

Elementos de Fotometria

PTC3547 – Codificação e
Transmissão Multimídia

Guido Stolfi – EPUSP – 2025



- 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

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

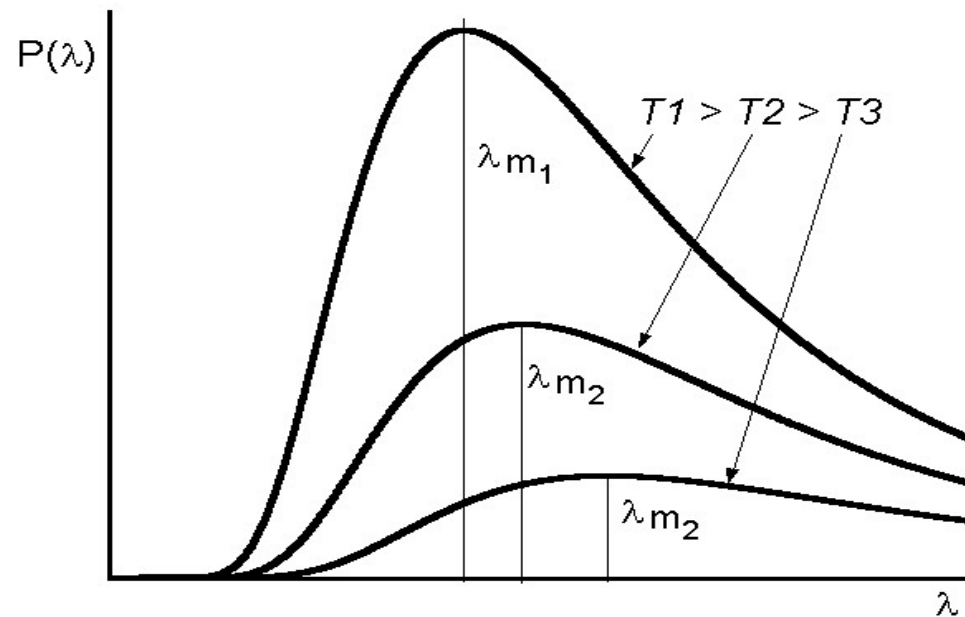
Radiação Emitida por um Corpo Negro Aquecido

Equação de Planck:

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

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

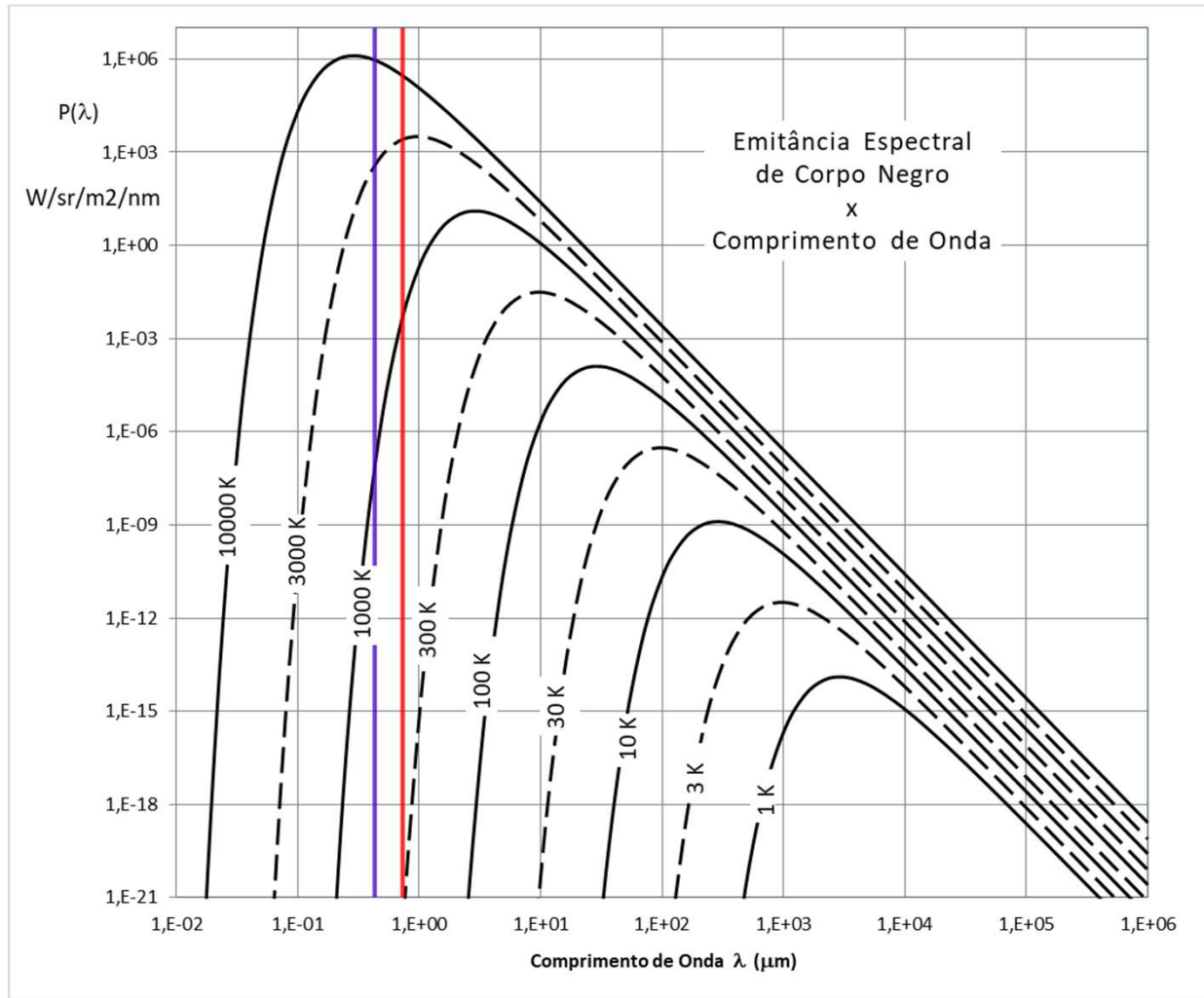
$$W_T = \int_{\lambda} P(\lambda) = \sigma T^4$$



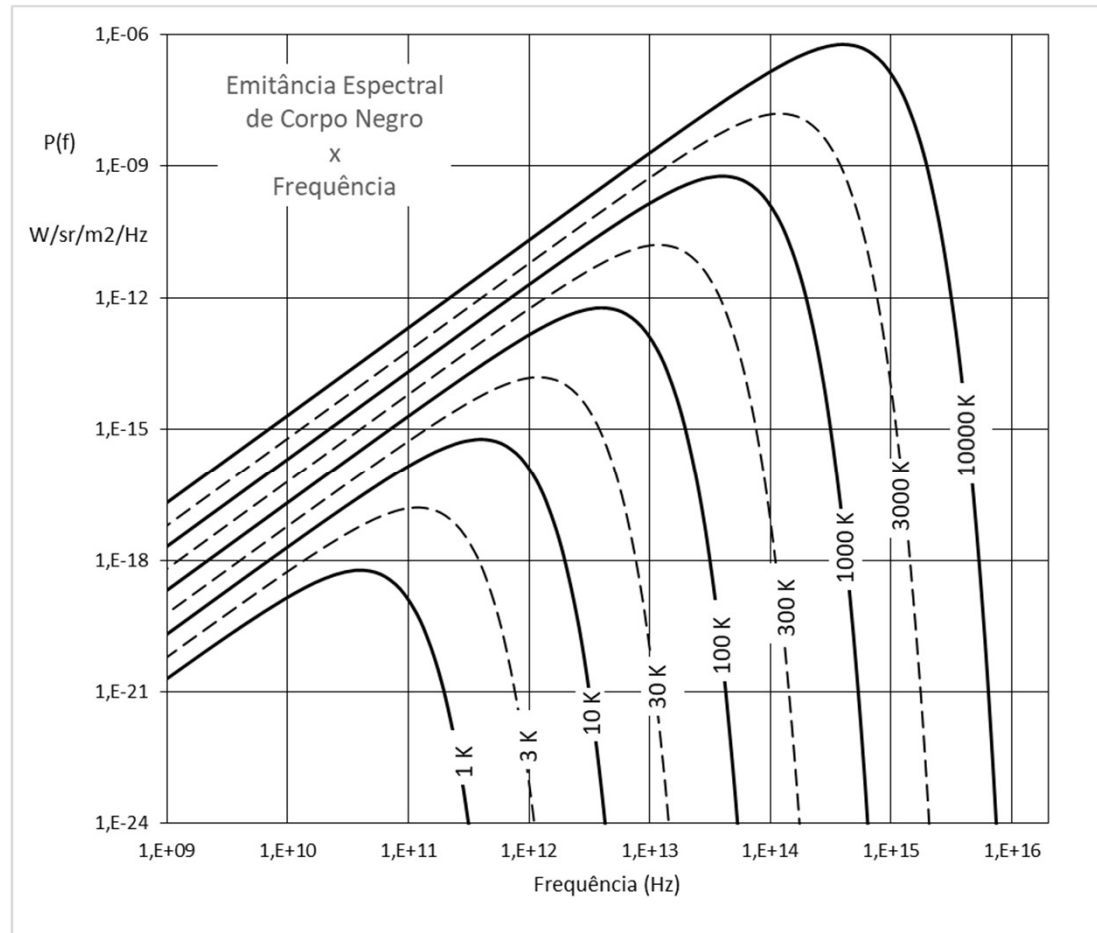
$h = 6,6256 \times 10^{-34} \text{ J s}$ (Planck)

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

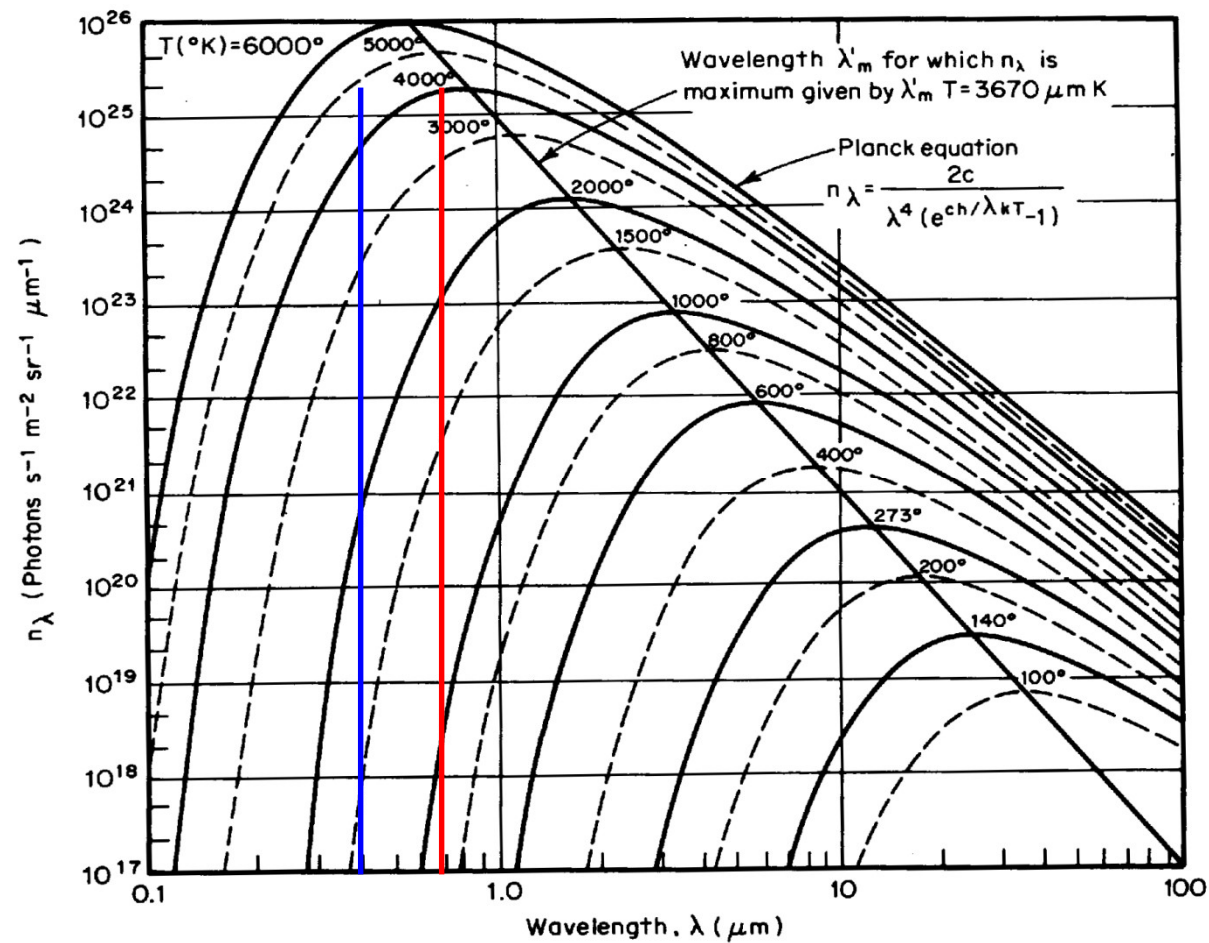
Em Escala Logarítmica:



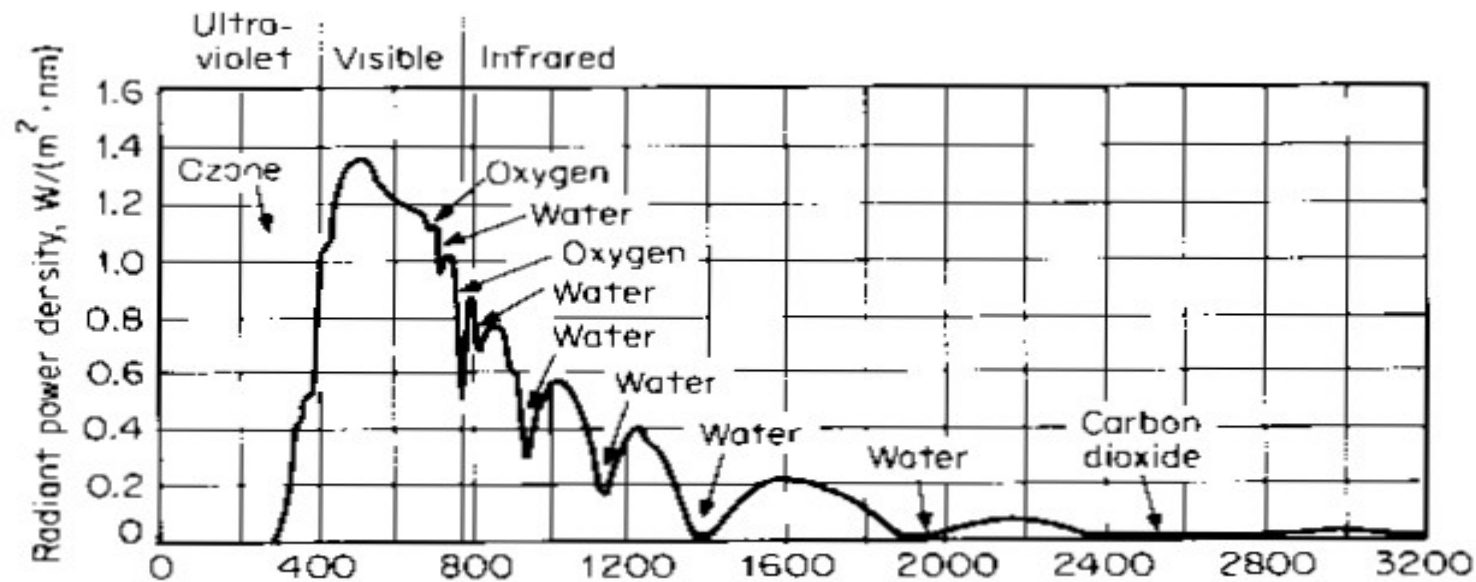
Em Função da Frequência:



Emissão de Fótons de um Corpo Negro Aquecido

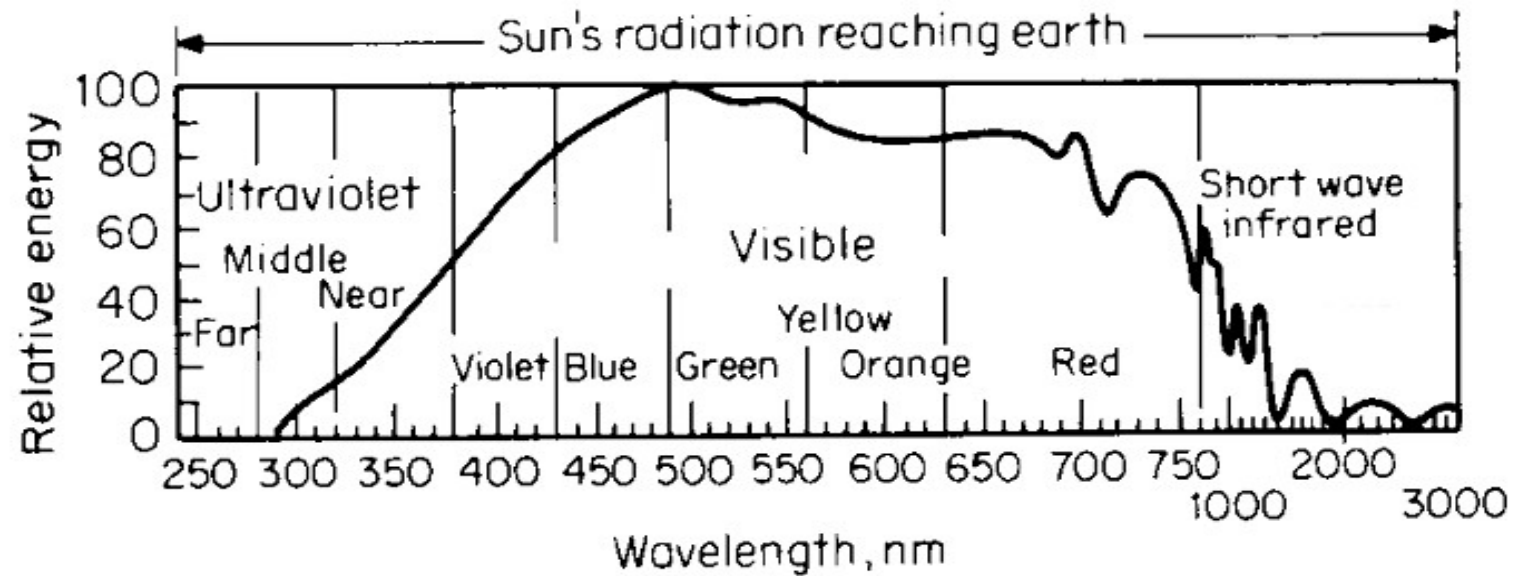


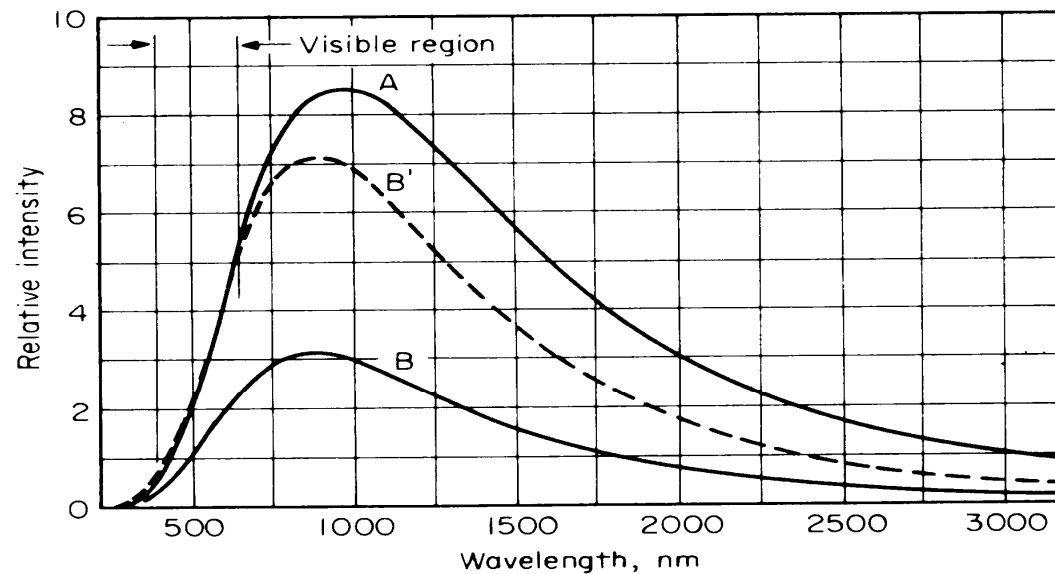
Emitância Espectral da Luz Solar



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

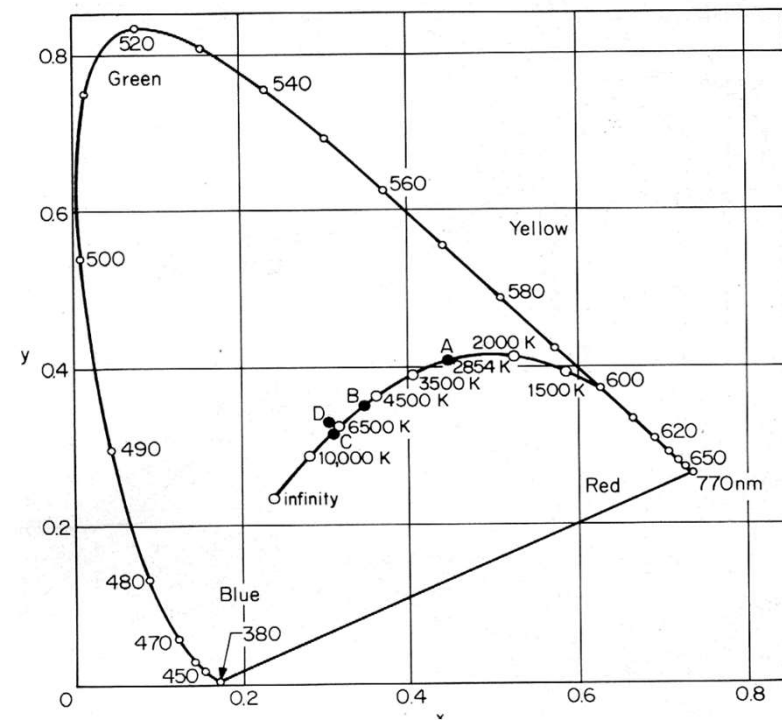
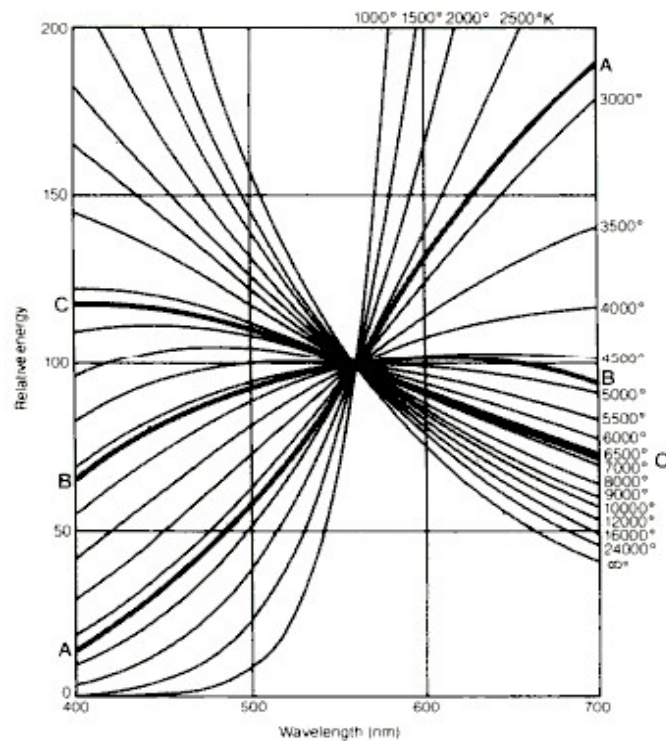
Emitância Visível da Luz Solar

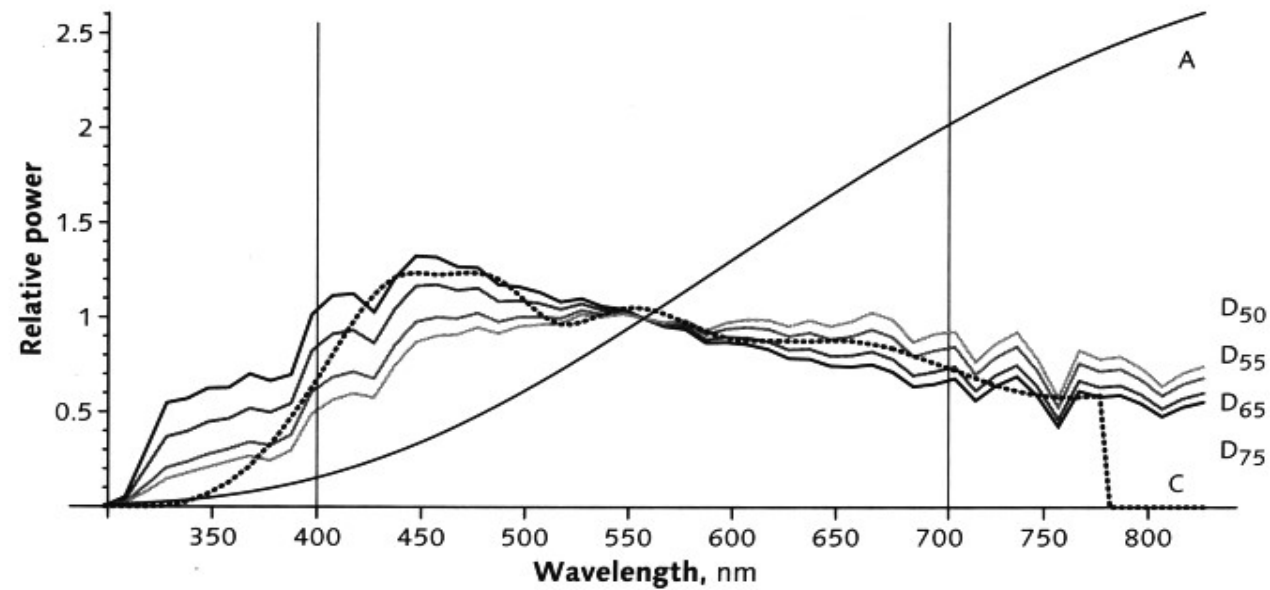




Emitância de Corpo Negro a 3000 K (**A**) e de 1 cm² de Tungstênio a 3000 K (**B** e **B'**)

Colorimetria de um Corpo Negro Aquecido



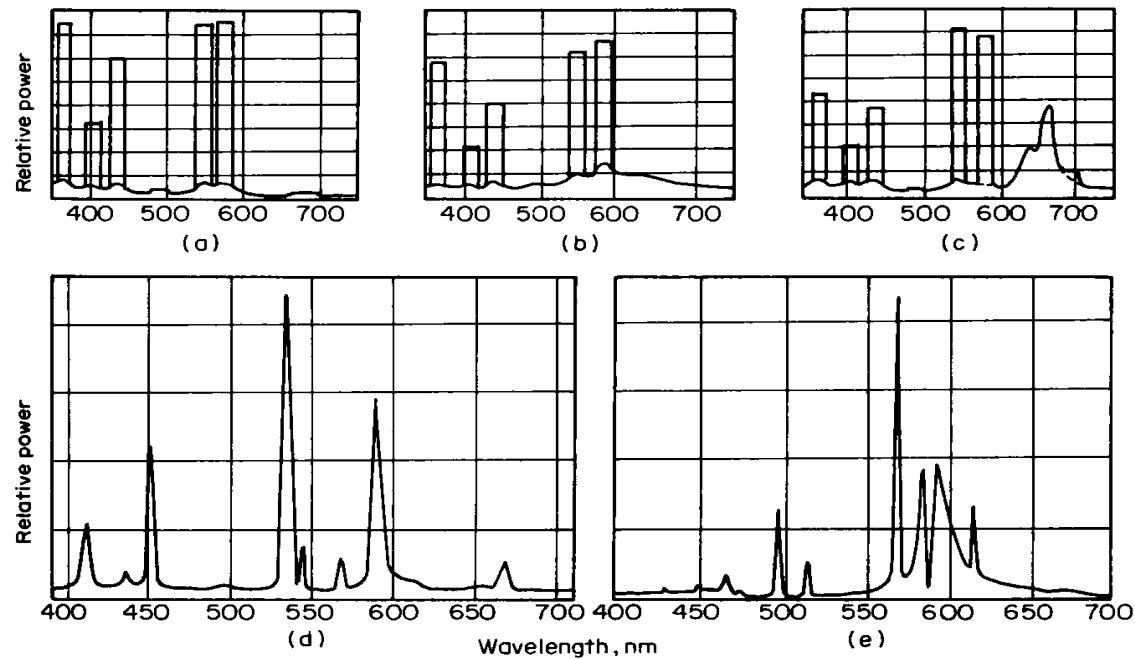


A = Corpo Negro a 3200 °K (obsoleto)

C = Luz do dia (obsoleto)

