

ELEMENTOS DE FOTOMETRIA

PTC3547 - CODIFICAÇÃO E TRANSMISSÃO MULTIMÍDIA

Guido Stolfi – EPUSP – 03/2025

Introdução

A luz é o suporte da imagem. Do ponto de vista físico, consiste de radiação eletromagnética com comprimentos de onda da ordem de $1\ \mu\text{m}$. 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. Um **Emissor de Luz Visível** é, portanto, uma fonte de energia radiante abrangendo essa faixa de comprimentos de onda, e pode ser caracterizado pela sua curva de densidade espectral de potência emitida, $P(\lambda)$, ou Emitância Espectral.

Nesta apostila serão estudadas as características de vários tipos de emissores luminosos, aplicáveis tanto para a construção de dispositivos de visualização como para a iluminação de objetos durante a captura de imagens: corpo negro, descarga em gás, fluorescência, LEDs.

Serão também apresentadas as grandezas relevantes para estudo e medição da luz (fotometria), bem como características de detectores de luz. Veremos também algumas relações fotométricas importantes para caracterização de sistemas ópticos. Já o estudo detalhado da medição das cores (colorimetria) será abordado na apostila Nº 4.

1. Emissores de Luz

2.1 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 (receptor e emissor perfeito) aquecido a uma temperatura absoluta T , medida em Watts por nanômetro, é descrita empiricamente pela equação de Planck:

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

De acordo com essa expressão, a emissão eletromagnética do corpo aquecido apresenta um espectro contínuo (figura 1.1), 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 dezenas de milhares de graus.

Um emissor não ideal pode apresentar diferenças em relação à expressão acima. Na figura 1.2 temos um exemplo da densidade espectral de

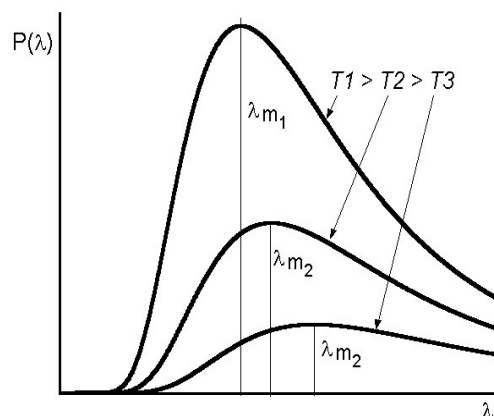


Fig. 1.1 - Emitância de um Corpo Negro

potência, $P(\lambda)$, para um corpo negro à temperatura de 3000 K, comparada com a emissividade de uma lâmpada de tungstênio à mesma temperatura.

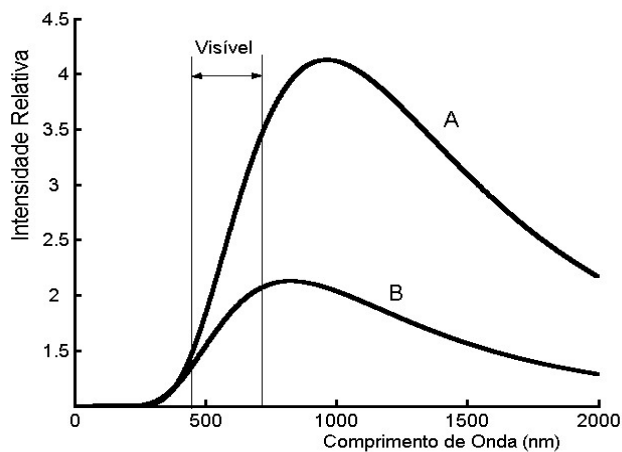


Fig. 1.2 - Emitância de Corpo Negro a 3000 K (A) e de 1 cm² de Tungstênio a 3000 K (B)

Como a energia de um fóton de comprimento de onda λ é $E = hc/\lambda$, onde $h = 6,6256 \times 10^{-34}$ J.s (constante de Planck), segue que o número equivalente de fótons emitidos em função de λ (fig. 1.3) é:

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

A potência total emitida por um corpo negro de área unitária, para $0 < \lambda < \infty$, é dada por $W_T = \sigma T^4$, onde $\sigma = 5,6697 \times 10^{-8}$ W/m²K⁴ (constante de Stefan-Boltzmann).

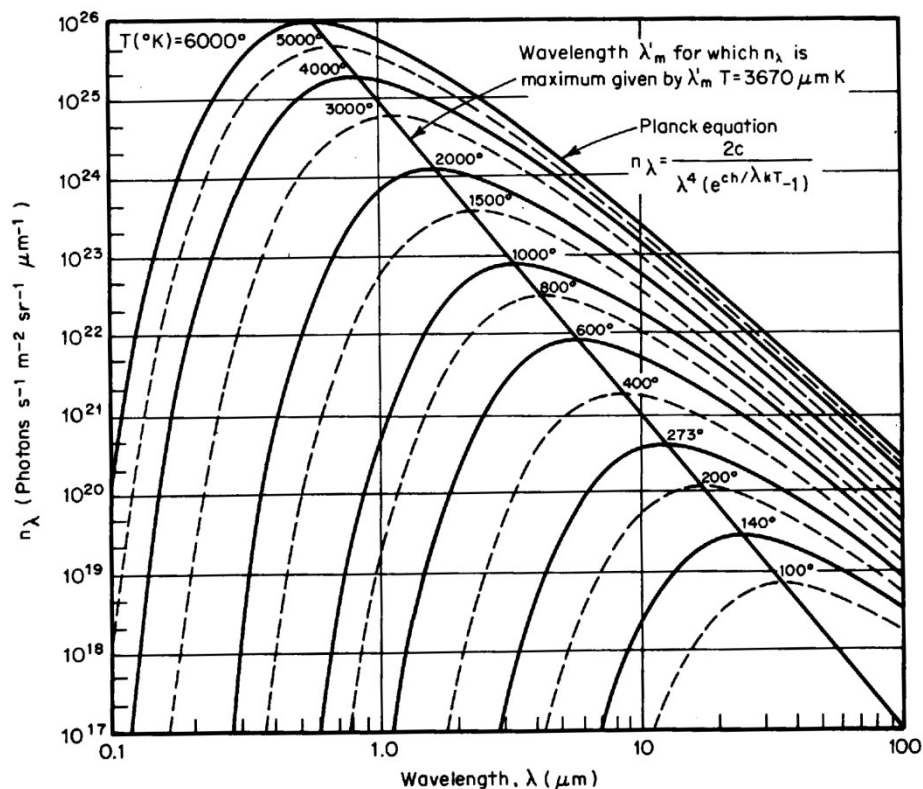


Fig. 1.3 – Fluxo de Fótons em função de λ e T

A figura 1.4 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). Na região compreendida entre 400 e 700 nanômetros, que corresponde ao pico de emissão da luz solar, o espectro está praticamente livre de bandas de absorção.

