

ELEMENTOS DE FOTOMETRIA

Guido Stolfi – 04/2008 – Televisão Digital

1. Fontes de Luz

A luz é o suporte da imagem. Do ponto de vista físico, consiste de radiação eletromagnética; em particular, as células receptoras na nossa retina são especificamente sensíveis à radiação cujo comprimento de onda situa-se aproximadamente entre 700 e 400 nanômetros. Uma **Fonte de Luz** é portanto uma fonte de energia radiante, abrangendo essa faixa de comprimentos de onda, e pode ser caracterizada pela sua curva de densidade espectral de potência emitida, $P(\lambda)$, ou Emitância Espectral.

1.1 Emissão de Corpo Negro

A fonte mais comum de luz é a radiação decorrente da excitação térmica dos átomos, em corpos sólidos ou gasosos, como a luz emitida pelo Sol ou por lâmpadas incandescentes.

A emitância espectral de um corpo negro (emissor perfeito) aquecido a uma temperatura T é descrita pela equação de Planck:

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

Para este caso, a emissão eletromagnética do corpo aquecido apresenta um espectro contínuo (figura acima), que atinge um pico de emitância em um determinado comprimento de onda λ_m , tanto menor este quanto maior a temperatura do corpo (desde o infravermelho para corpos à temperatura ambiente, até ultravioleta ou acima para temperaturas de milhares de graus).

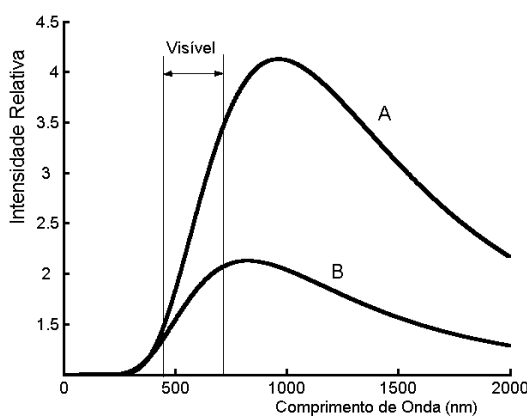
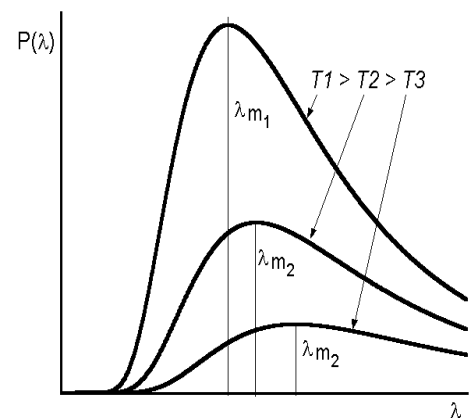


Fig. 1-1 - Emitância de Corpo Negro a 3000 K (A) e de 1 cm² de Tungstênio a 3000 K (B)

Um emissor não ideal pode apresentar diferenças em relação à expressão acima. Na figura 1-1 temos um exemplo da densidade espectral de potência, $P(\lambda)$, para um corpo negro à temperatura de 3000 K, comparada com a emissividade de uma lâmpada de tungstênio à mesma temperatura.

A figura 1-2 mostra a densidade espectral de potência da luz solar incidente na superfície da terra, evidenciando-se as bandas de absorção do ozônio (ultravioleta) e do vapor de água, gás carbônico e oxigênio (infravermelho).