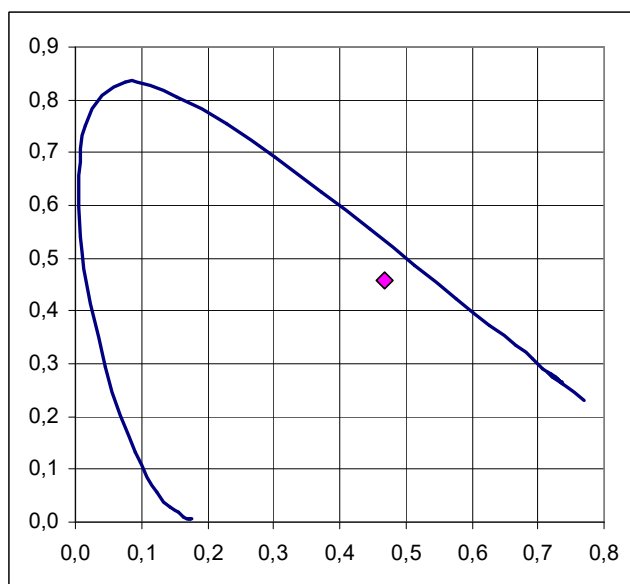
D50 a D75 = Luz do dia 5000 ~ 7500 °K

Emitância Espectral para Lâmpadas a Gás

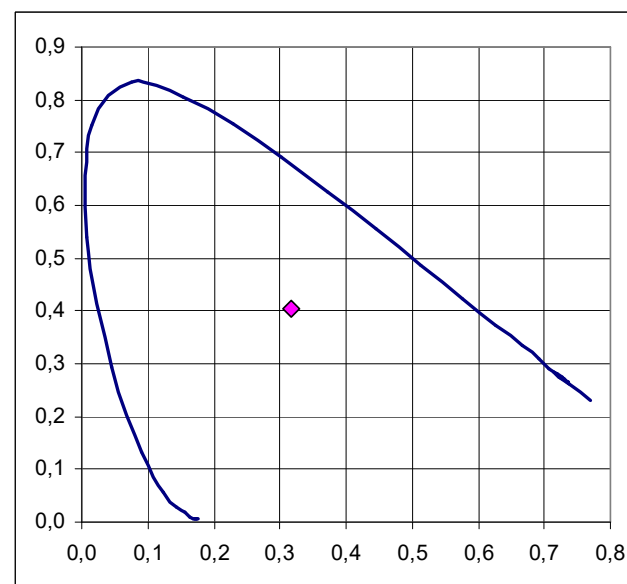


- (a) Lâmpada de Mercúrio; (b) Mercúrio com revestimento fosforescente;
(c) Idem com revestimento aprimorado; (d) Lâmpada de Sódio/Tálio/Índio/Iodo;
(e) Sódio de Alta Pressão

Coordenadas de Cromaticidade para Lâmpadas de Gás



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

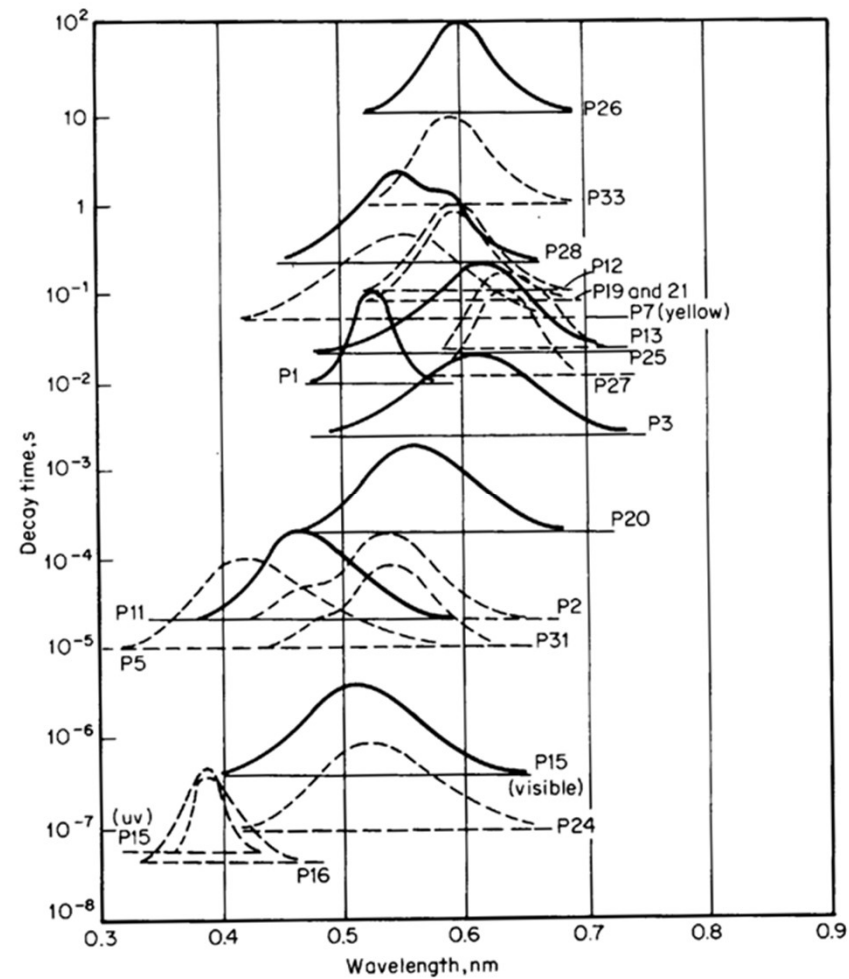


Lâmpada de Sódio/Tálio/Índio/Iodo
 $x = 0.317$ $y = 0.405$

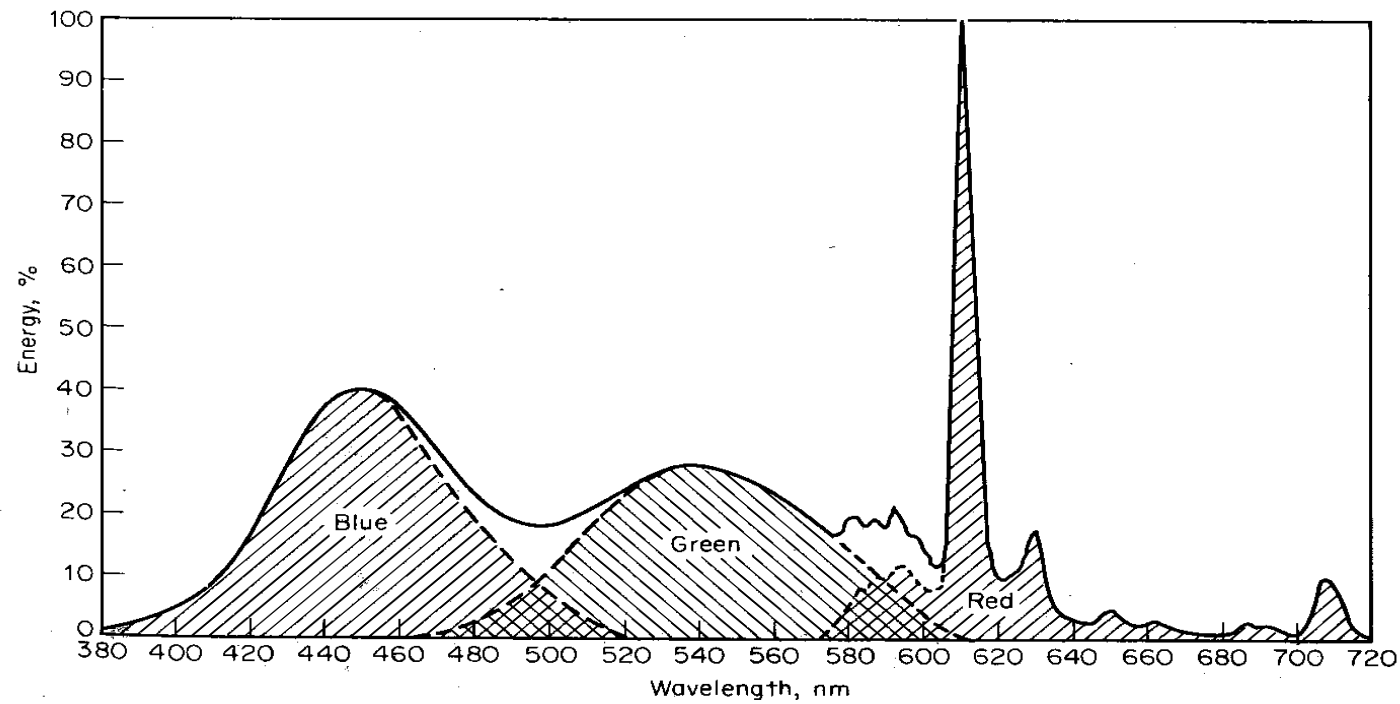
- Conversão de energia incidente (elétrons, fótons ultravioletas) em luz visível
- Cristais inorgânicos (ex.: CdS, Y_2O_2S , ZnS, $ZnSiO_4$, Y_2O_3)
- Dopados com ativadores (Ag, Cu, Al, Eu, Tb, Mn)
- Conhecidos como “Fósforos”; P1, P2, P45...

Características de “Fósforos”

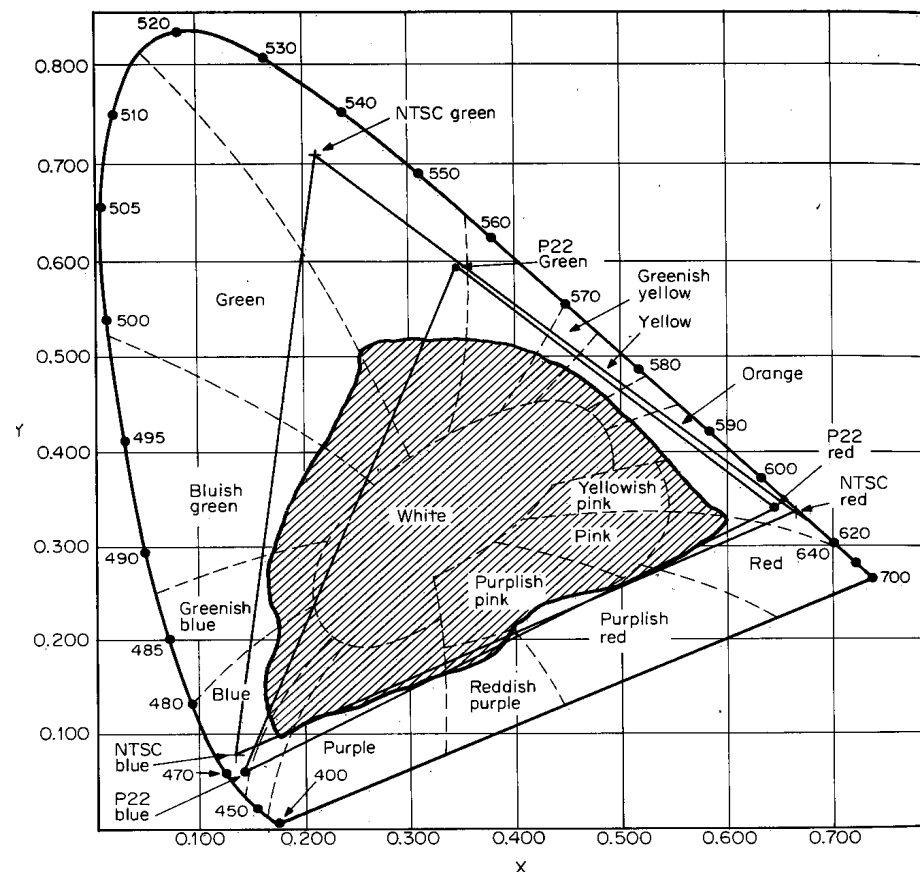
LCS
EPUSP



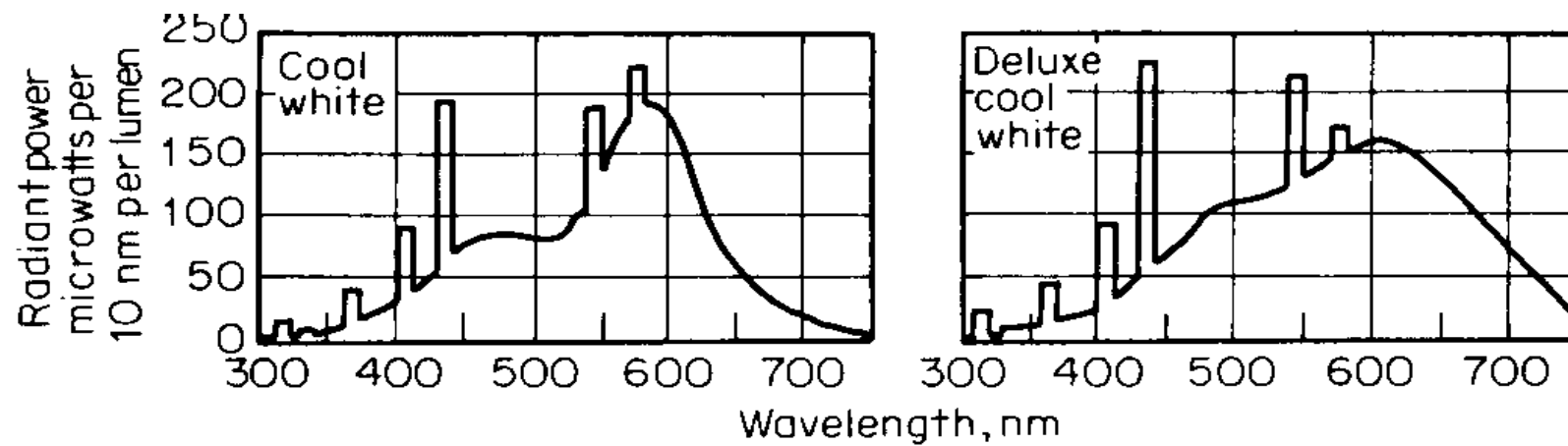
Primários Usados em Cinescópios (NTSC)



Coordenadas de Cromaticidade dos Primários (NTSC e P22)



Lâmpadas Fluorescentes



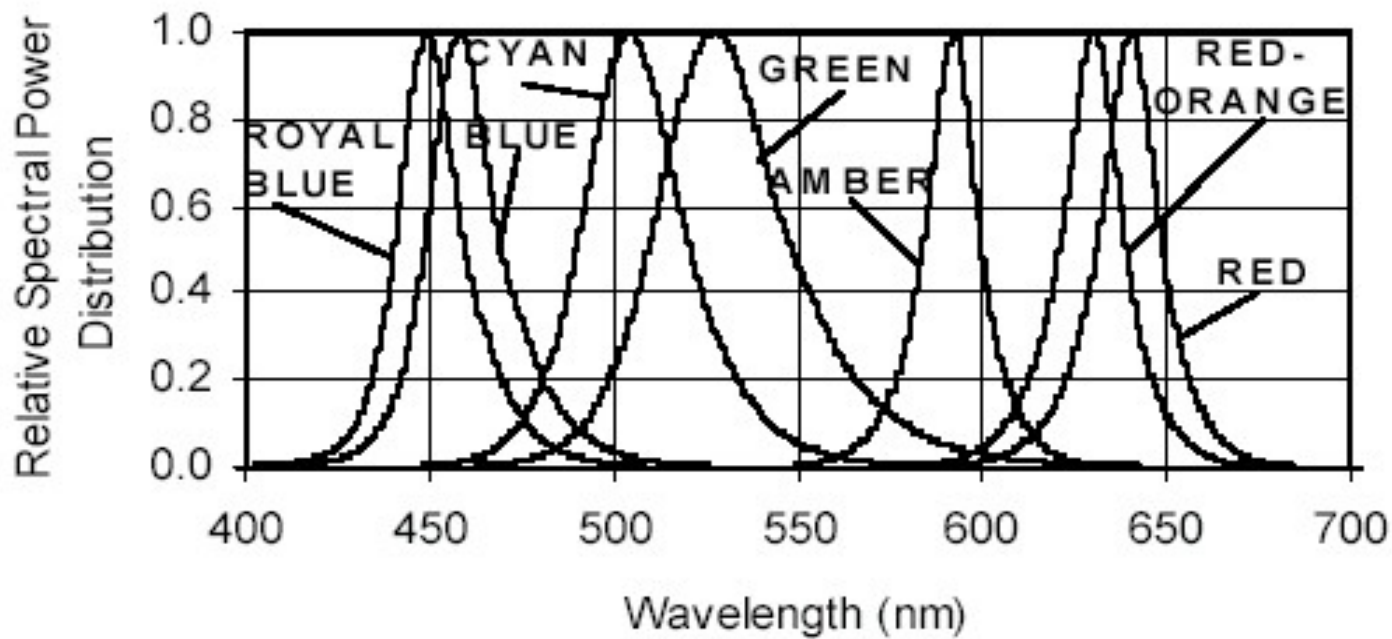
Lâmpadas Fluorescentes: Branca Fria Normal (esq.) e com melhoria de reprodução de cores (dir).