A potência máxima da energia solar, incidente na superfície da Terra, é da ordem de 1300 W/m².

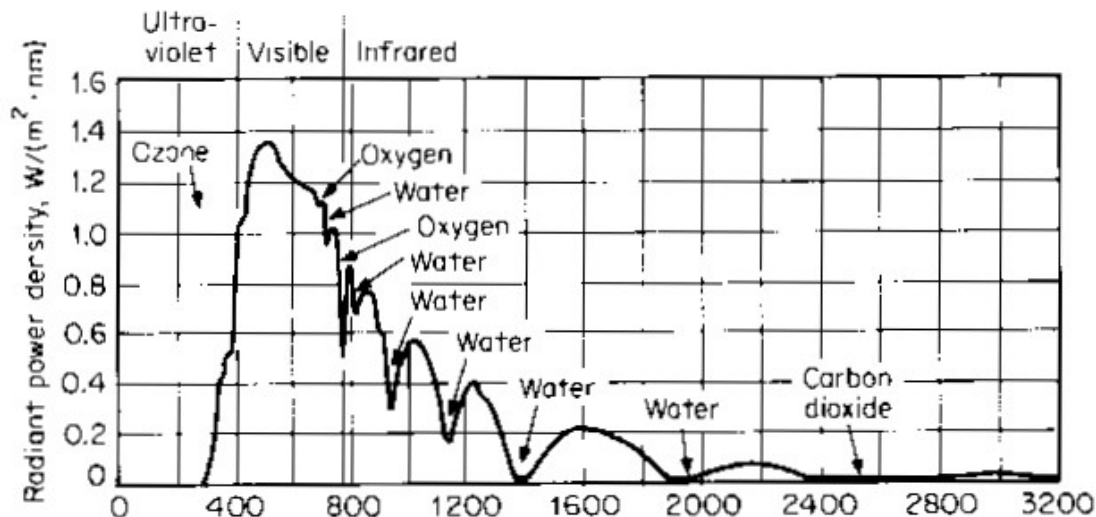


Fig. 1.4 - Distribuição Espectral da luz solar ao nível do mar

2.1 Iluminantes Padrão

Considerando a importância fundamental da luz solar, no sentido de que nossa visão se desenvolveu em função da distribuição espectral evidenciada na fig. 1.4, é natural que as demais fontes de energia luminosa sejam comparadas a ela. Com a intenção de padronizar as condições de iluminação aplicáveis em estúdios e em iluminação pública, a CIE (*Comissão Internationale d'Eclairage*) estabeleceu as características dos denominados “Iluminantes Padrão”, identificados a partir da equivalência com corpos negros de temperaturas variadas.

Na figura 1.5 abaixo, estão apresentadas as emitâncias espectrais correspondentes aos iluminantes *A* (obsoleto, equivalente a um corpo negro à temperatura de 3200 K, tal como uma lâmpada incandescente), *C* (também obsoleto, equivalente à luz do dia) e os iluminantes modernos *D50* a *D75* (equivalentes à luz do dia corrigida para temperaturas de 5000 a 7500 K).

Ao contrário da lógica, uma luz é denominada “fria” quando a temperatura equivalente do corpo negro é maior (luz mais azulada) ou “quente” quando menor (luz mais amarelada).

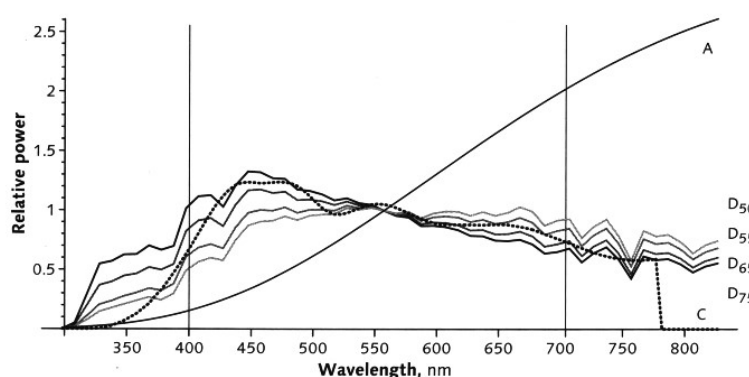


Fig. 1.5 - Iluminantes Padrão CIE

2.1 Emissão de Luz por Descarga em gases

A emissão de luz por descarga em gás, como ocorre em lâmpadas fluorescentes, é devida a saltos quânticos de elétrons dentro dos níveis de energia em átomos excitados ou ionizados. Caracteriza-se por um espectro predominantemente discreto, onde a energia radiante concentra-se em poucas raías espectrais, cujos comprimentos de onda estão relacionados com os níveis de energia que os elétrons podem assumir dentro do átomo.

Na figura 1.6 temos o espectro de emissão para vários tipos de lâmpadas a gás. Nas lâmpadas que utilizam vapor de mercúrio, costuma-se usar um revestimento fluorescente que converte parte da emissão ultravioleta em luz visível, de modo a aumentar o rendimento luminoso. É o caso das lâmpadas fluorescentes comuns (fig. 1.7).

A cor da luz emitida pela lâmpada de vapores metálicos (fig. 1.6.d) é percebida como equivalente à luz branca, apesar de estar concentrada em 3 comprimentos de onda (vermelho, verde e azul). Essa lâmpada explora uma característica da percepção visual humana, que será estudada posteriormente.

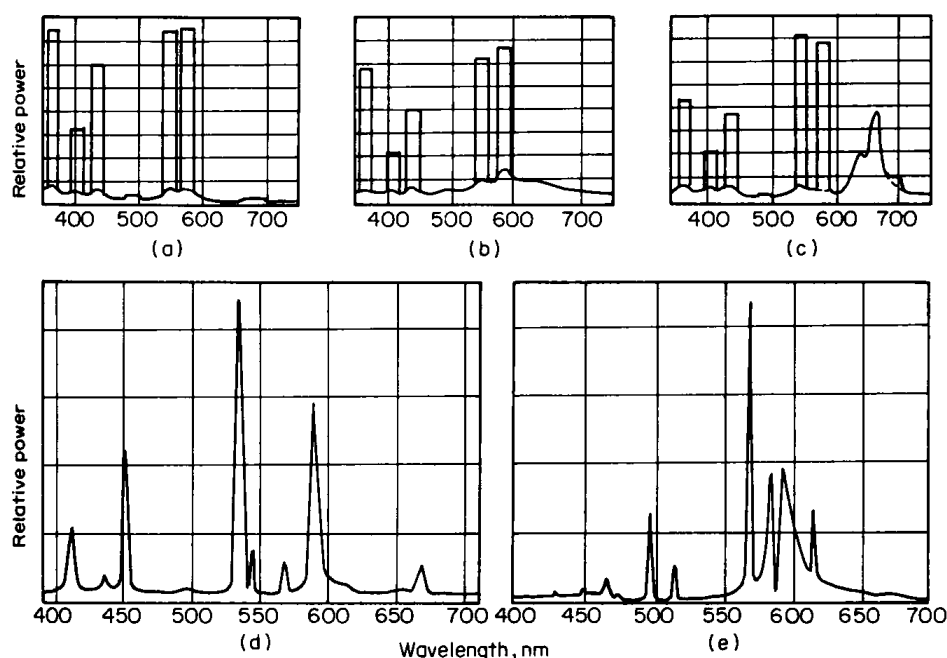


Fig. 1.6 - (a) Lâmpada de Mercúrio; (b) Mercúrio com revestimento fosforescente; (c) Idem com revestimento aprimorado; (d) Lâmpada de Sódio/Tálio/Índio/Iodo; (e) Sódio de Alta Pressão

