

Elementos de Fotometria

PTC3547 – Codificação e
Transmissão Multimídia

Guido Stolfi – EPUSP – 2019



- Emissão de Luz
 - Corpo Negro
 - Descarga em Gás
 - Fluorescência
 - Junções em Semicondutores
- Medição da Luz
 - Propriedades Descritivas da Luz
 - Funções de Luminosidade
 - Grandezas Fotométricas
 - Exemplos de Situações Fotométricas

- Lâmpadas
 - Rendimento luminoso
- Detectores de Luz
 - Térmicos
 - Quânticos
- Fotometria de Sistemas Ópticos

Emissores de Luz

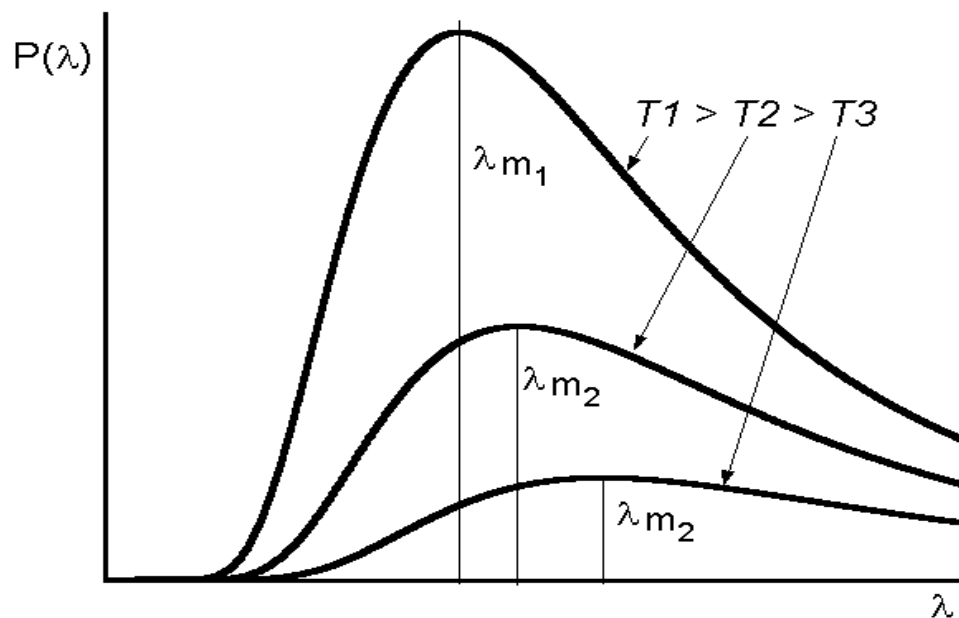
- Corpo Negro
- Descarga em Gás
- Fluorescência
- Junções em Semicondutores

Equação de Planck:

$$P(\lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5 \left(e^{hc/\lambda kT} - 1 \right)}$$

$$N(\lambda) = \frac{2c}{\lambda^4 \left(e^{hc/\lambda kT} - 1 \right)}$$

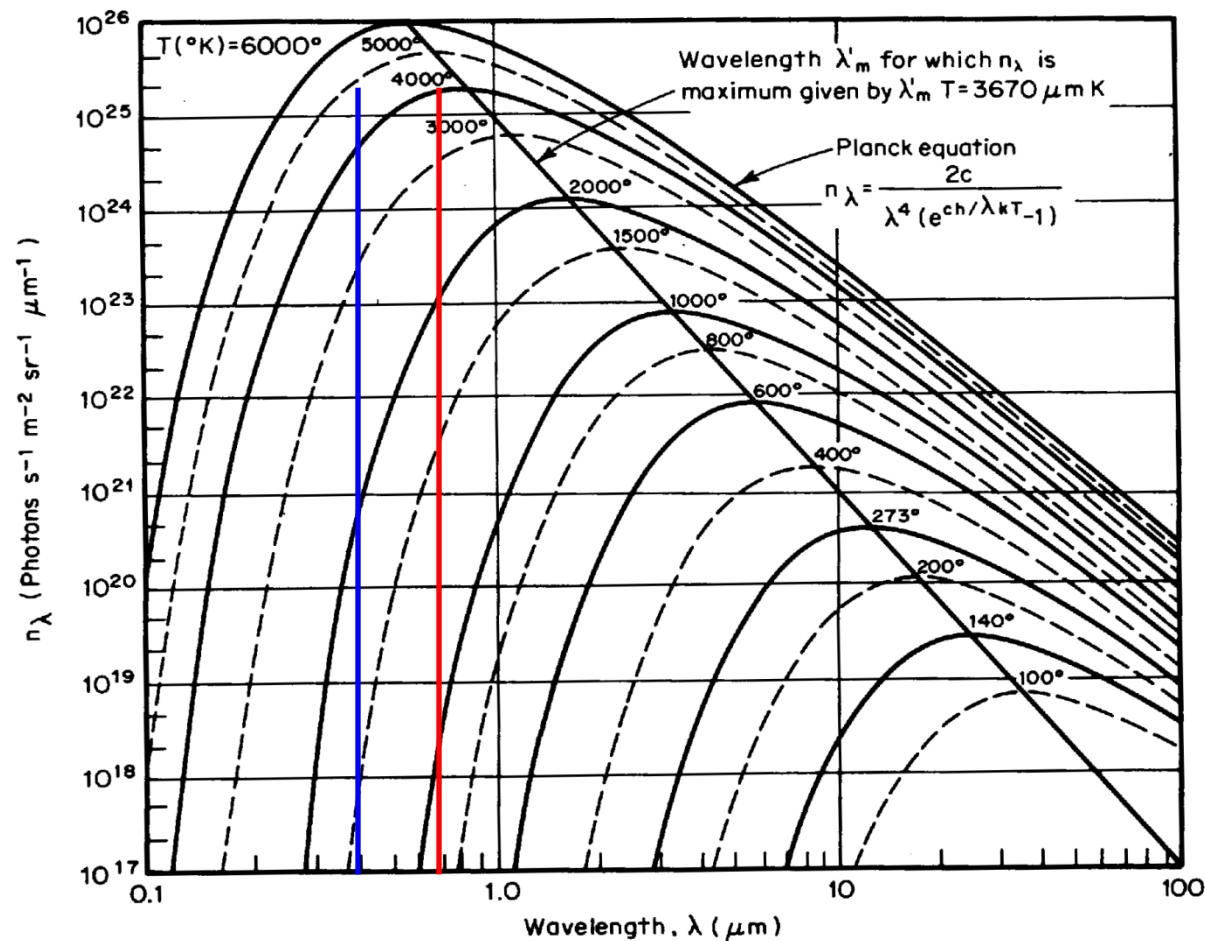
$$W_T = \int_{\lambda} P(\lambda) = \sigma T^4$$

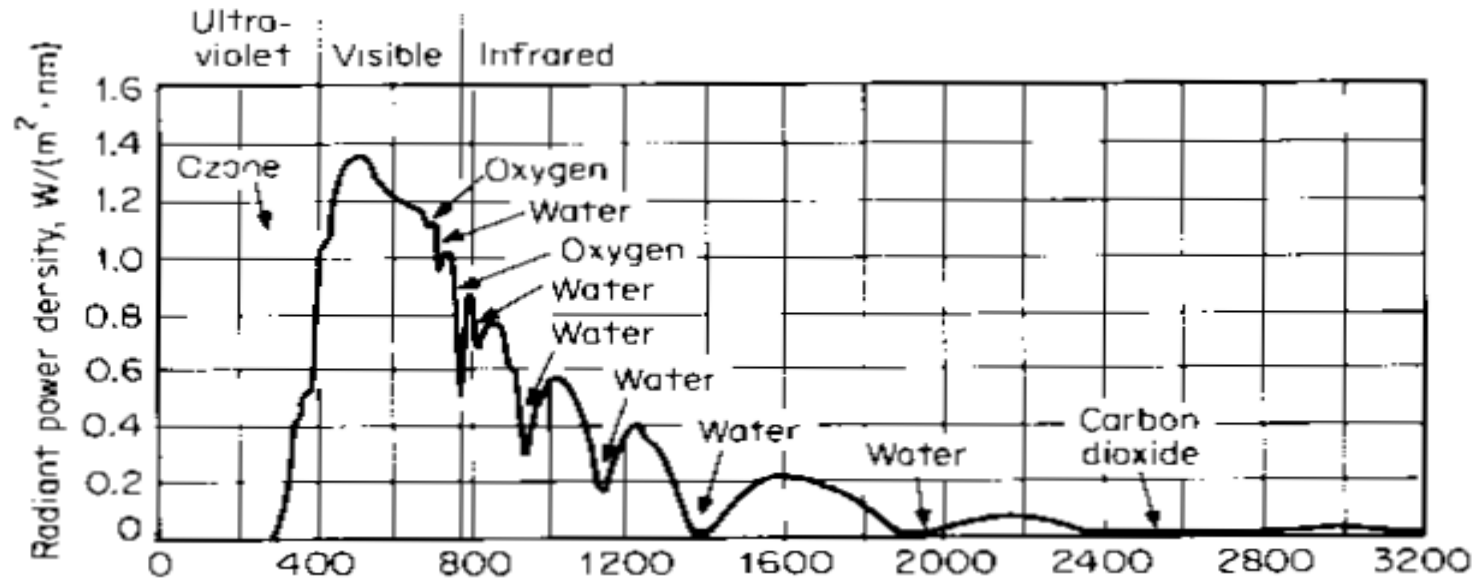


$h = 6,6256 \times 10^{-34} \text{ J s}$ (Planck)

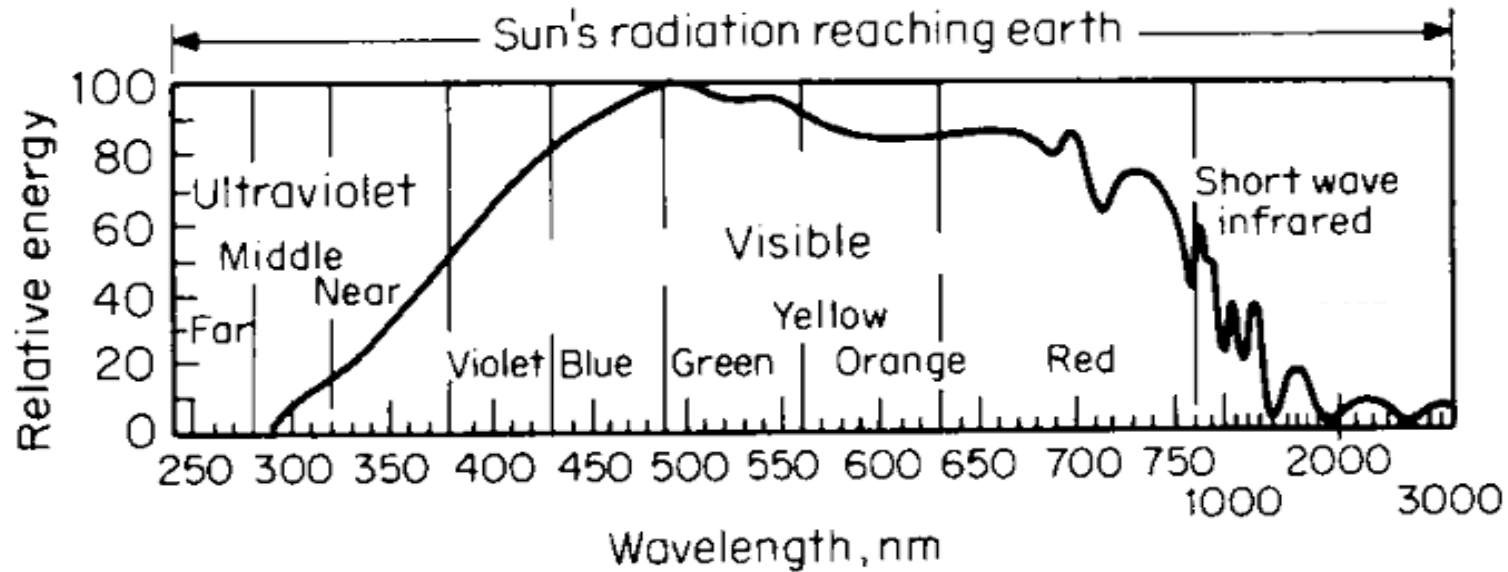
$\sigma = 5,6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ (Stefan-Boltzmann)

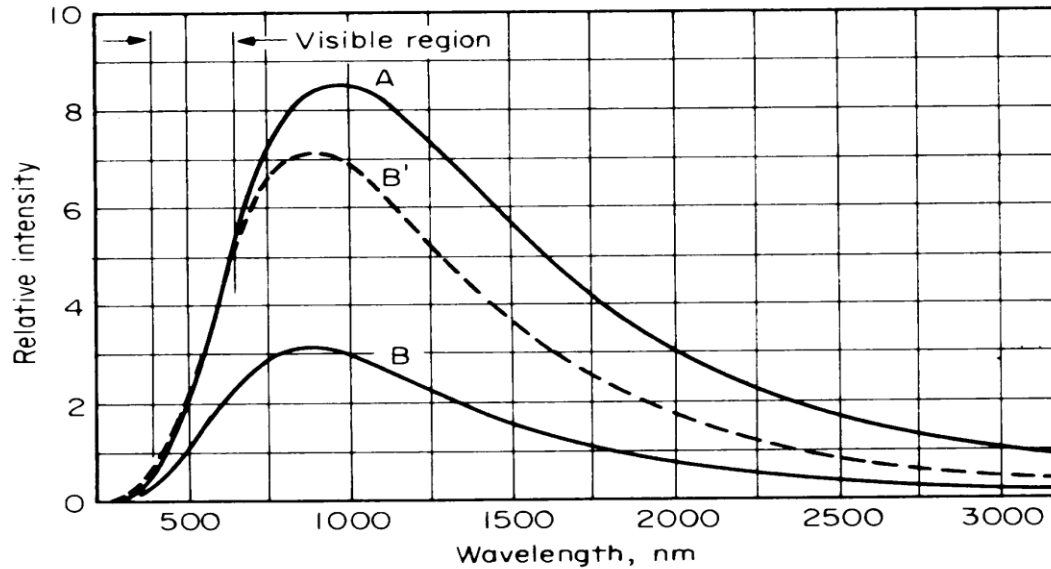
Emissão de Fótons de um Corpo Negro Aquecido