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

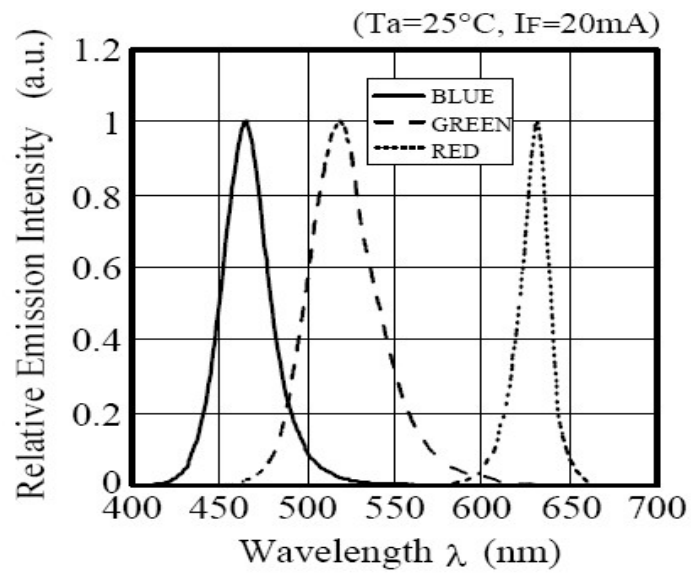
Materiais para Diodos LED

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

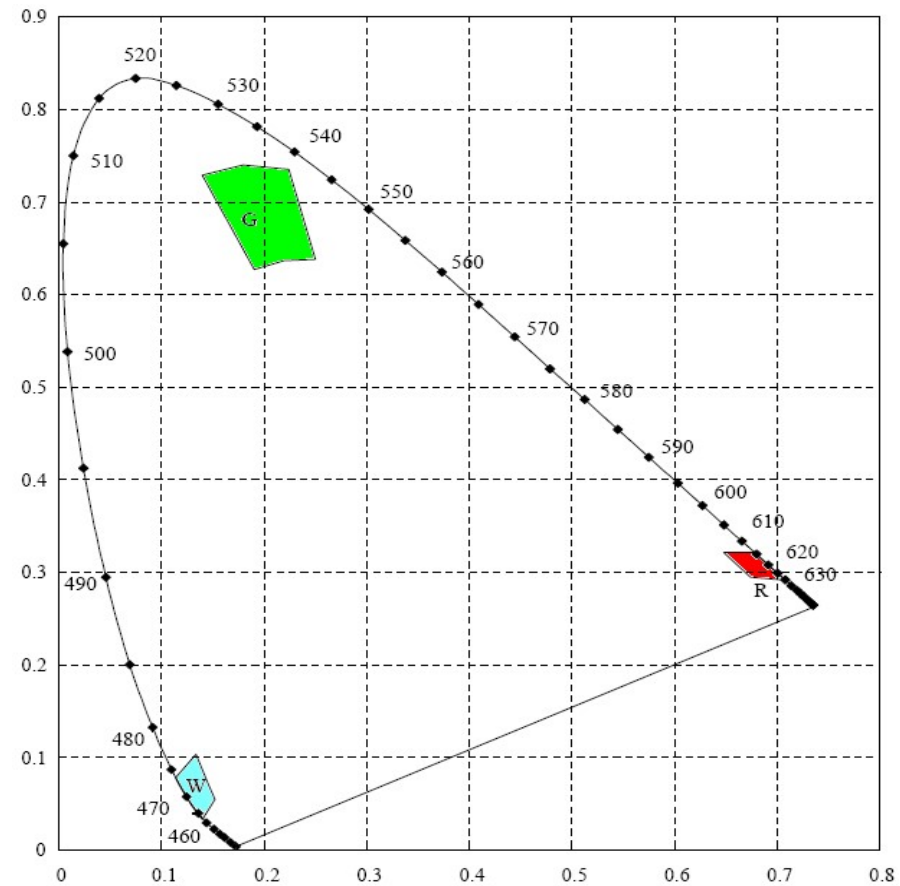
Emitância Espectral de LEDs



Colorimetria de LEDs RGB



LED Nichia NSCM315C



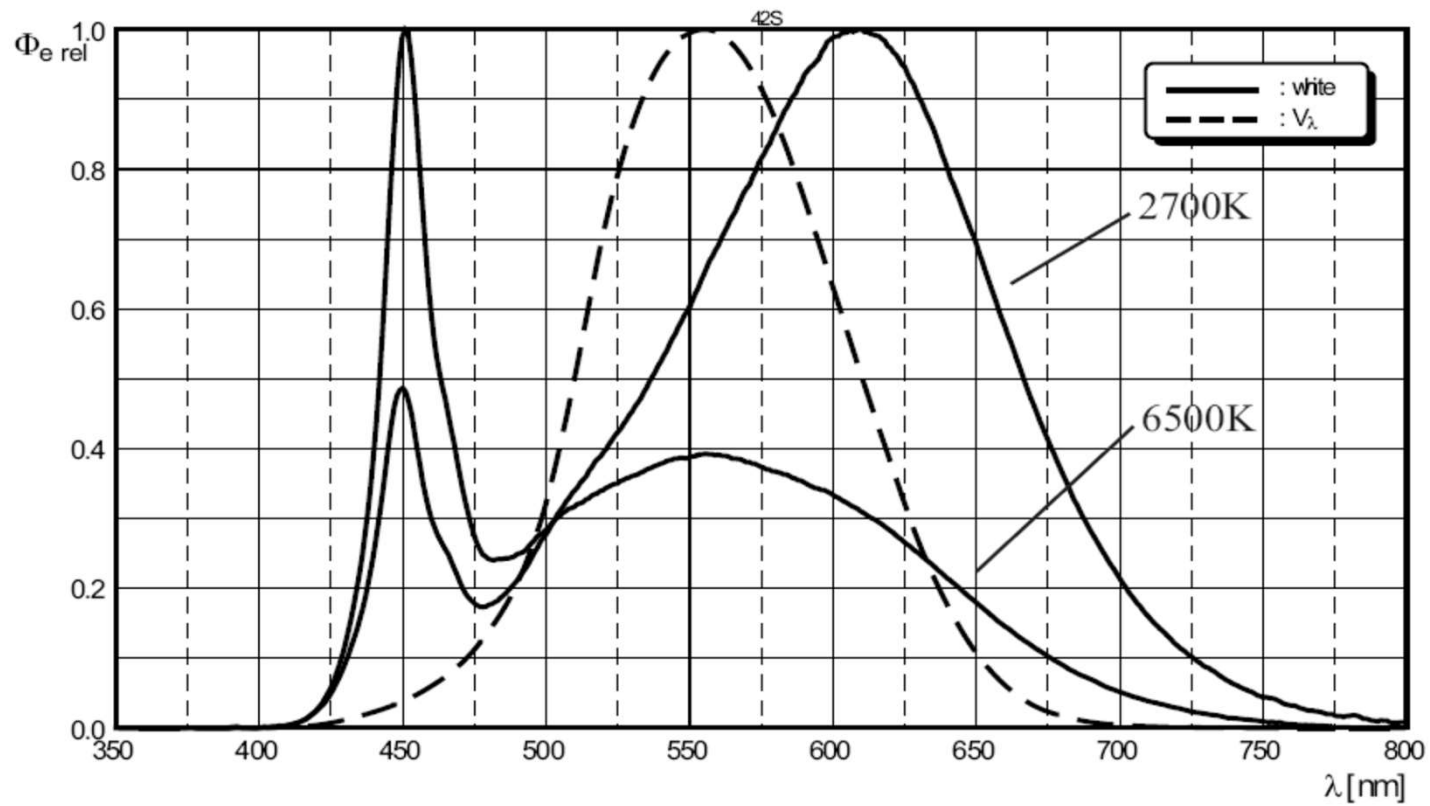
LEDs RGB para Sistemas de Visualização

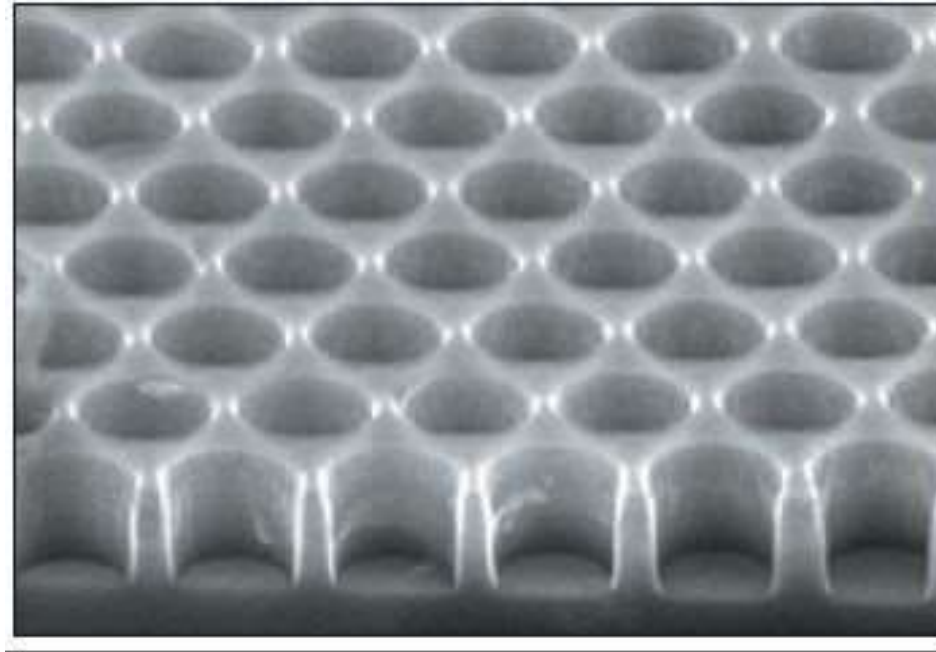
LCS
EPUSP



“Cluster” de LEDs para Outdoor

LED Branco

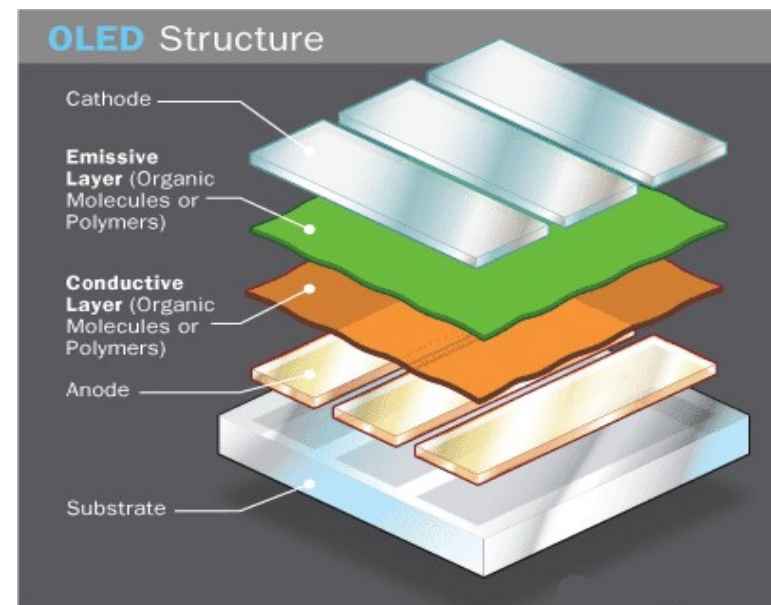




Estrutura fotônica superficial para aumento de eficiência no acoplamento luminoso entre o LED e o ar (*Luminous Devices, Inc.*)

LED Orgânico (OLED)

- 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



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

- **Radiometria:** refere-se à medição de grandezas físicas, associadas à energia radiante
- **Fotometria:** refere-se à radiometria da luz visível, considerando a resposta padrão da visão humana (grandezas psicofísicas)
- **Percepção:** sensações qualitativas, subjetivas, evocadas pelas grandezas psicofísicas

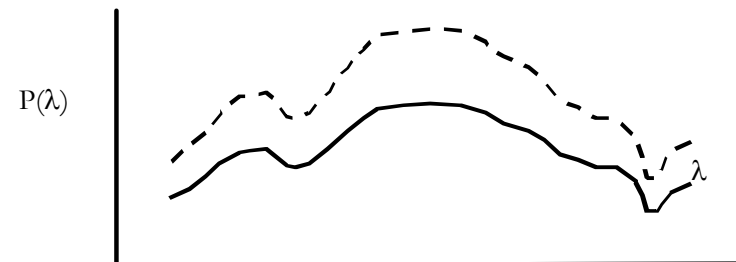
Propriedades Descritivas da Luz

<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

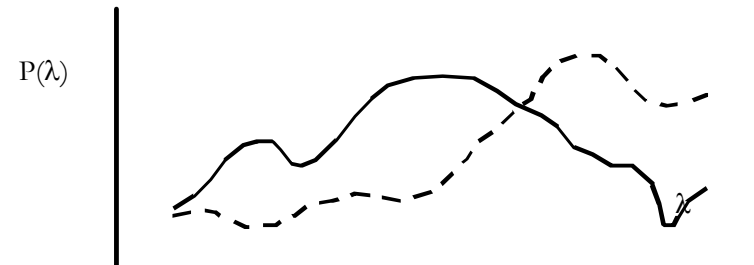
Grandezas Subjetivas x Objetivas

LCS
EPUSP

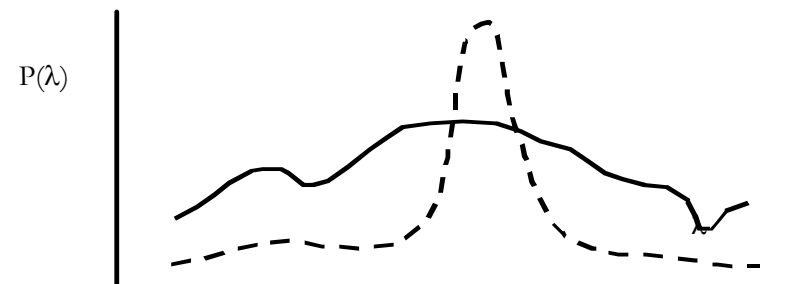
Brilho
(Luminância)



