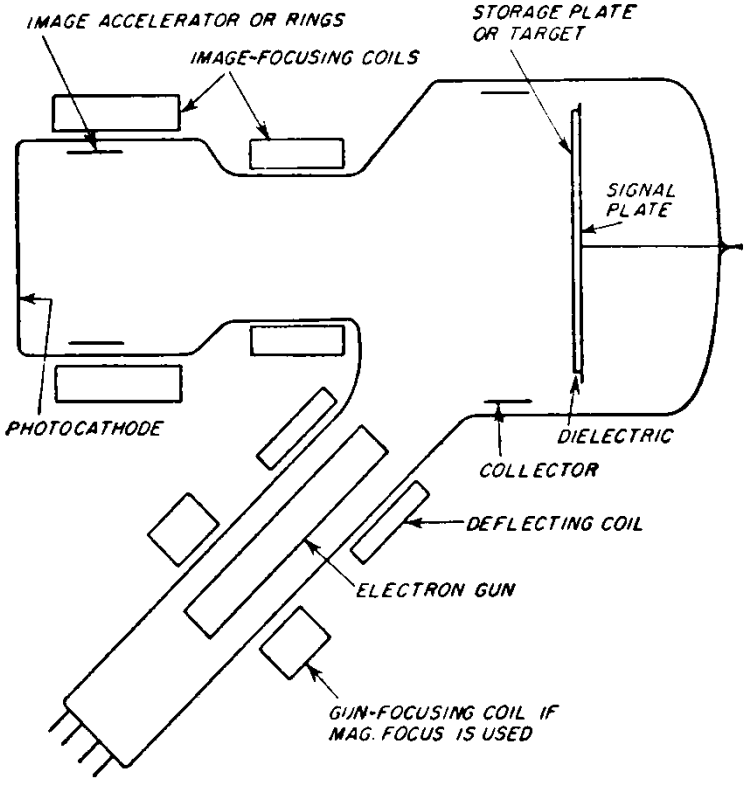
Philo T. Farnsworth

e o seu "*Image Dissector*" (1929)

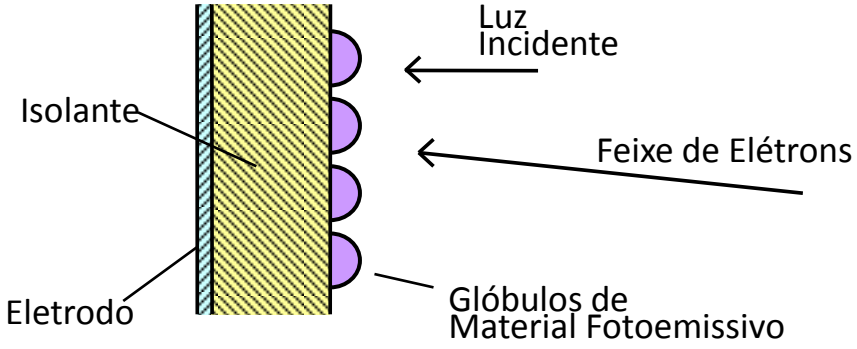
Transmissão: “Gato Félix” (1930)

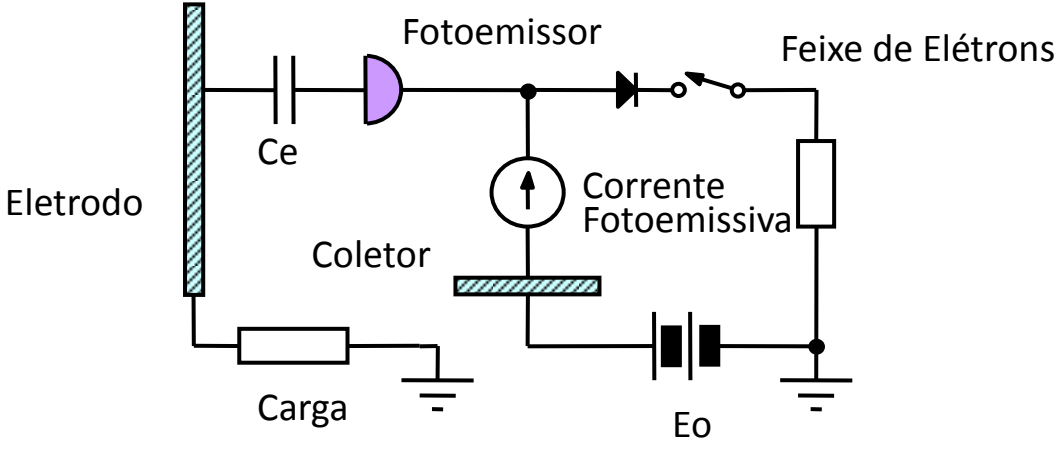
Câmera de Varredura Cumulativa

- Iconoscópio (Zworykin, 1939)



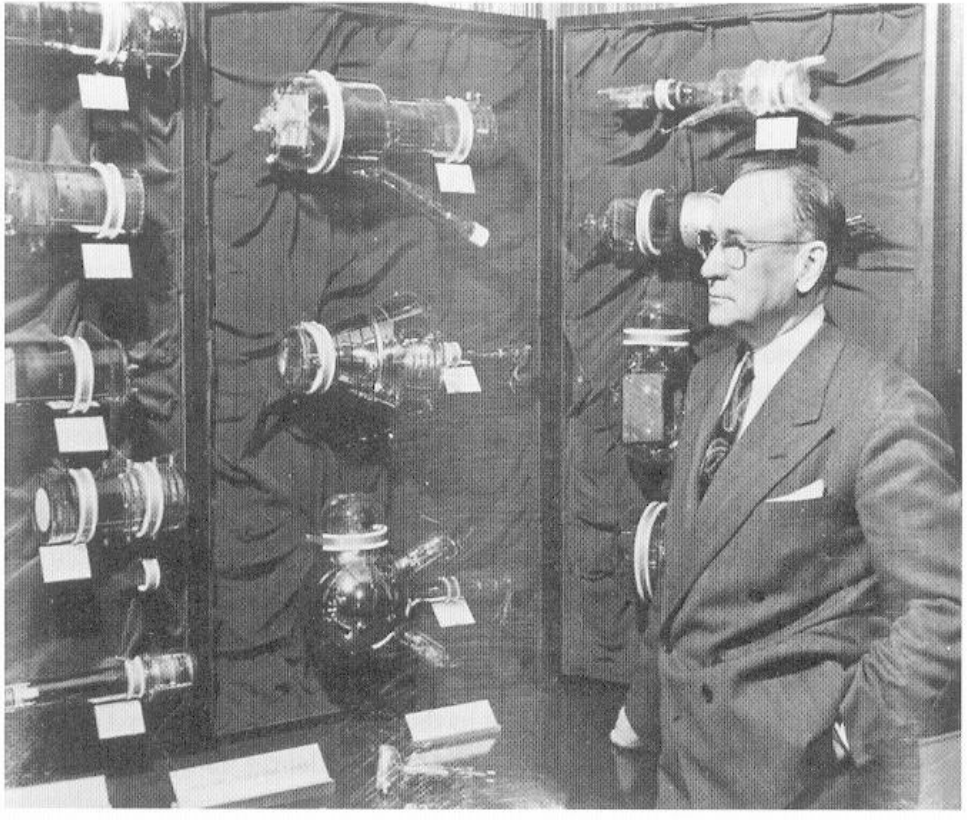
Sensor Fotoemissivo





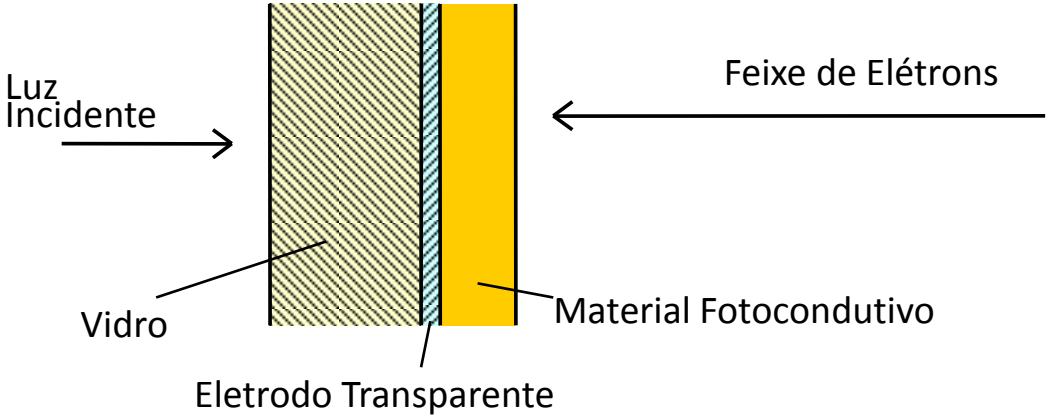
Iconoscópio

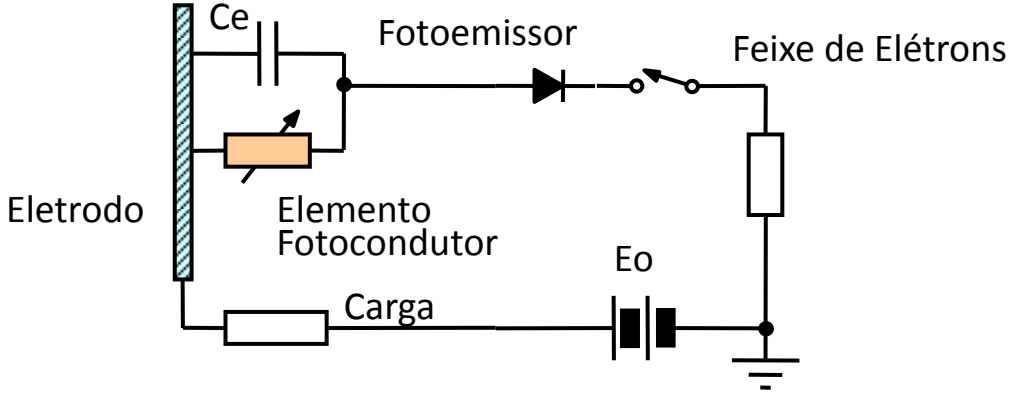
Iconocópios



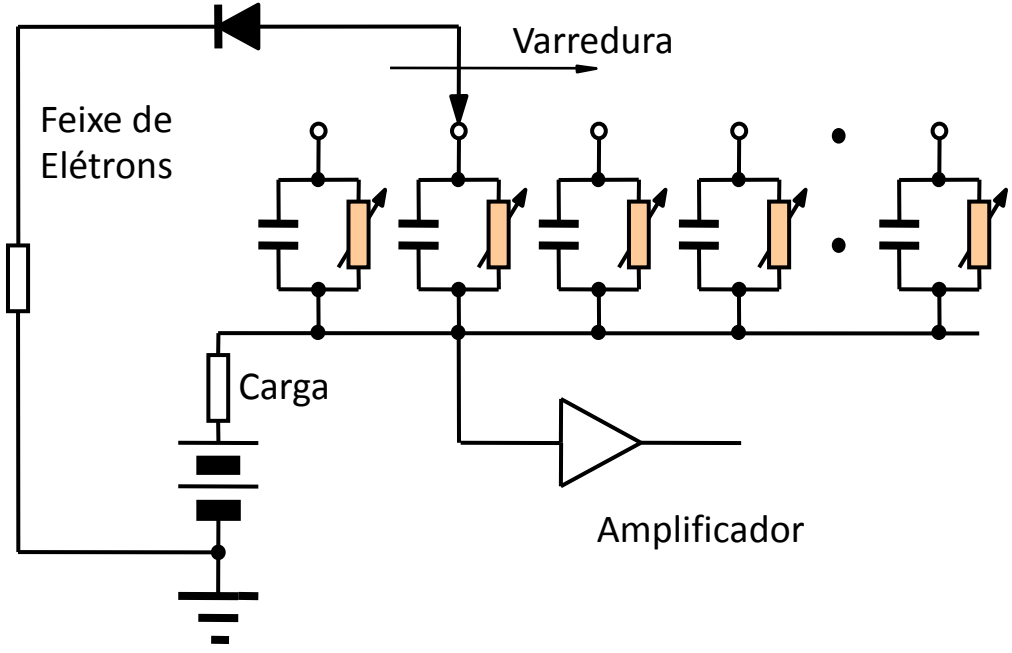
Vladimir Kosma Zworykin e seus Iconoscópios