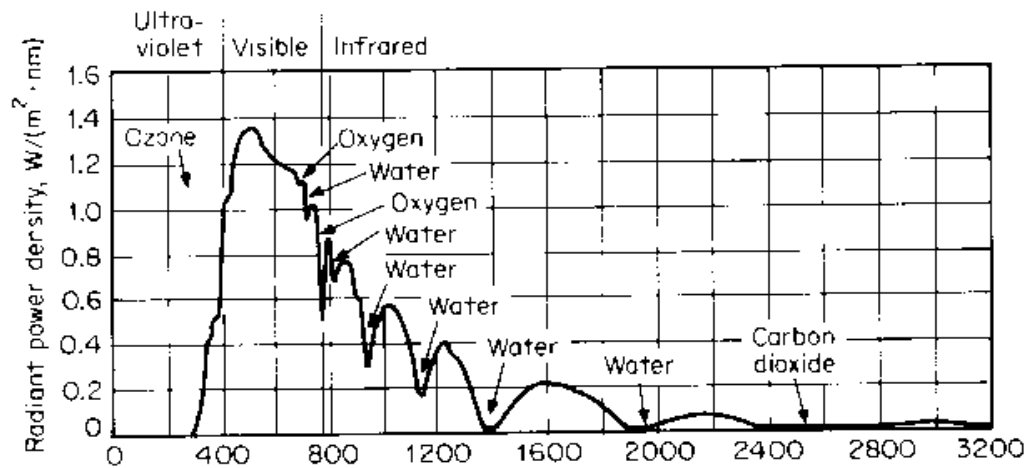


Fig. 1-2 - Distribuição Espectral da luz solar ao nível do mar

1.2 Emissão de Luz por Descarga em gases

A emissão de luz por ionização de gases, como ocorre em lâmpadas fluorescentes, é devida a saltos discretos de níveis de energia dos elétrons em átomos ionizados. Caracteriza-se por um espectro predominantemente discreto, cuja energia radiante concentra-se em poucas raia espectrais.

Na figura 1.3 temos o espectro de emissão para vários tipos de lâmpadas a gás. Nas lâmpadas que utilizam vapor de mercúrio, costuma-se usar um revestimento fosforescente que converte parte da emissão ultravioleta em luz visível, de modo a aumentar o rendimento luminoso. É o caso das lâmpadas fluorescentes comuns (fig. 1.4).

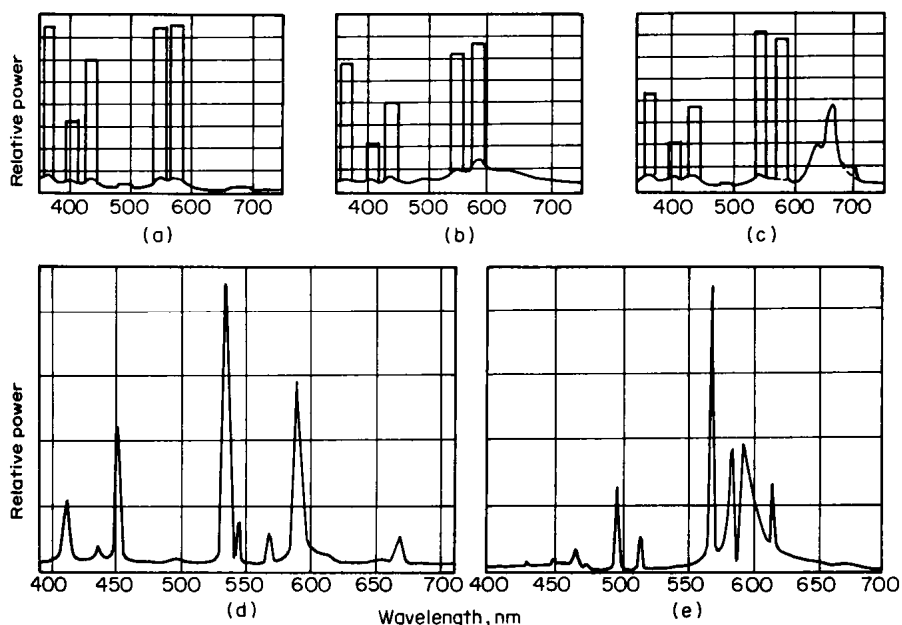


Fig. 1.3 - (a) Lâmpada de Mercúrio; (b) Mercúrio com revestimento fosforescente; (c) Idem com revestimento aprimorado; (d) Lâmpada de Sódio/Tálio/Índio/Iodo; (e) Sódio de Alta Pressão