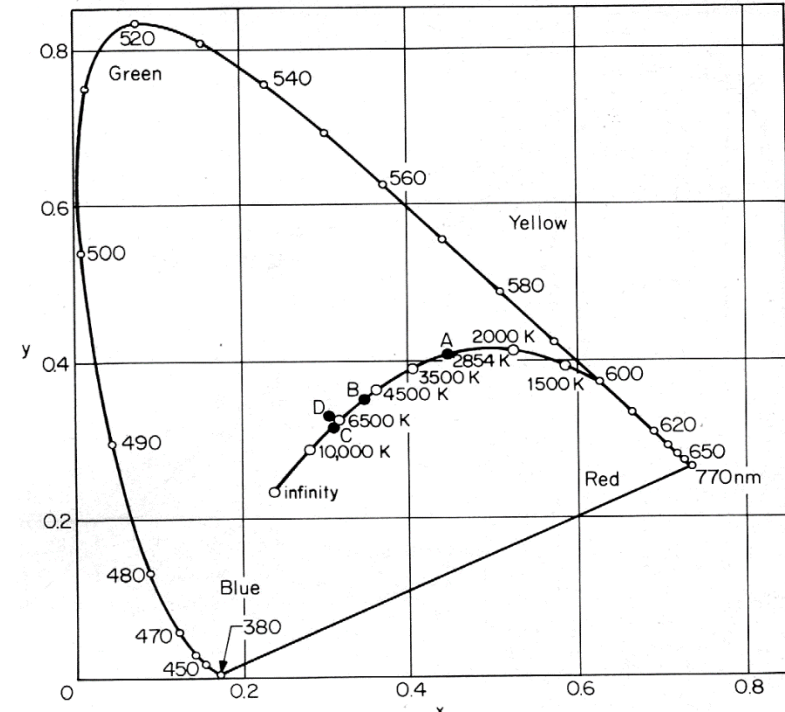
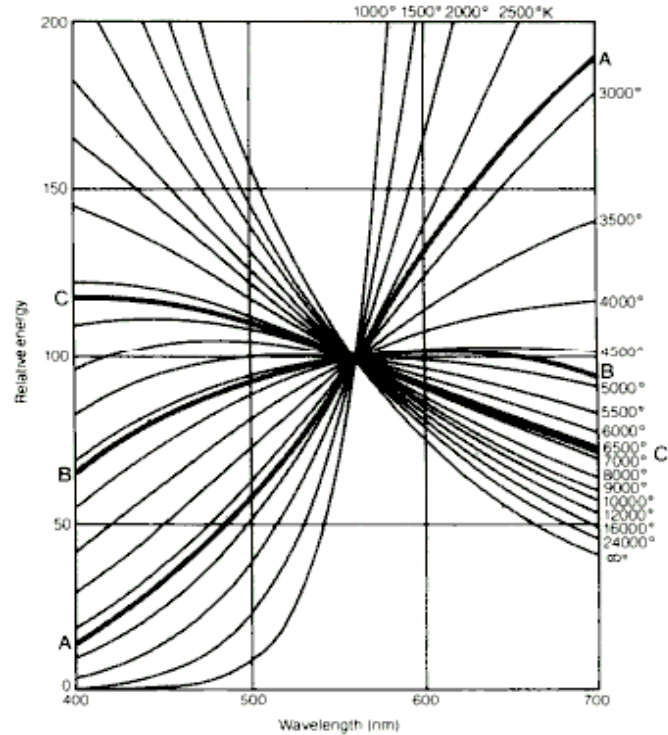
Densidade Espectral de Potência da Energia Radiante Solar Incidente na Superfície da Terra (ao nível do mar)

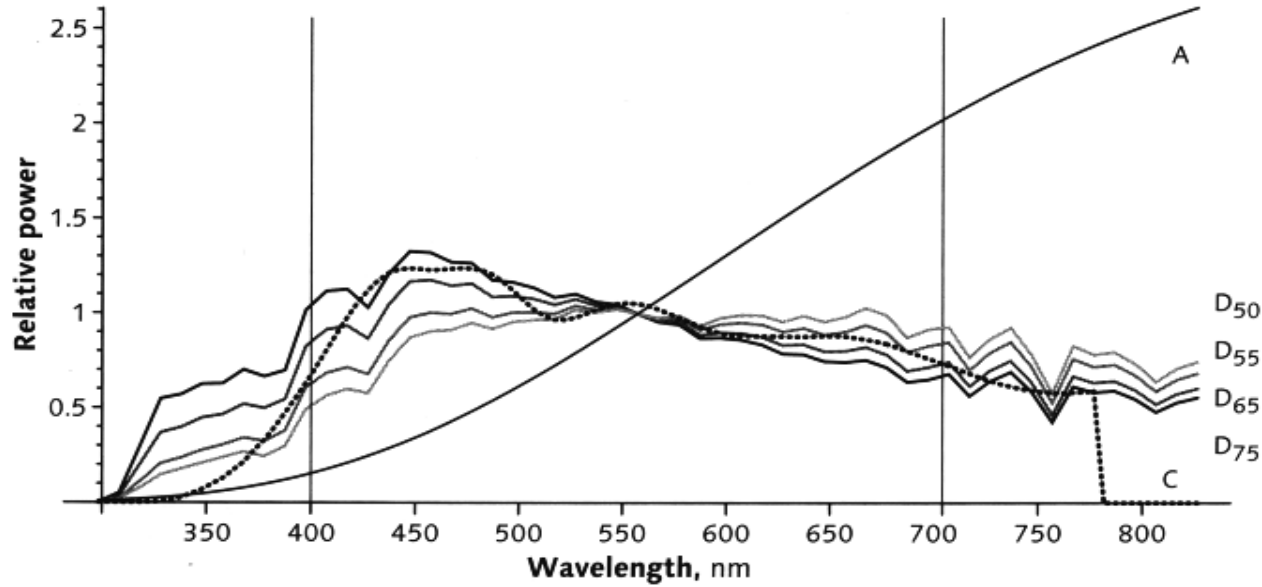




Emitância de Corpo Negro a 3000 K (**A**) e de 1 cm² de Tungstênio a 3000 K (**B** e **B'**)

Colorimetria de um Corpo Negro Aquecido

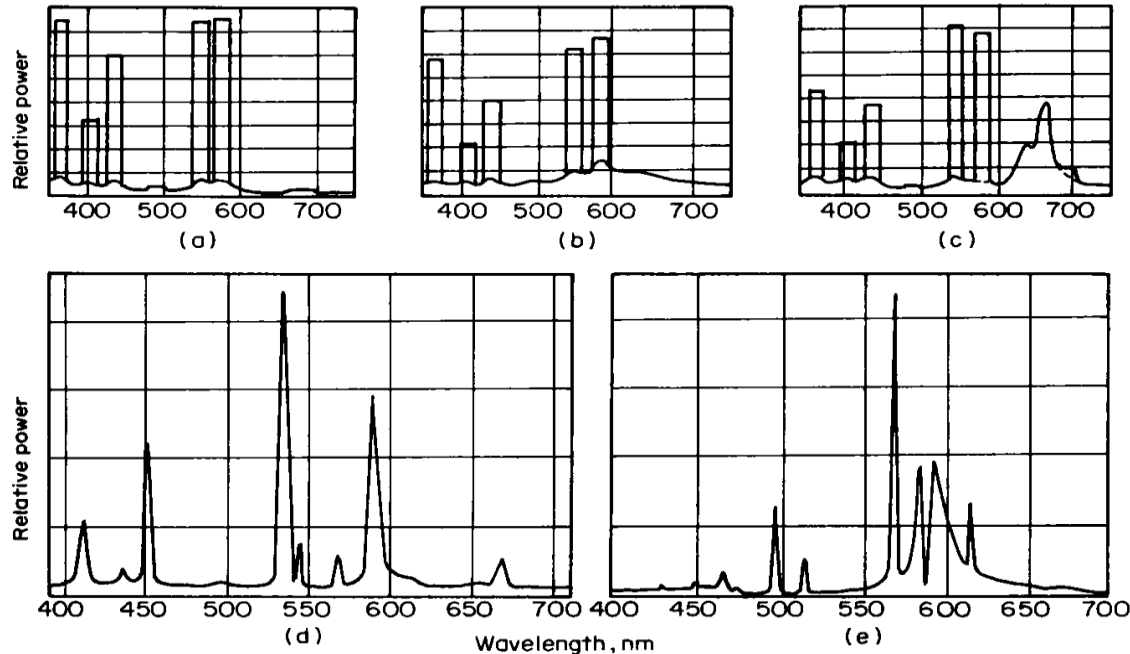




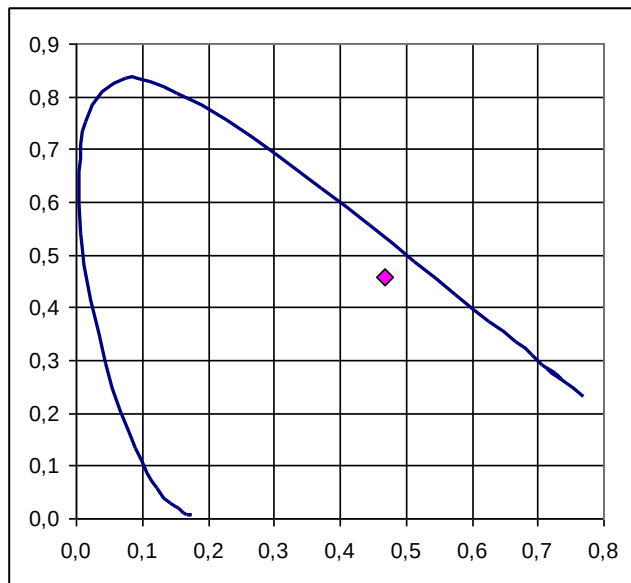
A = Corpo Negro a 3200 °K (obsoleto)

C = Luz do dia (obsoleto)

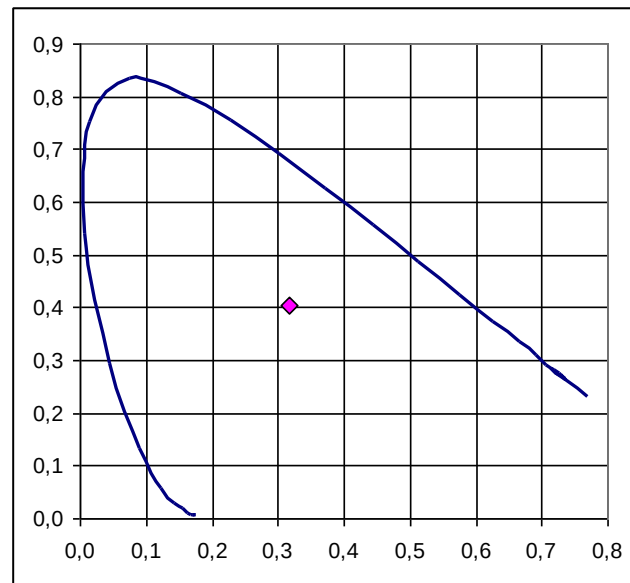
D50 a D75 = Luz do dia 5000 ~ 7500 °K



(a) Lâmpada de Mercúrio; (b) Mercúrio com revestimento fosforescente;
(c) Idem com revestimento aprimorado; (d) Lâmpada de Sódio/Tálio/Índio/Iodo;
(e) Sódio de Alta Pressão