Sensor Fotocondutivo

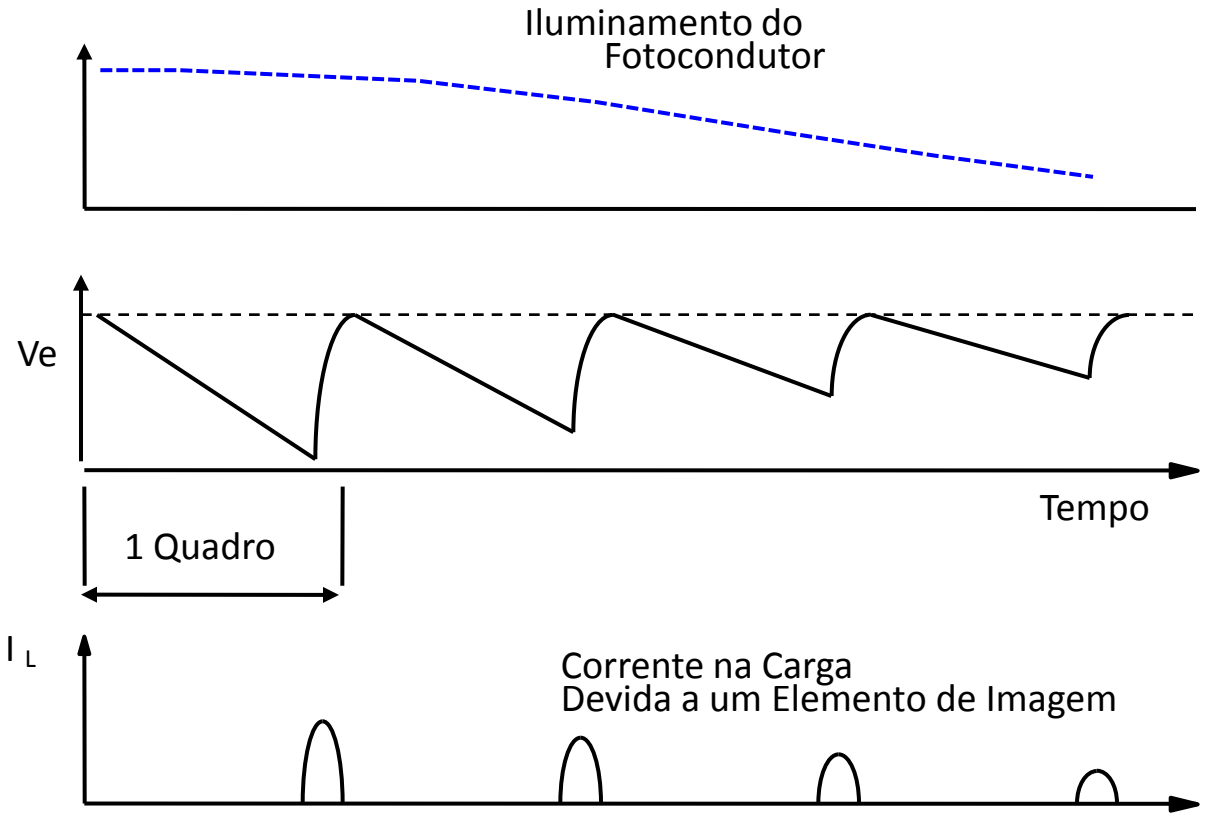




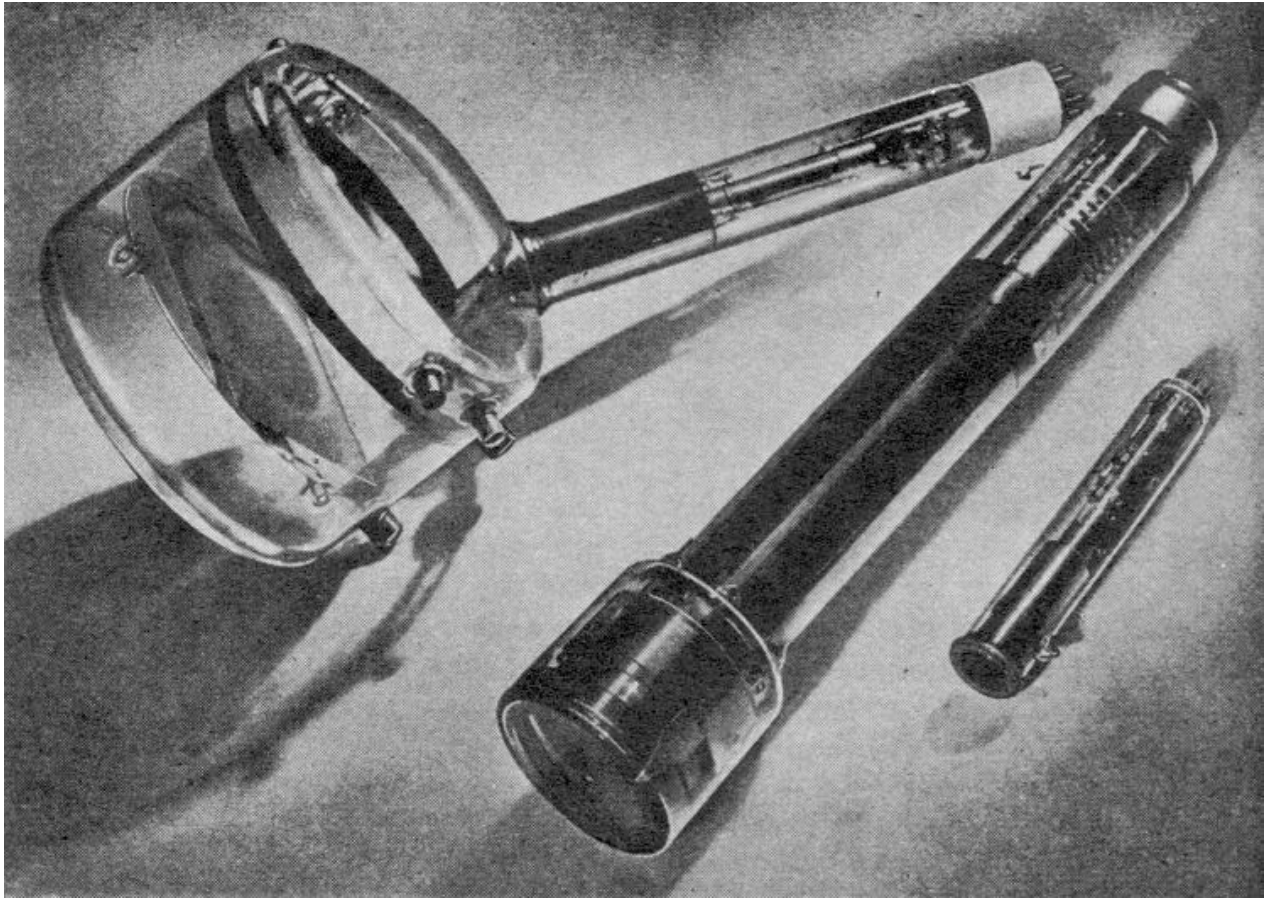
Câmera com Sensor Fotocondutivo



Câmera com Sensor Fotocondutivo

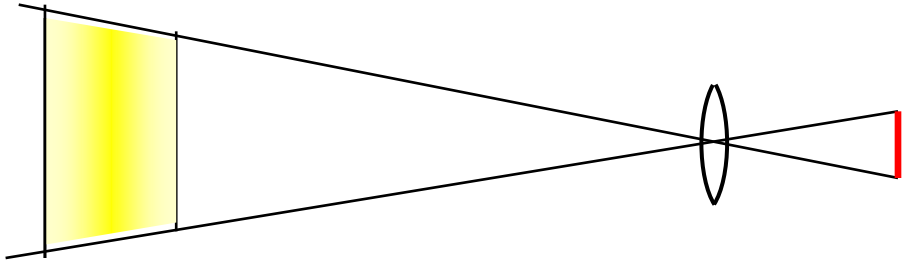


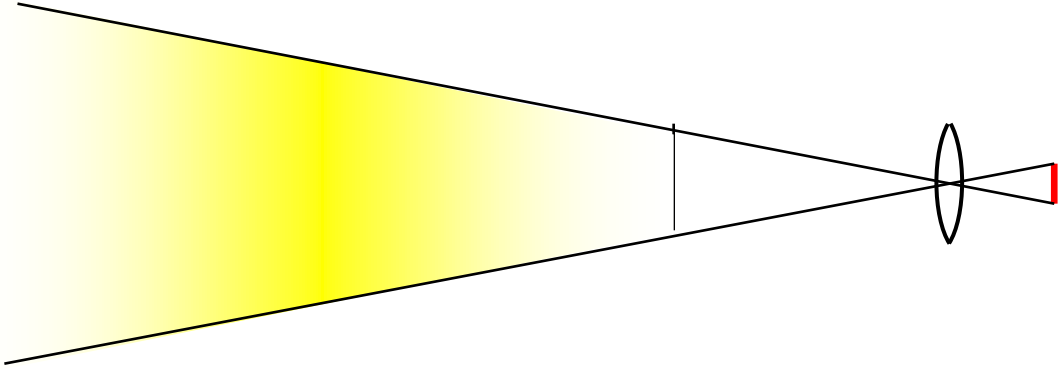
Iconoscópio, Orthicon e Vidicon



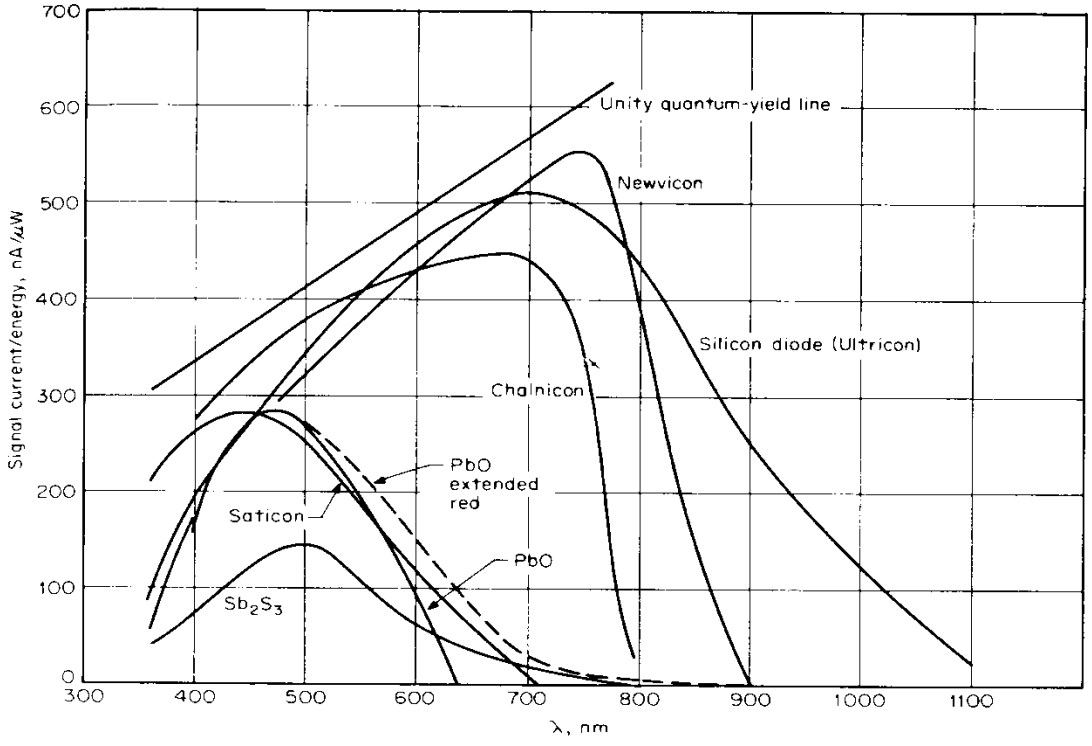
Profundidade de Foco

Profundidade de Foco





Sensibilidades Espectrais p/ Fotocondutores

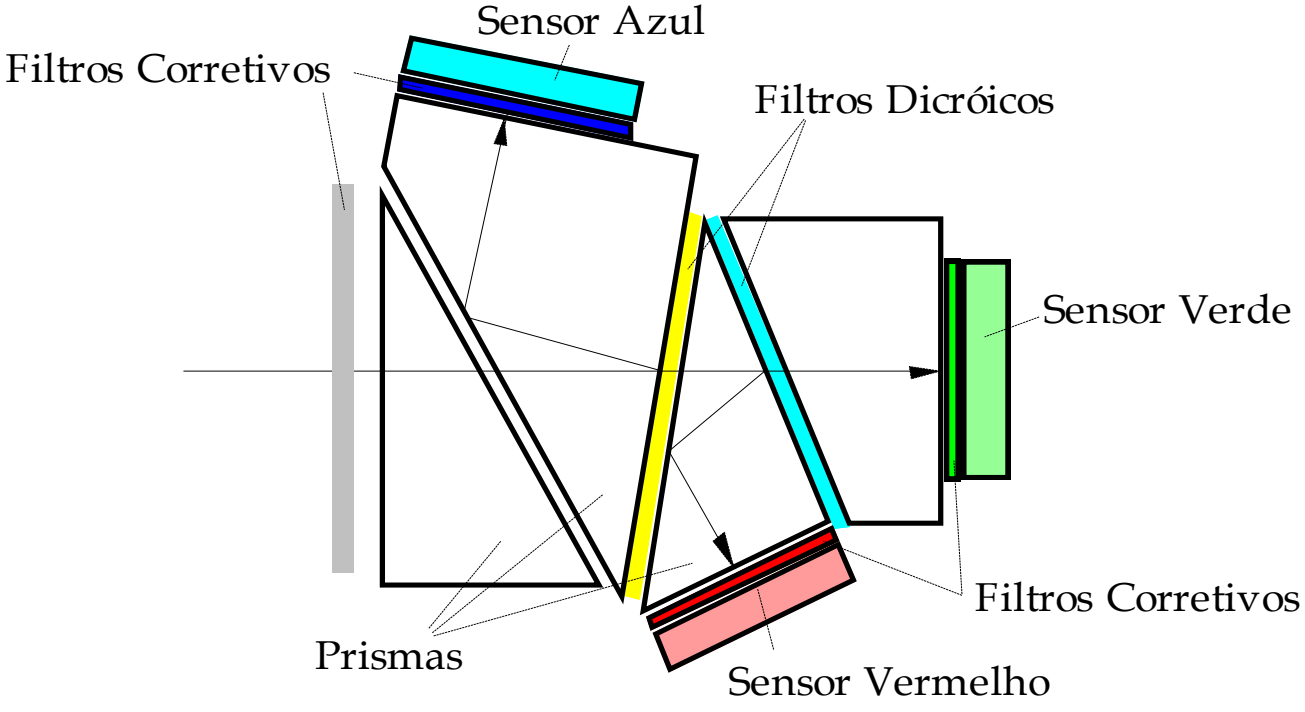


Câmeras Fotocondutoras

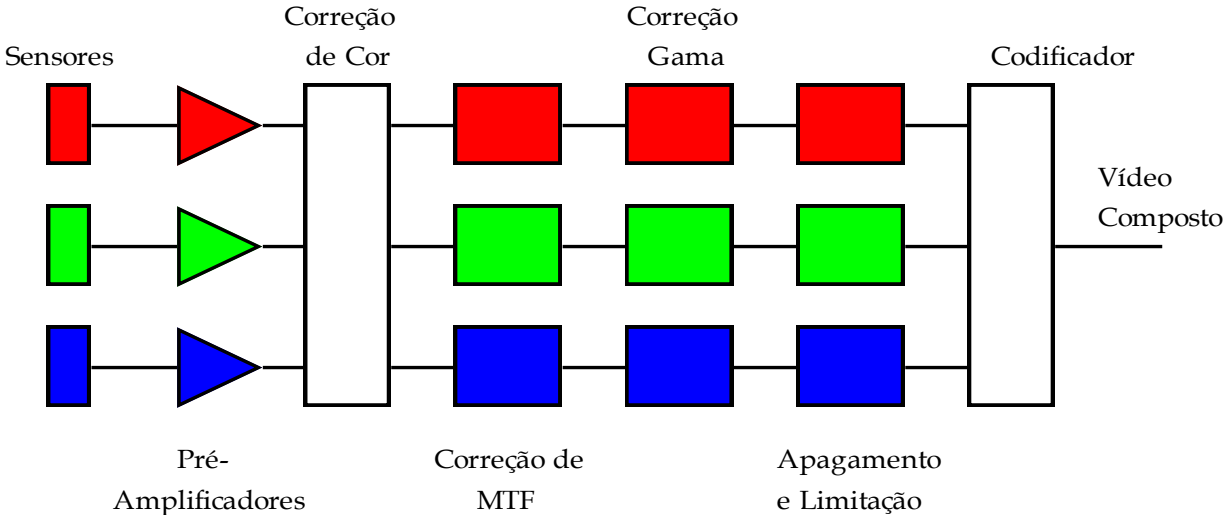
Tipo	Fotocondutor	Aplicações	Desvantagens
Vidicon	Trissulfeto de Antimônio	Telecinagem; Baixo Custo	"Lag" (Retardo)
Newvicon	Selenieto de Zinco	Alta Resolução; Intrum. Médica	alta corrente no escuro
Chalnicon	Selenieto de Cádmio	Sensivel; Vigilância	"Lag"; alta corrente no escuro
Saticon	Liga de Selênio/Arsênico/ 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