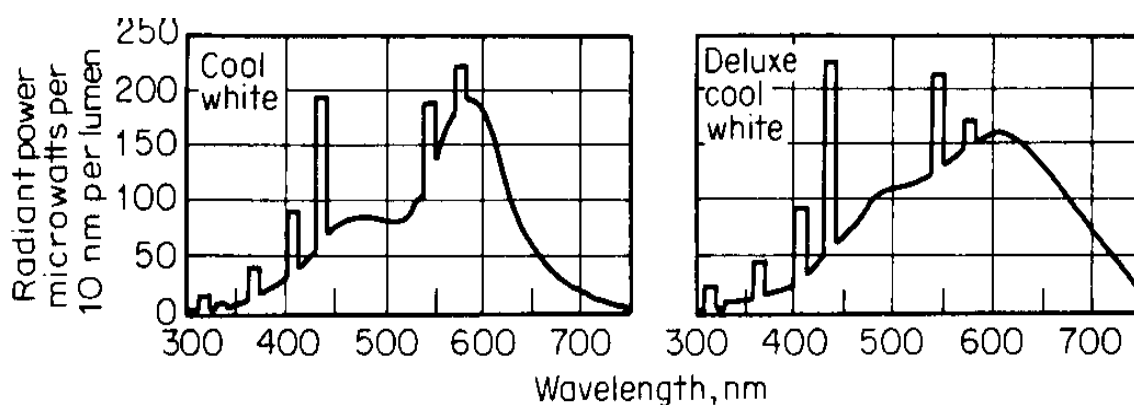


Fig. 1.7- Lâmpadas Fluorescentes: Branca Fria Normal (esq.) e com melhoria de reprodução de cores (dir).

2.1 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, Y_2O_2S , 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.

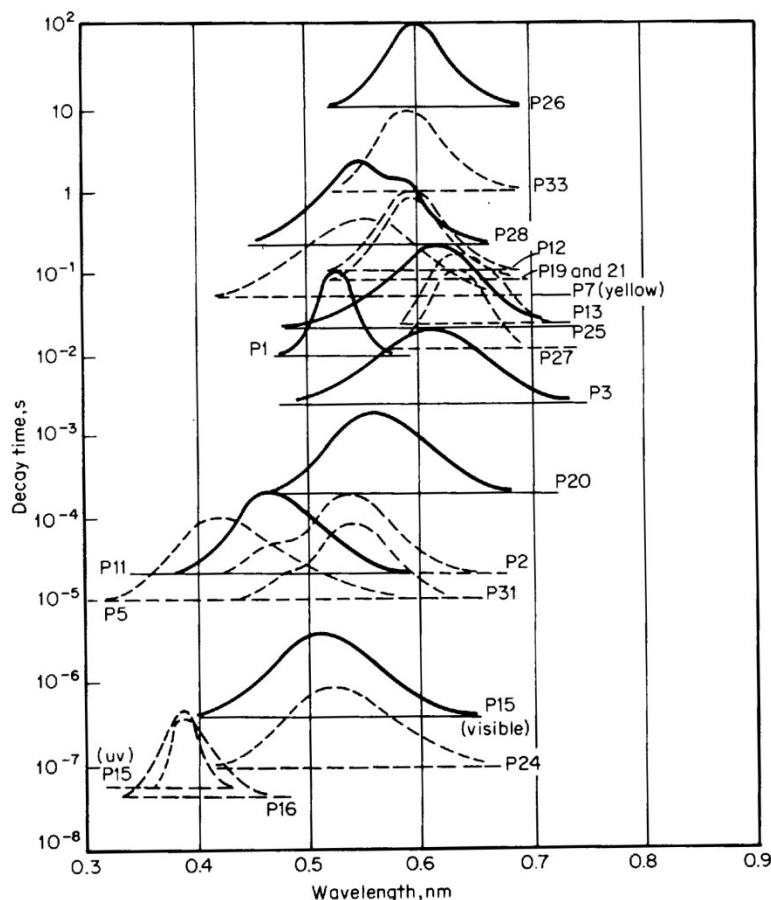


Fig. 1.8 – Emissão espectral e Persistências de Fósforos

Num 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).

A figura 1.8 apresenta características de emitância espectral e tempo de decaimento para vários tipos de “fósforos”, usados como emissores de luz em tubos de raios catódicos, cinescópios, telas de TV de plasma, lâmpadas LED e outros dispositivos eletro-ópticos.

2.1 Diodos Emissores de Luz

A emissão de luz por uma junção *pn* foi notada por Oleg Losev em 1923, trabalhando com carbureto de silício. A síntese de cristais de GaAs permitiu a criação de dispositivos emissores com eficiência luminosa aceitável, levando ao desenvolvimento de diodos emissores visíveis (LED) na década de 1960 pela General Electric, Monsanto e Hewlett-Packard. Algumas das vantagens do LED são: alta velocidade de modulação do fluxo luminoso, emissão quase monocromática, vida útil elevada, resistência à vibração e operação com baixas tensões e correntes. Desvantagens incluem baixa homogeneidade quanto às características direcionais, necessidade de refrigeração para altas potências, e baixo índice de reprodução cromática para luz branca. Em televisão, são usados como retro-iluminação (*backlight*) em monitores LCD e como

iluminação de estúdio, além de dispositivos de exibição de imagem para uso em ambientes externos.

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

Vários materiais semicondutores podem ser utilizados para cobrir uma ampla gama de comprimentos de onda, desde infravermelho até ultravioleta (ver tabela 1.1). Na figura 1.9 podemos ver curvas de emitância espectral típicas para LEDs de várias cores. LEDs brancos podem ser 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. Exemplos de espectros de LEDs brancos estão apresentados na fig. 1.10. A proporção entre a luz do LED (azul) e a luz fosforescente afeta a temperatura equivalente da cor resultante.