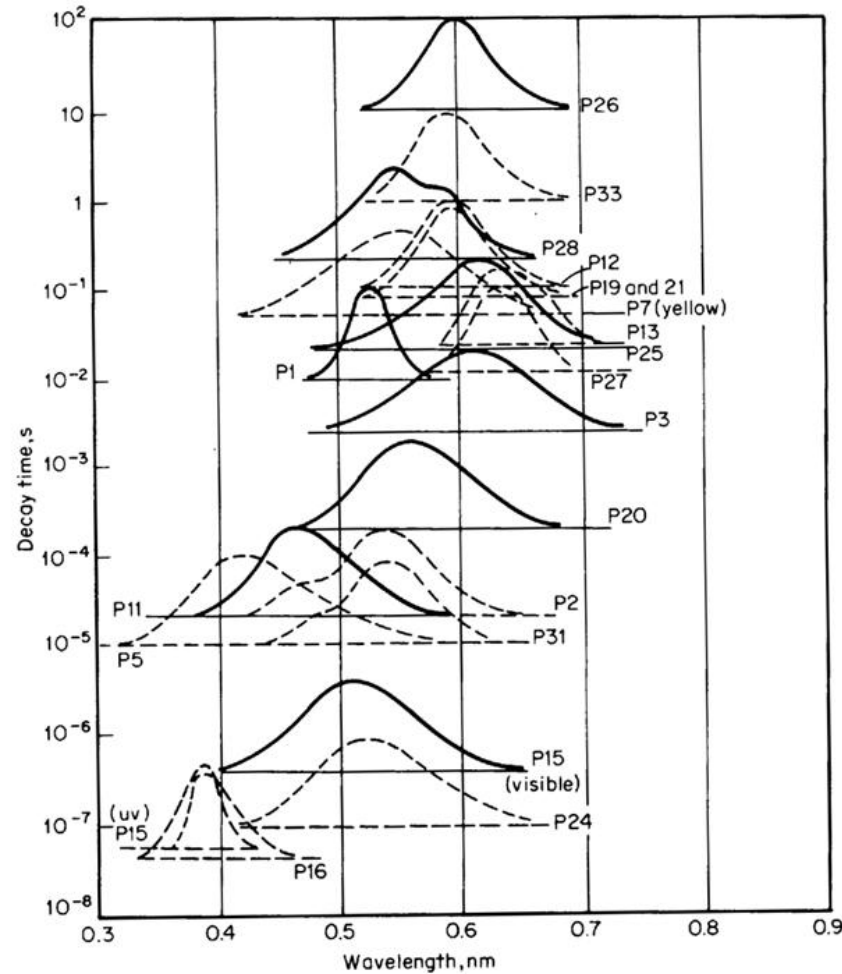


Lâmpada de Sódio Alta Pressão
 $x = 0.468$ $y = 0.459$

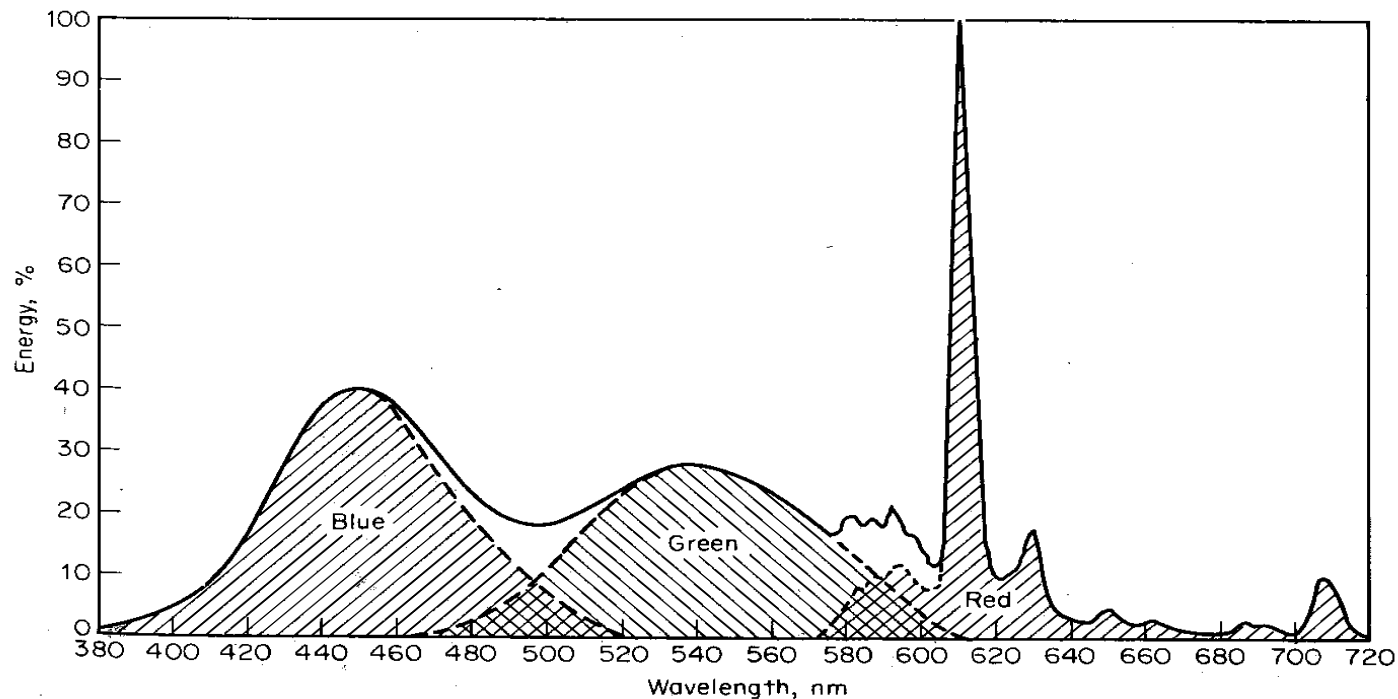


Lâmpada de Sódio/Tálio/Índio/Iodo
 $x = 0.317$ $y = 0.405$

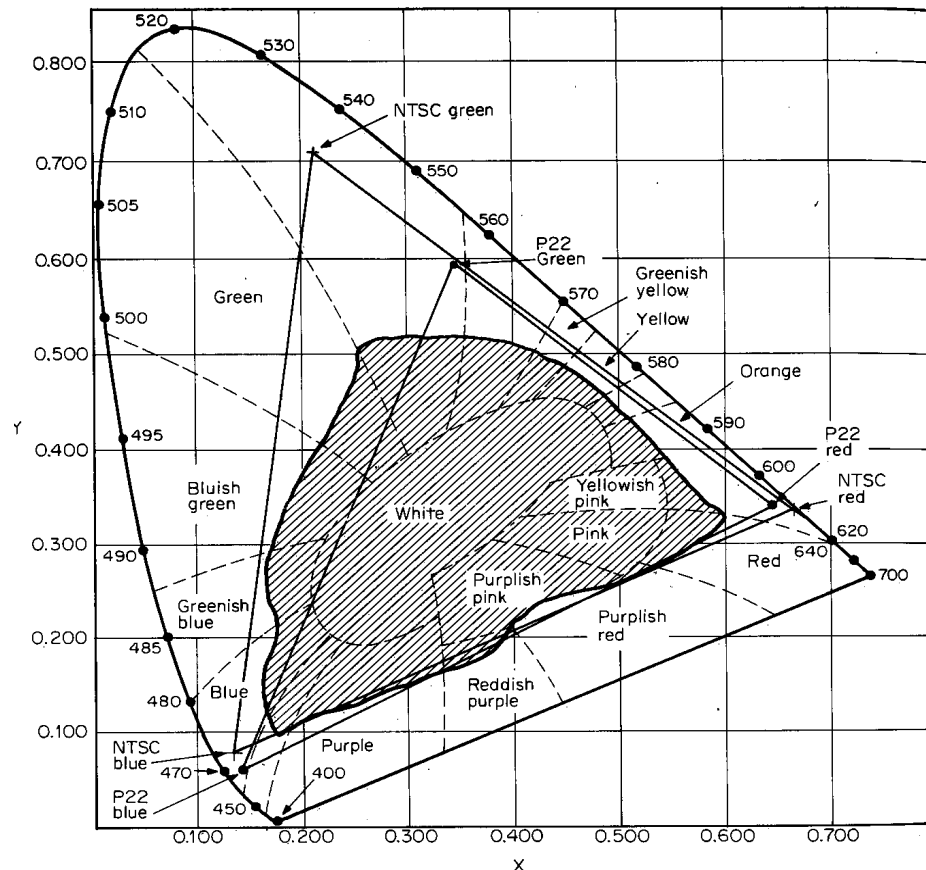
- Conversão de energia incidente (elétrons, fótons ultravioleta) em luz visível
- Cristais inorgânicos (ex.: CdS , $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}$, ZnS , ZnSiO_4 , Y_2O_3)
- Dopados com ativadores (Ag, Cu, Al, Eu, Tb, Mn)
- Conhecidos como “Fósforos”; P1, P2, P45...

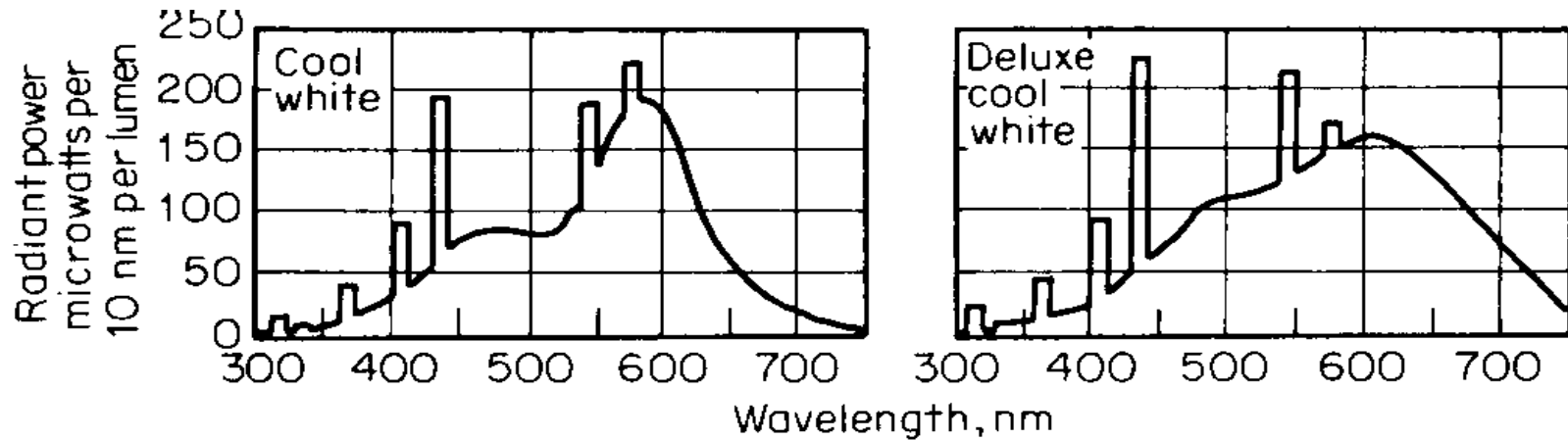


Primários Usados em Cinescópios (NTSC)



Coordenadas de Cromaticidade dos Primários (NTSC e P22)

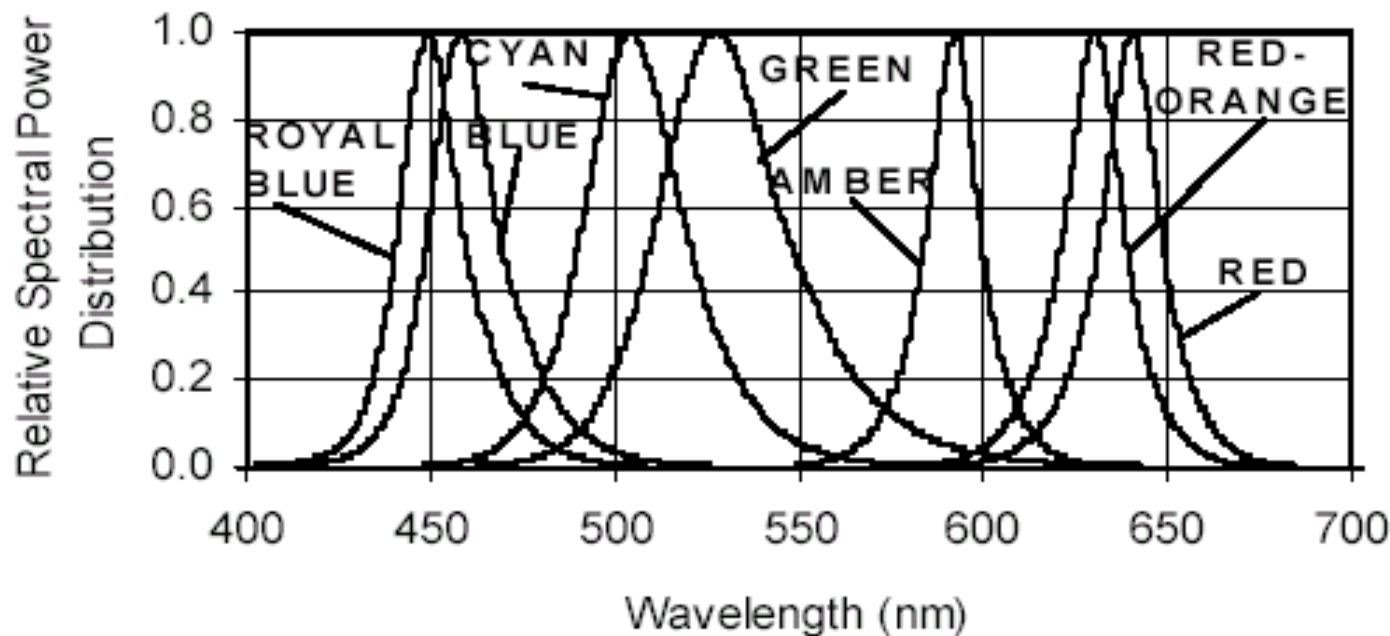


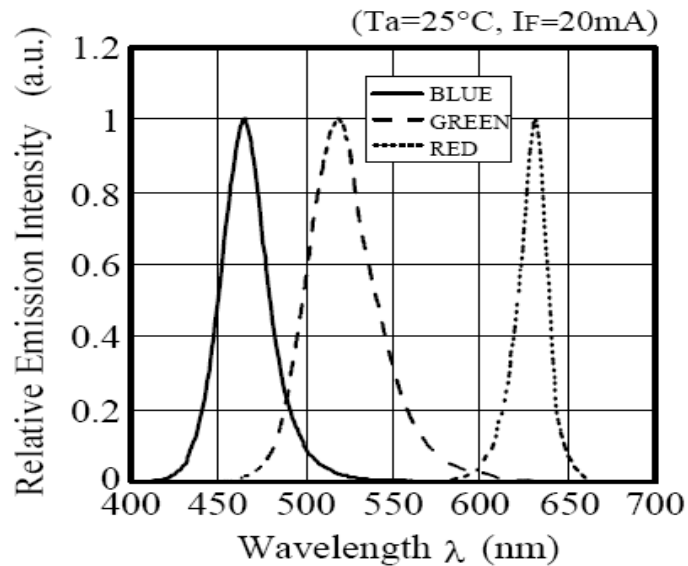


Lâmpadas Fluorescentes: Branca Fria Normal (esq.) e com melhoria de reprodução de cores (dir).