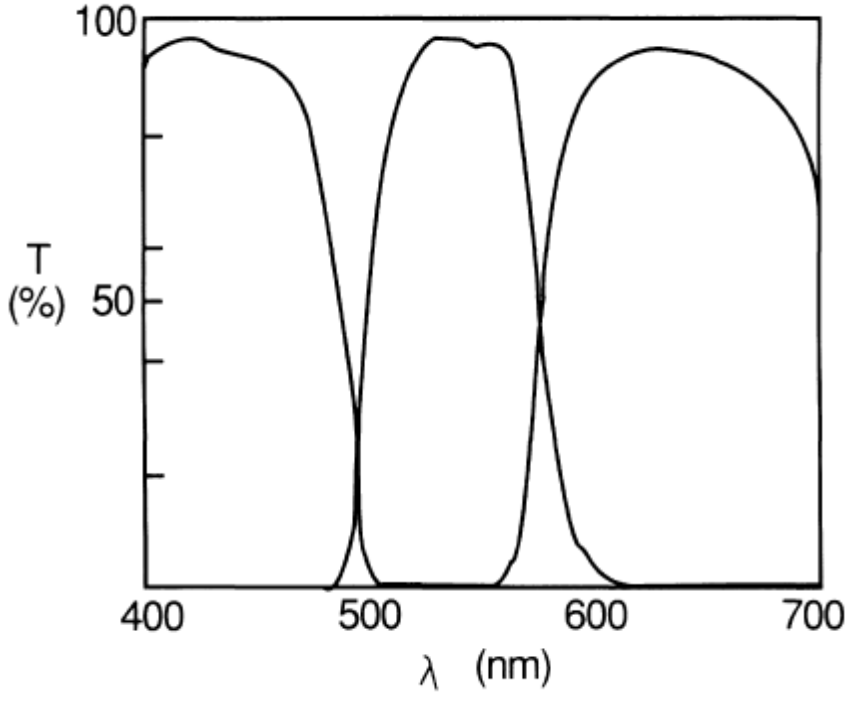
Câmera a Cores com 3 Sensores



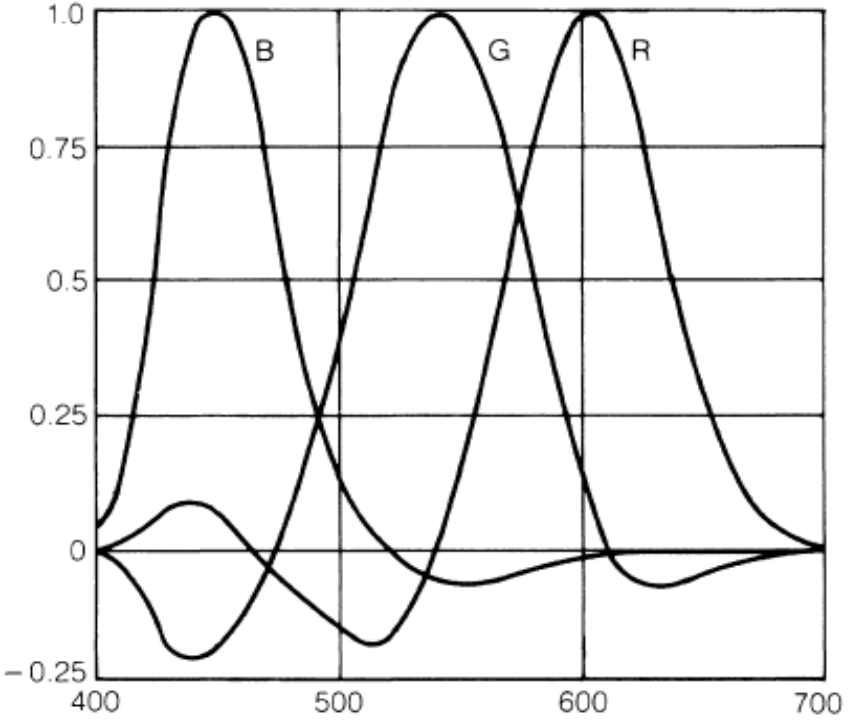
Processamento de Sinal na Câmera de 3 Sensores



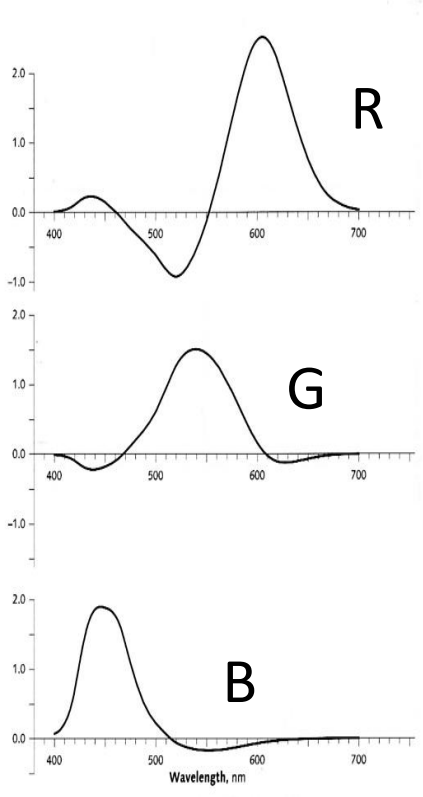
Filtros de Separação de Cor



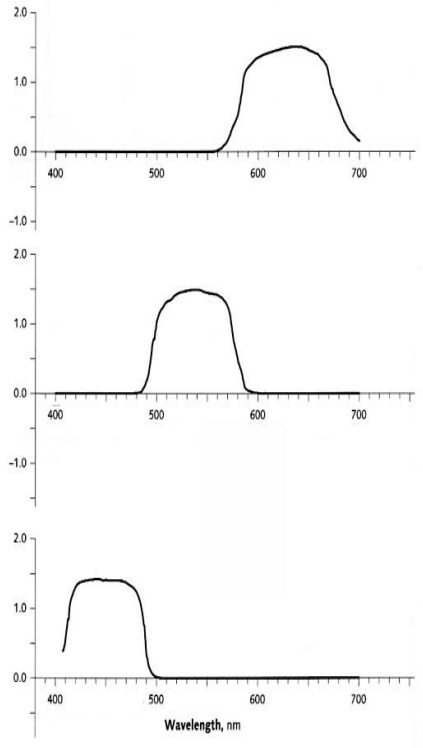
Características Ideais dos Filtros



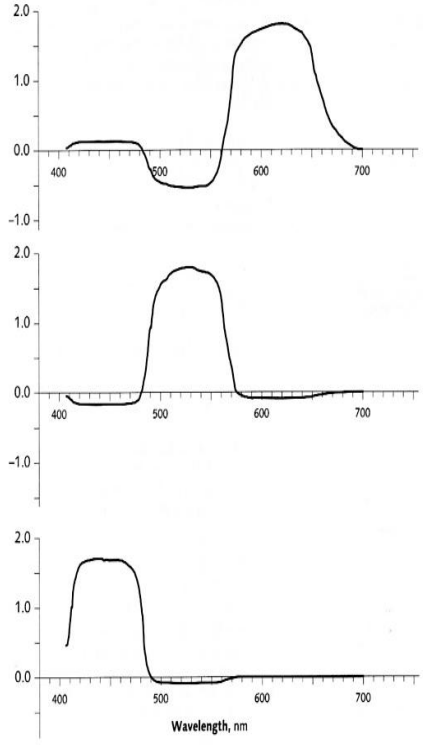
Características Aproximadas por Matrixagem



Resposta Ideal

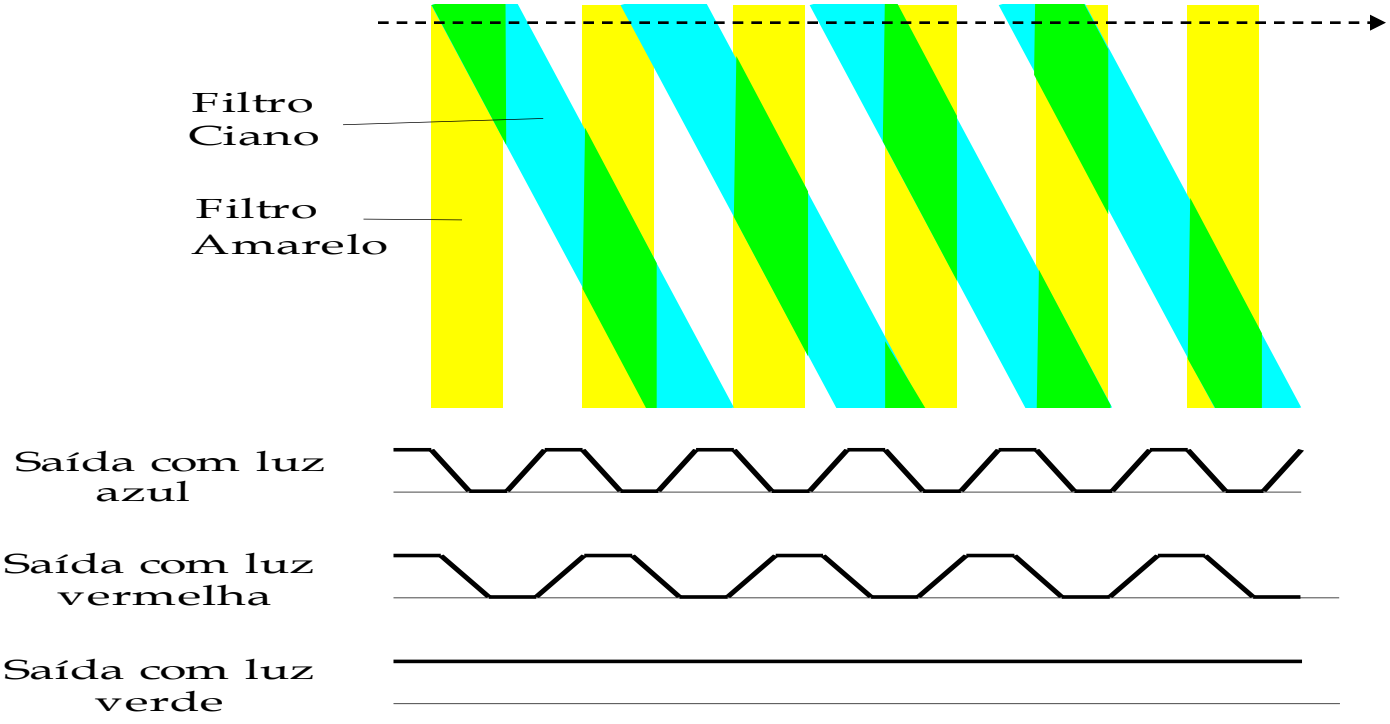


Resposta dos
Filtros ópticos

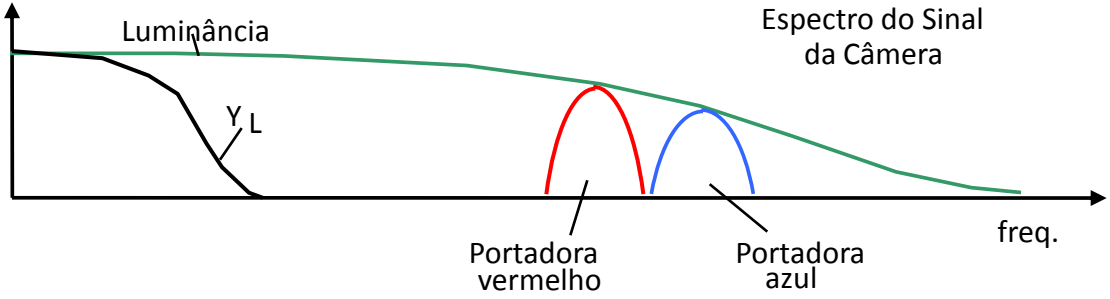


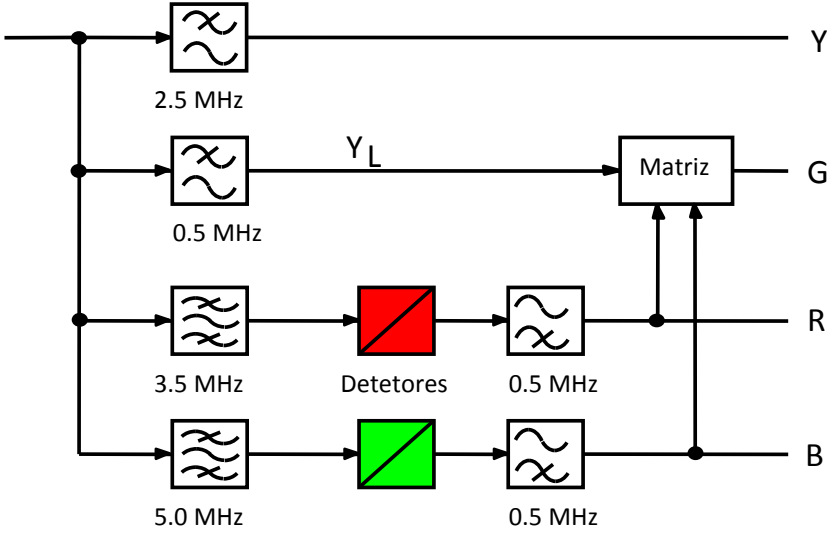
Resposta após
Matriz RGB

Câmera a Cores com 1 Sensor

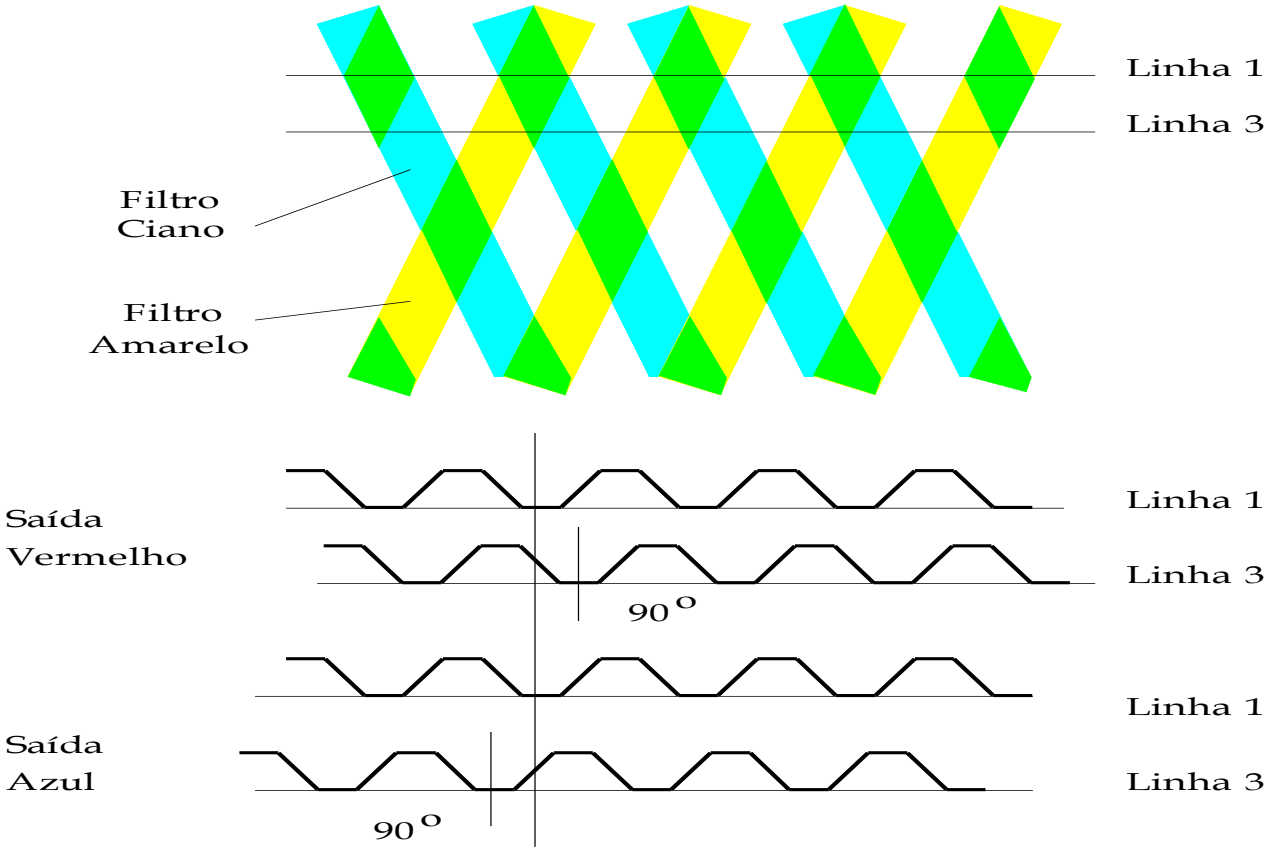


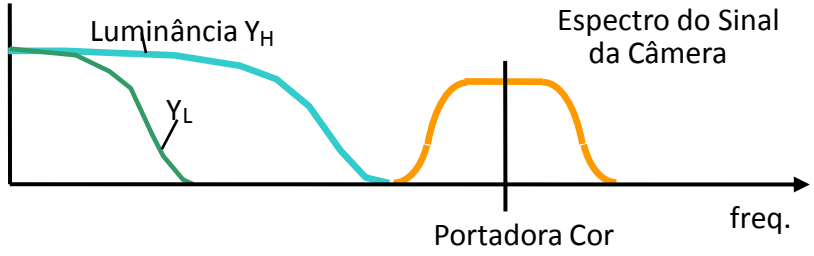
Processamento de Sinal p/ Câmera de 1 Sensor