Tonalidade
(Comprimento de
Onda Dominante)

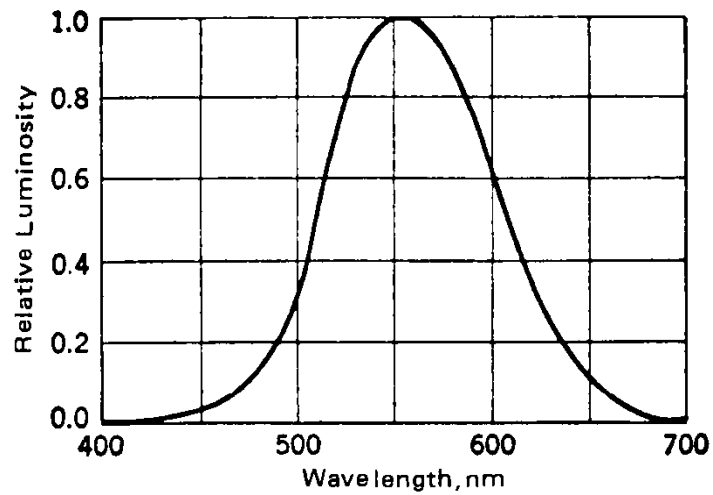


Saturação
(Pureza Espectral)

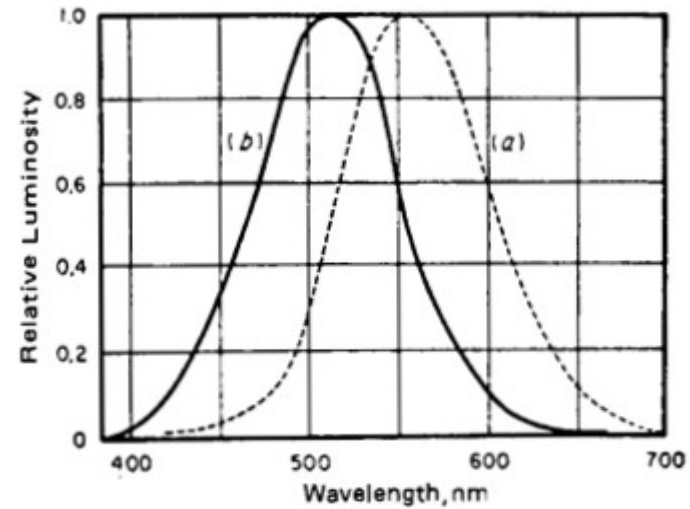


Funções de Luminosidade

LCS
EPUSP



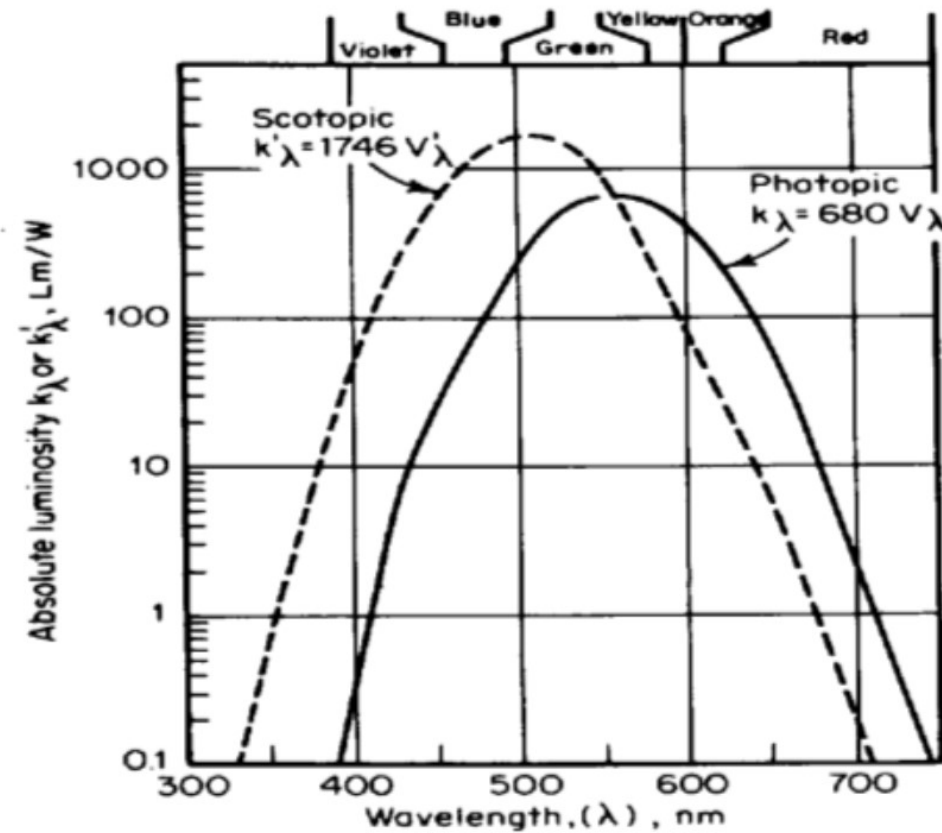
Função de Luminosidade Fotópica



Função de Luminosidade Escotópica

Funções de Luminosidade

LCS
EPUSP



- Fluxo Luminoso
- Intensidade Luminosa
- Iluminamento
 - Iluminamento Retinal
- Luminância
- Transmitância
 - Densidade Óptica
- Refletância
- Contraste

Fluxo Luminoso:

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

$F(\lambda)$ = Função de Luminosidade

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

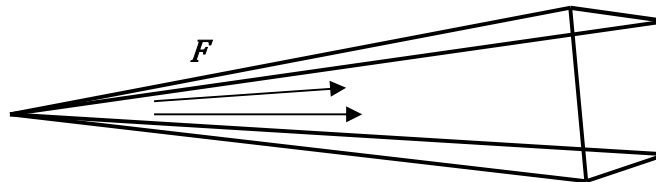
$$P(\lambda) = \text{W} / \text{nm}$$

Intensidade Luminosa:

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

F = Fluxo em Lumens

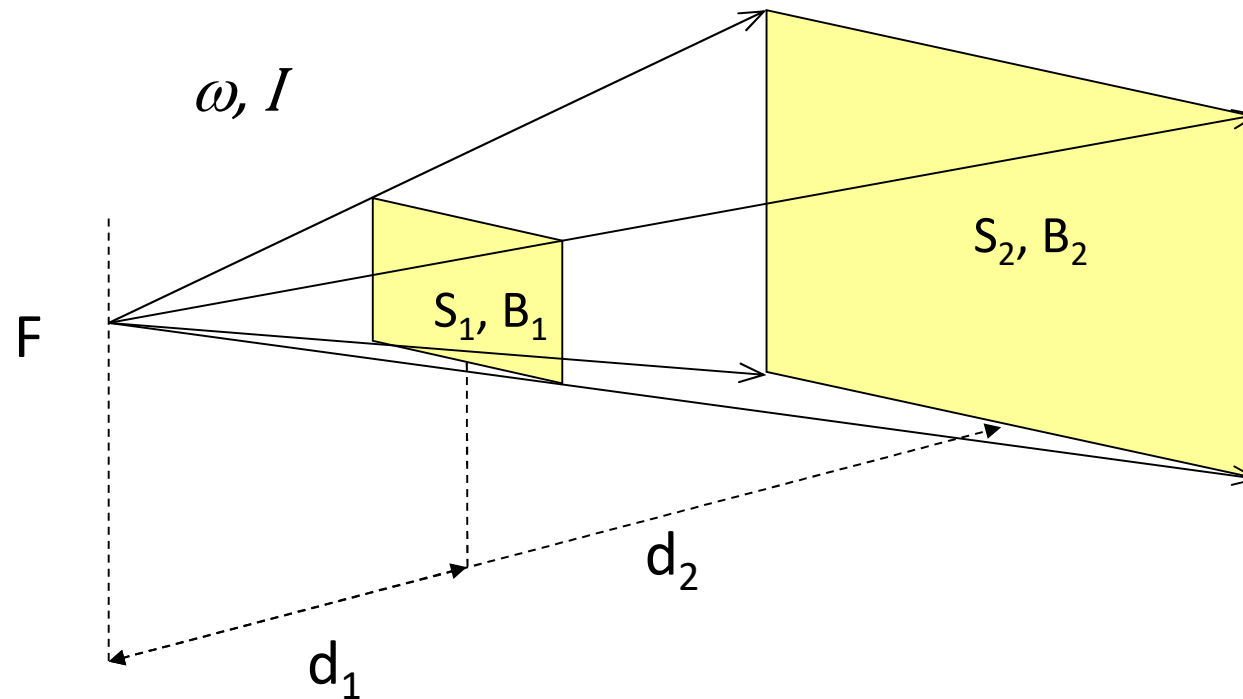
ω = Ângulo Sólido em esteroradianos



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

Níveis de Iluminamento Recomendados

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

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

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

Luminâncias de Alguns Objetos

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)

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

Refletância:

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

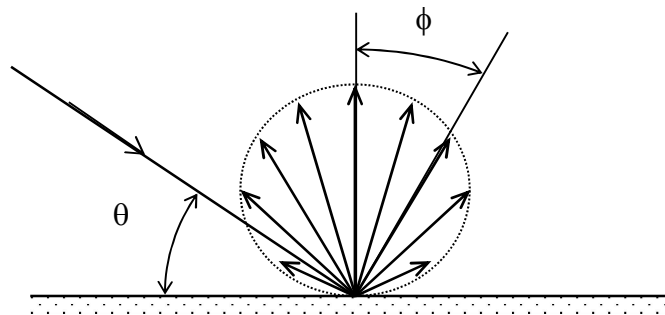
P_{λ} = Radiância recebida do objeto

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

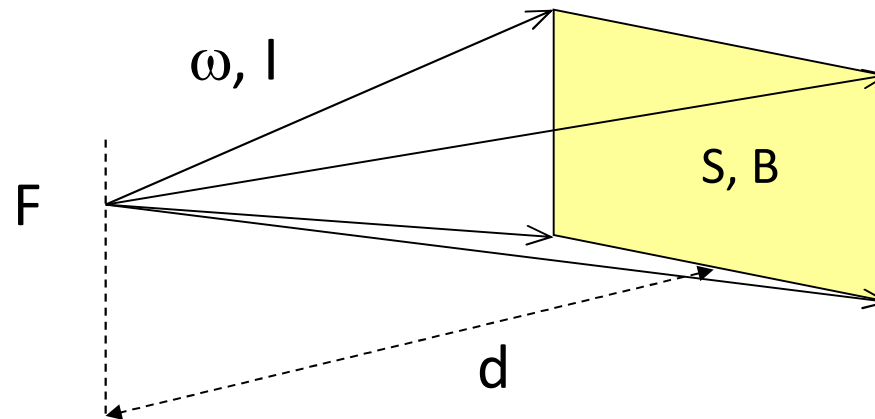
Refletância do Difusor Padrão (Lambertiano):

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

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



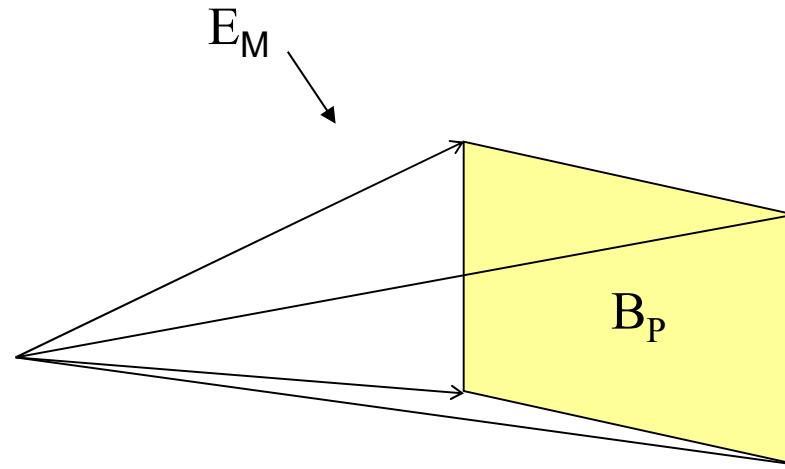
Exemplo: Projeção



- 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:
 - $I = F / \omega = 56000 \text{ candelas}$

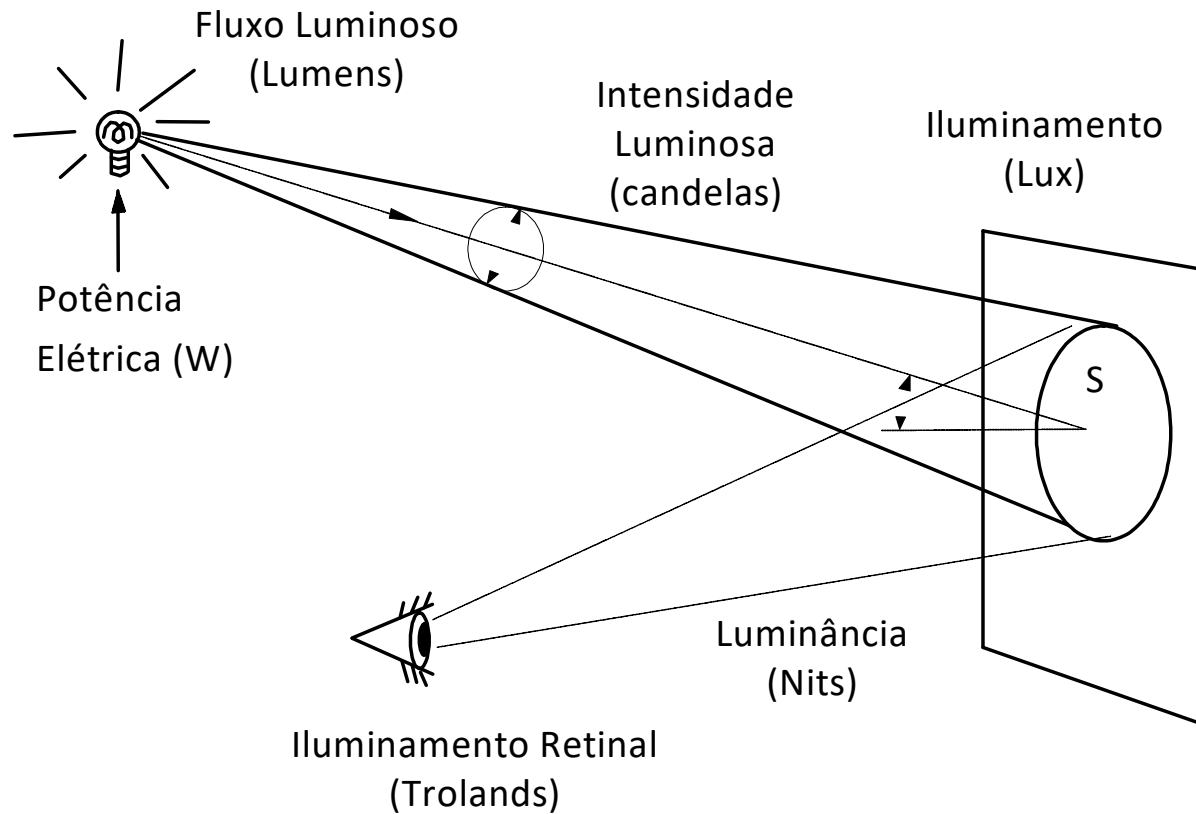
- Relação entre Luminâncias Máxima e Mínima de uma imagem (contraste simultâneo)
- Relação entre Luminâncias em imagens não simultâneas (contraste sequencial)
- Percepção visual: 1000:1 máx; 100:1 aceitável
- Situações típicas:
 - Cinema: 80:1 (simultâneo); 1000:1 (sequencial)
 - Televisão (ambiente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