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

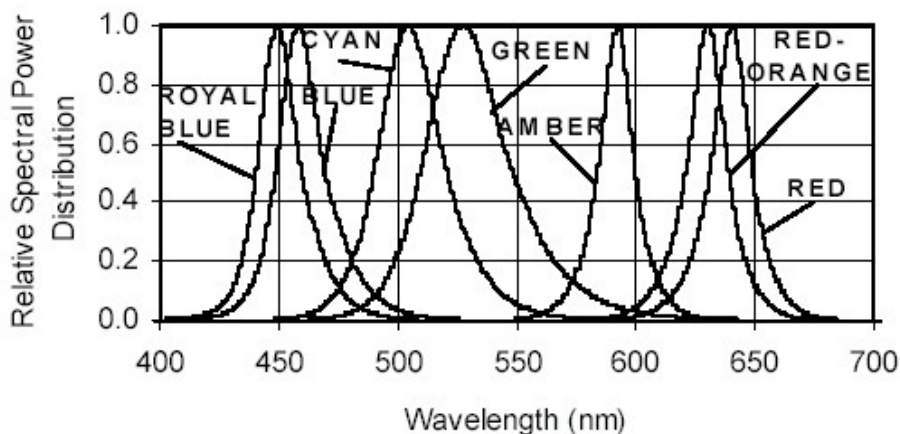


Fig. 1.9 – Emitância Espectral de LEDs Coloridos

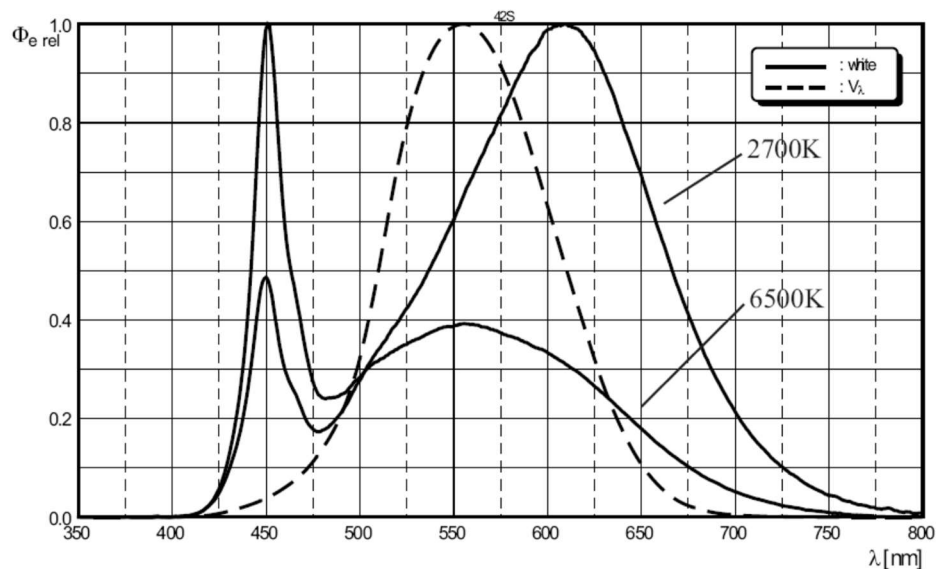


Fig. 1.10 – Emitância Espectral de LEDs Brancos (emissor azul recoberto com fósforo amarelo)

2.1 LED Orgânico

O LED Orgânico (OLED) consiste de um emissor eletroluminescente que utiliza um material orgânico (fotopolímero, p. ex. poli-p-fenileno-vinileno) posicionado entre dois eletrodos, um dos quais é transparente.

O OLED possui características ideais para aplicações em dispositivos de visualização e iluminação, tais como:

- Diversidade de comprimentos de onda disponíveis
- Baixas tensões de operação (dezenas de Volts)
- Baixo consumo de energia e alta velocidade de resposta
- Simplicidade de fabricação
- Emissão omnidirecional e homogênea

As principais desvantagens, atualmente, são o elevado custo dos materiais e a baixa durabilidade, devida à sensibilidade ao oxigênio e umidade.

2. Grandezas Fotométricas

A tabela 2.1 estabelece a relação entre as grandezas físicas relativas à *radiometria* (ou medição de energia radiante), com as correspondentes grandezas psicofísicas (relativas à medição quantitativa da luz visível) e aquelas subjetivas (relativas à nossa percepção).

Grandezas Físicas	Psicofísicas	Subjetivas
Densidade Espectral	Comprimento de Onda Dominante	Tonalidade de Cor
Seletividade	Pureza Espectral	Saturação
Radiância	Luminância	Brilho
Coeficiente de Transmissão	Transmitância Espectral	Transparente / Opaco
Coeficiente 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 psicofísicas são relacionadas às grandezas físicas através de funções que consideram 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 há 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 2.1.

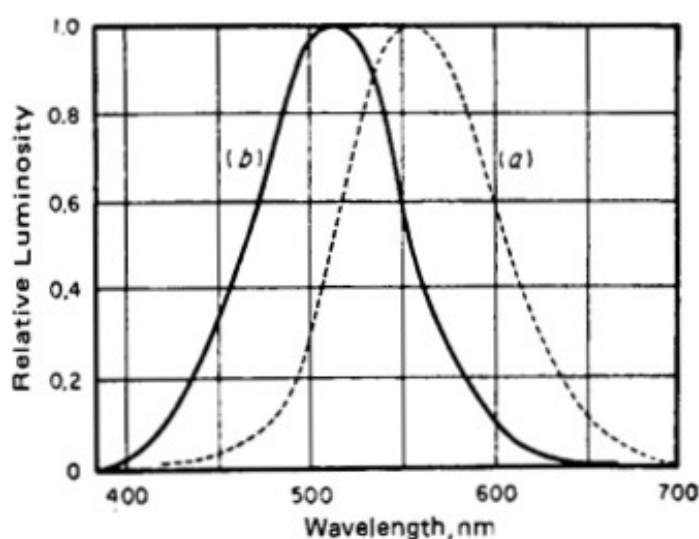


Fig. 2.1 – Funções de Luminância: A= Fotópica; B= Escotópica

Vemos então que a percepção de luminosidade é equivalente à ação de um filtro passa-banda centrado em 560 nm (ou 510 nm para visão escotópica), ao qual é aplicada a potência radiante da fonte de luz, 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 superfície **S**, dizemos que há um **Iluminamento** desta área, que é expresso em Lumens/m² ou **Lux**.

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

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

Para uma fonte de luz puntiforme, o iluminamento resultante diminui com o quadrado da distância entre a fonte e a superfície iluminada.

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**:

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

A tabela 2.3 abaixo apresenta níveis de iluminamento recomendados em várias situações. Quanto maior o iluminamento (até certo ponto), melhor é o discernimento da visão humana, seja quanto ao tempo de resposta, quanto à percepção de detalhes e cores.

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 2.3 - Níveis de Iluminamento Recomendados

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 (área projetada perpendicularmente ao observador). É expressa em **Nits** (Candelas/m²), e corresponde ao que podemos definir subjetivamente como "brilho" de um objeto. Enquanto o objeto puder ser considerado não puntiforme (enquanto sua extensão angular for maior do que o limite de discernimento da visão), a luminância não depende da distância do objeto ao observador.