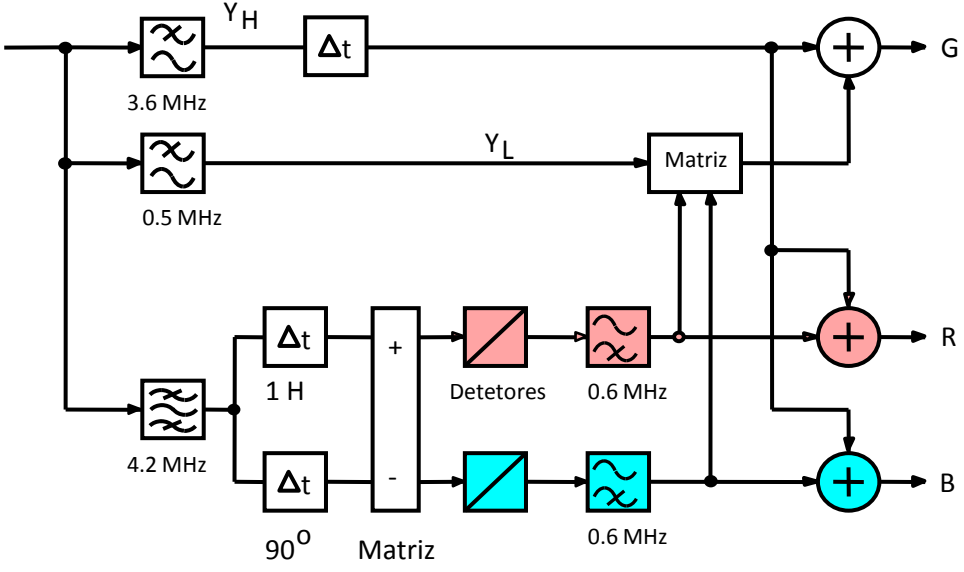




Câmera a Cores de 1 Sensor (Alternativa)

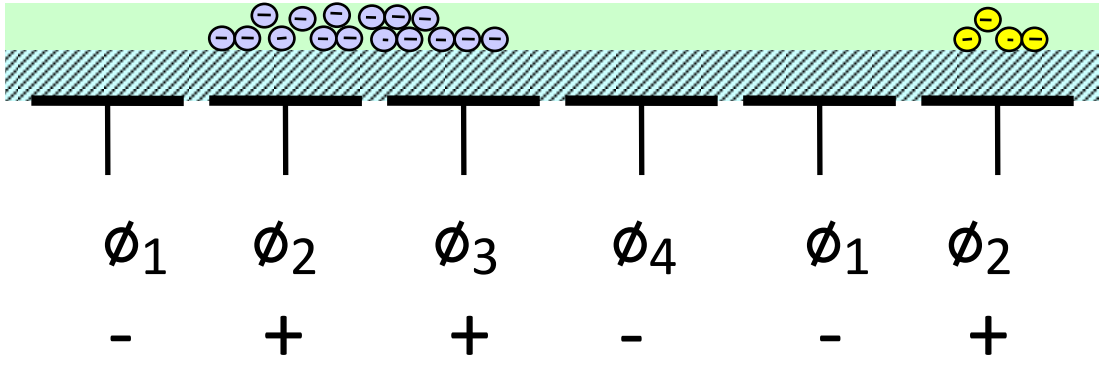



Luminância Y_H
Y_L
Espectro do Sinal
da Câmera
Portadora Cor
freq.


Y_H
Δt
3.6 MHz
G
Y_L
Matriz
0.5 MHz
Δt
1 H
+
-
Detetores
0.6 MHz
R
4.2 MHz
Δt
90°
Matriz
0.6 MHz
B

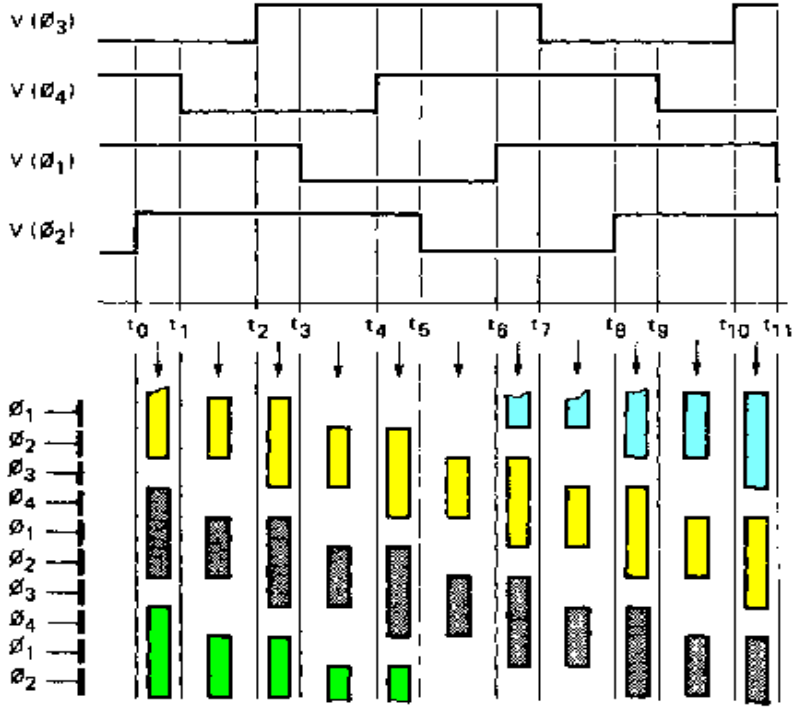
Sensores CCD

Dispositivo de Transferência de Carga



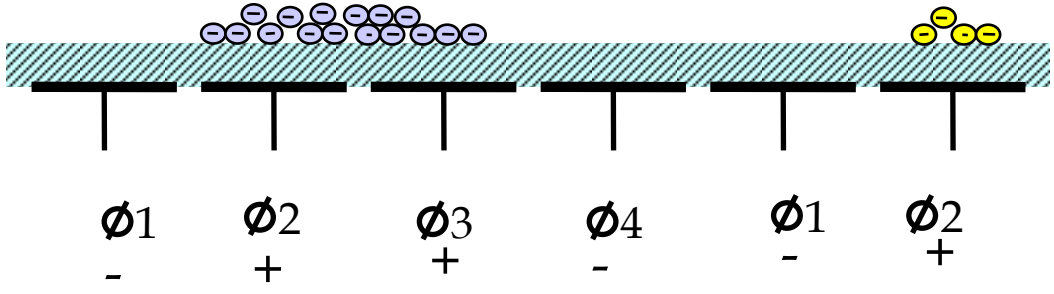
- CCD: Charge Coupled Device

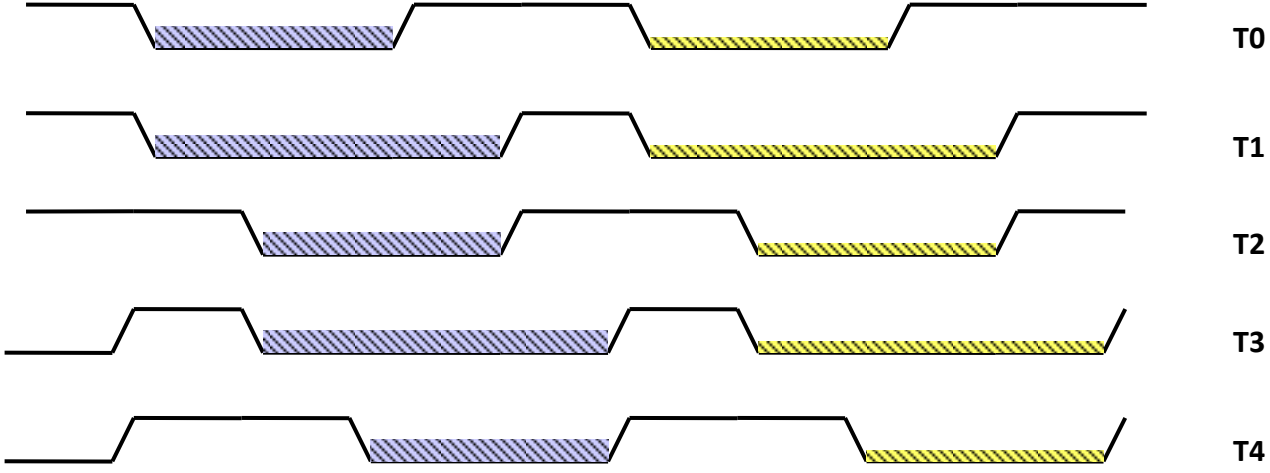
CCD (*Charge Coupled Device*)