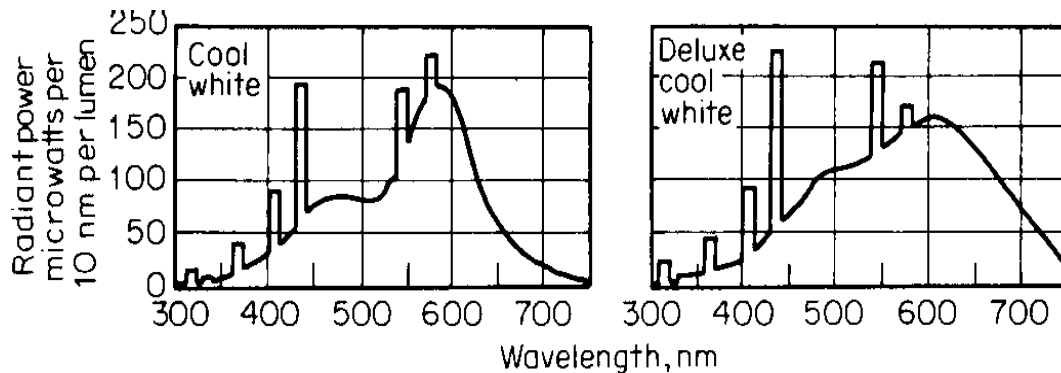


Fig. 1.4- Lâmpadas Fluorescentes: Branca Fria Normal (esq.) e com melhoria de reprodução de cores (dir.).

1.3 Emissão de Luz por Fluorescência

Os emissores por fluorescência são materiais que convertem energia incidente (elétrons ou fótons de alta energia, como ultravioleta) em luz visível. São vulgarmente denominados "Fósforos", apesar de raramente conterem este elemento. Consistem basicamente de sais inorgânicos (ex.: CdS , $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}$, ZnS , ZnSiO_4 , Y_2O_3), acrescidos de impurezas ativadoras (Ag, In, Al, Eu, Tb, Mn). Misturas padronizadas são identificadas por códigos, como P1, P2, P45, etc.

No dispositivo fluorescente, um feixe incidente de elétrons ou fótons eleva os níveis de energia dos elétrons do material emissor. Quando os elétrons voltam ao potencial de repouso, emitem fótons. A emissão de luz no instante da excitação é denominada *Fluorescência*; depois de cessada a excitação, a luz pode continuar sendo emitida por *Fosforescência* (este processo determina a *persistência luminosa* do material, ou seja, o tempo de decaimento da emissão luminosa).

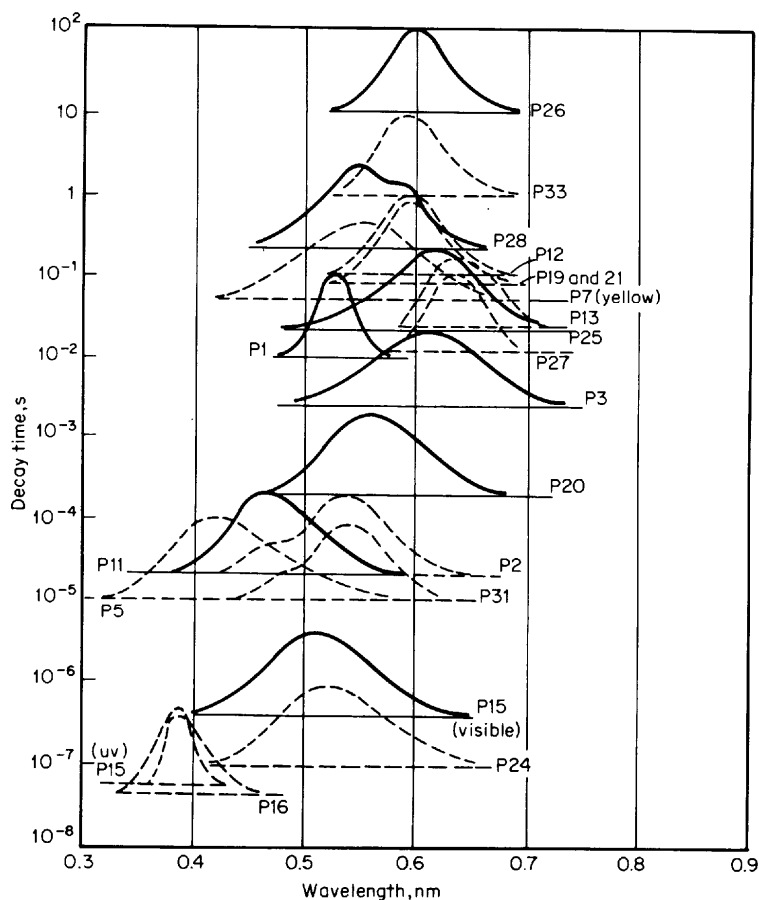


Fig. 1.5 – Emissão espectral e Persistências de Fósforos

1.4 Diodos Emissores de Luz

A emissão de luz por uma junção *pn* foi notada por Lassew em 1923. A síntese de cristais de GaAs permitiu a criação de dispositivos emissores com eficiência luminosa aceitável. O diodo emissor visível (LED) foi desenvolvido em 1962 pela Hewlett-Packard. Algumas de suas vantagens são: alta velocidade de comutação do fluxo luminoso, emissão quase monocromática, vida útil elevada, resistência à vibração e operação com baixas tensões e correntes.