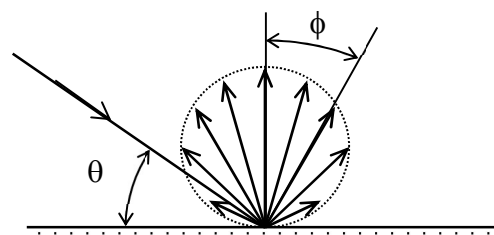
$$B = K_m \int \frac{F(\lambda)P(\lambda)}{\omega A \cos \theta} d\lambda \quad \text{Candelas / m}^2 \text{ ou nits}$$

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

$$A \cos \theta = \text{área projetada da fonte luminosa}$$

Um objeto difusor perfeito ("branco ideal"), ao receber um iluminamento 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,



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

Fontes de luz que seguem esta distribuição são denominadas *Lambertianas*. Uma folha de papel branco é um razoável exemplo de difusor perfeito.

Objeto	Luminância (Nits)
Superfície do Sol do 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
Referência de Branco para Monitores de Vídeo (*)	103
Tela de Cinema	35

(*) = Recomendação SMPTE – Society of Motion Pictures and Television Engineers

Tabela 2.4 - 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 característica espectral da sua refletância, enquanto que a "cor" de uma fonte luminosa corresponde à curva da densidade espectral de potência irradiada.

Um objeto "iridescente" possui características espectrais de refletância ("cores") que dependem do ângulo de observação e/ou incidência.

2.7 Transmitância, Densidade Óptica

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

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

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

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

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

Analogamente, um objeto transparente pode ser colorido (transmitância é função de λ), ou "opalescente" (cor depende do ângulo de observação).

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 intensidade da energia radiante incidente na mesma. O **Iluminamento Retinal**, i , medido em

Trolands, é consequência da observação de um corpo com uma determinada luminância **B**, e depende do diâmetro **l** da pupila. É definido como:

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

B = Luminância em nits

l = diâmetro da pupila em mm(2 a 8)

2.9 Contraste

O **Contraste** de uma imagem é definido como a relação entre os valores máximo e mínimo das luminâncias encontradas nessa imagem. Em um dado dispositivo de reprodução ou visualização de imagem, podemos distinguir duas interpretações para essa característica:

- **Contraste Simultâneo** – Relação entre a luminância máxima e mínima que pode ser conseguida em uma mesma imagem; em geral é limitado pela refletância do ambiente, que difunde a luz emitida pela imagem e com isso causa uma luminância residual nas partes mais escuras. Por exemplo, uma tela de cinema pode apresentar contraste simultâneo de 80:1, enquanto que um televisor em ambiente doméstico, com luz acesa, pode apresentar contraste de 20:1.
- **Contraste Sequencial** - Relação entre a luminância máxima e mínima que podem ser obtidas em imagens não simultâneas (p. ex., entre uma tela totalmente branca e uma tela totalmente escura); em geral é limitado pelas características intrínsecas do sistema de reprodução de imagem e pelo iluminamento residual do ambiente. Por exemplo, o Cinema atinge contraste sequencial de 1000:1, e alguns monitores de vídeo ultrapassam 100000:1 em ambientes escuros.

Em condições normais de observação, contrastes **simultâneos** maiores que 1000:1 são irrelevantes, e 100:1 representa uma situação aceitável.

Dependendo do contexto, o **Contraste** pode ser definido como

$$C = \left| \frac{B_{MAX} - B_{MIN}}{B_{MAX} + B_{MIN}} \right| \text{ e expresso em porcentagem, de 0 a 100.}$$

3. Lâmpadas

A tabela 3.1 a seguir apresenta características de vários tipos de lâmpadas usadas para iluminação de ambientes. Além do rendimento (Lumens / Watt) e da vida útil (tempo de uso após o qual a emissão luminosa cai pela metade), para certas aplicações pode ser necessário avaliar o índice de reprodução cromática, ou seja, a qualidade da percepção das cores dos objetos quando iluminados pela luz da lâmpada.

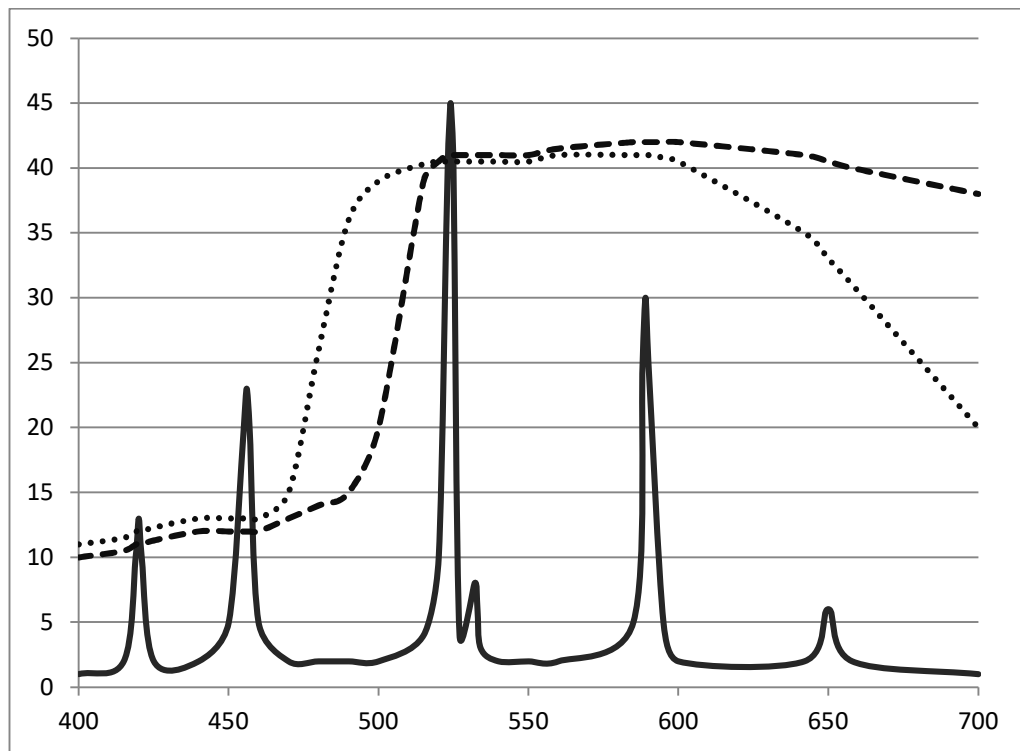
3.1 Fidelidade de Reprodução Cromática (CRI)

A emitância espectral de uma lâmpada afeta diretamente a percepção de cor dos objetos por ela iluminados. Lâmpadas incandescentes, ou que possuem espectro contínuo de modo geral, são mais adequadas para reprodução de cores, enquanto que lâmpadas com emissão concentrada em alguns comprimentos de onda podem distorcer as tonalidades. O índice CRI (*Color Rendering Index*) fornece uma medida objetiva da fidelidade cromática da lâmpada.