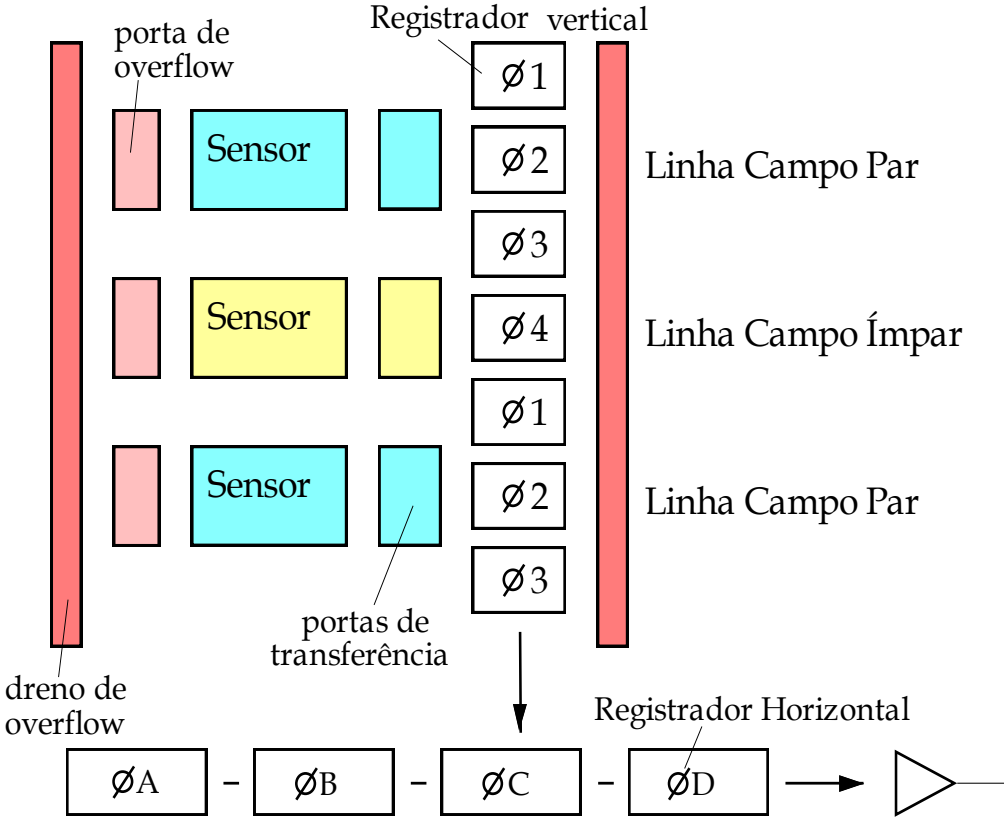
Bell Laboratories, 1970

Deslocamento das Cargas no CCD

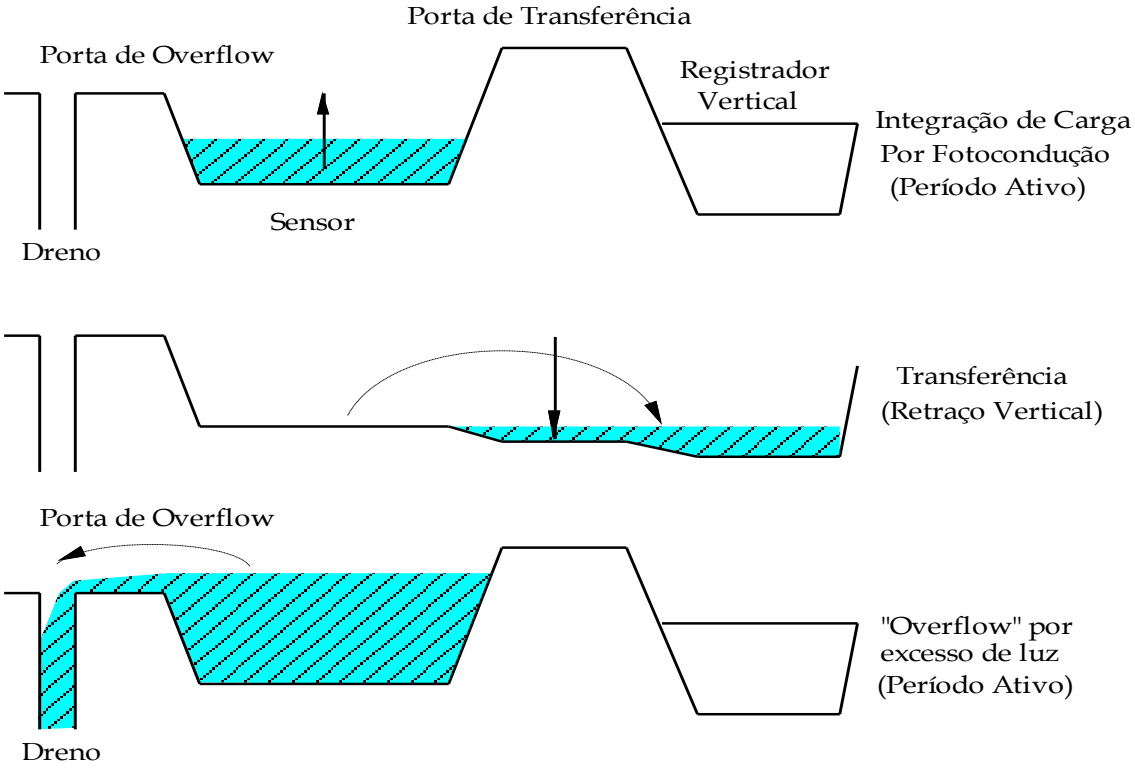




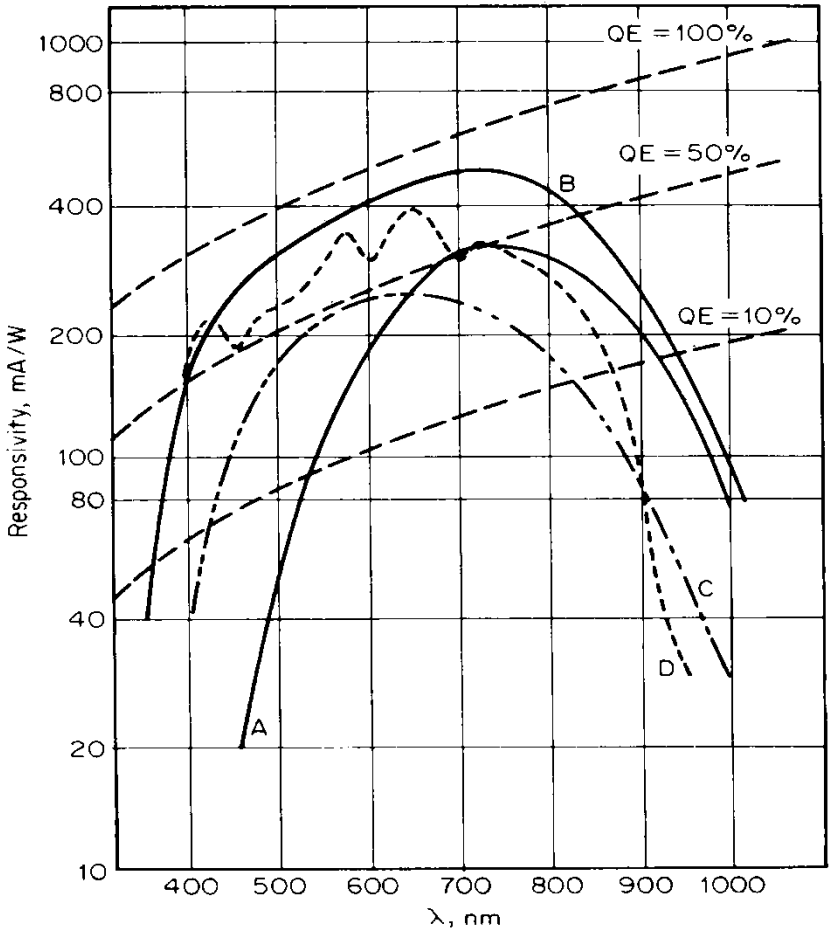
Estrutura de um Sensor CCD



Operação do Sensor CCD



Sensibilidade Espectral de Sensores CCD



A Iluminação Frontal c/ portas de Poli-Silício

B Iluminação Posterior

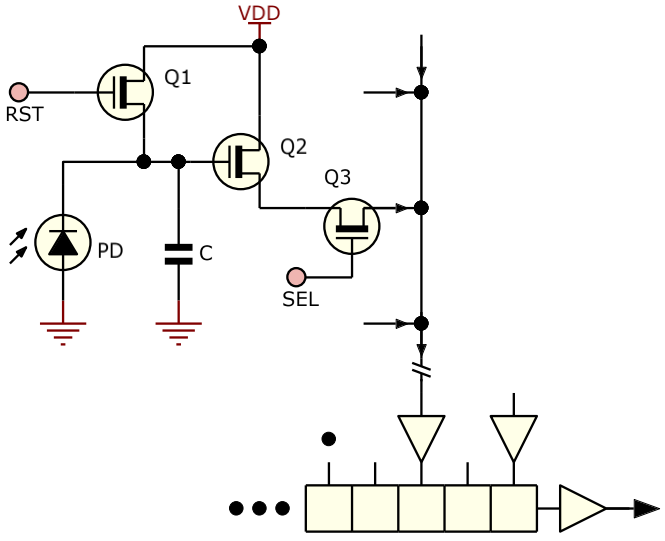
C Iluminação Frontal "fase virtual"

D Iluminação Frontal c/ portas transparentes

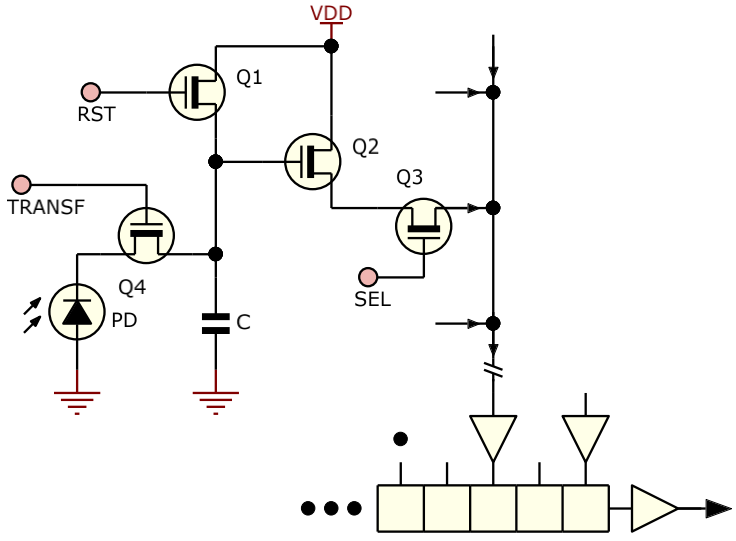
Comparações CCD x Tubo (Final Séc. XX)

	CCD	Tubo
Sensibilidade	f/8 @ 2000 lux	f/4 @ 2000 lux
Iluminamento Mínimo	7.5 lux	10 lux
Índice de Exposição	~540	~150
Resolução Horzontal	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)



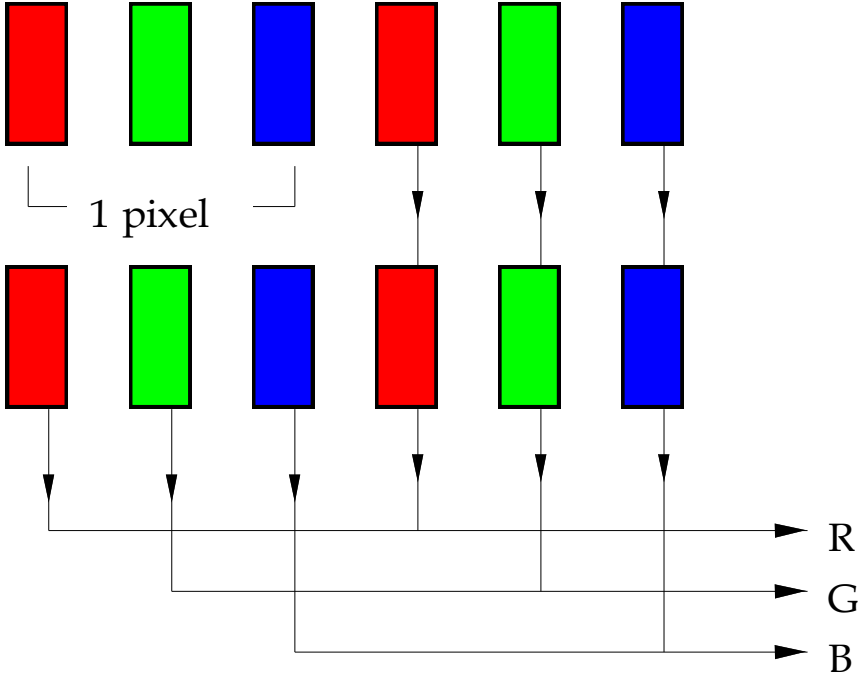
Célula 4T (Permite amostragem simultânea)

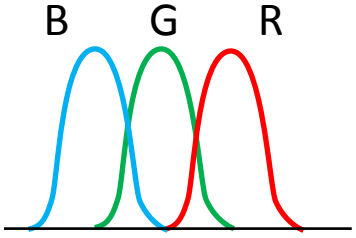
Sensor CMOS (APS – Active Pixel Sensor)

Foto: H. Lartigue (Obturador de cortina)

Distorção devida à amostragem sequencial por linha

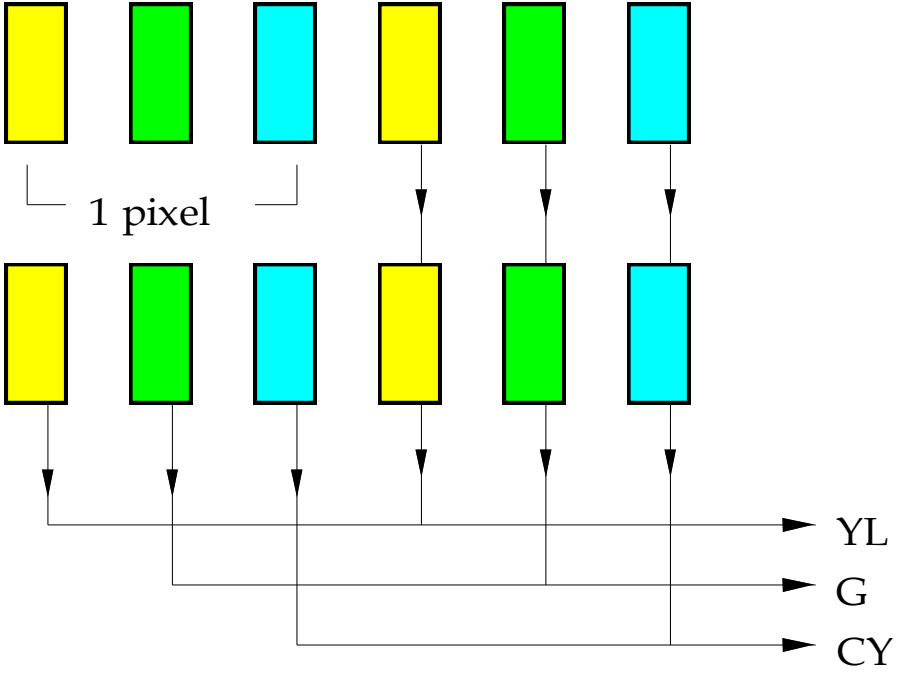
Sensor CCD Tricromático (RGB)

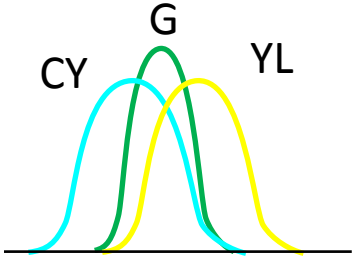




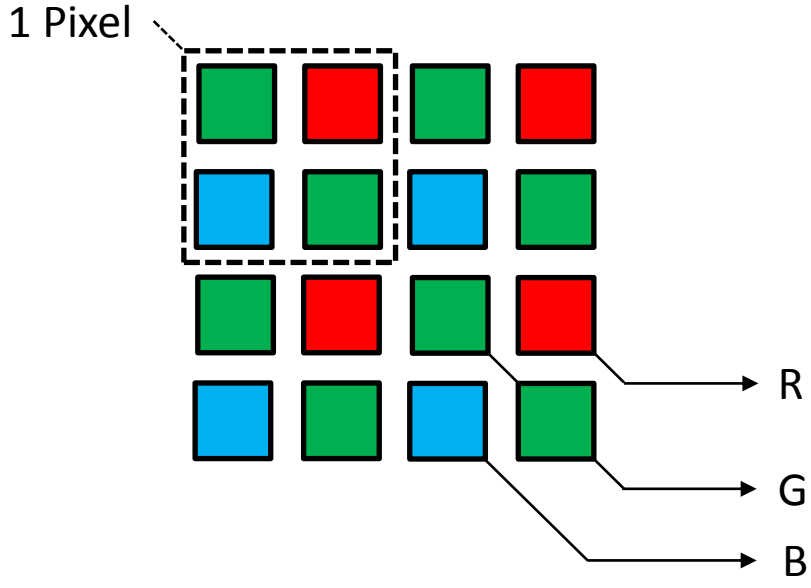
Filtros R, G e B depositados sobre o sensor

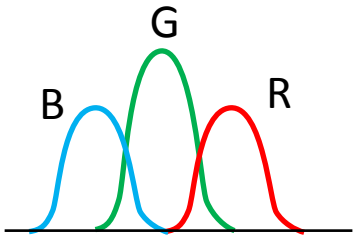
Sensor CCD Tricromático (YL - G - CY)





Sensor CCD Bayer (R G G B)





Resolução (MTF) do Sensor CCD

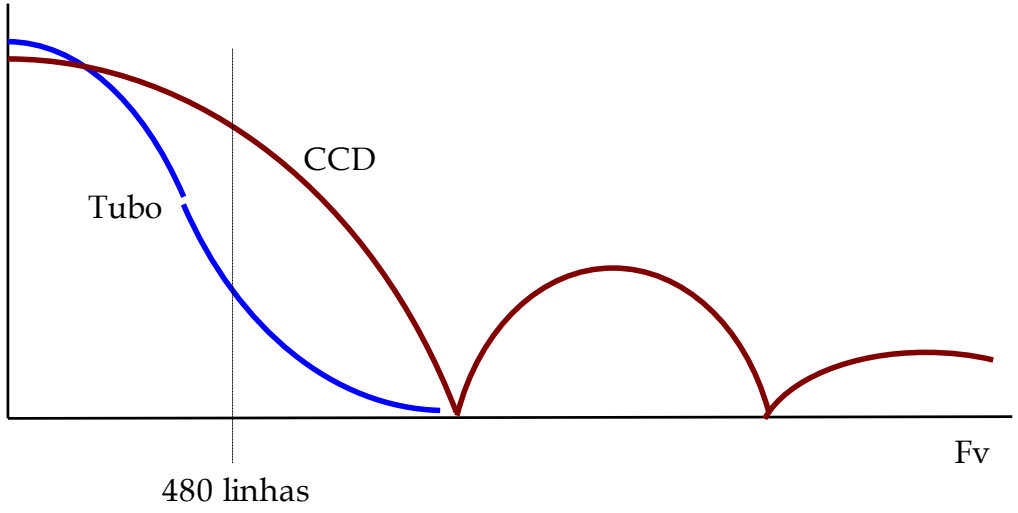
$$MTF(f_h) = \frac{\operatorname{sen} \pi \frac{W_h}{F_h} f_h}{\pi \frac{W_h}{F_h} f_h}$$

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

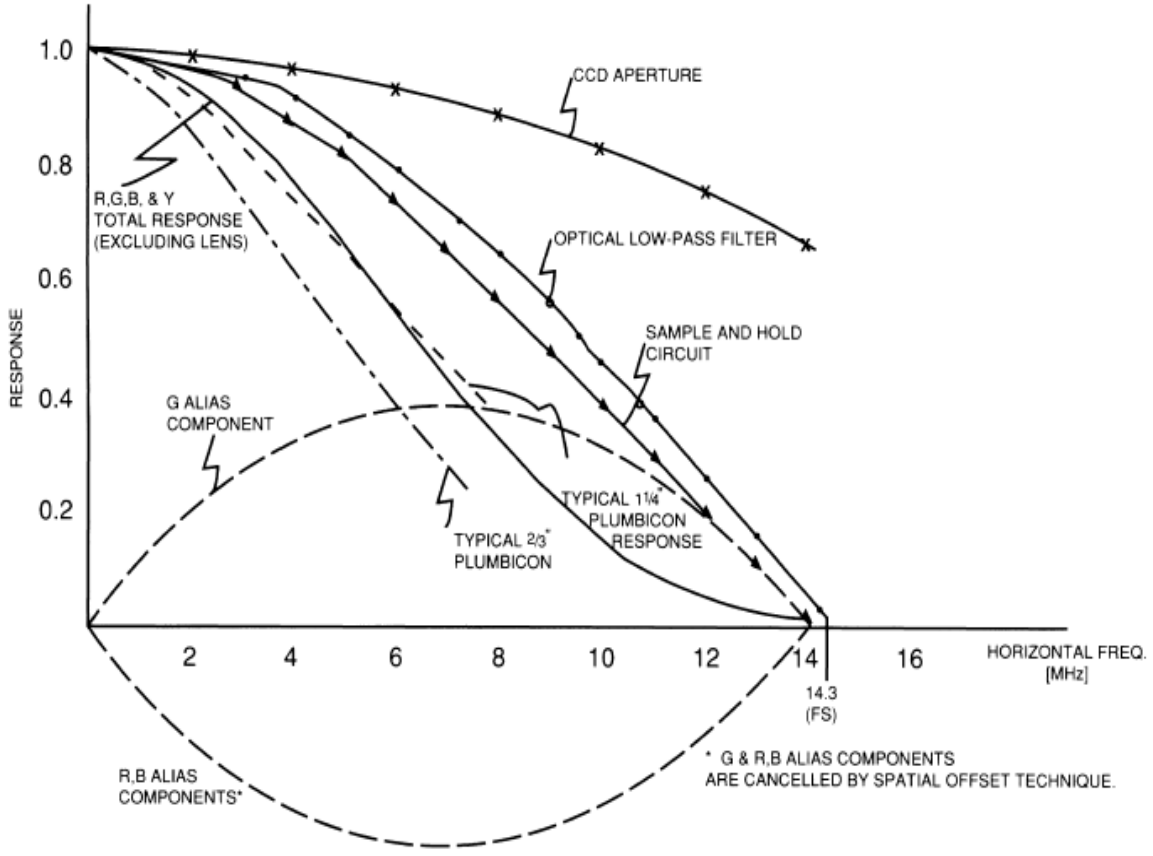
$$MTF(f_v) = \frac{\operatorname{sen} \pi \frac{W_v}{Fv} f_v}{\pi \frac{W_v}{F_v} f_v}$$