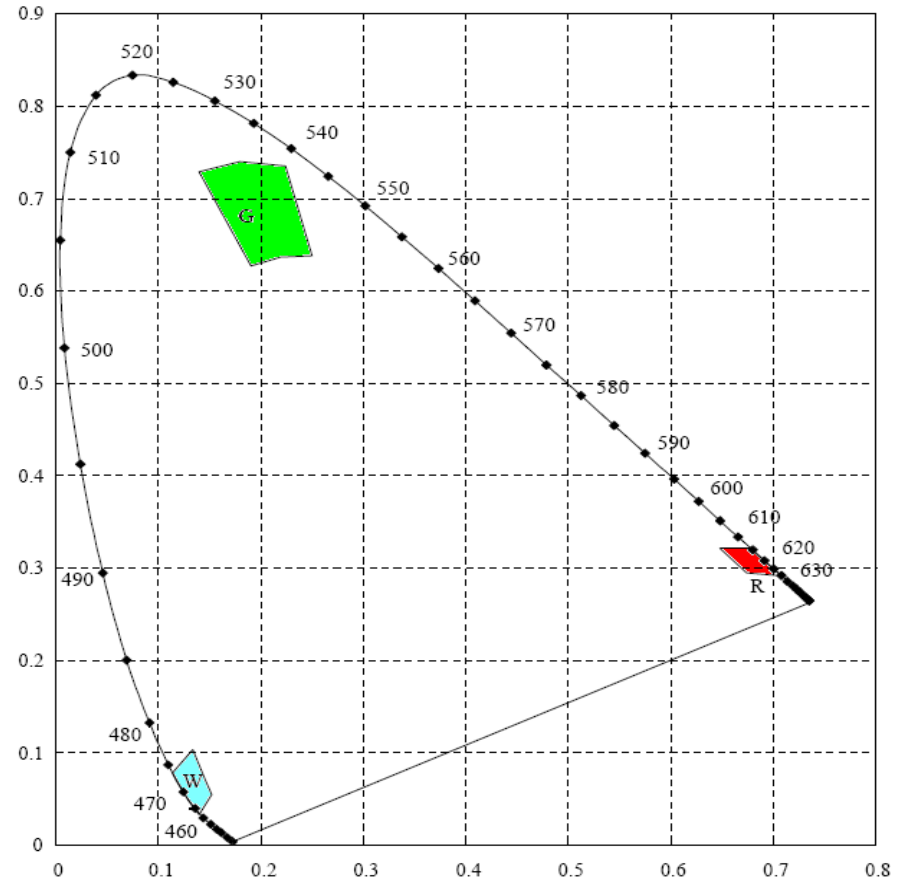
- Diodo LED (Light Emitting Diode)
- Ao cruzarem uma barreira de potencial, elétrons transferem energia para emissão de luz

Material	Barreira de Potencial (eV)	Comprimento de Onda (nm)
GaAs	1.43	910
$\text{GaAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}$	1.91	650
$\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$	1.93	645
$\text{GaAs}_{0.35}\text{P}_{0.65}$	2.09	635
$\text{GaAs}_{0.2}\text{P}_{0.8}$	2.16	600
$\text{GaAs}_{0.1}\text{P}_{0.9}$	2.21	583
GaP:N	2.26	568
GaP	2.26	555
SiC	2.99	480



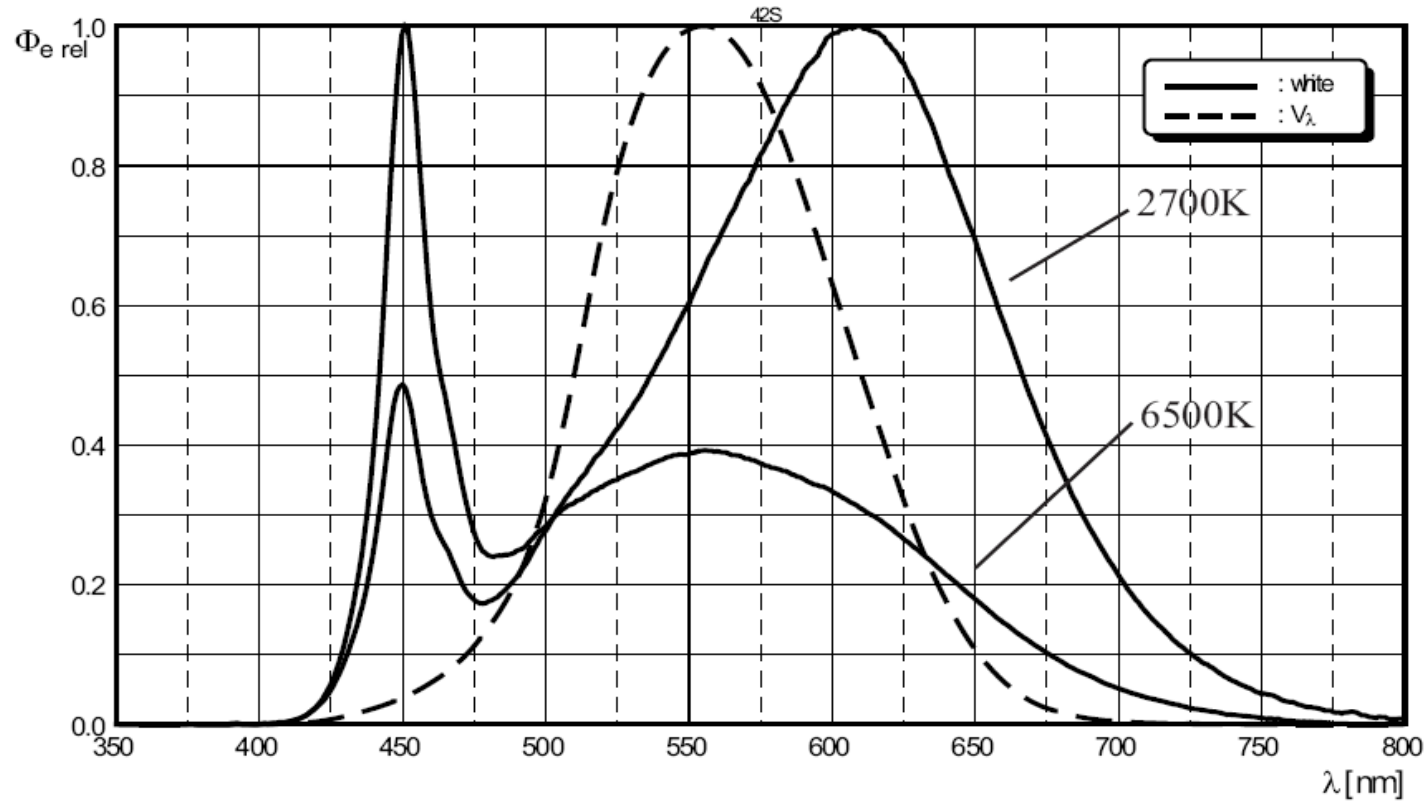


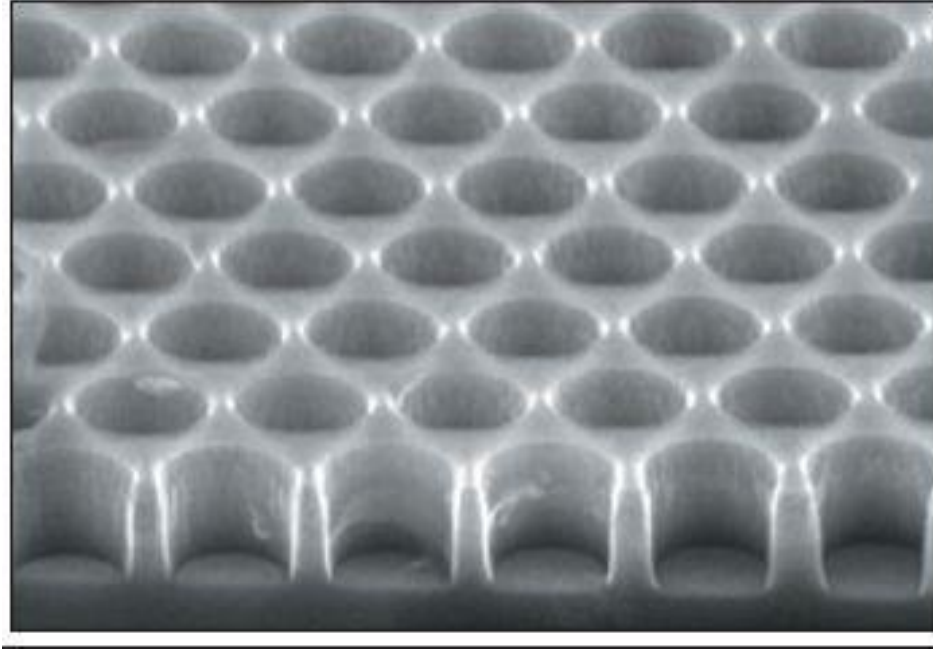
LED Nichia NSCM315C





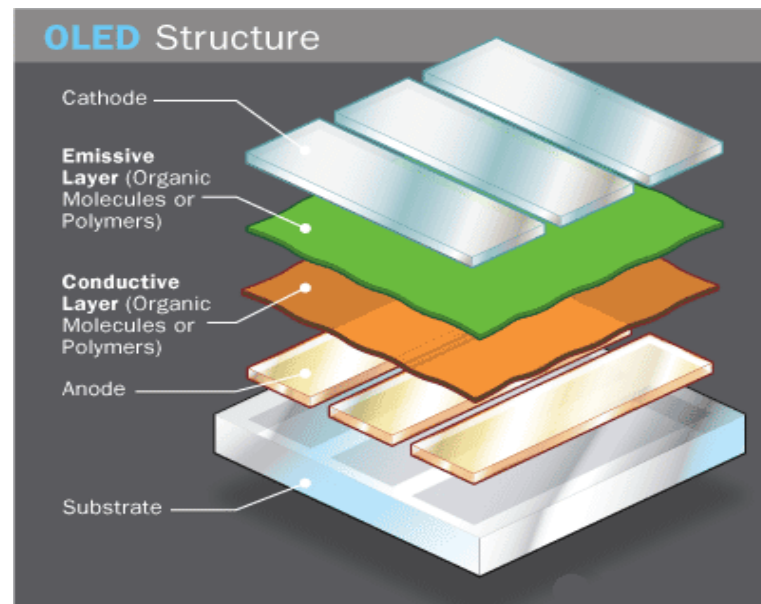
“Cluster” de LED's para Outdoor





Estrutura fotônica superficial para aumento de eficiência no acoplamento luminoso entre o LED e o ar (*Luminous Devices, Inc.*)

- Emissor eletroluminescente com material orgânico posicionado entre dois eletrodos
 - Diversidade de comprimentos de onda disponíveis
 - Baixas tensões de operação
 - Baixo consumo de energia
 - Alta velocidade de resposta
 - Simplicidade de fabricação
 - Emissão omnidirecional
-
- Desvantagens: elevado custo dos materiais , baixa durabilidade

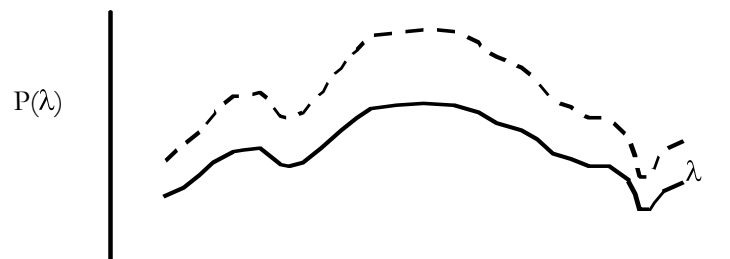


Fotometria

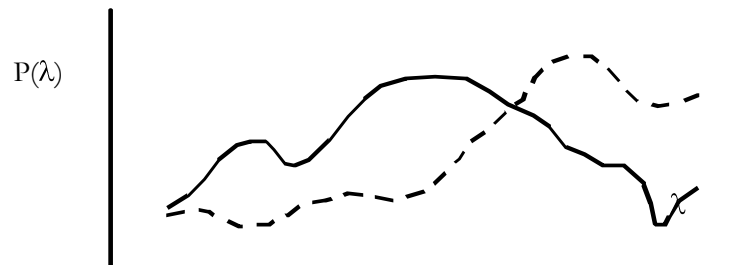
- Propriedades Descritivas da Luz
- Funções de Luminosidade
- Grandezas Fotométricas
- Exemplos de Situações Fotométricas

<i>Físicas</i>	<i>Psicofísicas</i>	<i>Subjetivas</i>
Densidade Espectral	Comprimento de Onda Dominante	Tonalidade de Cor
Seletividade	Pureza de Excitação	Saturação
Radiância	Luminância	Brilho
Coeficiente de Transmissão ou Reflexão	Transmitância Refletância Luminosas	Claro/Escuro
Potência Radiante	Fluxo Luminoso	Intensidade de Luz

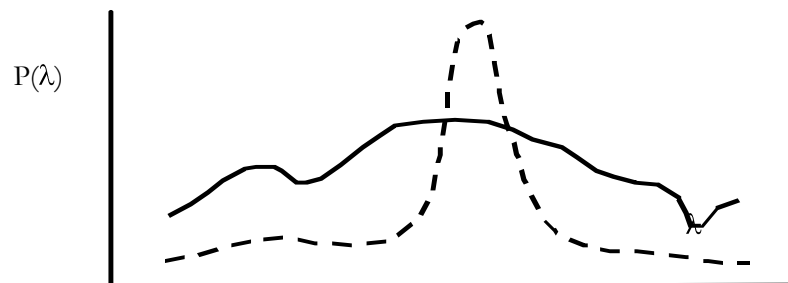
Brilho
(Luminância)

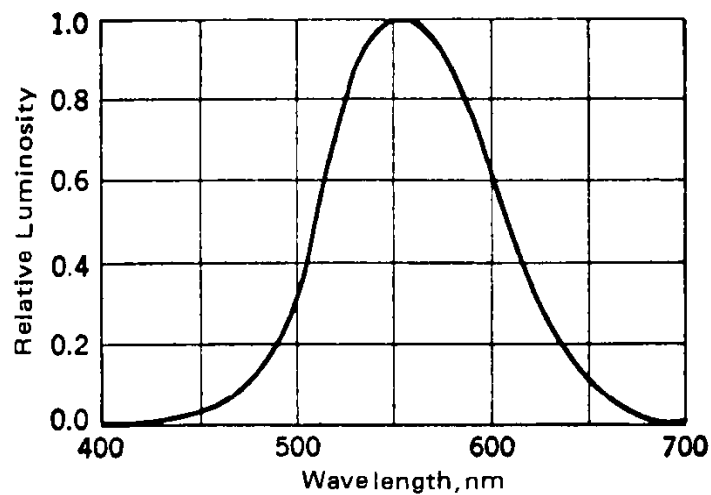


Tonalidade
(Comprimento de
Onda Dominante)

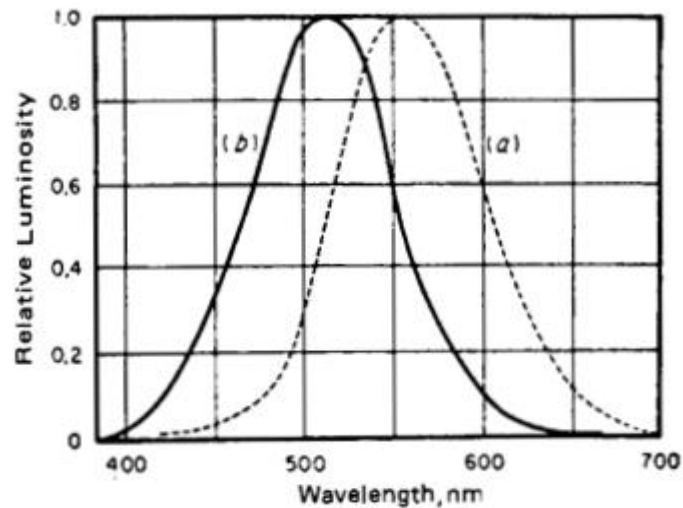


Saturação
(Pureza Espectral)