No exemplo da figura 3.1, dois objetos com refletâncias espectrais diferentes podem apresentar a mesma cor quando iluminados por uma lâmpada de vapores metálicos, pois suas refletâncias são iguais nos comprimentos de onda emitidos pela lâmpada.

Tipo de Lâmpada	Potência	Vida Útil	Lumens / Watt	CRI
Incandescente Comum	100 W	750 h	17,5	99
Incandescente Alta Potência	1.000 W	1.000 h	23,7	80
Incandescente Halógena	1.000 W	2.000 h	23,4	100
Fluorescente Comum	40 W	20.000 h	76,2	65 - 70
Fluorescente Compacta	13 W	10.000 h	69,2	65 - 75
Fluorescente HO	110 W	12.000 h	80,9	75
Mercúrio (c/ fósforo)	400 W	24.000 h	56,2	50
Sódio Alta Pressão	400 W	24.000 h	118,8	20 - 40
Sódio Baixa Pressão	180 W	25.000 h	183,3	0 - 18
LED Branco de Alta Eficiência	2 W	50.000 h	150	70
LED Branco Quente (3000 K)	2 W	50.000 h	80	95

Tabela 3.1 - Características de alguns tipos de lâmpadas



**Fig. 3.1 – Dois objetos com refletâncias espectrais diferentes,
iluminados por uma lâmpada de vapores metálicos**

4. Detectores de Radiação Luminosa

Os dispositivos que convertem a radiação eletromagnética em um sinal elétrico mensurável podem ser classificados em duas categorias: detectores *Térmicos* e *Quânticos*.

Uma categoria à parte seriam os detectores fotoquímicos, na qual se situa o processo fotográfico tradicional.

4.1 Detectores Térmicos

Esta classe compreende detectores usados para medições de precisão e banda larga (radiometria), bem como para aplicações em infravermelho longo, onde a energia individual dos fótons é relativamente baixa; p. ex. câmeras termográficas. Baseiam-se na medição do aumento de temperatura de um elemento receptor, provocada pela absorção de energia radiante. O elemento receptor é essencialmente um corpo negro, isolado termicamente, com massa reduzida e dimensões adequadas à aplicação. Alguns sensores desta categoria são:

- **Termopilha:** consiste de uma associação em série de grande número (20 ~ 100) de junções de metais diferentes (termopares). O lado “frio” das junções é mantido a uma temperatura de referência, enquanto o lado “quente” está termicamente acoplado a uma superfície absorvedora exposta à radiação incidente. A relação entre a tensão gerada pela termopilha e a potência radiante incidente é praticamente linear, e a sensibilidade é da ordem de 50 a 300 V/W.
- **Sensor Piroelétrico:** o elemento transdutor consiste de um capacitor, cujo dielétrico opera próximo à temperatura de Curie, na qual a constante dielétrica sofre grande variação com a temperatura. Se o capacitor estiver carregado com uma certa carga q , uma variação da capacitância (causada pelo aquecimento devido à absorção de energia radiante) provoca uma variação de tensão.
- **Bolômetro:** Neste sensor, a temperatura é medida por um termistor, acoplado ao corpo negro. Vários materiais podem ser utilizados no termistor, proporcionando uma ampla gama de características como linearidade, sensibilidade e faixa dinâmica.

Para medição de baixas intensidades de radiação, pode-se utilizar a modulação óptica, empregando obturadores mecânicos que comutam o feixe de radiação incidente em uma frequência adequada, e amplificando o sinal AC resultante na frequência da comutação.

4.2 Detectores Quânticos

Na região da luz visível, os detectores quânticos são mais usados que os térmicos, embora a resposta espectral seja menos uniforme. Os detectores quânticos dependem da interação dos fótons com uma estrutura cristalina semicondutora. Podem ser classificados como *Fotovoltaicos* e *Fotocondutivos*.

- **Fotoresistor:** é um dispositivo fotocondutivo cuja resistência depende da luz incidente. Tipicamente é constituído de um substrato coberto por Seleneto de Cádmio ou Sulfeto de Cádmio (CdSe ou CdS), e é conhecido como LDR (*Light Dependent Resistor*). Possui alta sensibilidade, porém a resposta é não linear e relativamente lenta.
- **Fotodiodo:** este é atualmente o sensor quântico mais comum, usado em câmeras, fotômetros, chaves ópticas, etc. Usa o mesmo princípio da célula solar, ou seja, a conversão de fótons em pares elétron-lacuna em uma junção semicondutora. A figura 4.1 mostra um conjunto de curvas características V-I de uma junção semicondutora, quando submetida a várias intensidades P_i de energia radiante. A curva superior corresponde a $P_i = 0$.

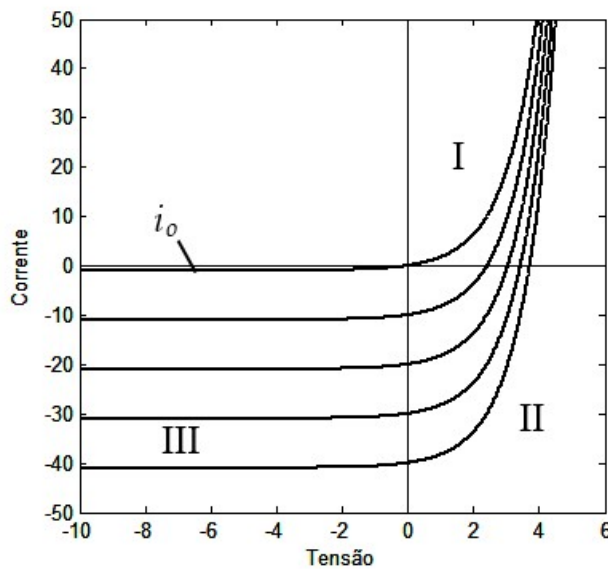


Fig. 4.1 – Característica V-I de um fotodiodo

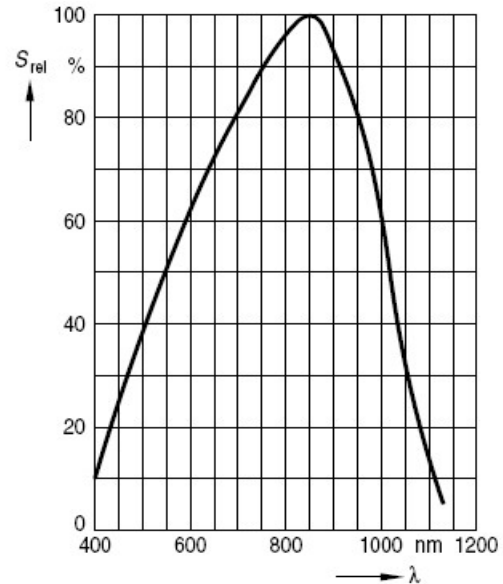


Fig. 4.2 – Resposta Espectral de junção de Si

A região I corresponde a um diodo polarizado diretamente, havendo absorção de energia elétrica e geração de calor (e fótons, no caso de um LED). A região II corresponde ao efeito fotovoltaico (é a região de operação de um painel solar), onde a junção converte energia radiante em energia elétrica. Nesta região, o fotodiodo pode ser operado de duas maneiras: em circuito aberto (carga de alta impedância) ou em curto (carga de baixa impedância). No primeiro caso, a tensão desenvolvida sobre a junção (ao longo do eixo horizontal, para a direita) varia de forma logarítmica com a potência radiante incidente. Já no segundo caso, a corrente gerada (ao longo do eixo vertical, para baixo) varia linearmente com a potência, da forma:

$$i_p = -\frac{\eta e P}{h \nu}$$

onde e = carga do elétron, P = potência incidente, h = constante de Planck, ν = comprimento de onda, e η é a eficiência espectral do sensor. A figura 4.2 apresenta a eficiência espectral típica de junções de Silício, normalizadas para o valor máximo, o qual varia normalmente de 10 a 50%.

Na região III, que corresponde à região fotocondutiva, a junção é polarizada reversamente, e a corrente varia linearmente com a intensidade da energia radiante, mas sofre o acréscimo de um termo residual i_0 , denominado “dark current”, que depende da temperatura e da tensão aplicada. Nesta região, temos:

$$i_p = i_0 \left(e^{eV/kT} - 1 \right) - \frac{\eta e P}{h \nu}$$

Onde V é a tensão aplicada e T a temperatura absoluta.

Apesar da presença da corrente de fuga i_0 , as vantagens de operar na região III, além da linearidade, são:

- Possibilidade de operar com resistor de carga de valor elevado, desde que a operação não se aproxime da região II;
- A capacitância da junção com polarização reversa é drasticamente menor, resultando em maior velocidade de resposta.

Aumentando a tensão de polarização reversa, podemos chegar em uma região onde o fotodiodo entra na região de avalanche, resultando em um ganho adicional pelo efeito de multiplicação de portadores. Dispositivos que operam nessa região (*APD – Avalanche Photo Diodes*) podem ter ganhos maiores que 1000 vezes em relação a um fotodiodo normal.

- **Fotocélula:** este dispositivo baseia-se no efeito fotoelétrico, ou seja, a emissão de elétrons no vácuo, estimulada pela absorção de fótons pelos átomos de um metal. Consiste de um fotocatodo (eletrodo negativo), exposto à luz incidente e usualmente recoberto com um metal alcalino como Césio ou Rubídio, e um anodo (eletrodo positivo) que atrai os elétrons emitidos pelo catodo.

A fotocélula possui elevada linearidade e sensibilidade, devido ao uso generalizado de estágios multiplicadores de elétrons, que operam por emissão secundária. Além disso, responde com alta velocidade (da ordem de nano-segundos). Por estas razões, é largamente utilizada em instrumentos de medida e equipamentos científicos.

A figura 4.3 apresenta características de um exemplo de fotocélula. A curva de sensibilidade, à esquerda, mostra a saída da fotocélula em mA/W, em função de λ . No mesmo gráfico, temos a eficiência quântica, ou seja, a proporção de fótons incidentes que causam resposta na saída. À direita, a variação da sensibilidade em A/lumens e do ganho da seção multiplicadora em função da tensão de alimentação.

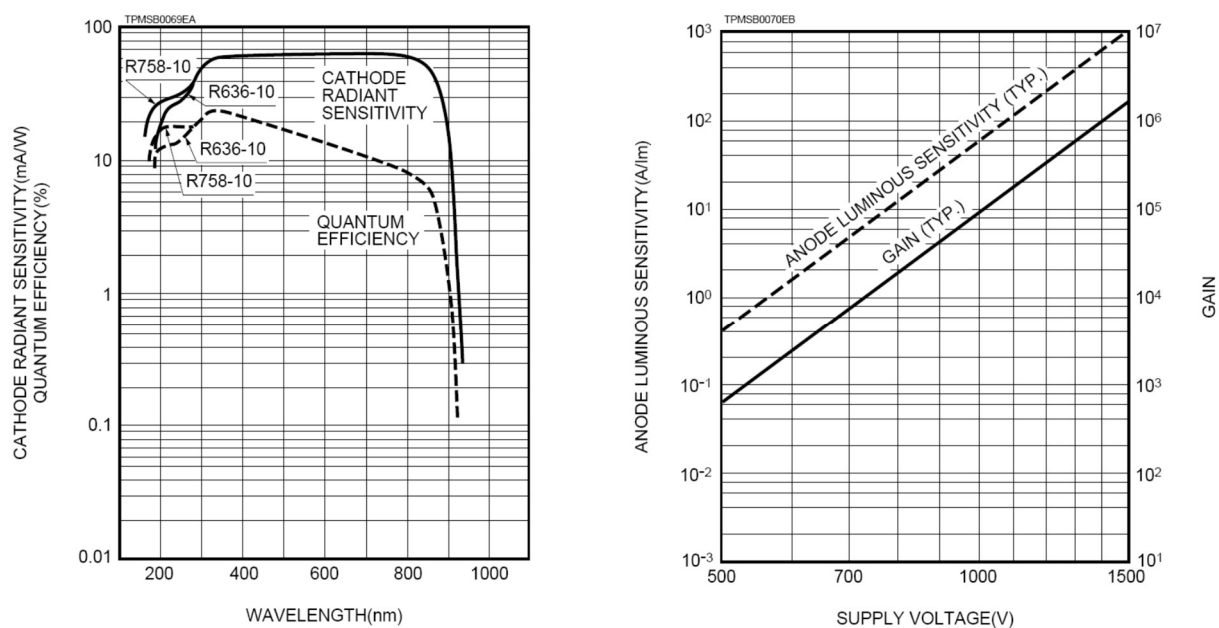


Fig. 4.3 – Características de uma Fotocélula (Hamamatsu R636-10)

5. 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 plano focal (no qual está situado o filme fotográfico ou sensor fotoelétrico). Estes sistemas convertem as **luminâncias** dos objetos focalizados em níveis de **iluminamento** na imagem projetada sobre o plano focal (Figura 5.1)

A imagem estará focalizada quando:

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{1}{f} \quad \text{onde } f \text{ é a distância focal da lente.}$$

O *iluminamento* E da imagem real projetada sobre o sensor 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

$T = \text{Transmitância da Lente}$
 $F = \text{Abertura da Lente} = \frac{f}{d}$
 $f = \text{Distância focal da Lente}$
 $\theta = \text{Ângulo entre objeto e eixo óptico}$