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

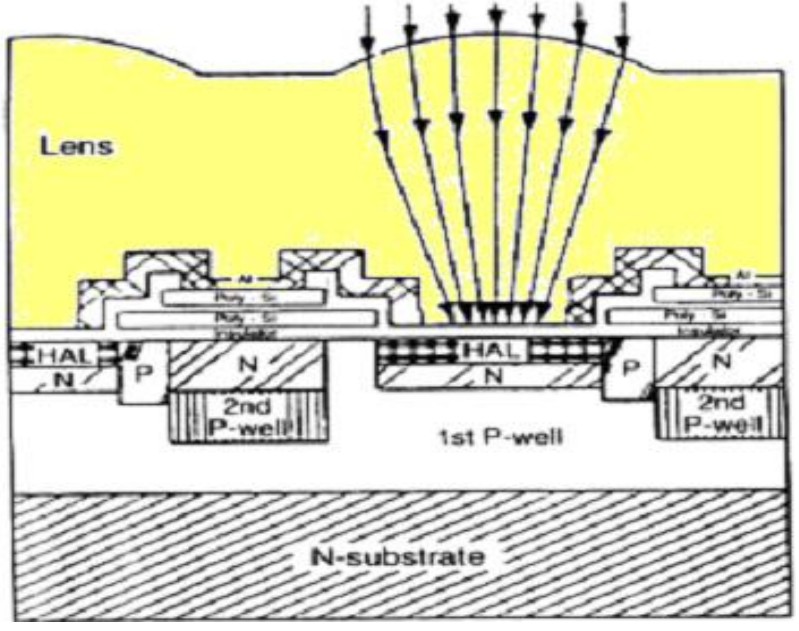
Resolução (MTF) do Sensor CCD

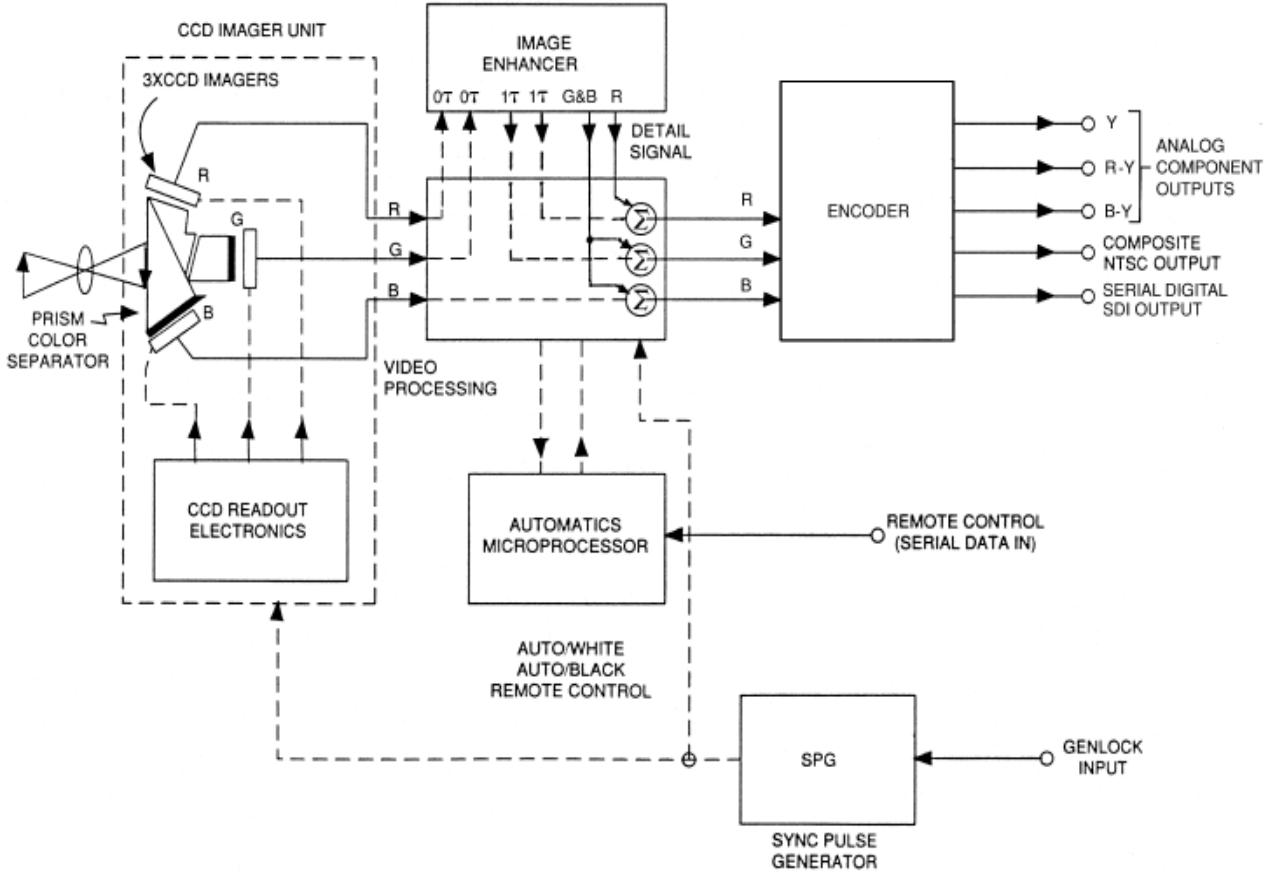


Resolução (MTF) do Sensor CCD

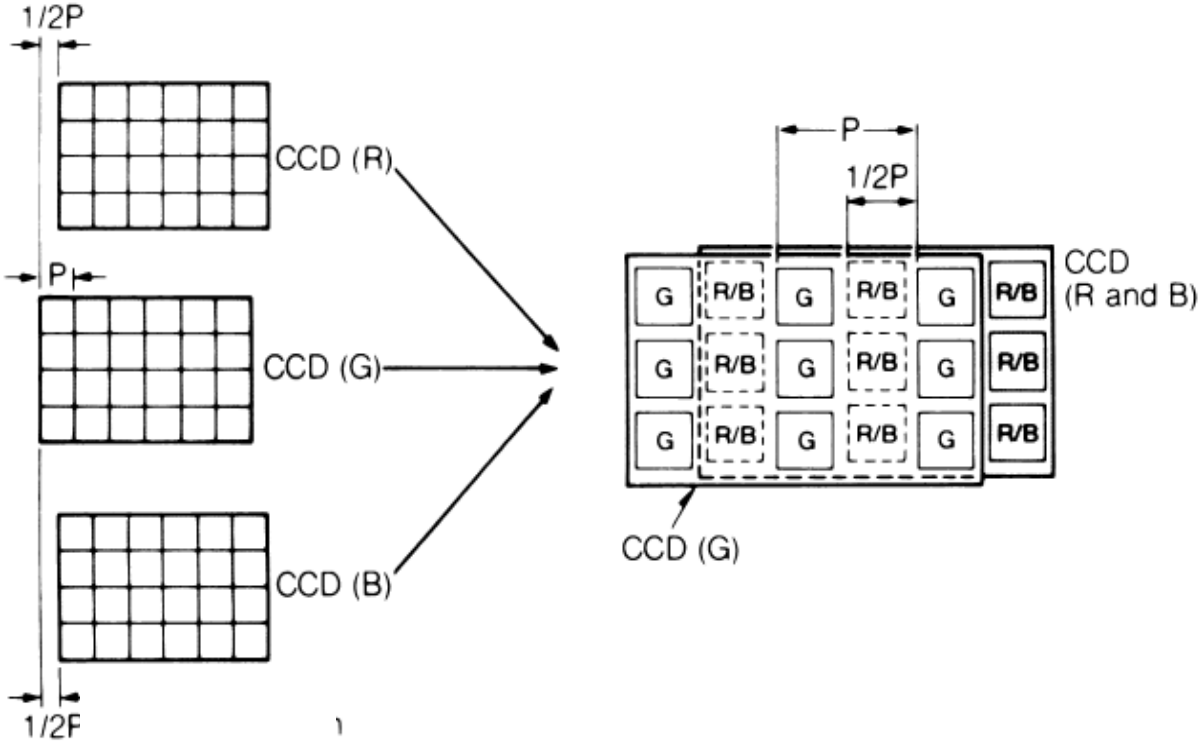


Sensor CCD com Micro-Lentes

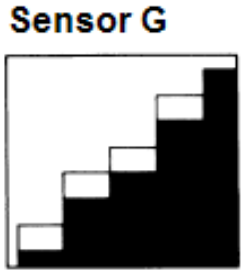


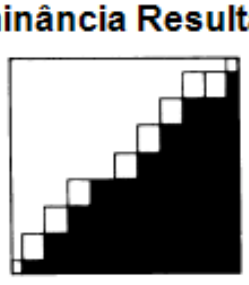

CCD IMAGER UNIT
3XCCD IMAGERS
R
G
B
PRISM
COLOR
SEPARATOR
IMAGE
ENHANCER
0T 0T 1T 1T G&B R
DETAIL
SIGNAL
R
G
B
VIDEO
PROCESSING
ENCODER
Y
R-Y
B-Y
ANALOG
COMPONENT
OUTPUTS
COMPOSITE
NTSC OUTPUT
SERIAL DIGITAL
SDI OUTPUT
CCD READOUT
ELECTRONICS
AUTOMATICS
MICROPROCESSOR
REMOTE CONTROL
(SERIAL DATA IN)
AUTO/WHITE
AUTO/BLACK
REMOTE CONTROL
SPG
GENLOCK
INPUT
SYNC PULSE
GENERATOR