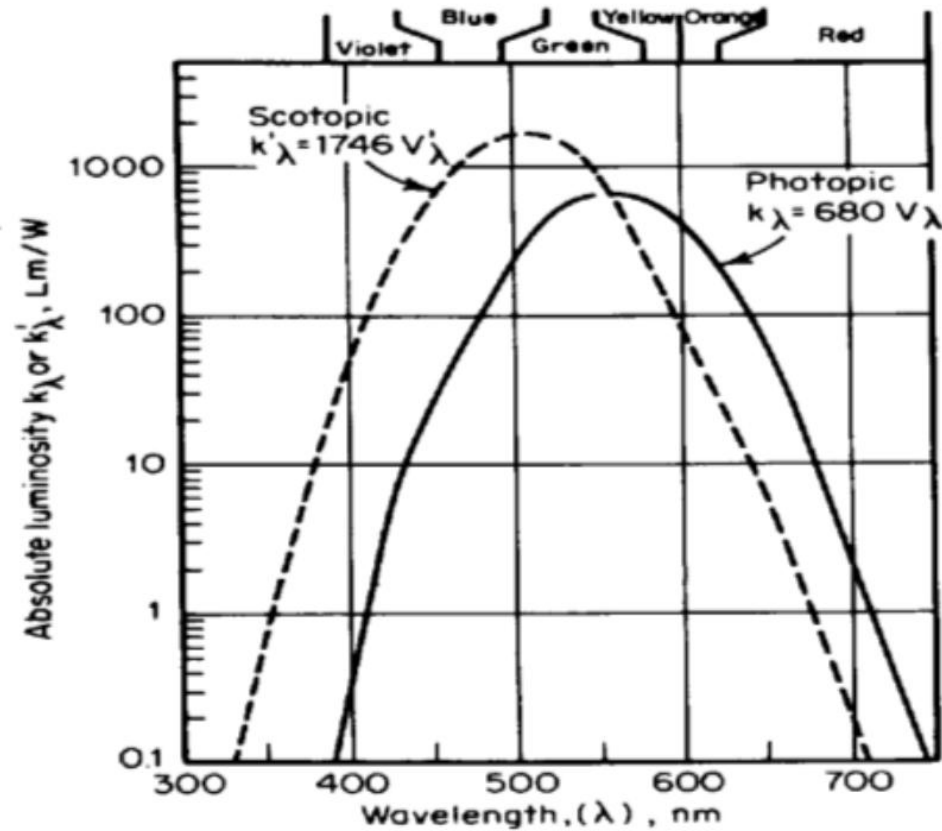




Função de Luminosidade Fotópica



Função de Luminosidade Escotópica



Fluxo Luminoso:

$$F = K_m \int_{\lambda} F(\lambda) \cdot P(\lambda) d\lambda \quad \text{Lumens}$$

$F(\lambda)$ = Função de Luminosidade

$$K_m = 683 \text{ Lumens} / \text{W}$$

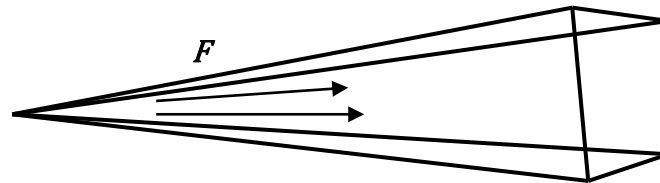
$$P(\lambda) = \text{W} / \text{nm}$$

Intensidade Luminosa:

$$I = \frac{F}{\omega} \quad \text{Candelas}$$

F = Fluxo em Lumens

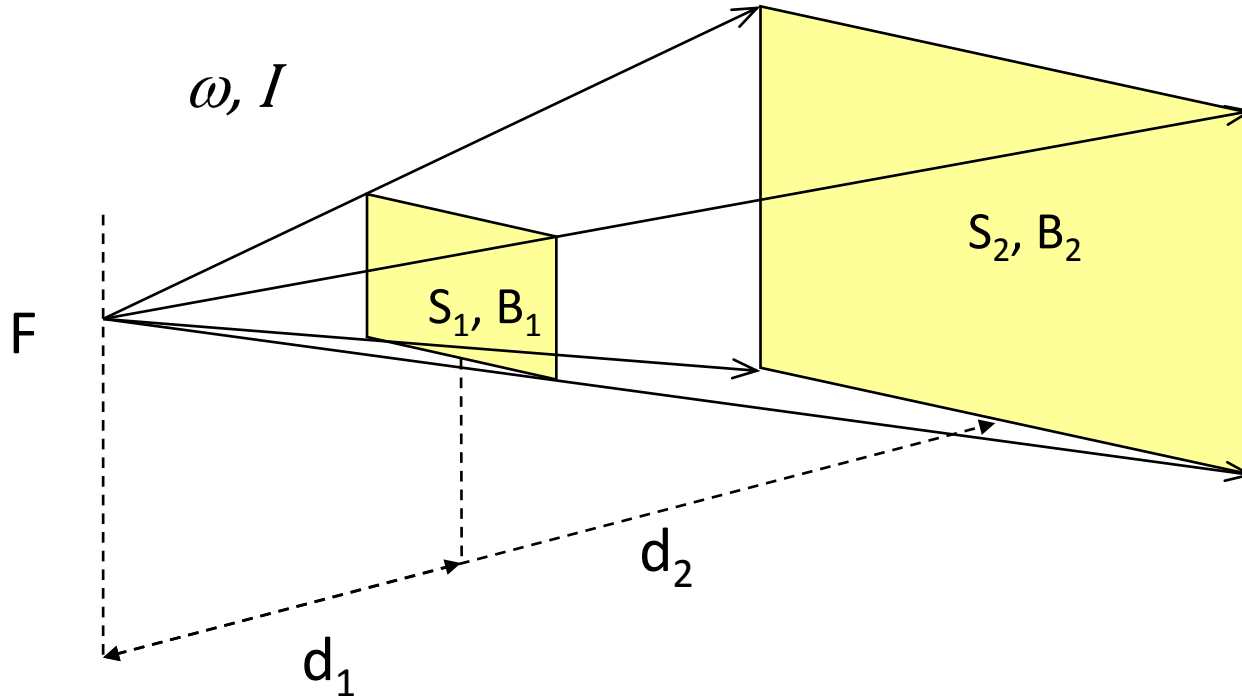
ω = Ângulo Sólido em esteroradianos



Iluminamento:

$$E = \frac{F}{S} \quad \text{Lumens}/m^2 \text{ ou Lux}$$

S = Área sobre a qual incide o fluxo F



O iluminamento é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre a fonte e a superfície iluminada

Ambiente ou Atividade	Iluminamento (Lux)
Iluminamento Máximo da Luz Solar	até 100.000
Montagem / Inspeção Industrial Muito Detalhada	5.000 ~ 10.000
Mesa de Operação Cirúrgica	5.000 ~ 10.000
Leitura de Textos Manuscritos	500 ~ 2.000
Sala de Cirurgia	1.000 ~ 2.000
Sala de Aula	300 ~ 600
Leitura de Textos Impressos	200 ~ 1000
Montagem / Inspeção Industrial: Simples	200 ~ 500
Sala de Estar	100 ~ 200
Mínimo Absoluto para Segurança Visual	5 ~ 50

Luminância:

$$B = \frac{F}{\omega A \cos \theta} = \frac{I}{A \cos \theta} \quad \text{Candelas/m}^2 \text{ ou Nits}$$

(Lumens/sterad/m²)

$A \cos \theta$ = Área projetada do objeto



Luminância não varia com a distância entre objeto e observador

Superfície do Sol ao meio-dia	$1,65 \times 10^9$
Objeto branco ideal exposto ao sol	31.800
Lâmpada fluorescente	6.000 ~ 14.000
Lua cheia	7.600
Céu nublado	3.000 ~ 7.000
Céu claro	2.000 ~ 6.000
Tela de TV	200 ~ 300
Tela de Cinema	40

Iluminamento Retinal:

$$i = 0,785 l^2 B \quad \text{Trolands}$$

B = Luminância em Nits

l = diâmetro da pupila (2 a 8 mm)

Transmitância:

Transmitância: $t_\lambda = \frac{P_\lambda}{P_{o\lambda}}$

Densidade: $D_\lambda = -\log t_\lambda = \log \frac{P_{o\lambda}}{P_\lambda}$

P_λ = Radiância recebida através do objeto

$P_{o\lambda}$ = Radiância recebida com o objeto removido

Refletância:

$$r_{\lambda} = \frac{P_{\lambda}}{P_{o\lambda}}$$

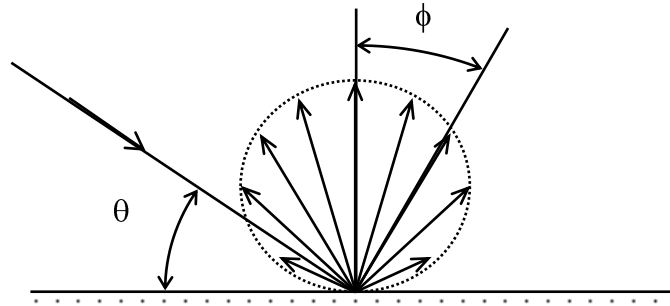
P_{λ} = Radiância recebida do objeto

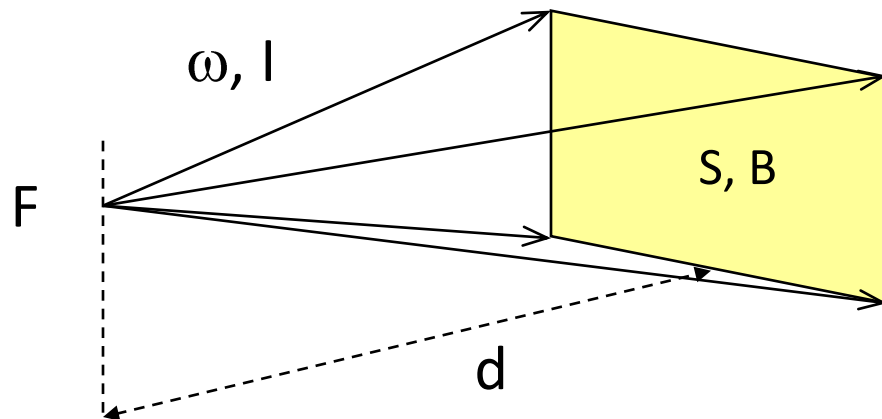
$P_{o\lambda}$ = Radiância recebida com o objeto
substituído por difusor padrão

Refletância do Difusor Padrão:

$$I_{\varphi} = I \cos \varphi$$

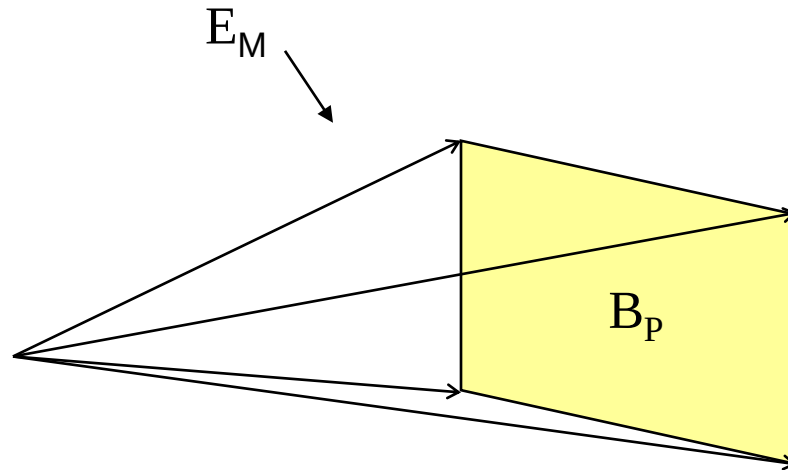
$$B_D = \frac{1}{\pi} E$$



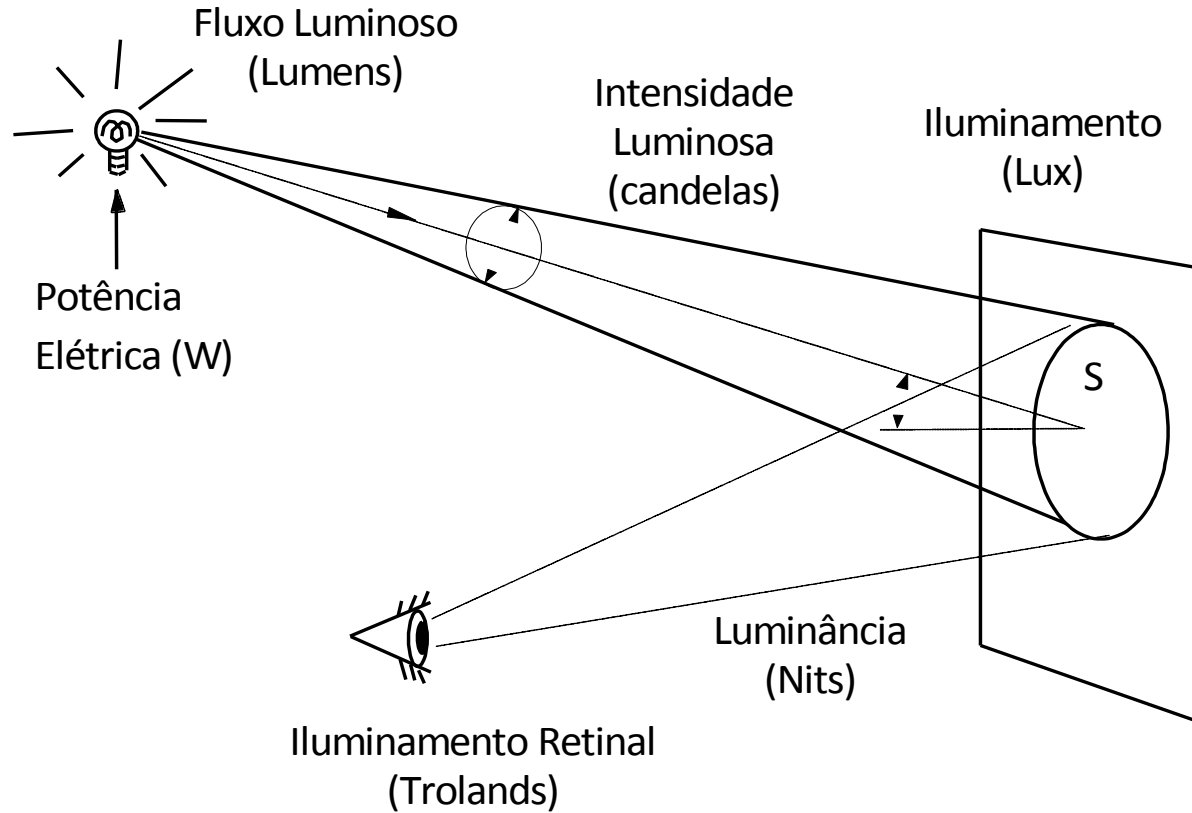


- Área da Tela: $S = 15 \text{ m}^2$; Refletância: $\rho = 0,9$; Distância: $d = 20 \text{ m}$
- Ângulo sólido do feixe de projeção: $\omega = S / d^2 = 0,038$ esteroradianos
- Iluminamento necessário para obter Luminância $B = 40$ nits na tela:
 - $B = \rho \times E \times 1/\pi \Rightarrow E = B \times \pi / \rho = 140 \text{ Lux} = 140 \text{ Lumens} / \text{m}^2$
- Fluxo luminoso fornecido pelo projetor:
 - $F = E \times S = 2100 \text{ Lumens}$
- Intensidade Luminosa do projetor:
 - $I = F / \omega = 56000 \text{ candelas}$