No LED, os fótons são emitidos quando elétrons cruzam a barreira de potencial da junção semicondutora, polarizada no sentido direto.

Vários materiais semicondutores são utilizados para cobrir uma gama de comprimentos de onda, desde infravermelho até ultravioleta (ver tabela 1.1).

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

Tabela 1.1 – Alguns Materiais Semicondutores para LED's

A figura 1.6 apresenta curvas de emitância espectral típicas para LED's de várias cores. LED's brancos são construídos com a combinação de emissores azul, verde e vermelho, ou então por um emissor azul ou ultravioleta recoberto por um fósforo amarelo ou branco (fig. 1.7).

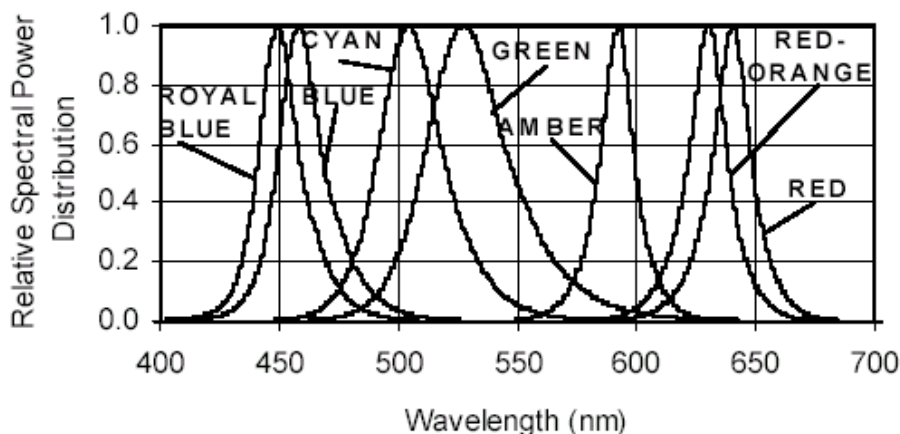


Fig. 1.6 – Emitância Espectral de LED's Coloridos

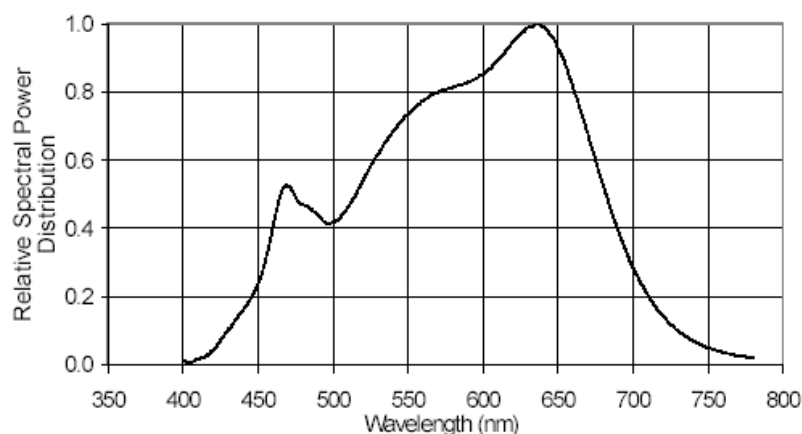


Fig. 1.7 – Emitância Espectral de LED Branco (emissor azul recoberto com fósforo amarelo)

| Tipo de Lâmpada | Potência | Vida Útil | Lumens / Watt |
|-------------------------------|----------|-----------|---------------|
| 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 |
| Mercúrio (c/ fósforo) | 400 W | 24.000 h | 56,2 |
| Sódio Alta Pressão | 400 W | 24.000 h | 118,8 |
| Sódio Baixa Pressão | 180 W | 25.000 h | 183,3 |
| LED Branco de Alta Eficiência | 1 W | 100.000 h | 30 |

Tabela 1.2 - Características de alguns tipos de lâmpadas

2. Grandezas Fotométricas

A tabela 2.1 relaciona grandezas físicas relativas à *radiometria* (ou medição de energia radiante), com as correspondentes grandezas psico-físicas (relativas à medição quantitativa da luz visível) e subjetivas (relativas à nossa percepção).