Exemplo: Contraste em uma Tela de Projeção



- 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

Situações Fotométricas

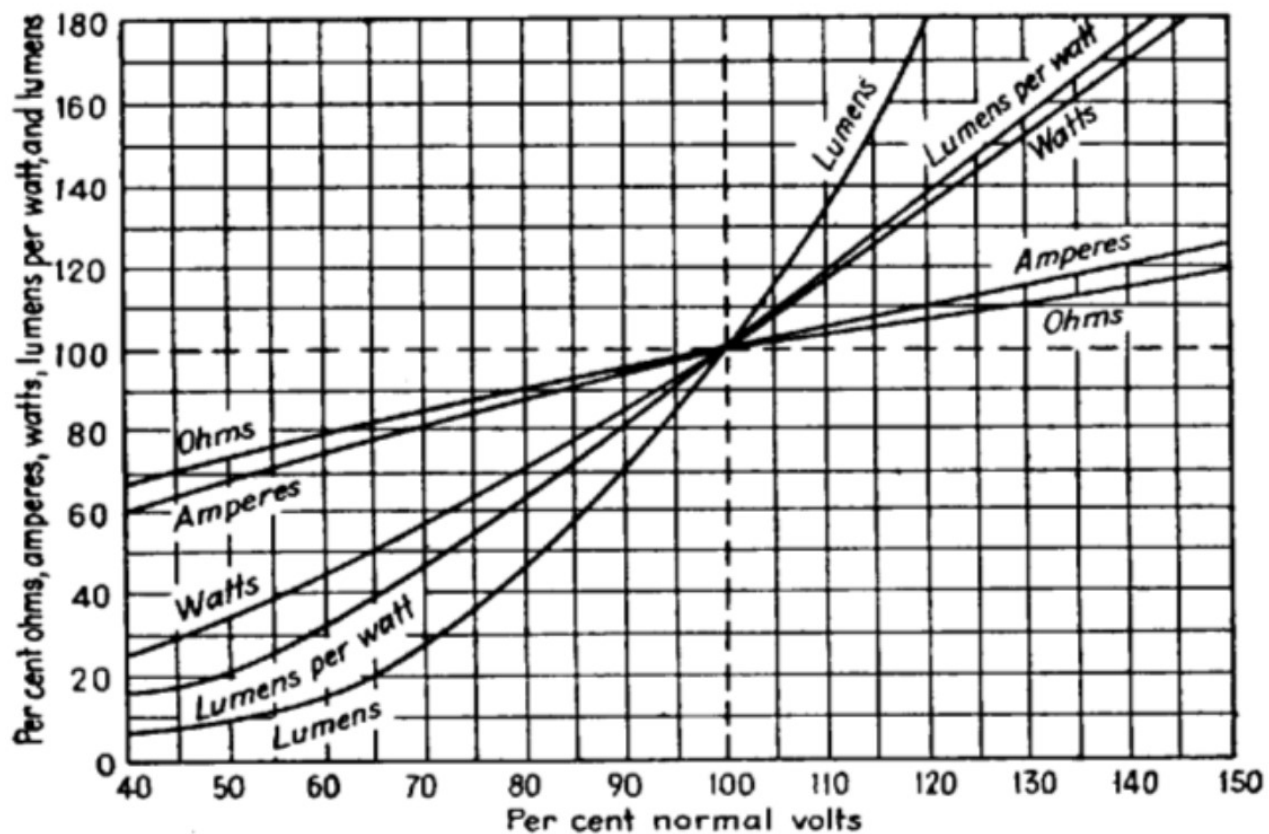


- Características
- Rendimento Luminoso
- Fidelidade de Reprodução Cromática

Rendimento Luminoso de Algumas Lâmpadas

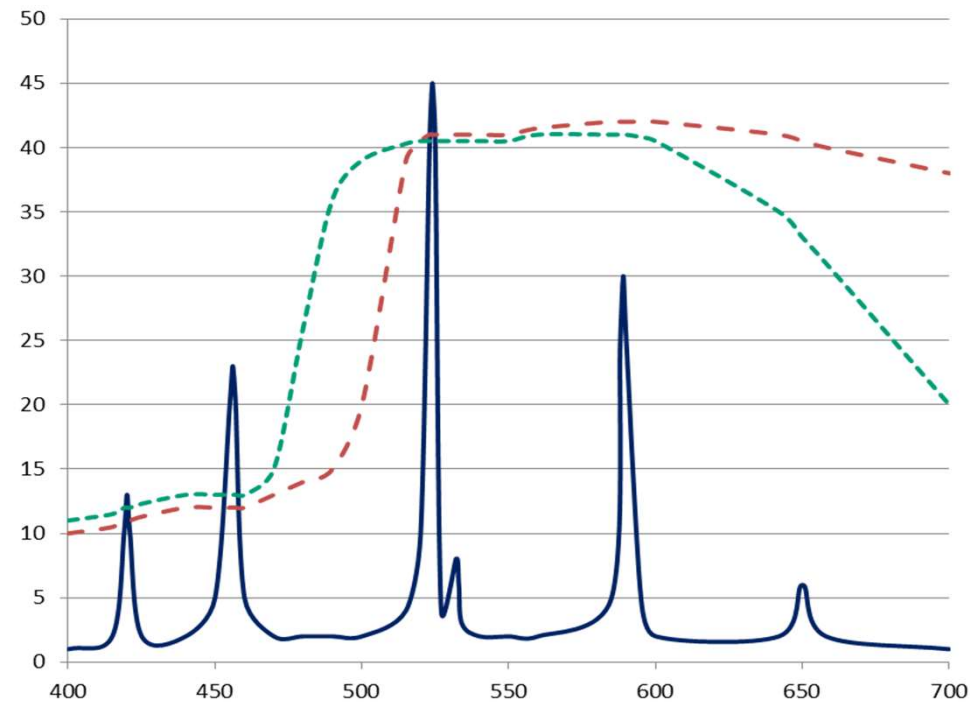
<i>Tipo</i>	<i>Potência</i>	<i>Vida Útil</i>	<i>Lumens / W</i>
Incandescente comum	100 W	750 h	17,5
Incandescente Alta Potência	1.000 W	1.000 h	23,7
Incandescente Halógena	1.000 W	2.000 h	23,4
Fluorescente comum	40 W	20.000 h	76,2
Fluorescente compacta	13 W	10.000 h	69,2
Fluorescente HO	110 W	12.000 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

Variação das Características de Lâmpadas Incandescentes com a Tensão



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

Fidelidade de Reprodução Cromática

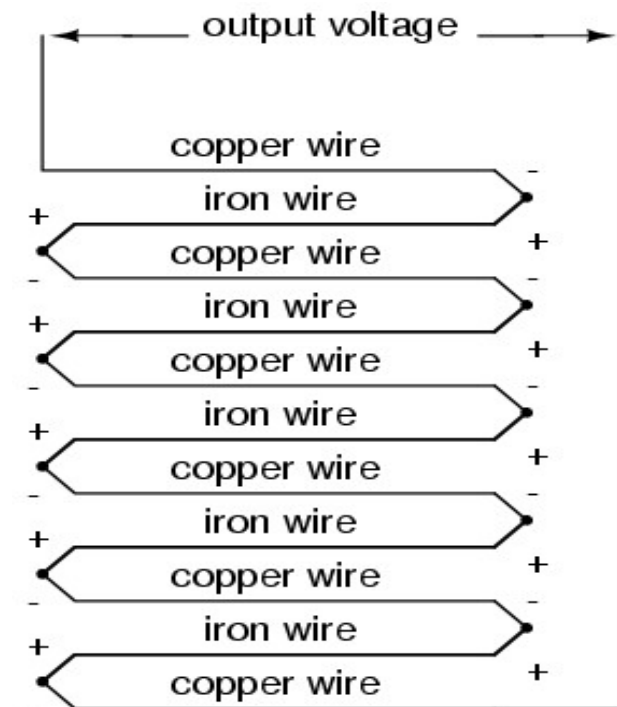
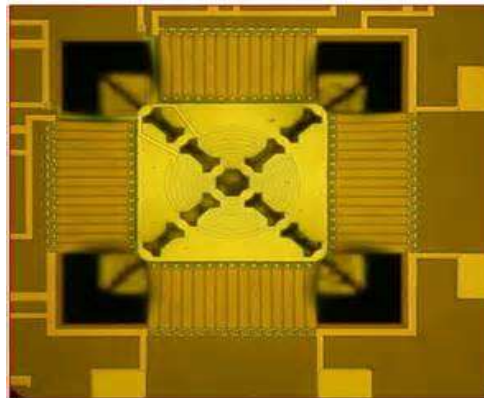


2 objetos com refletâncias espectrais diferentes
Iluminação com lâmpada de vapores metálicos

- Térmicos
 - Termopilha
 - Sensor Piroelétrico
 - Bolômetro
- Quânticos
 - Fotoresistor
 - Fotomultiplicadora
 - Fotodiodo

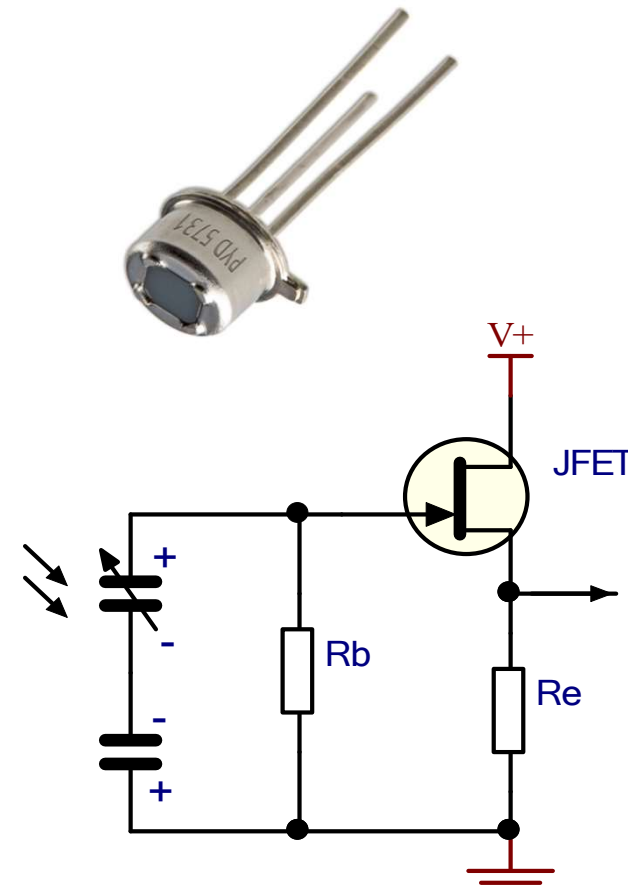
Termopilha:

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



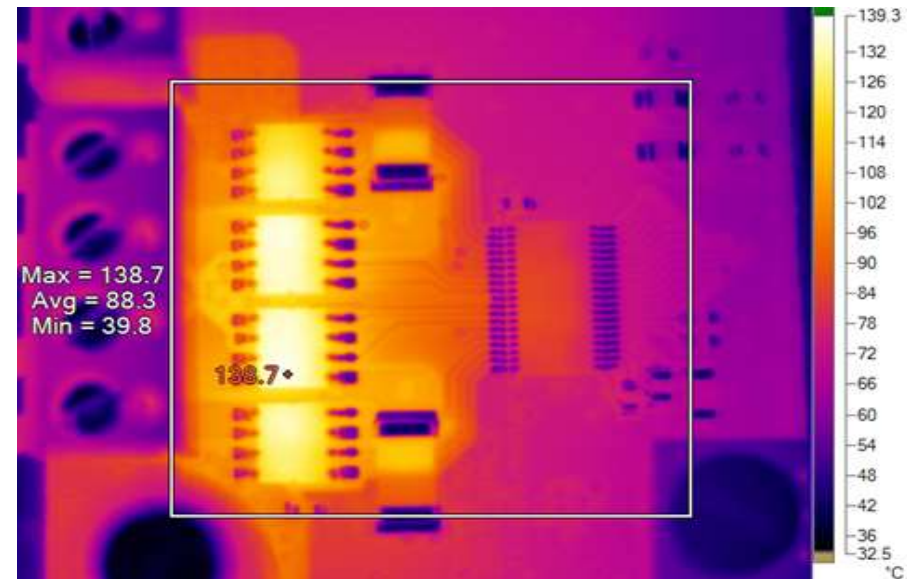
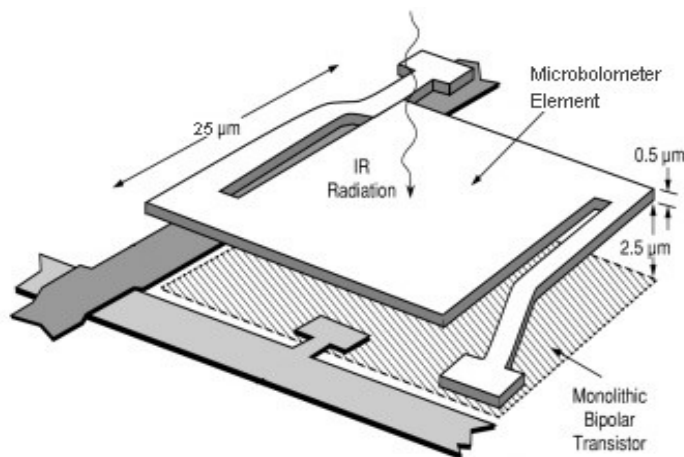
Sensor Piroelétrico:

- 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)



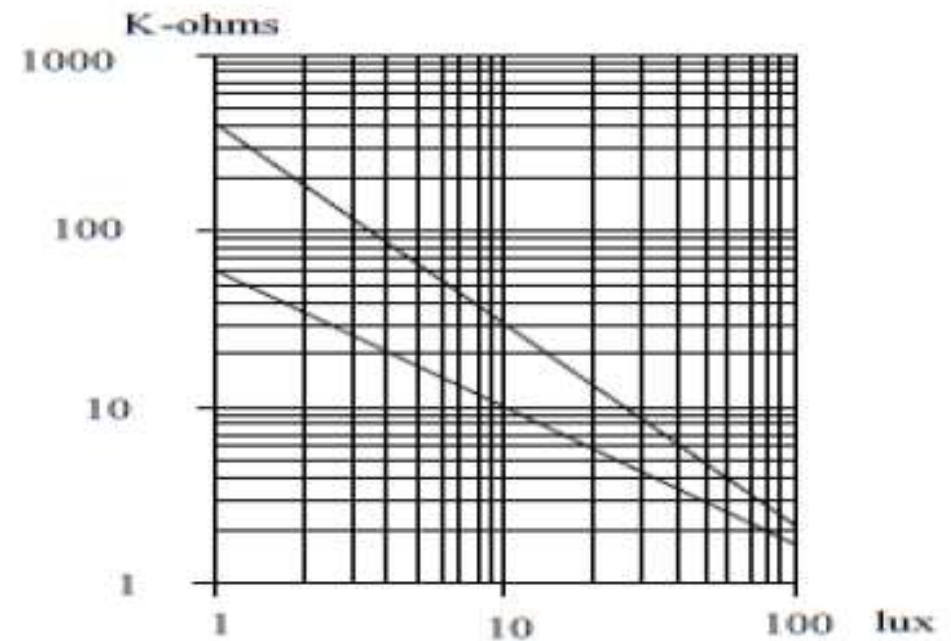
Bolômetro:

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



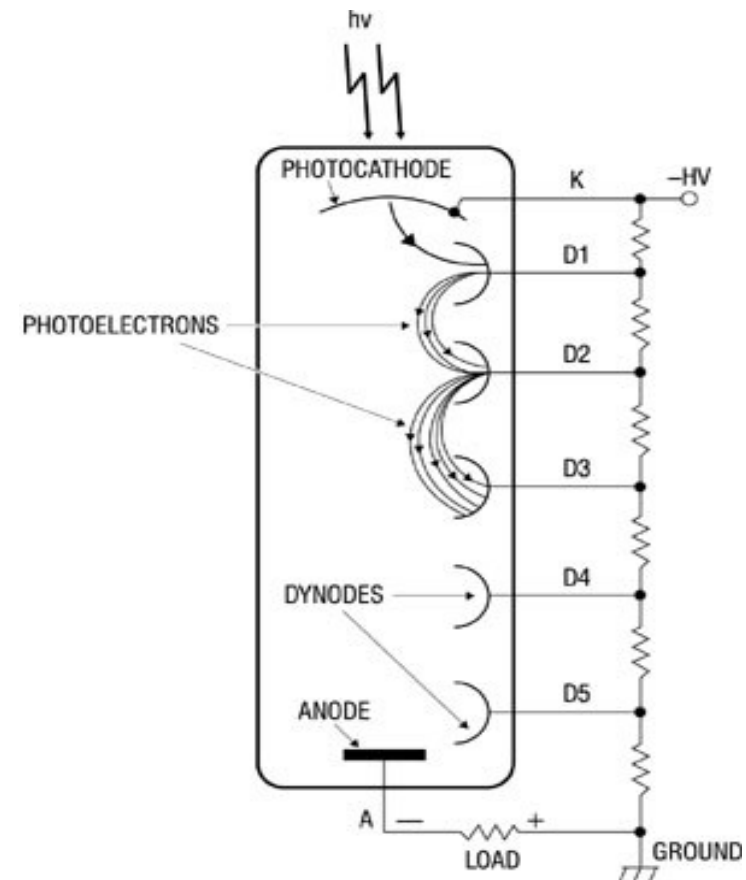
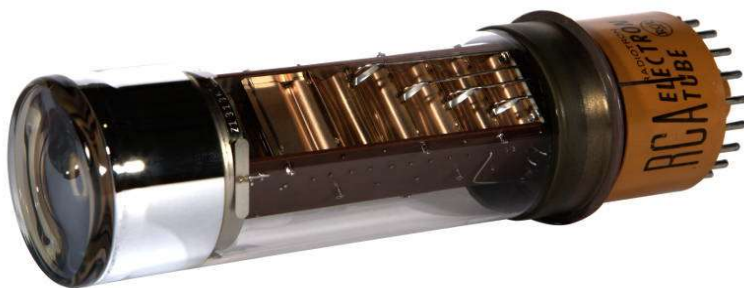
Fotoresistor:

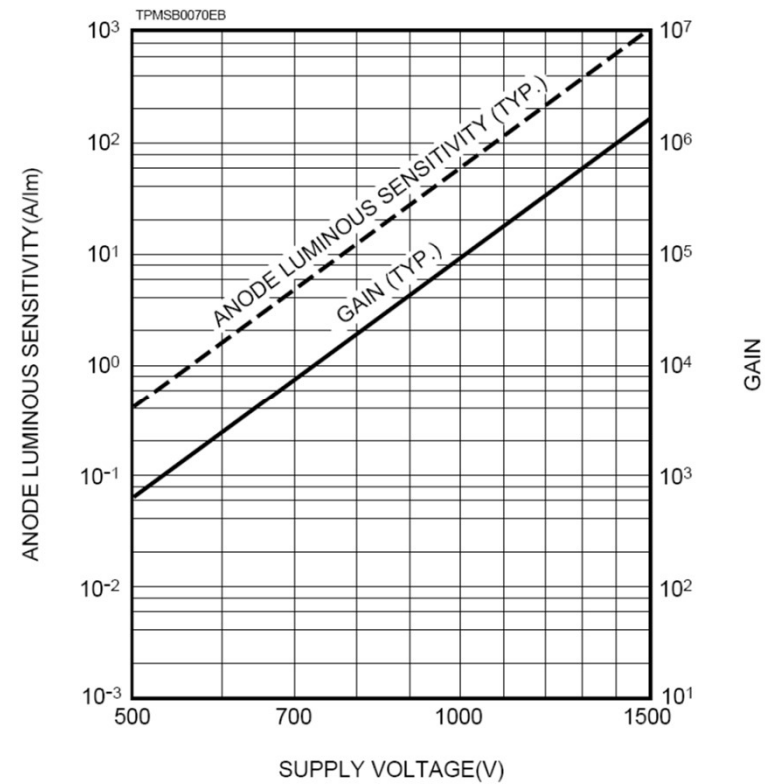
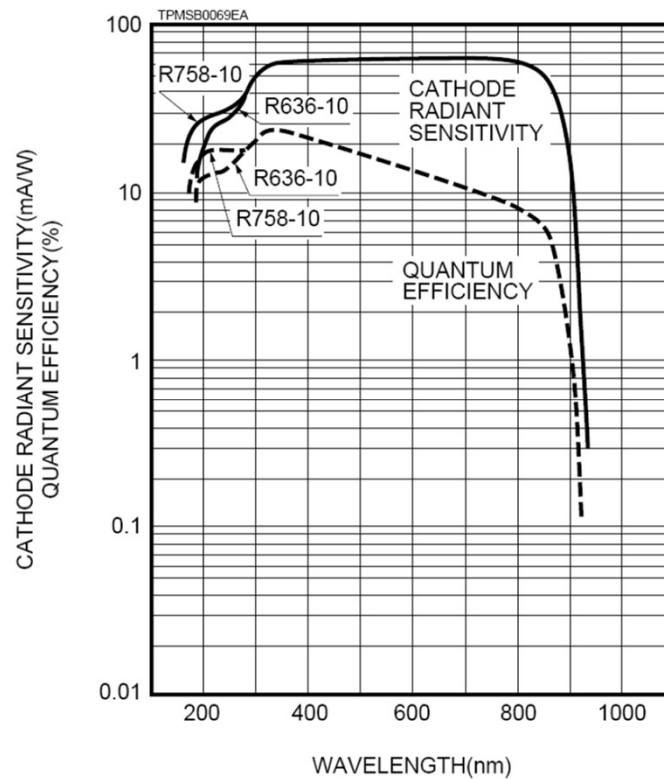
- Resistência depende da luz incidente
- Ex.: LDR, CdS
- Alta sensibilidade, baixa velocidade, não linear



Fotocélula (Fotomultiplicadora):

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

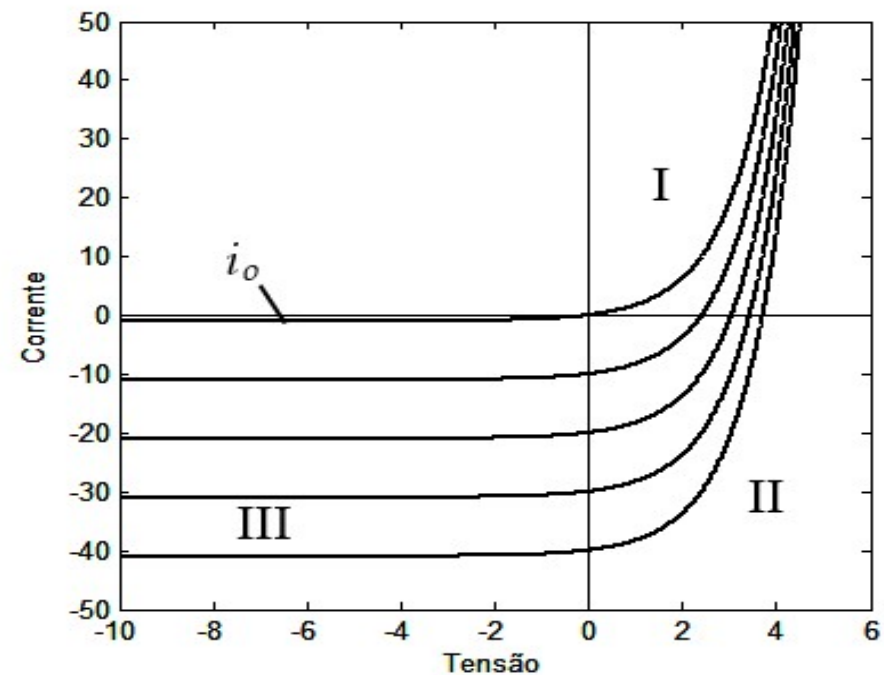
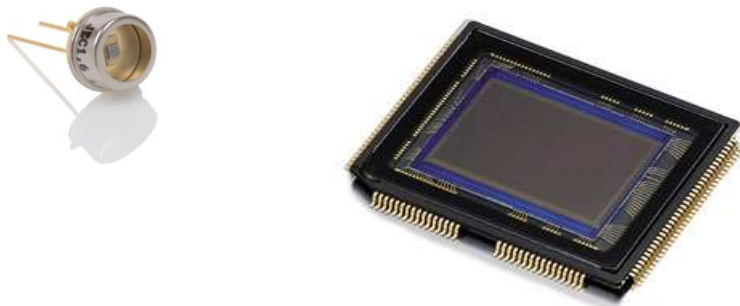


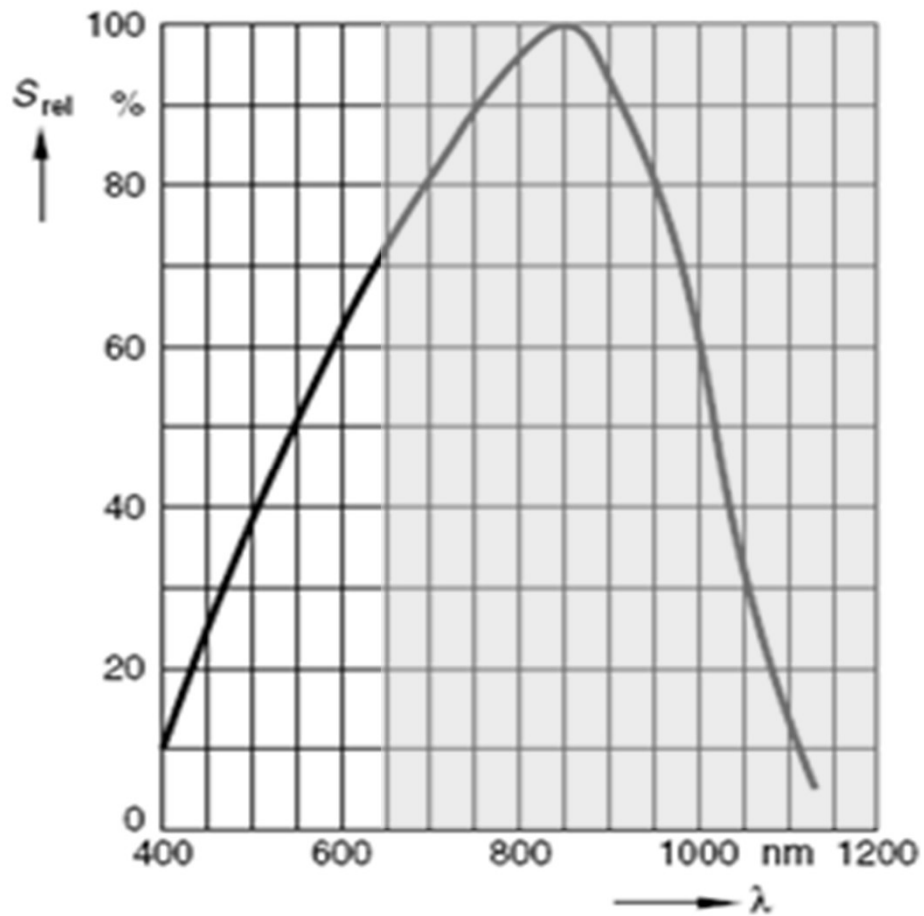


Características de Fotomultiplicadora (Hamamatsu R636-10)

Fotodiodo:

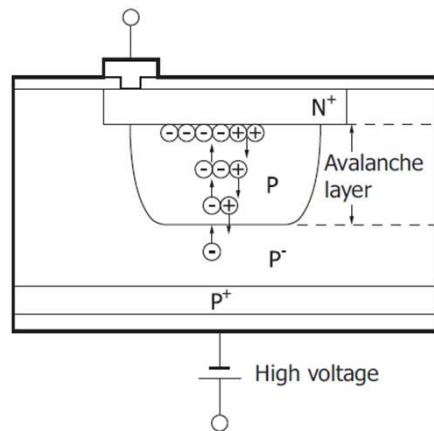
- Corrente depende da intensidade da luz incidente
- Bateria Solar
- Baixa sensibilidade, alta velocidade, linear
- Sensor para câmeras ópticas