- Relação entre Luminâncias Máxima e Mínima de uma imagem (contraste simultâneo)
- Relação entre Luminâncias em imagens não simultâneas (contraste seqüencial)
- Percepção visual: 1000:1 máx; 100:1 aceitável
- Situações típicas:
 - Cinema: 80:1 (simultâneo); 1000:1 (seqüencial)
 - Televisão (ambiente doméstico): 20:1

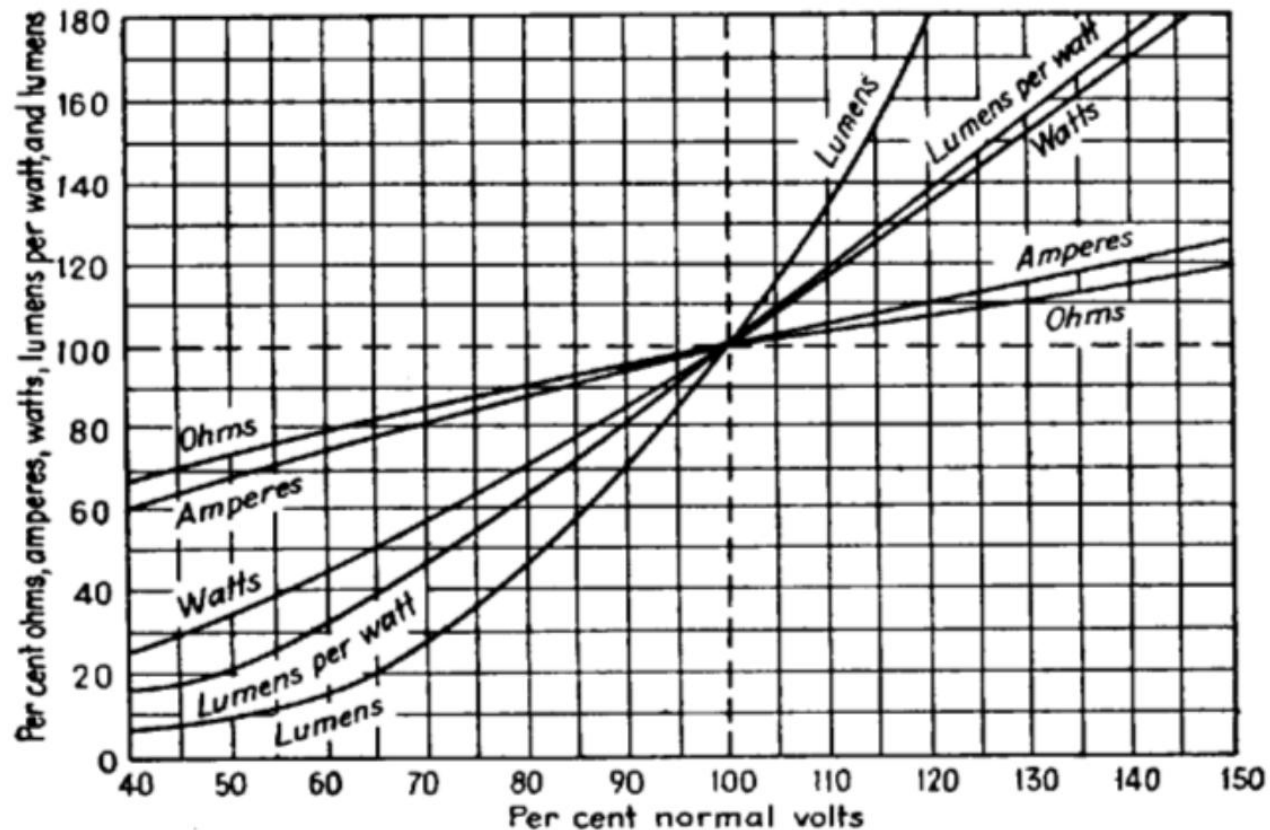


- Refletância da tela: $\rho = 0,9$
- Luminância da tela devida à projeção: $B_p = 40$ Nits
- Luminância residual devida ao iluminamento ambiente: $B_R = \rho \times E \times 1/\pi$
- Iluminamento ambiente máximo para contraste de 1000:1 :
 - $B_R / B_p = 1000 \Rightarrow B_R = 0,04$ Nits $\Rightarrow E_M = B_R \times \pi / \rho = 0,14$ Lux



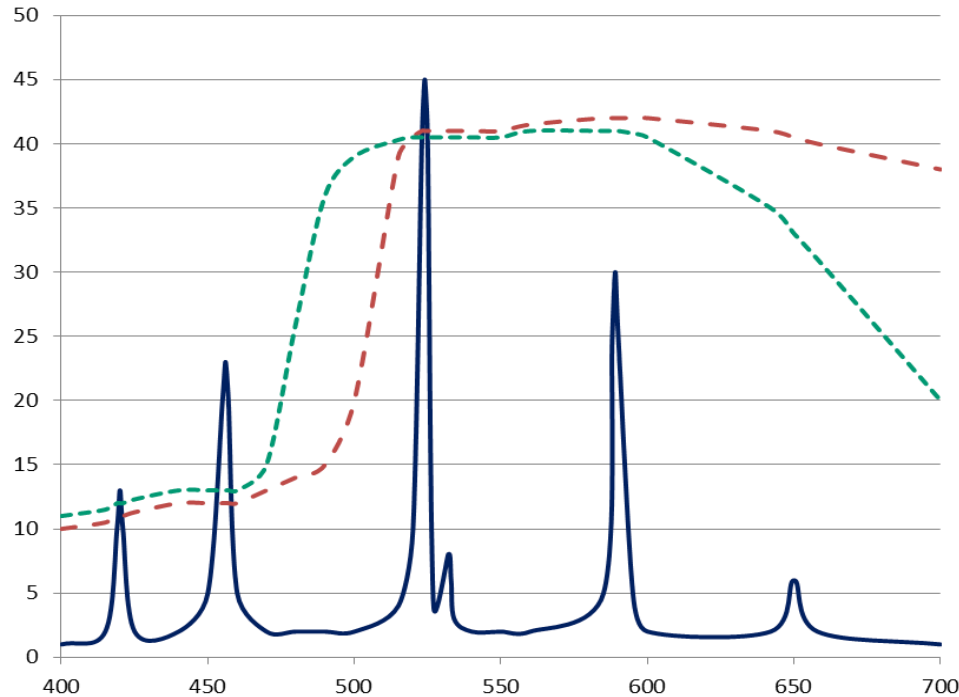
Lâmpadas

- Características
- Rendimento Luminoso
- Fidelidade de Reprodução Cromática



<i>Tipo</i>	<i>Potência</i>	<i>Vida Útil</i>	<i>Lumens / W</i>
Incandescente comum	100 W	750 h	17,5
Incandescente Alta Potência	1.000 W	1.000 h	23,7
Incandescente Halógena	1.000 W	2.000 h	23,4
Fluorescente comum	40 W	20.000 h	76,2
Fluorescente compacta	13 W	10.000 h	69,2
Fluorescente HO	110 W	12.000 h	80,9
LED Branco alto brilho	2 W	100.000 h	100
Sódio alta pressão	400 W	24.000 h	118,8
Sódio baixa pressão	180 W	25.000 h	183,3

- Luz Monocromática:
 - 683 Lumens / W ($\lambda \sim 550$ nm)
- Luz branca (emitância espectral uniforme):
 - ~ 220 Lumens / W



2 objetos com refletâncias espectrais diferentes
Iluminação com lâmpada de vapores metálicos

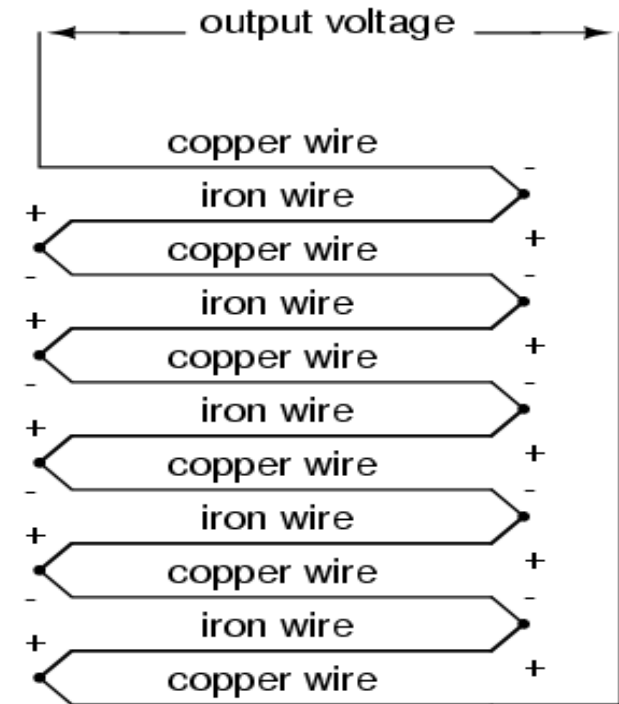
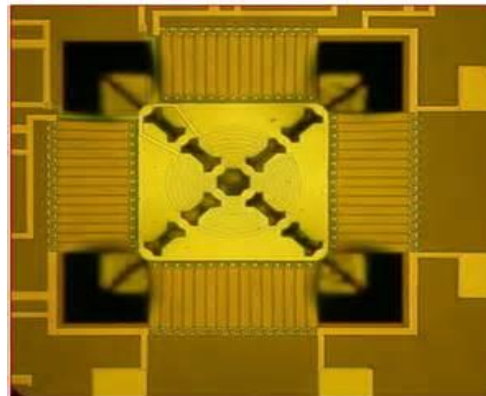
- Recomendação SMPTE para Monitores de Vídeo para Estúdios:
 - Luminância (branco 100%) = 103 nits
 - Cromaticidade: CIE D65

Detectores de Luz

- Térmicos
- Quânticos

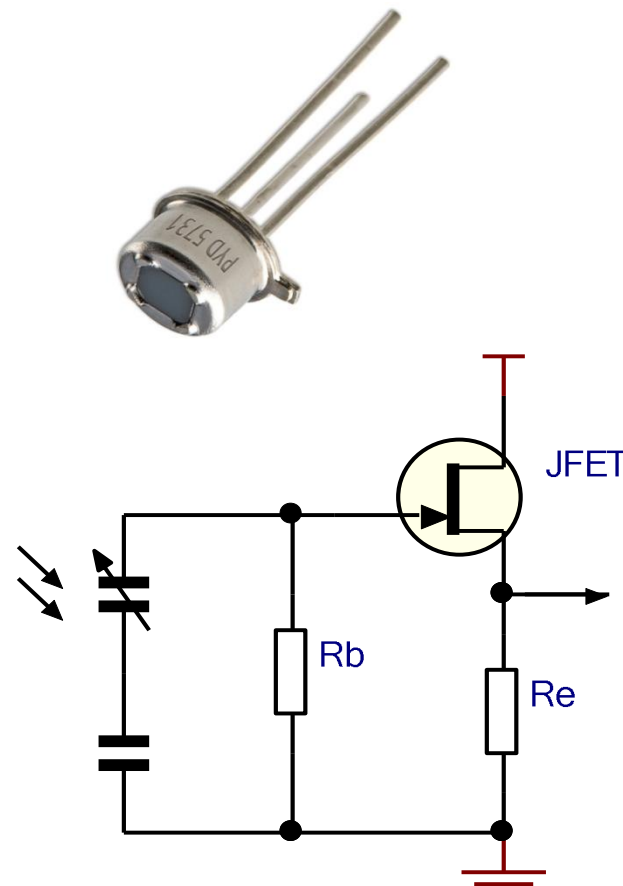
Termopilha:

- Associação de termopares em série
- Tensão linear com a potência incidente
- Banda larga