| Grandezas Físicas | Psico-Físicas | Subjetivas |
|-----------------------------|-------------------------------|----------------------|
| Densidade Espectral | Comprimento de Onda Dominante | Tonalidade de Cor |
| Seletividade | Pureza Espectral | Saturação |
| Radiância | Luminância | Brilho |
| Coefficiente de Transmissão | Transmitância Espectral | Transparente / Opaco |
| Coefficiente de Reflexão | Refletância | Claro / Escuro |
| Potência Radiante | Fluxo Luminoso | Intensidade de Luz |

Tabela 2.1 – Propriedades Descritivas da Luz

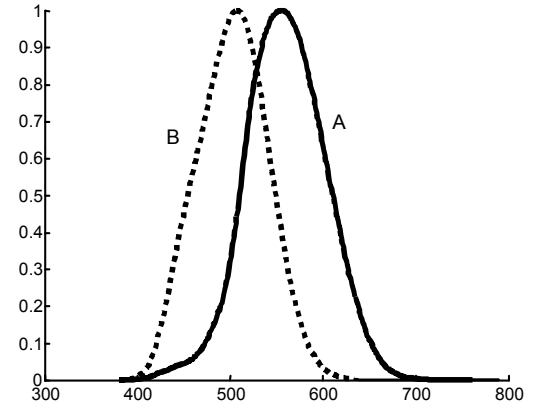
2.1 Funções de Luminância

As grandezas psico-físicas são relacionadas às grandezas físicas através de funções que descrevem a sensibilidade relativa da visão aos vários comprimentos de onda. Por exemplo, o Fluxo Luminoso total emitido por uma fonte corresponde à potência radiante desta, ponderada por uma curva que representa a sensibilidade espectral média do olho humano. Esta curva, ou

Função de Luminância, $F(\lambda)$, corresponde à sensação subjetiva de brilho proporcionada pela luz de um determinado comprimento de onda, em relação ao ponto de sensibilidade máxima (que se manifesta na região do verde amarelado, em 560 nm).

Na verdade, há dois mecanismos distintos de percepção visual, que operam em condições diferentes de luminosidade. Com luz suficientemente intensa, opera a visão **fotópica**, na qual a visão tem discernimento de cores. Com níveis extremamente baixos de iluminação, passa a atuar a visão **escotópica** (sem discernimento de cores). As Funções de Luminância $F(\lambda)$ para visão fotópica (curva A) e escotópica (curva B) são apresentadas na figura ao lado.

Vemos então que a percepção de luminosidade é semelhante à ação de um filtro passa-banda centrado em 560 nm (ou 510 nm para visão escotópica), ao qual é aplicada a potência radiante descrita por $P(\lambda)$.



2.2 Fluxo Luminoso

O *Fluxo Luminoso* equivale à potência luminosa total emanada por uma fonte de luz. É medido em **Lumens** quando $P(\lambda)$ é dada em Watts/nm.

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

$$F(\lambda) = \text{Função de Luminância}$$

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

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

2.3 Intensidade Luminosa

Quando uma fonte luminosa pode ser considerada puntiforme, podemos dizer que possui uma *Intensidade Luminosa* (correspondente ao “brilho” da fonte puntiforme), medida em **Candelas** ou Lumens por esteroradiano:

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

$$F = \text{Fluxo em Lumens}$$

$$\omega = \text{Ângulo Sólido em esteroradianos}$$

2.4 Iluminamento

Quando um fluxo luminoso F atinge uma área S , dizemos que há um *Iluminamento* desta área, que é expresso em Lumens/m² ou **Lux**. Para uma fonte puntiforme, o iluminamento resultante diminui com o quadrado da distância entre a fonte e a superfície iluminada.

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

$$S = \text{área sobre a qual incide o fluxo } F$$

Ou, analogamente, uma fonte de intensidade luminosa I provoca um **iluminamento** E em uma superfície situada à distância r , atingida com ângulo de incidência θ :

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \theta \quad \text{Lux}$$

2.5 Luminância

Para uma fonte ou objeto não puntiforme, podemos definir a Luminância como sendo a intensidade luminosa emitida por unidade de área aparente (projeção perpendicular ao observador). É expressa em Nits (Candelas/m²), e corresponde ao que podemos definir subjetivamente como "brilho" de um objeto. Não depende da distância do objeto ao observador (enquanto o objeto puder ser considerado não-puntiforme).