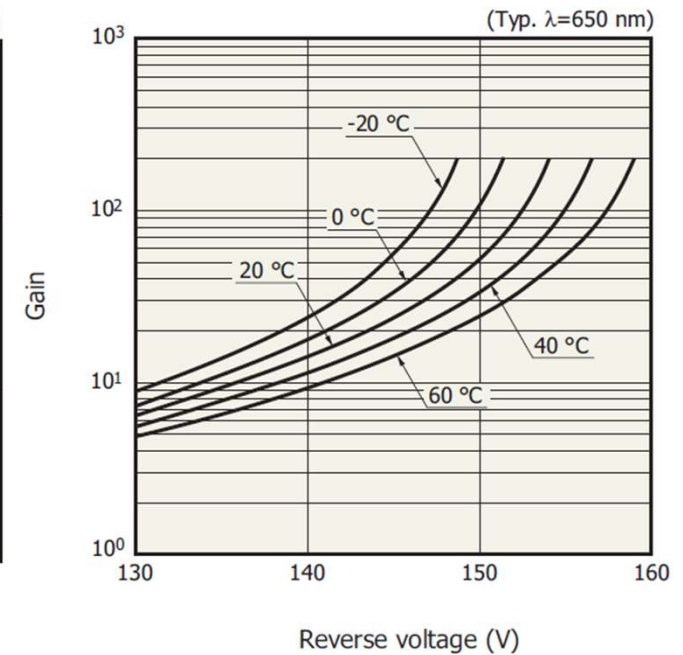
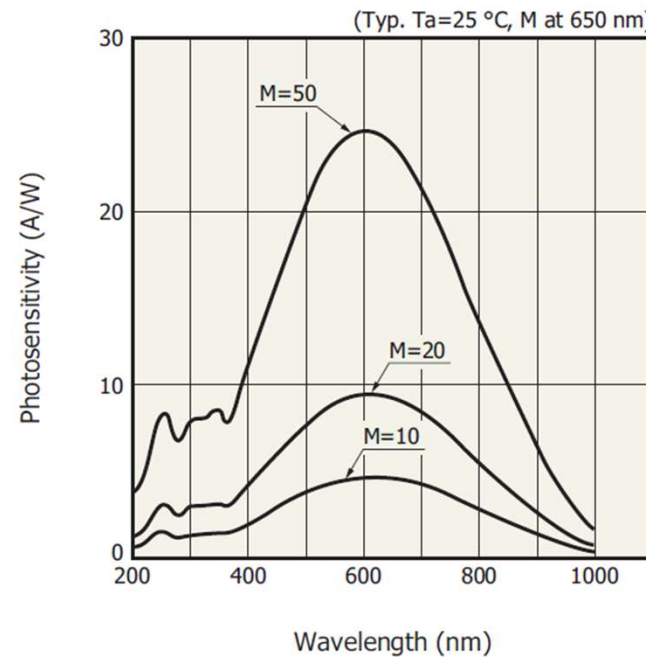


Fotodiodo de Silício

Sensibilidade
espectral

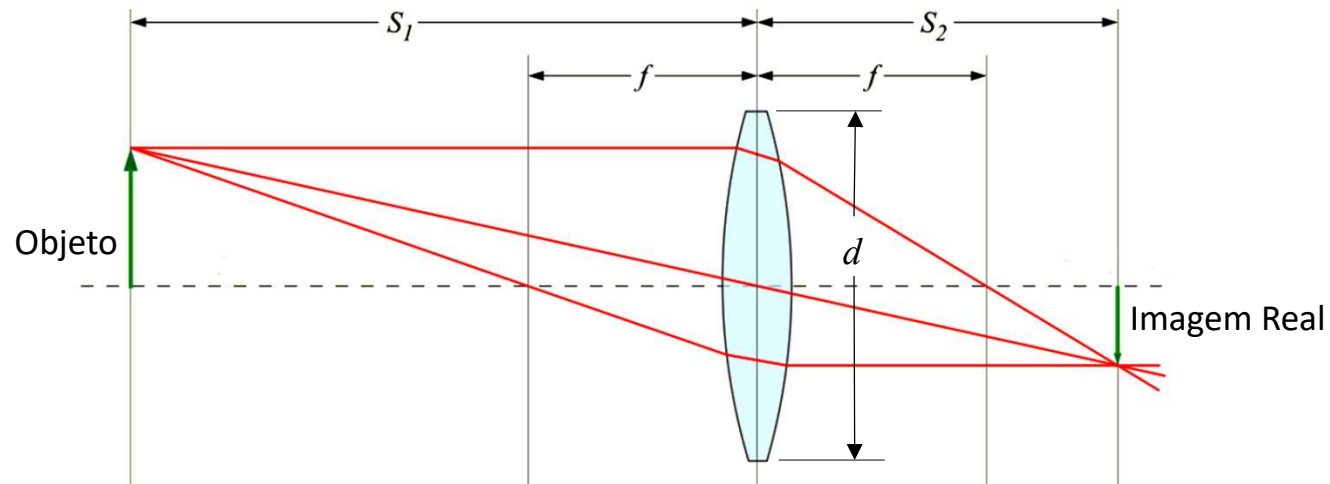


Fotodiodo de Avalanche *APD – Avalanche Photo Diode*



- Equação da Objetiva
- Luminância $\times$ 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 Numérica da Lente

Exemplo:



Sensor 16:9
Diagonal: $\frac{1}{2}'' = 12,7 \text{ mm}$
Altura: $v = 5,9 \text{ mm}$
Largura: $h = 10,6 \text{ mm}$

Distância Focal = 35 mm
Abertura da Lente = 2

Campo de Visão Angular no infinito:

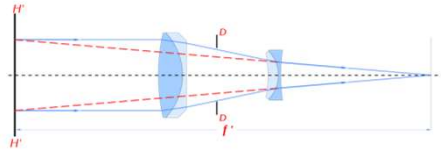
$\theta_H = 17,2 \text{ graus}$

$\theta_V = 9,6 \text{ graus}$

Diâmetro efetivo: 17,5 mm

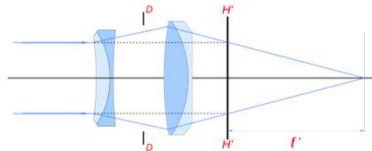
$$\theta_H = 2 \tan^{-1} \left(\frac{h}{2f} \right)$$

Tipos de Objetivas



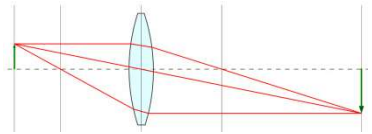
Teleobjetiva:

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



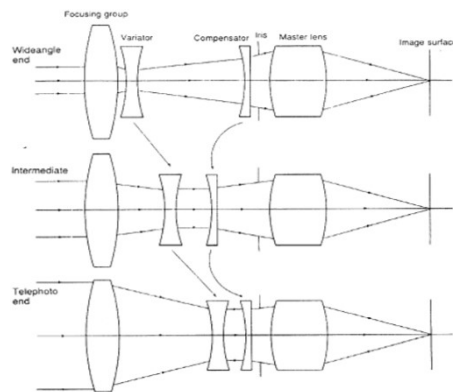
Grande-Angular:

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



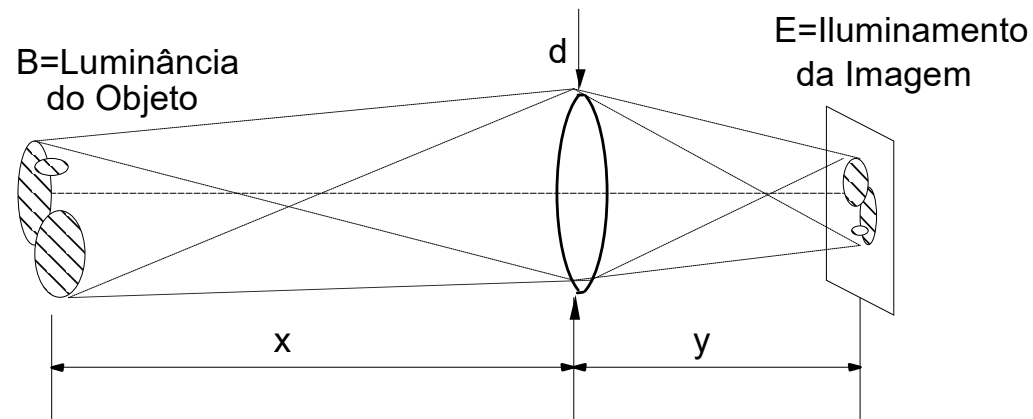
Macro:

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



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

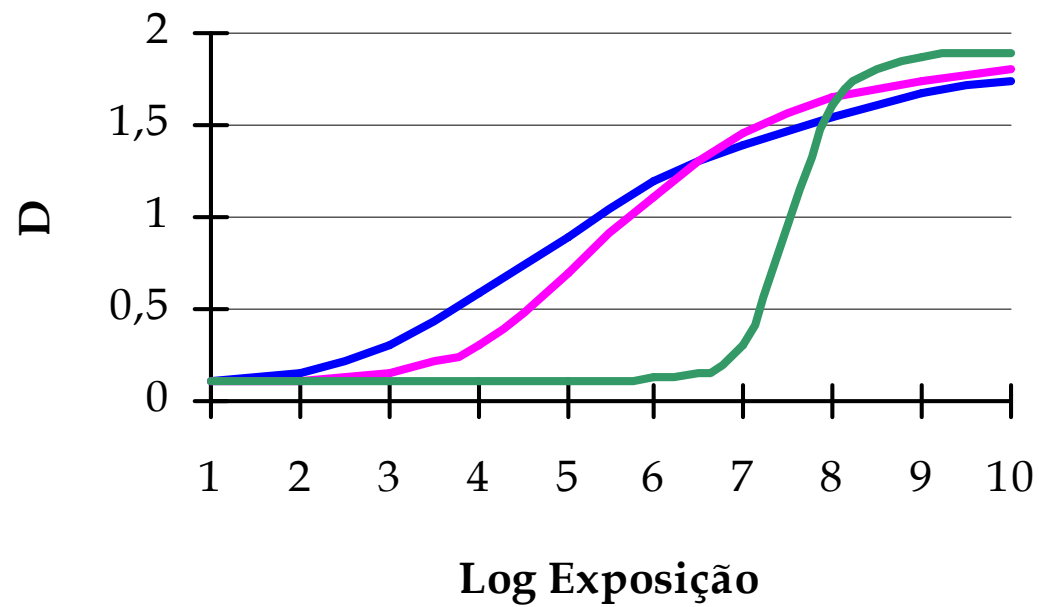
θ = Ângulo entre o objeto e o eixo óptico

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)

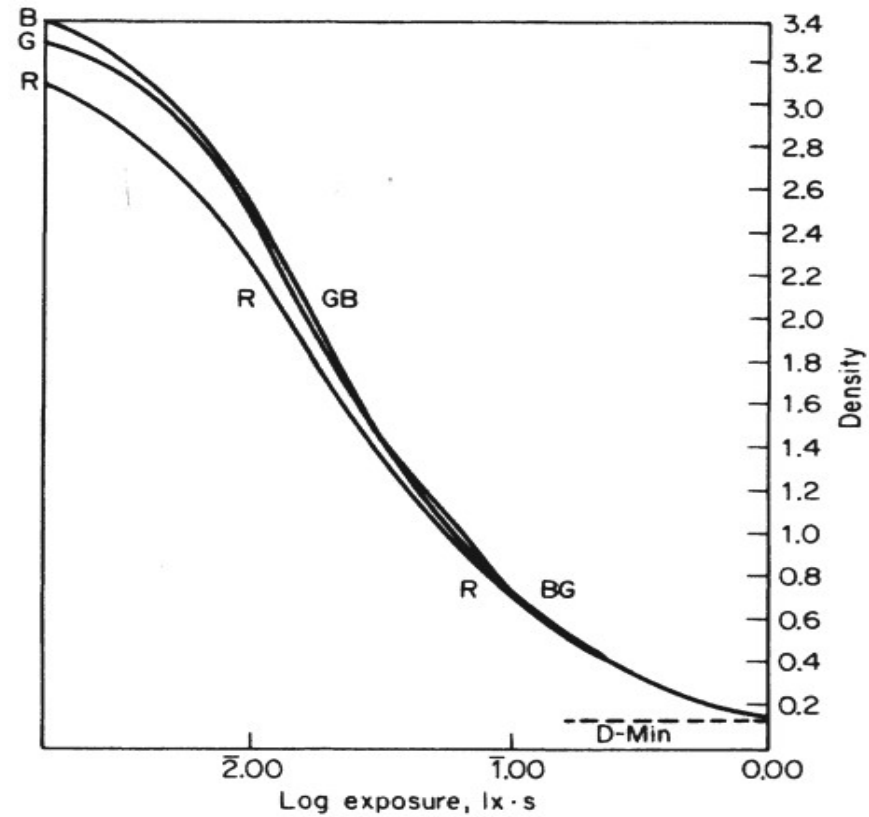


$$\mathfrak{E} = E \times \Delta t$$

(iluminamento $\times$ tempo de exposição)

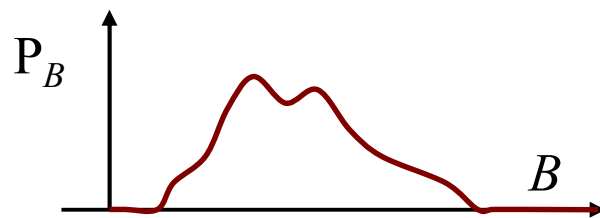
Filme Positivo Colorido

LCS
EPUSP



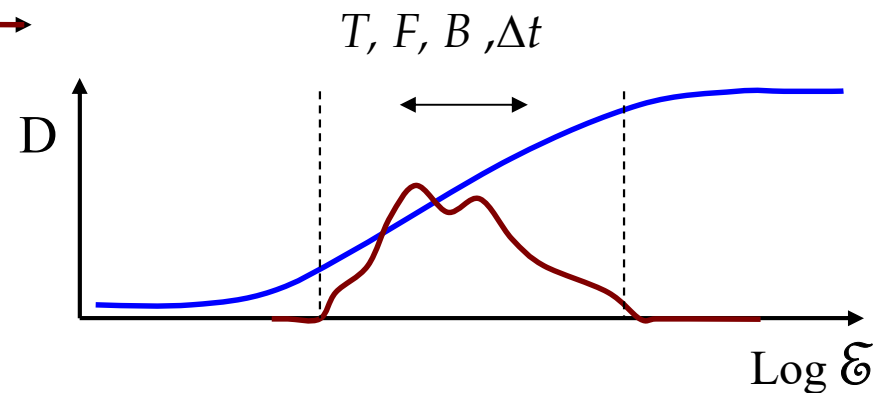
Tarefa do Fotógrafo

- Ajustar a Exposição ξ 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



$$\mathcal{E} = E \times \Delta t$$

(Exposição = 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?

LCS
EPUSP



Foto:
Deep Space
Climate
Observatory

(NASA / NOAA)
Julho / 2015