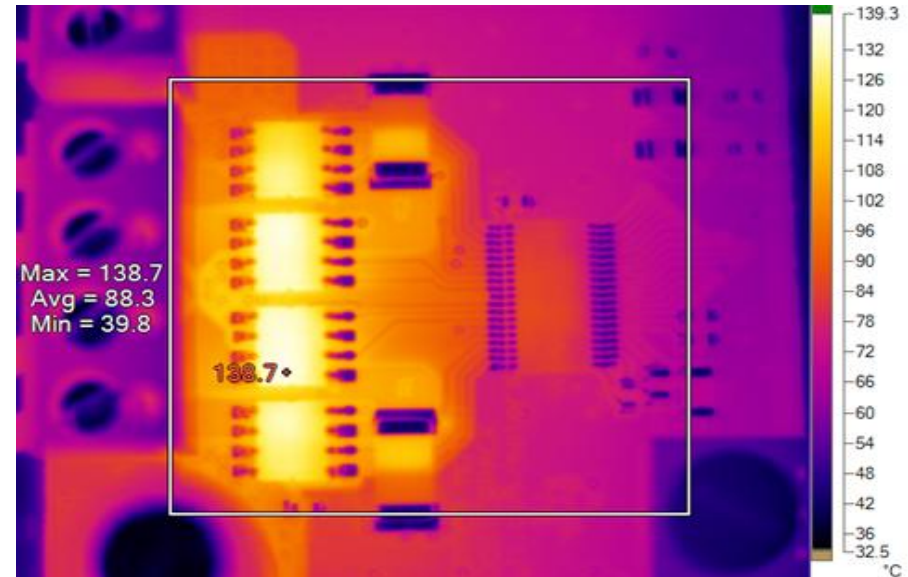
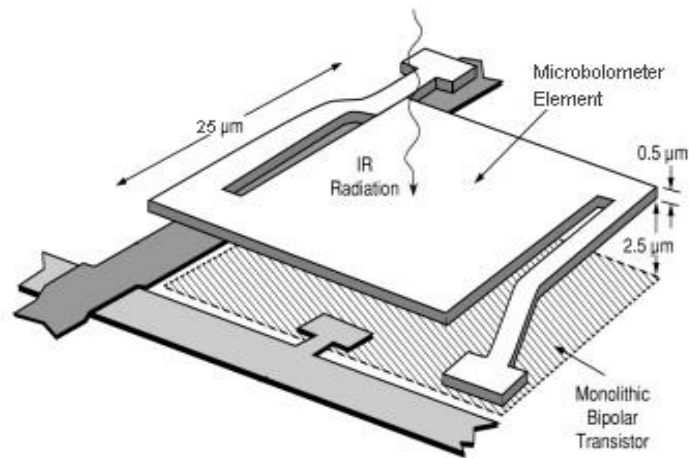
Sensor Piroelétrico:

- Sensor é um capacitor com dielétrico operando próximo à temperatura de Curie
- Variação de capacitância com temperatura é convertida em tensão
- Sensível a variações de intensidade (AC)
- Alarmes infravermelhos passivos (PIR)



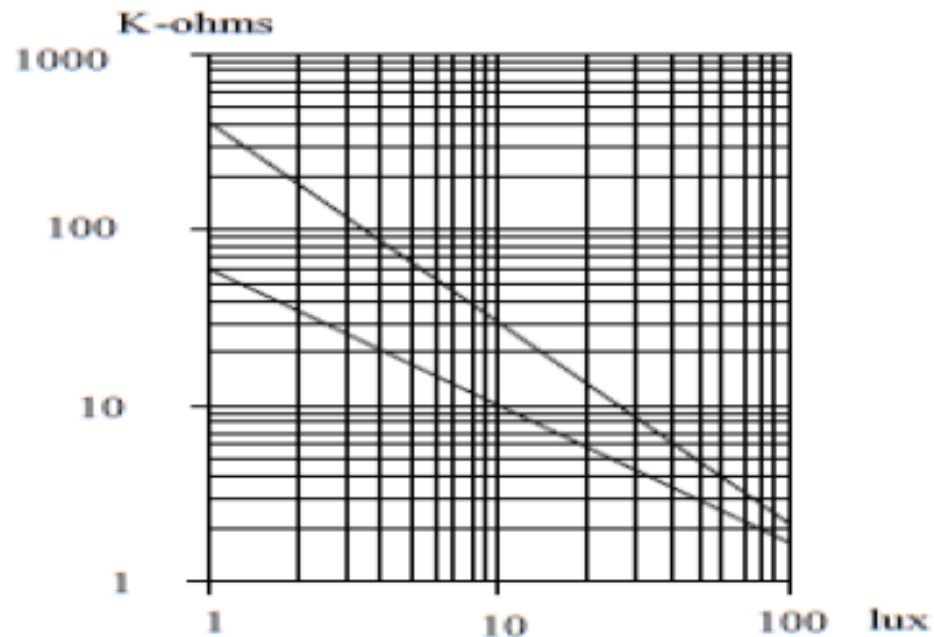
Bolômetro:

- Temperatura do absorsor é medida com termistor
- Alta sensibilidade, não linear
- Uso em câmeras termométricas
- Banda larga



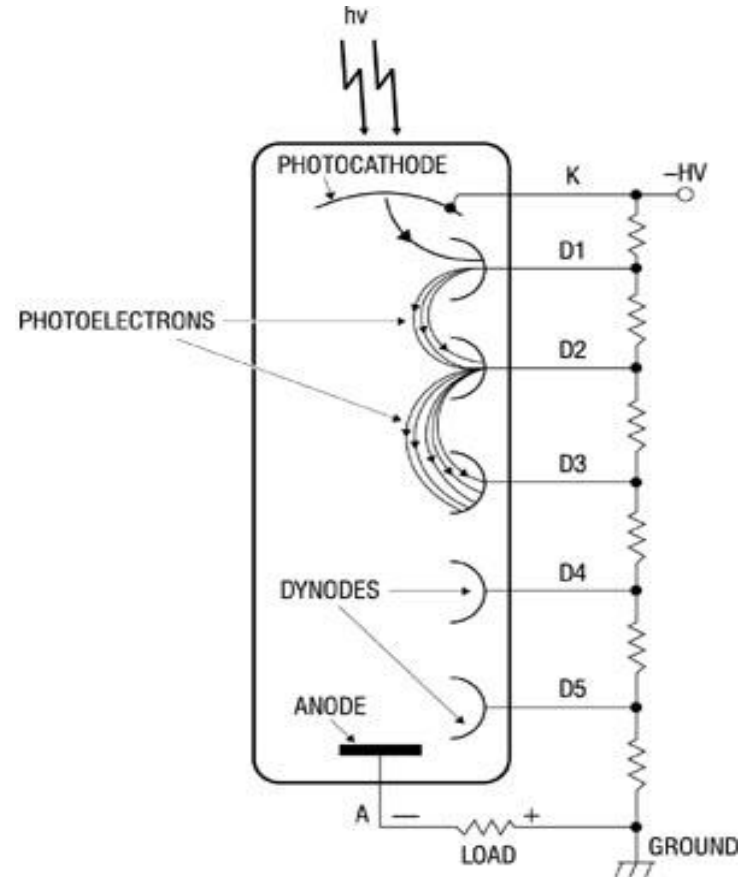
Fotoresistor:

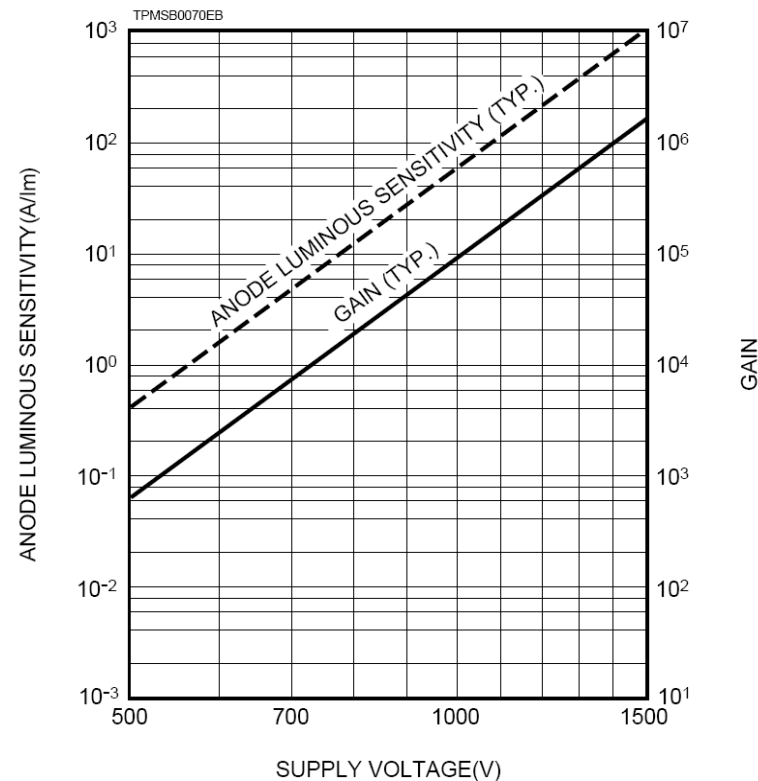
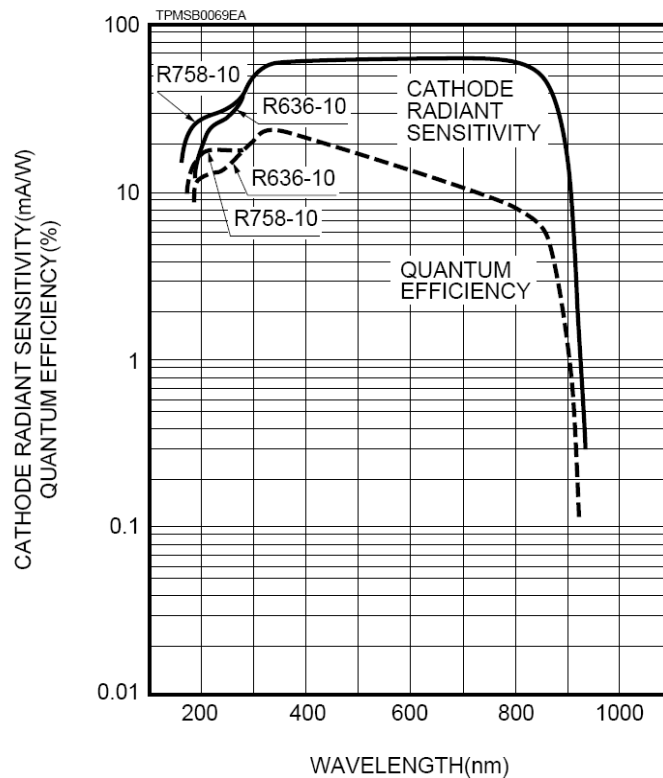
- Resistência depende da luz incidente
- Ex.: LDR, CdS
- Alta sensibilidade, baixa velocidade, não linear



Fotocélula (Fotomultiplicadora):

- Corrente depende da intensidade da luz incidente
- Alta sensibilidade, alta velocidade, linear

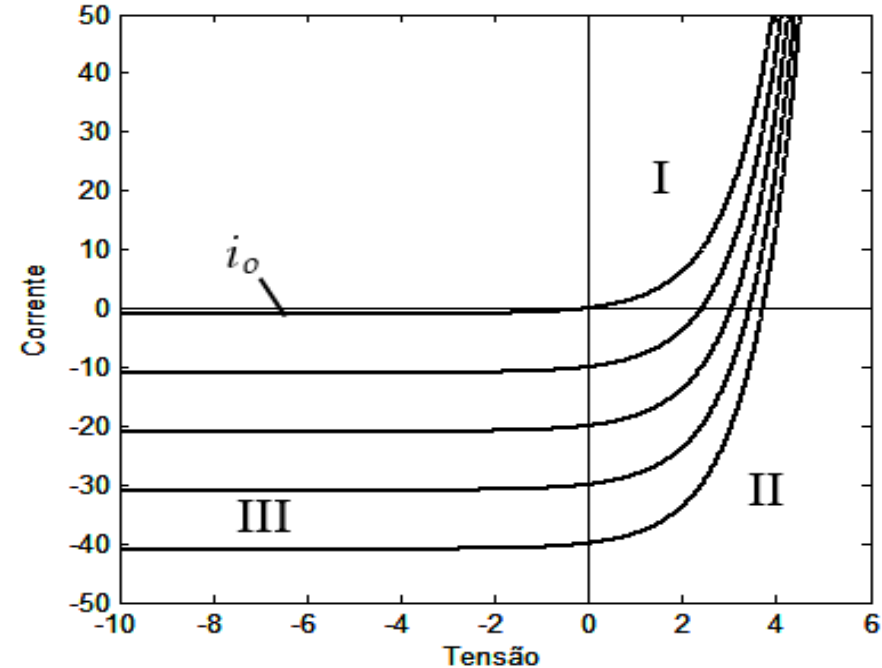
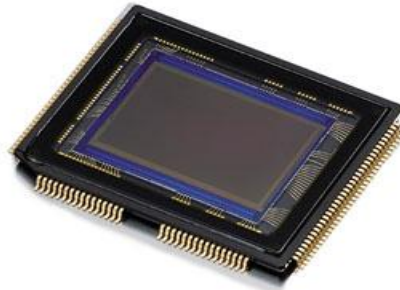