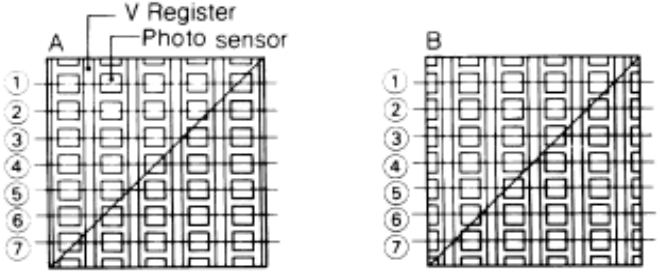
Deslocamento Espacial G / RB



Deslocamento Espacial G / RB

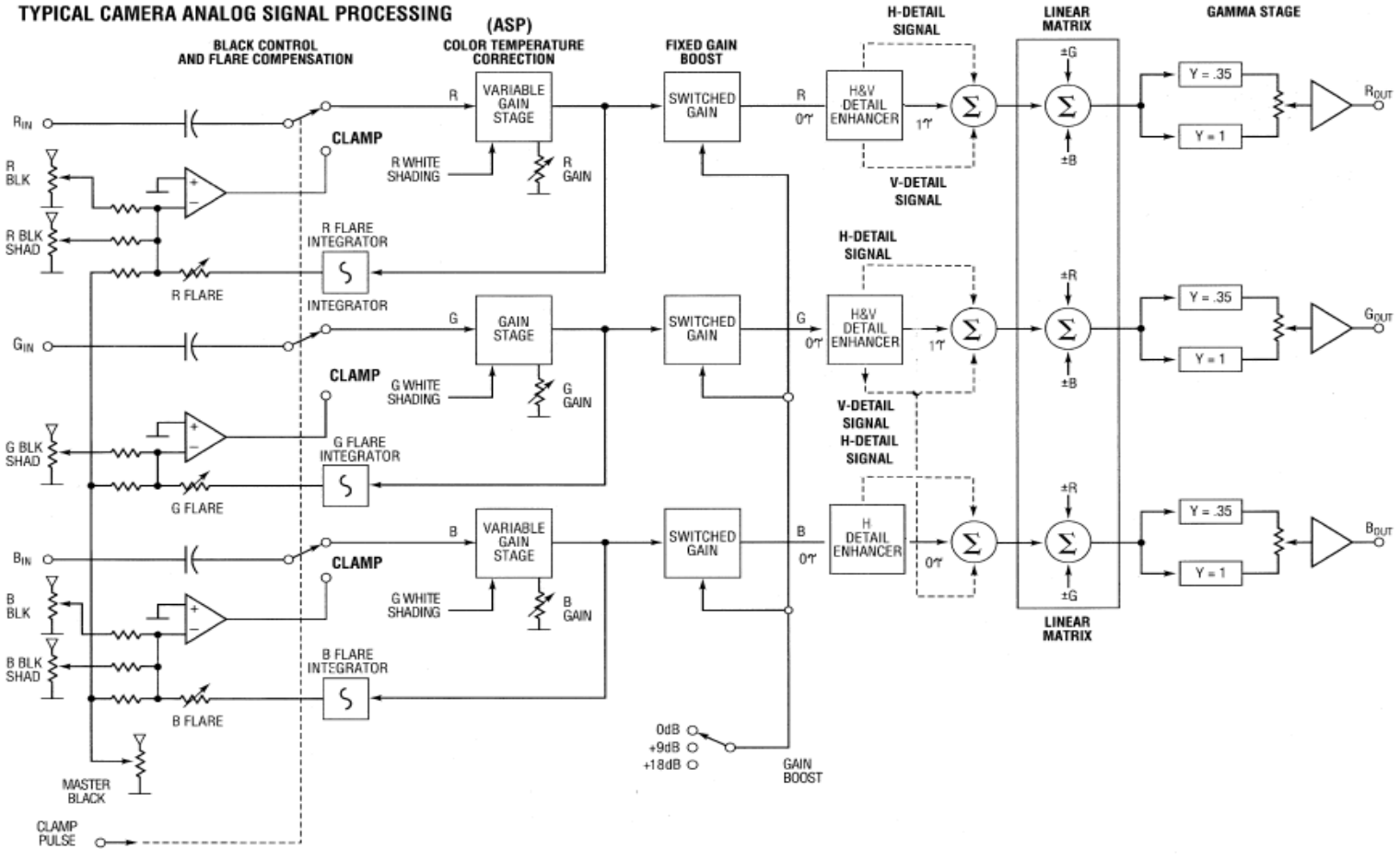




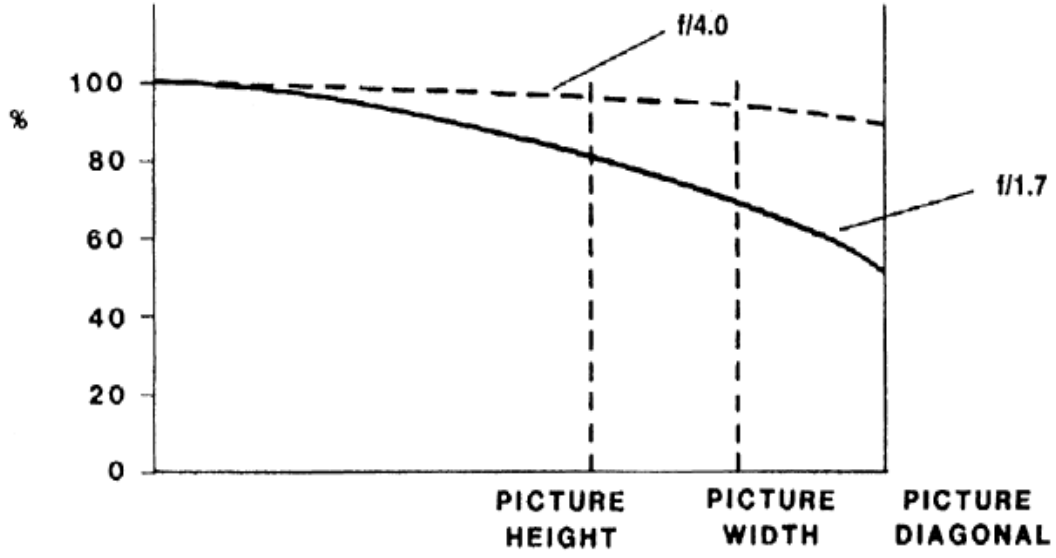


Processamento de Sinal

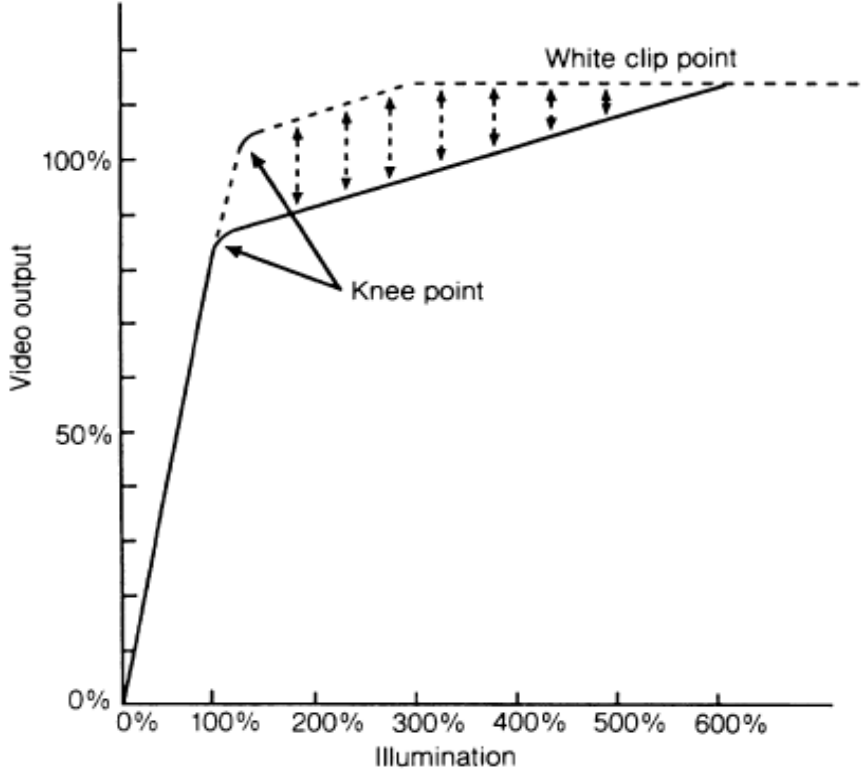
Processamento Analógico



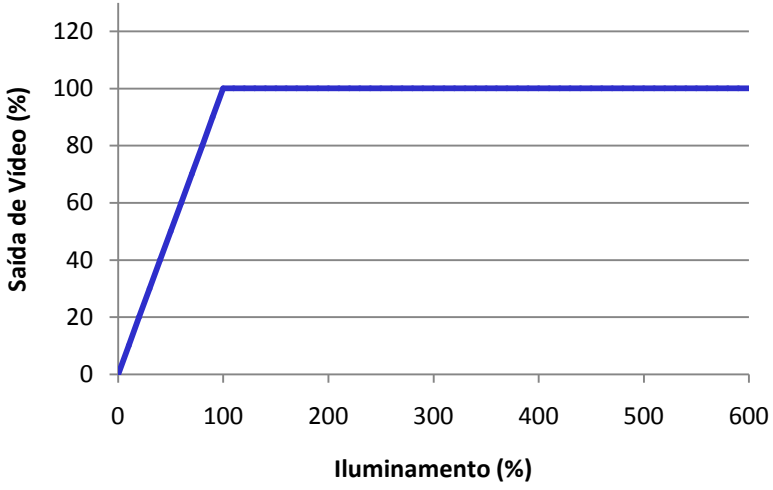
Uniformidade de Campo ("Shading")



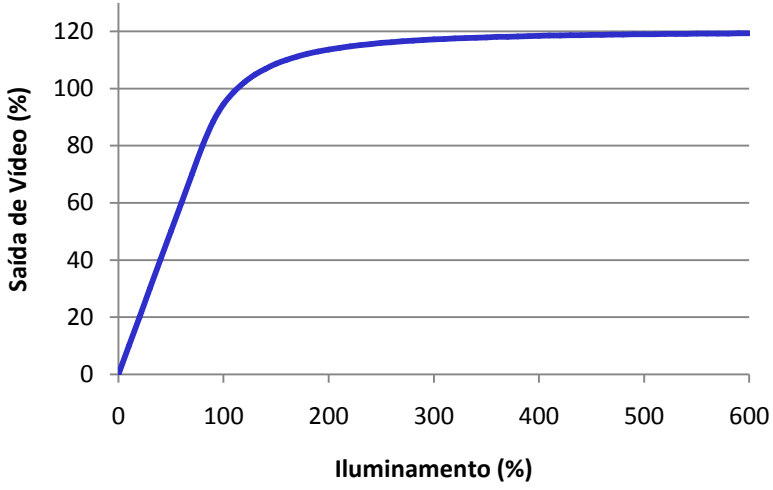
Controle Dinâmico de Contraste



Controle Estático de Contraste

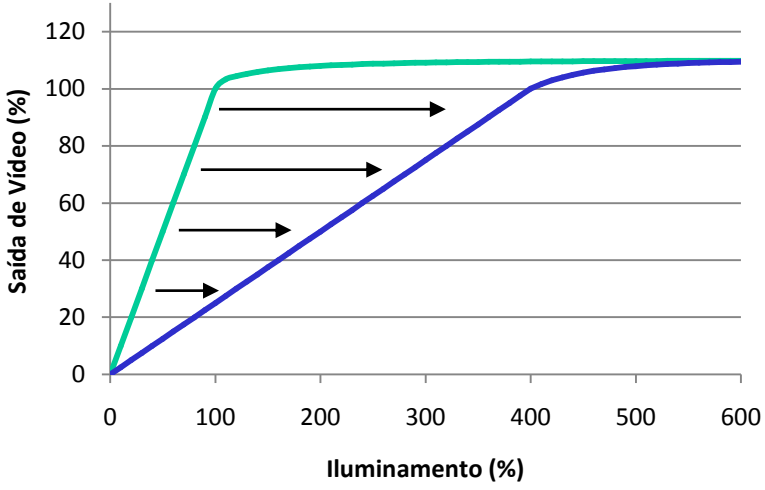


"*Hard Clipping*"
- Linear até 100%, saturação "dura" acima disso

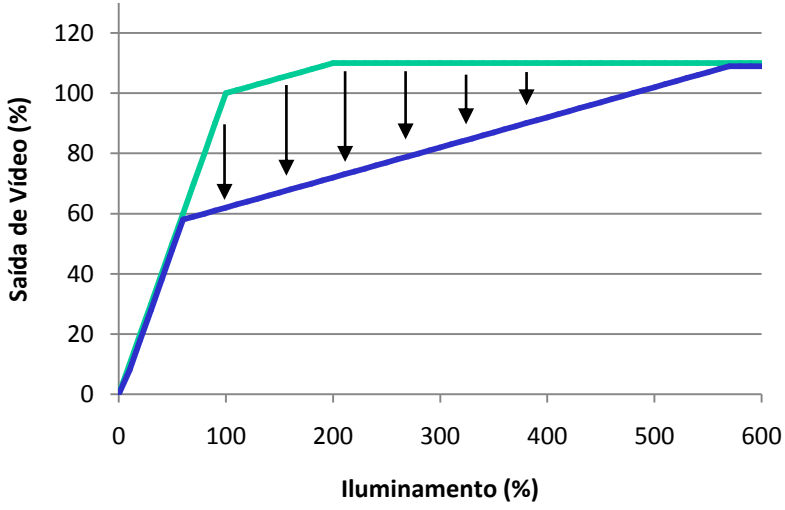


"*Soft Clipping*"
- Linear até ~100%, saturação progressiva acima disso

Controle Dinâmico de Contraste

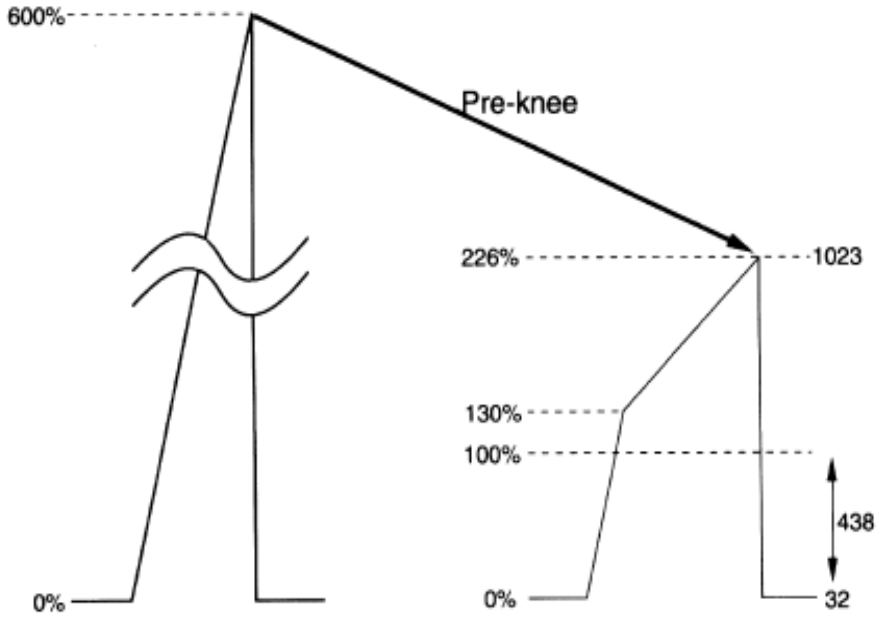


"*Peak AGC*"
- Controle Automático de Ganho mantendo amplitude máxima de saída em 100%

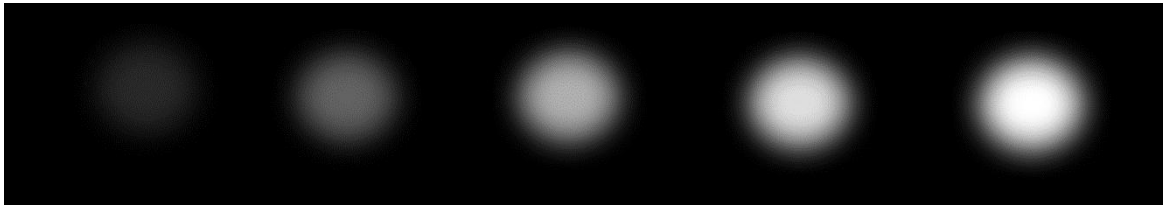


"*Dynamic Clipping*"
- 2 faixas de ganho, com ponto de inflexão controlado para manter amplitude máxima em 100%

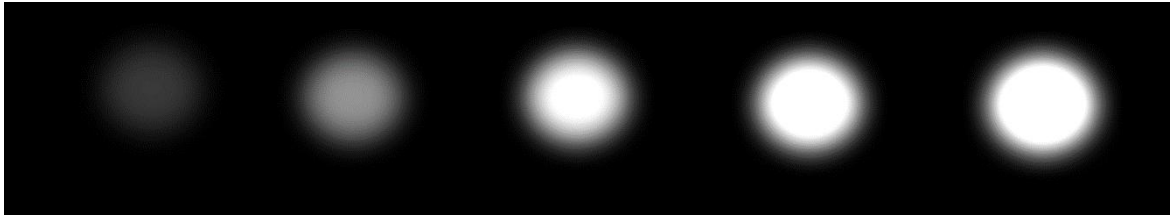
Faixa Dinâmica com Controle de Saturação



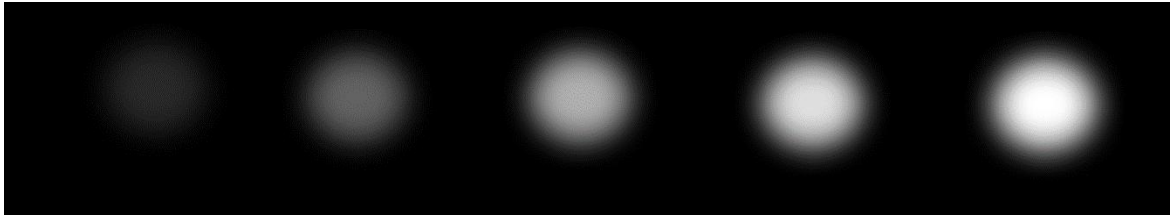
Efeitos de Saturação



“Peak AGC”