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

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

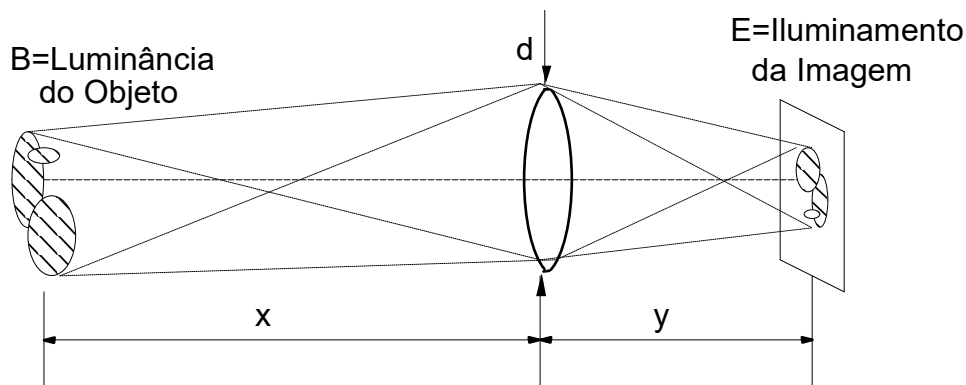


Fig. 5.1 - Iluminamento da Imagem no Plano Focal

5.1 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 dada no item anterior. 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.

A figura 5.2 esquematiza as curvas $D \times \mathfrak{E}$ (Densidade óptica x Exposição) para 3 tipos de filme negativo (suave, normal e alto contraste), enquanto que a figura 5.3 apresenta as curvas $D \times \mathfrak{E}$ para as 3 cores básicas de um filme diapositivo colorido (slide).

Já em um sensor estado sólido, como usado em câmeras digitais, a resposta é praticamente linear; a carga gerada em cada “pixel” (e, portanto, a tensão de saída do sensor) é diretamente proporcional à Exposição (Lux-segundo). Os limites são a saturação (para exposições elevadas) e o ruído intrínseco (para baixas exposições).

Uma das tarefas básicas do fotógrafo ou cinegrafista consiste então em ajustar a exposição $\mathfrak{E}$ de tal forma que o histograma de distribuição das luminâncias ($P_B \times B$) da cena a ser registrada se ajuste à parte linear da curva de exposição do filme utilizado (ou do sensor, no caso de uma câmera digital ou de TV), como esquematizado na fig. 5.4. Desta forma, ele evita que haja saturação tanto nos níveis de branco (por excesso de exposição) quanto nos níveis de preto (por falta de luz). Para isso, o fotógrafo dispõe dos recursos de ajuste de abertura, tempo de exposição, iluminação e uso de filtros neutros, além da escolha da sensibilidade do filme e do processo de revelação.

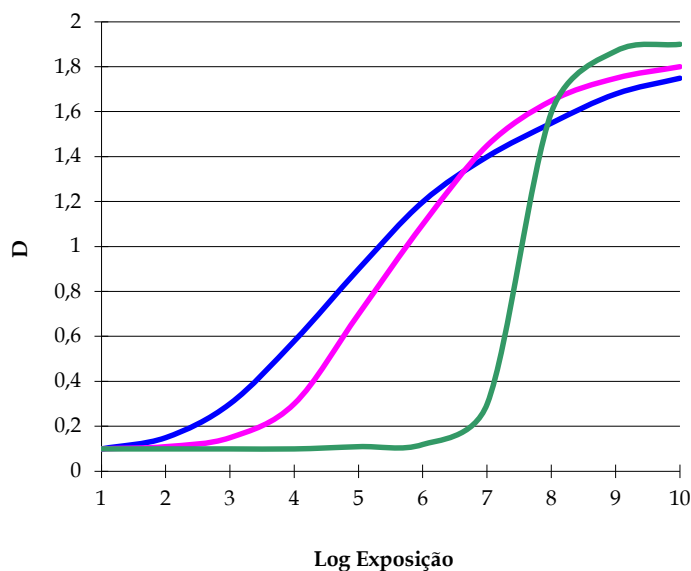


Fig. 5.2 – Curvas de Exposição para filmes negativos

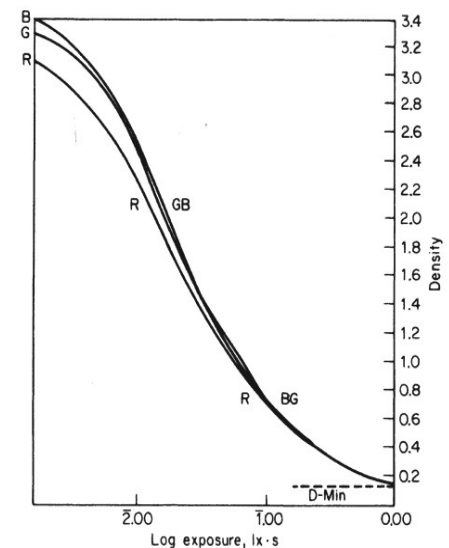


Fig. 5.3 – Curva de Exposição para diapositivo a cores

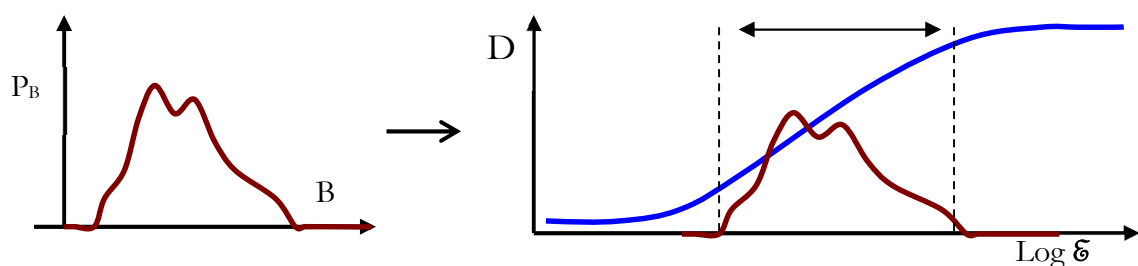


Fig. 5.4 – Ajuste do Histograma de Luminâncias à Curva de Exposição do filme

6. Referências

- Donald G. Fink, H.W. Beaty: Standard Handbook for Electrical Engineers – McGraw-Hill, 1993 (Figs. 1.6, 1.7)
- K. Blair Benson: Television Engineers Handbook - McGraw-Hill, 1985 (Fig. 1.3, 5.3)
- Charles Harper: Handbook of Components for Electronics - McGraw-Hill, 1977 (Fig. 1.8)
- Charles Poynton: Digital Video and HDTV – Algorithms and Interfaces – Morgan Kaufmann, 2003 (Fig. 1.5)
- Lumileds, Inc. (www.lumileds.com) - *DL25 Data Sheet*, 2010 (Fig. 1.9)
- Osram Opto Semiconductors – *Soleriq E30 Data Sheet*, 2013 (Fig 1.10)
- Jacob Fraden: *Handbook of Modern Sensors* – Springer, 2010
- Hamamatsu Photonics – *R636-10 Data Sheet*, 1994 (Fig. 4.3)