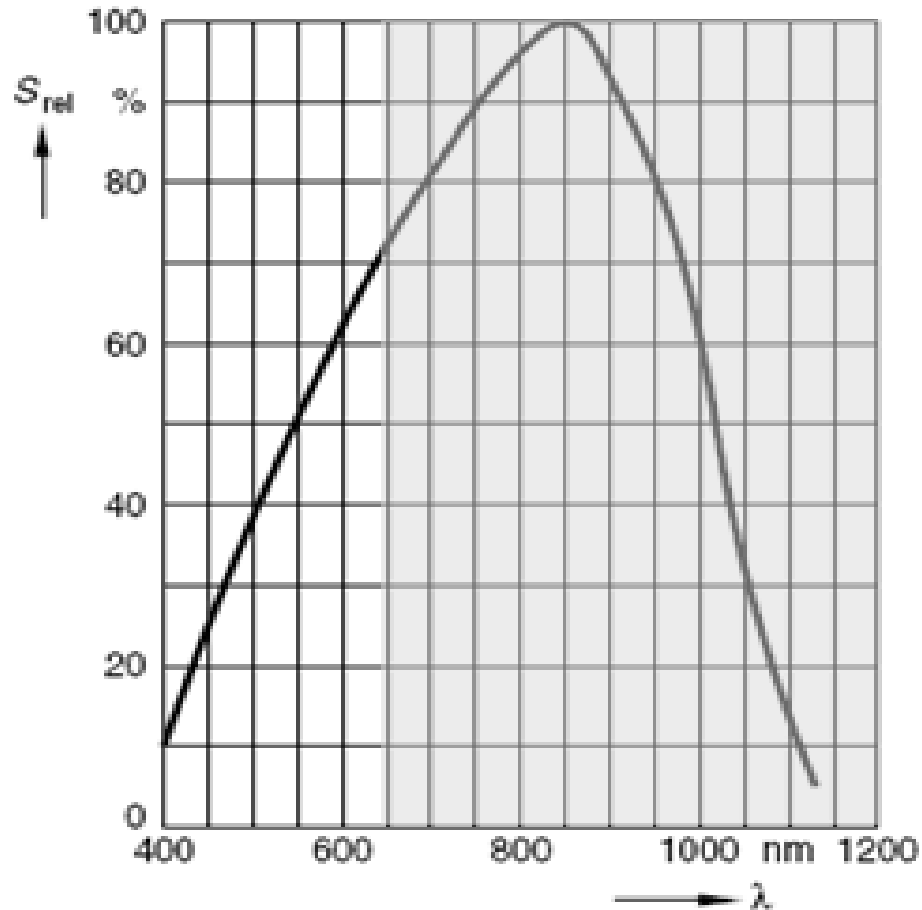


Características de Fotomultiplicadora (Hamamatsu R636-10)

Fotodiodo:

- Corrente depende da intensidade da luz incidente
- Bateria Solar
- Baixa sensibilidade, alta velocidade, linear
- Sensor para câmeras ópticas





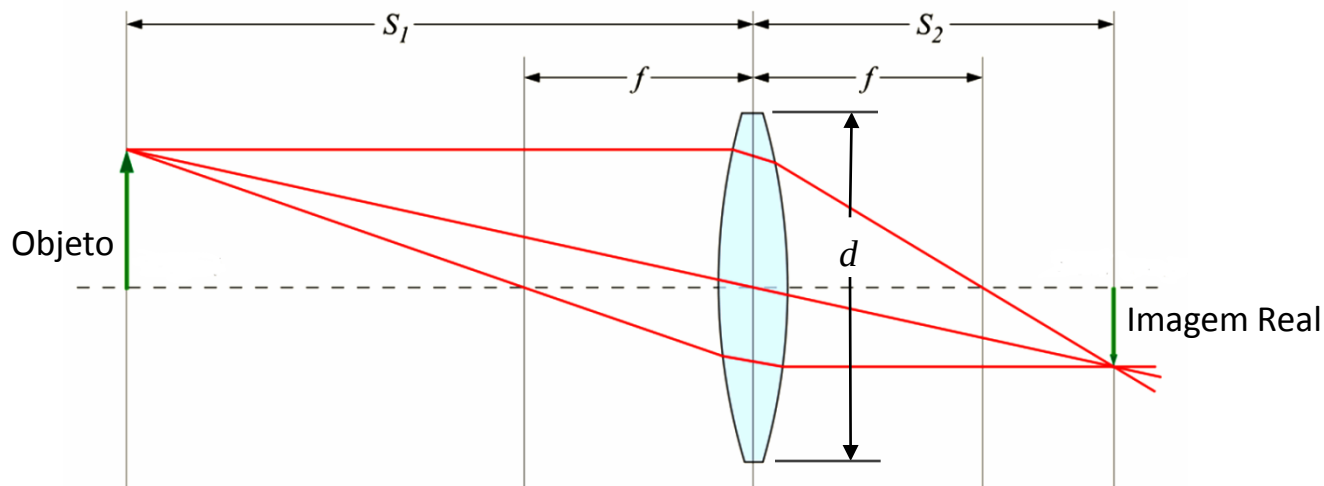
Fotodiodo de Silício

Sensibilidade
espectral

Fotometria de Sistemas Ópticos

- Equação da Objetiva
- Luminância x Iluminamento
- Exposição
- Reciprocidade

Equação Fundamental da Objetiva: $\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} = \frac{1}{f}$



f = Distância Focal

d = Diâmetro da Lente

$F = f/d$ = Abertura da Lente

Exemplo:



Sensor de 1/2" 16:9
Diagonal: 1/2" = 12,7 mm
Altura: v=5,9 mm
Largura: h=10,6 mm

Distância Focal = 35 mm
Abertura da Lente = 2

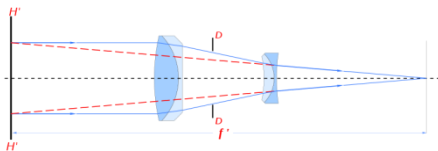
Campo de Visão Angular no infinito:

H = 17,2 graus

V = 9,6 graus

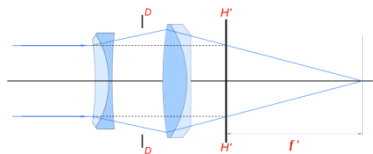
Diâmetro efetivo: 17,5 mm

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



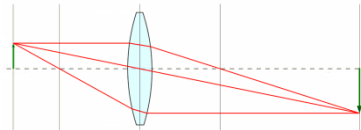
Teleobjetiva:

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



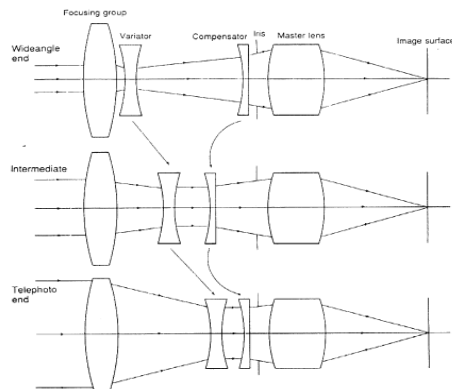
Grande-Angular:

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



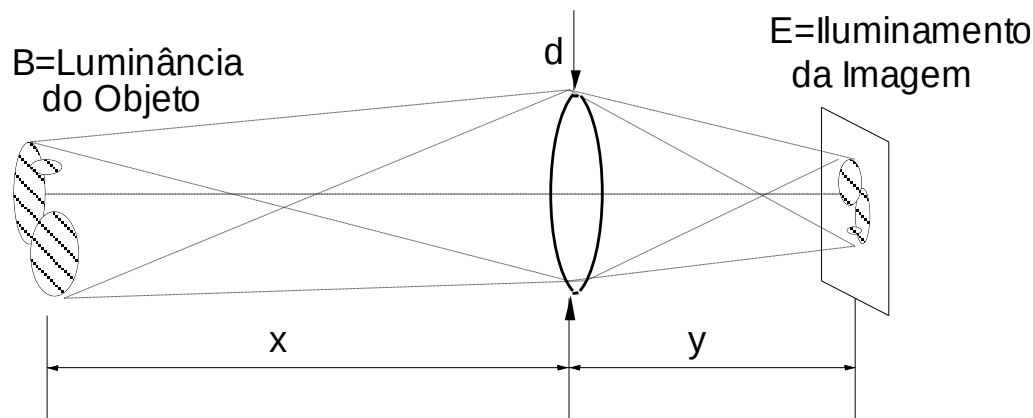
Macro:

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



Zoom:

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



$$E = \frac{\pi B f^2 T}{4 y^2 F^2} \cos^4 \theta$$

T = Transmitância da lente

F = Abertura da lente = $\frac{f}{d}$

f = Distância focal da lente

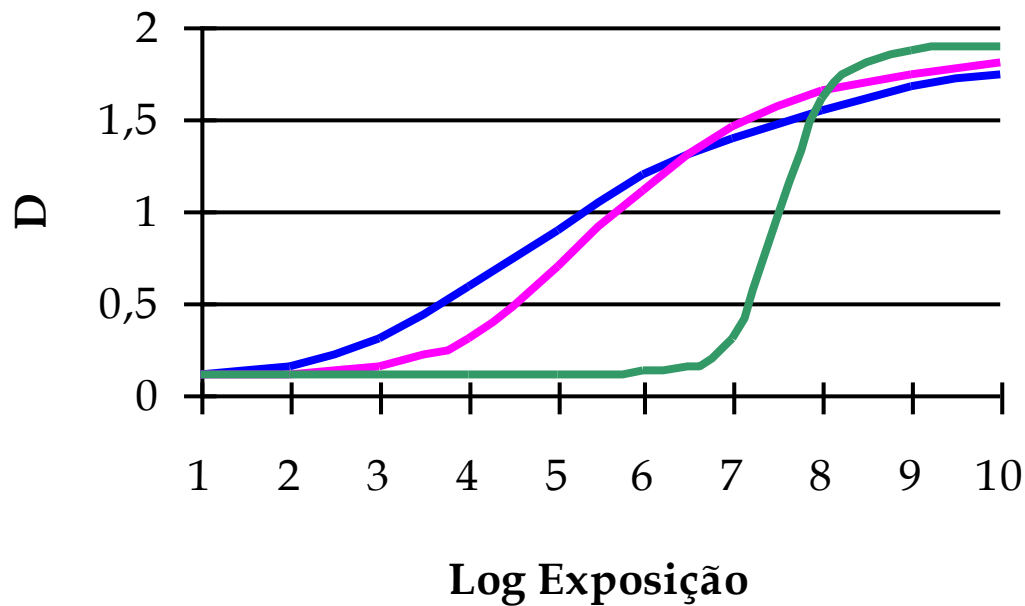
θ = Ângulo entre o objeto e o eixo óptico

Ou

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

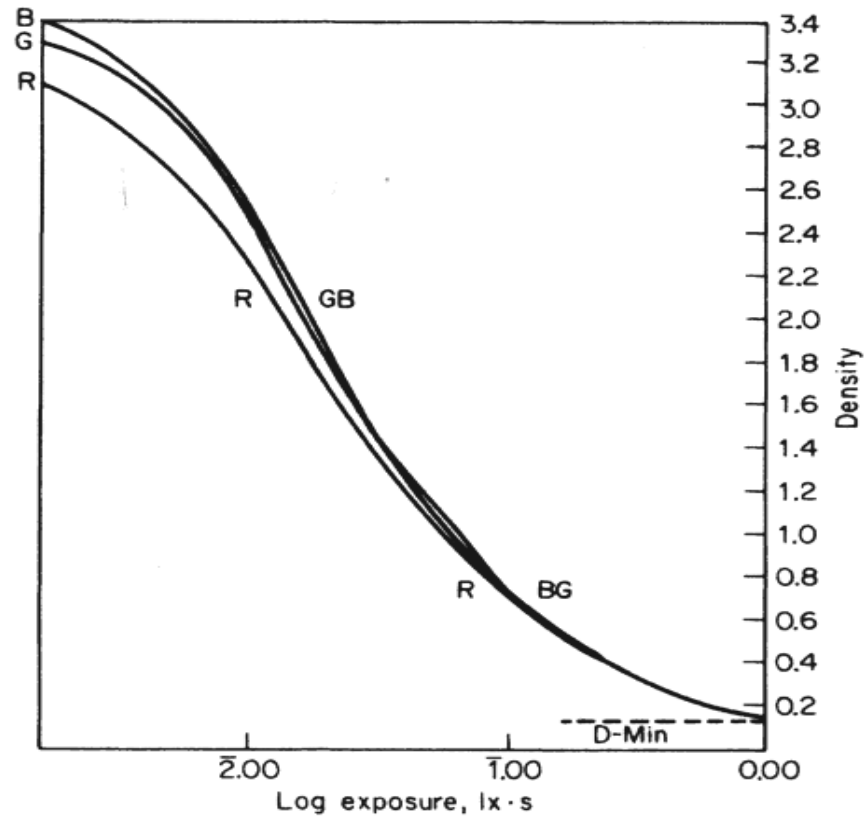
$$S = \frac{V_0}{E \cdot \Delta t} \quad \Rightarrow \quad V_0 = S \cdot E \cdot \Delta t$$

(Resposta linear, cumulativa,
tipicamente da ordem de 1 a 10 V/lux.seg)

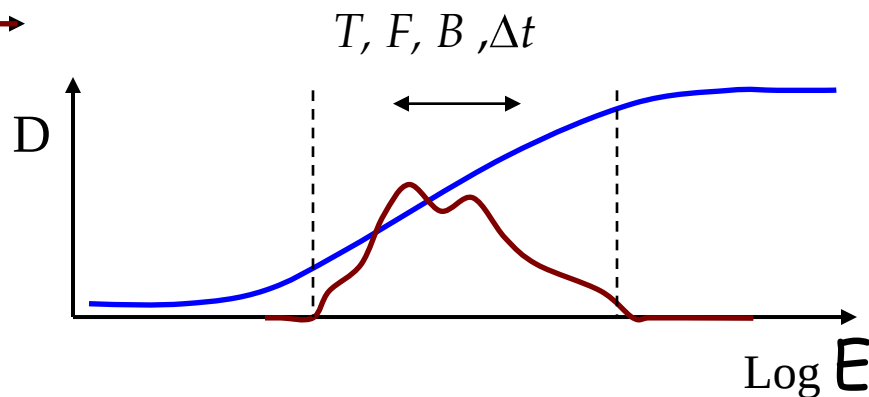
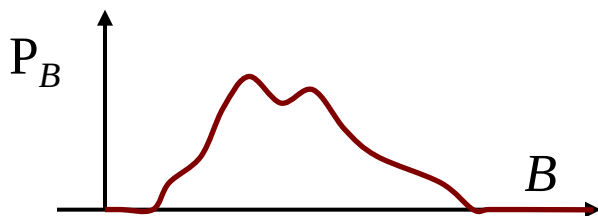


$$E = E \times \Delta t$$

(iluminamento $\times$ tempo de exposição)



- Ajustar a Exposição E de modo que a distribuição das luminâncias na cena esteja compreendida dentro da região linear do sensor



Recursos:

- Tempo de exposição Δt
- Abertura da lente F
- Filtros Neutros T
- Iluminação da cena B

$$E = E \times \Delta t$$

(Iluminamento $\times$ Tempo de Exposição)

Vale dentro de uma determinada faixa de tempos de exposição (típico: $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{1000}$ de segundo).

Qual é a cor da Lua?





Foto:
Deep Space
Climate
Observatory

(NASA / NOAA)
Julho / 2015