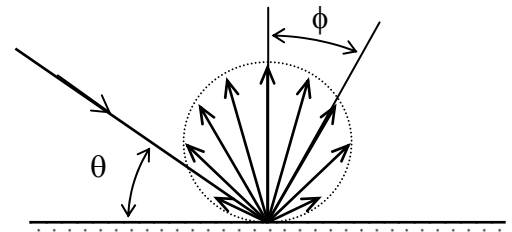
$$B = K_m \int \frac{F(\lambda)P(\lambda)}{\omega A \cos \theta} d\lambda \quad \text{Candelas/m}^2 \text{ ou nits}$$

$$(\text{Lumens / sterad. / m}^2)$$

$A \cos \theta =$ área projetada da fonte luminosa

Um objeto difusor perfeito ("branco ideal"), ao ser iluminado com um fluxo de 1 lux, apresenta uma luminância de $1/\pi$ nit. Esta luminância será independente do ângulo de observação ϕ .

Nessas condições, a intensidade dos raios refletidos pelo difusor ideal varia com o cosseno do ângulo de irradiação, ou seja,



$$I_\phi = I \cos(\phi)$$

| Ambiente ou Atividade | Iluminamento (Lux) |
|--|--------------------|
| Iluminamento Máximo da Luz Solar | até 100.000 |
| Montagem / Inspeção Industrial: Extremamente Detalhada | 5.000 ~ 10.000 |
| Mesa de Operação | 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 |

Tabela 2.2 - Níveis de Iluminamento Recomendados

| Objeto | Luminância (Nits) |
|------------------------------------|------------------------|
| Superfície do Sol do meio-dia | 1,65 x 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 | 35 |

Tabela 2.3 - Luminâncias de Alguns Objetos

2.6 Refletância

Denominamos de Refletância a relação entre a luminância apresentada por um determinado corpo e aquela proporcionada pelo difusor ideal, sob mesmas condições de iluminação. A refletância pode ser função do comprimento de onda (indicando que um objeto é "colorido") e/ou do ângulo de observação ou incidência (diferenciando objetos "foscos" ou difusores, de objetos "polidos" ou refletivos).

Podemos então dizer que a "cor" de um objeto está relacionada com a resposta espectral da sua refletância, enquanto que a "cor" de uma fonte luminosa corresponde à curva da densidade espectral de potência irradiada.

2.7 Transmitância, Densidade Óptica

Para objetos transparentes, definem-se a Transmitância e a Densidade Óptica a partir da radiância transmitida através do objeto:

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

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

$$P_{\lambda} = \text{Radiância recebida através do objeto}$$

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

2.8 Iluminamento Retinal

Quando estudamos a resposta subjetiva do olho humano, é conveniente estabelecer como parâmetro o nível de iluminamento na retina, pois muitas características sensoriais dependem da energia radiante incidente na mesma. O **Iluminamento Retinal**, medido em *Trolands*, é definido como

$$i = 0.785 l^2 B \text{ Trolands}$$

$$B = \text{Luminância em nits}$$

$$l = \text{diâmetro da pupila em mm (2 a 8)}$$

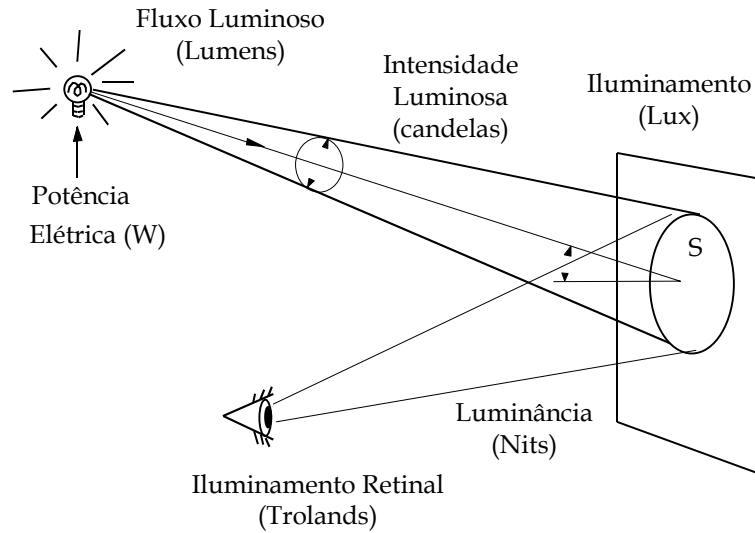


Fig. 2.2 – Situações Fotométricas: um Resumo

3. Fotometria de Sistemas Ópticos

Os sistemas ópticos utilizados para formação de imagens consistem em geral de uma *objetiva*, ou lente convergente, posicionada adequadamente em relação a um anteparo (filme fotográfico ou sensor fotoelétrico).