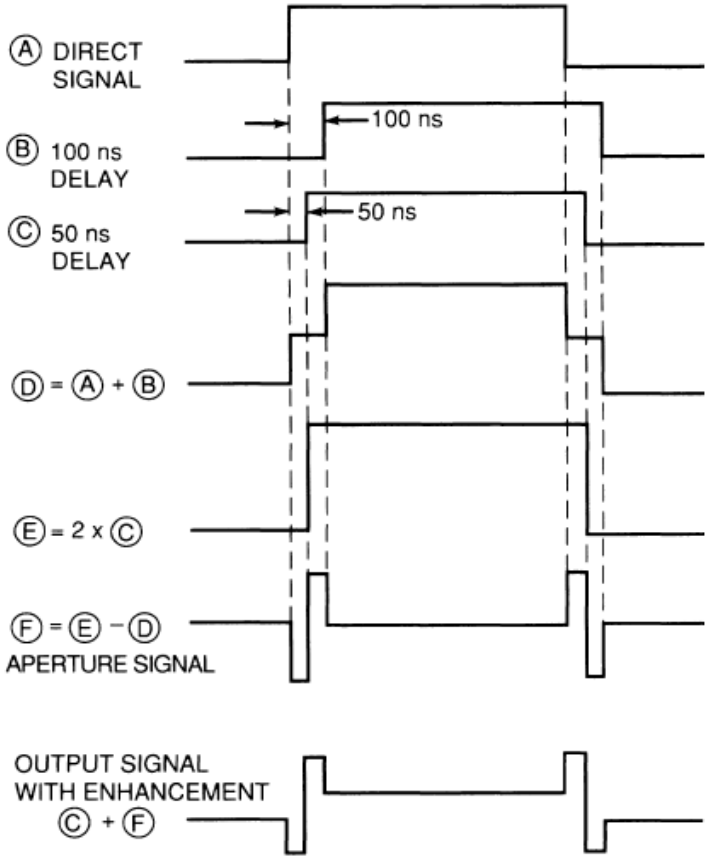


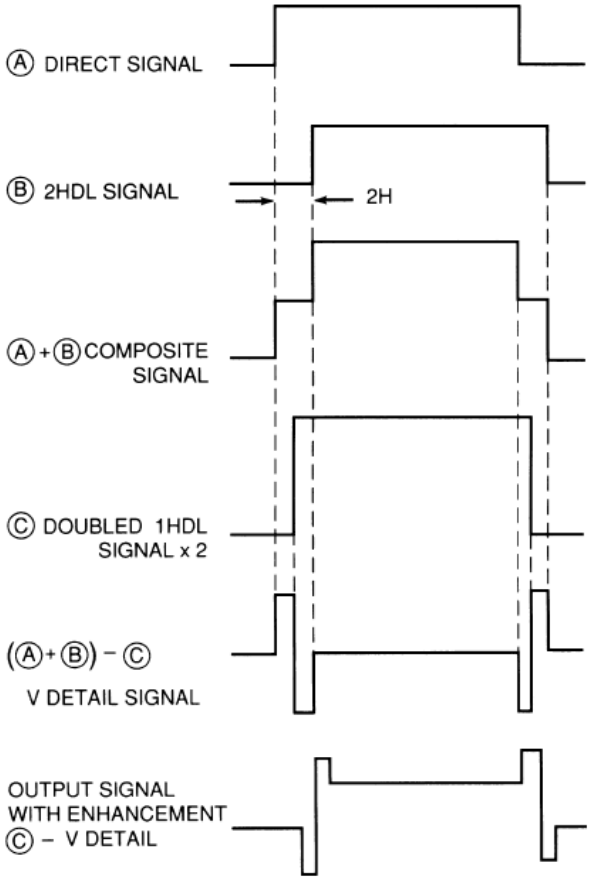
“Hard Clipping”



“Dynamic Clipping”

Controle de Nitidez (H/V Enhancement)





Desafios e Tendências

Desafios

- 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

Desafios

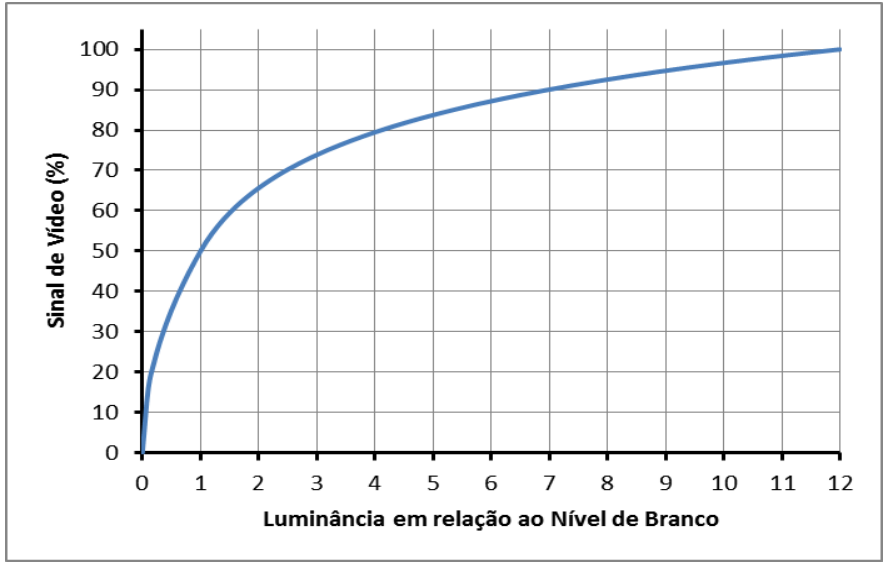
- *"High Dynamic Range"* (HDR)
  - Extensão da faixa dinâmica para níveis de luminância ~10x maiores do que o nível de branco de referência
  - Reprodução de altas luzes
  - HLG (*Hybrid Log-Gamma*):

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

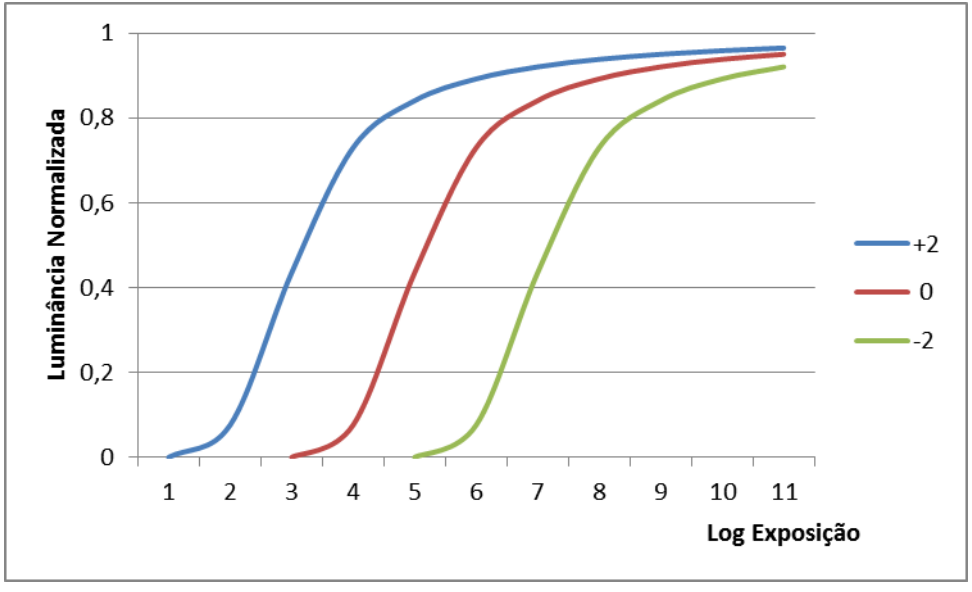
$$a = 0{,}17883277$$

$$b = 0{,}28466892$$

$$c = 0{,}55991073$$



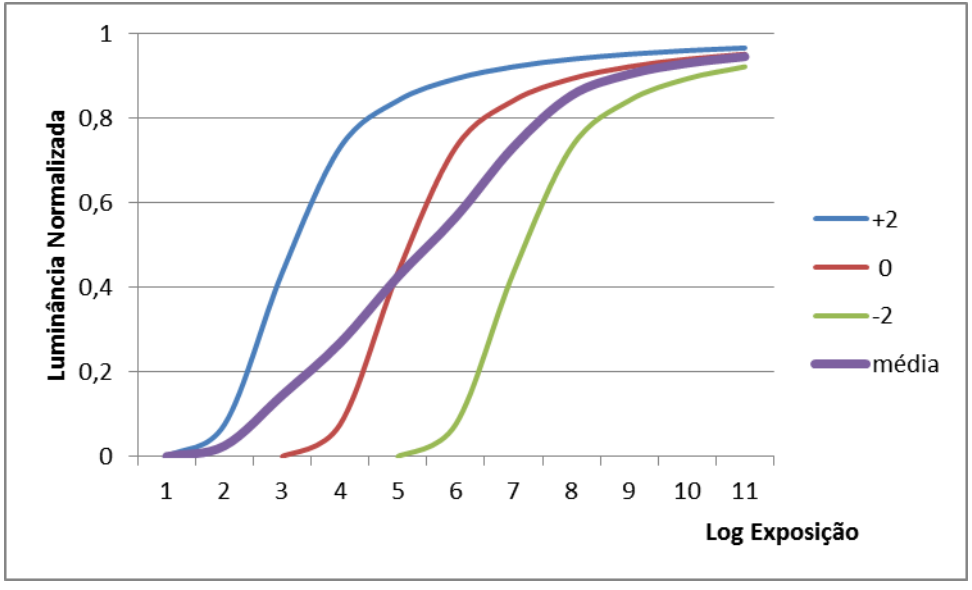
HDR - *High Dynamic Range*



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

Fotos: Klaus Herrmann

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

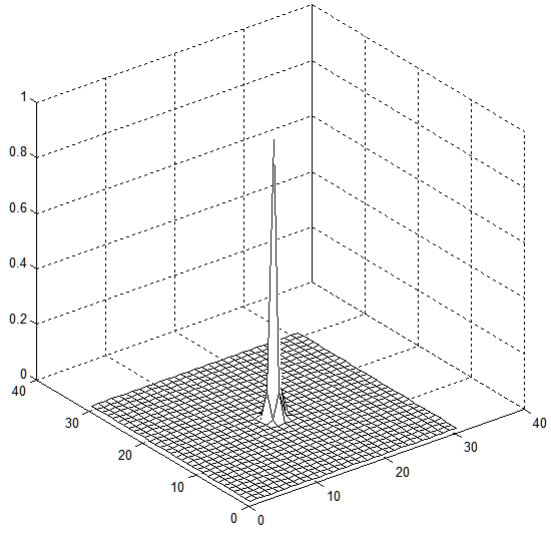


Percepção de Faixa Dinâmica com Filtro Estrela

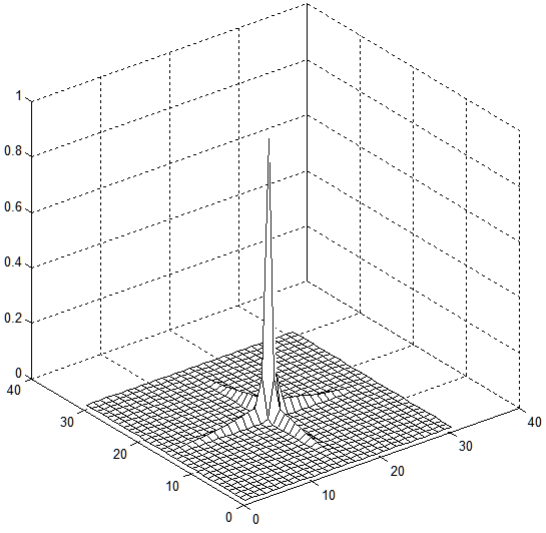
Original, captura com “soft clipping”

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

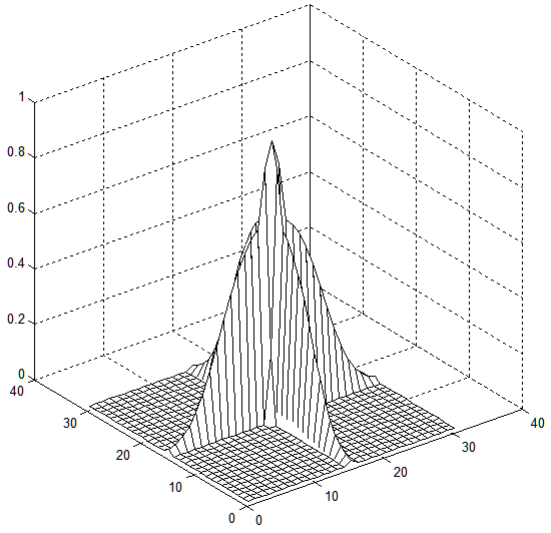
Resposta Impulsiva do Filtro Estrela



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



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

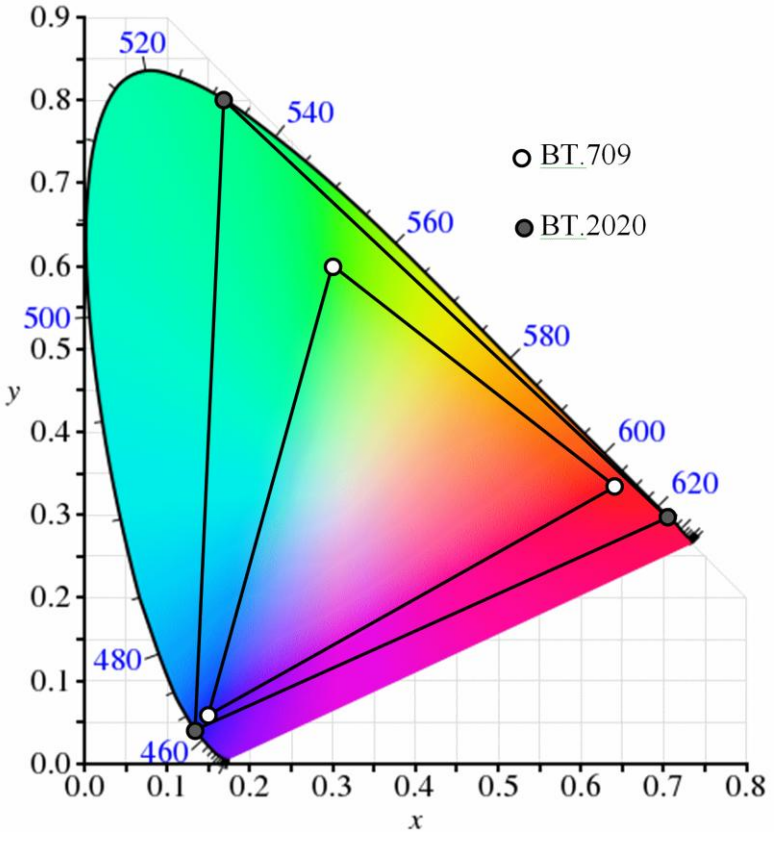


Resposta com Filtro “estrela” e “*soft clipping*”, $Y_{MAX} = 40$

Desafios

- "*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 (λ= 630 nm)
G: x= 0,170, y=0,797 (λ= 532 nm)
B: x= 0,131, y=0,046 (λ= 467 nm)



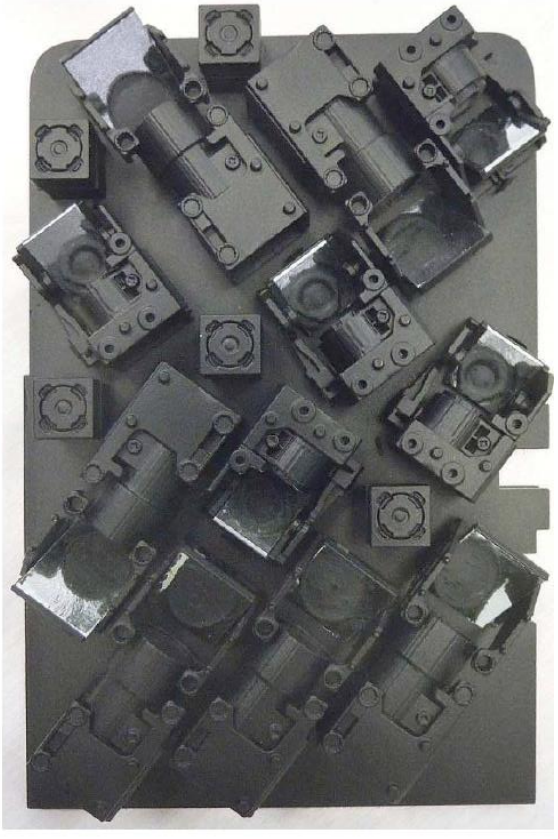
Controle da Profundidade de Foco

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

Fotos: IEEE Spectrum / Rajiv Laroya / Sue Tallon

Controle da Profundidade de Foco

- 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

Estado da Arte

- Câmera 8K – NHK
  - 7680 x 4320 pixels (8k)
  - 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