O *iluminamento* E da imagem real projetada sobre o anteparo relaciona-se com a *luminância* B do objeto focalizado, através da seguinte expressão:

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

onde

$T =$ Transmitância da Lente

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

$f =$ Distância focal da Lente

$\theta =$ Ângulo entre objeto e eixo óptico

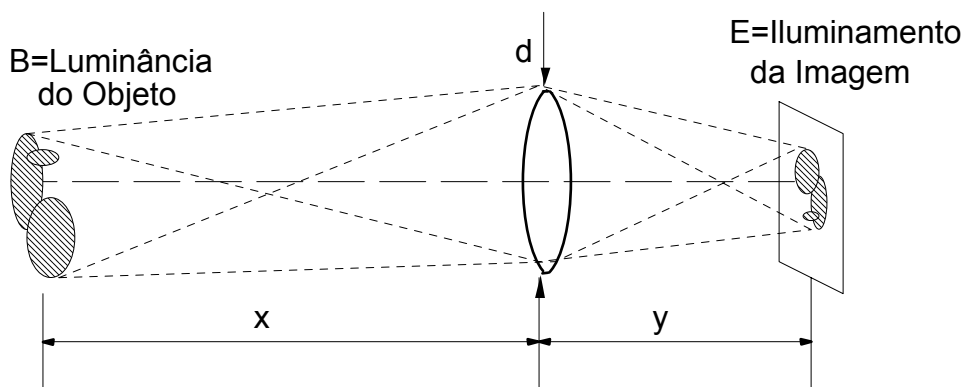


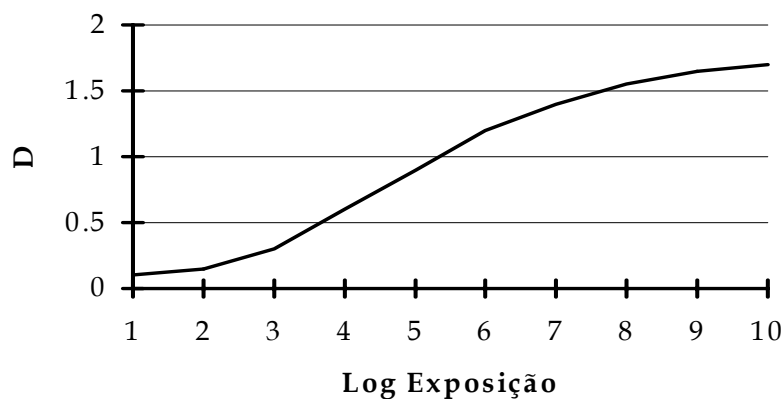
Fig. 3.1 - Iluminamento da Imagem no Plano Focal

Quando o objeto está no infinito e próximo ao eixo óptico da lente, podemos simplificar esta expressão para:

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

3.1 Exposição de Filme Fotográfico

Em uma câmera (fotográfica ou de televisão), o iluminamento do filme (ou sensor), proporcionado por um objeto focalizado, pode ser obtido pela expressão acima. Denomina-se *Exposição* (\mathcal{E}) ao produto $E \times \Delta t$ (iluminamento \times tempo de exposição). Para um filme negativo convencional, a densidade óptica resultante (após a revelação) é aproximadamente linear, dentro de uma faixa restrita, em relação ao logaritmo da Exposição.



4. Referências

Donald G. Fink, H.W. Beaty: *Standard Handbook for Electrical Engineers* - McGraw-Hill, 1993 (Figs. 1.3, 1.4)

K. Blair Benson: *Television Engineers Handbook* - McGraw-Hill, 1985 (Fig. 1.2)

Charles Harper: *Handbook of Components for Electronics* - McGraw-Hill, 1977 (Fig. 1.5)

Lumileds, Inc. (www.lumileds.com) - DL25 Data Sheet (Figs. 1.6, 1.7)