

13

Lâmpadas Elétricas e Luminotécnica

13.1 INTRODUÇÃO

Este Capítulo apresenta inicialmente alguns conceitos básicos de visão e fotometria, incluindo a estrutura e o funcionamento do olho humano e as principais grandezas físicas utilizadas em luminotécnica. O tema da colorimetria, embora complexo, é abordado brevemente apenas para permitir a introdução dos conceitos de *Temperatura de Cor* e *Índice de Reprodução de Cor*.

Em seguida são apresentados detalhadamente os principais tipos de lâmpadas disponíveis atualmente: lâmpadas incandescentes (convencionais e halógenas) e lâmpadas de descarga (de baixa e de alta pressão). Um objetivo adicional desta seção é mostrar a complexidade relacionada à comparação entre as diferentes lâmpadas, a qual envolve diversas grandezas tais como eficácia luminosa, reprodução de cores, custo de investimento e custo operacional das lâmpadas.

Finalmente apresenta-se os principais aspectos relacionados ao projeto de iluminação, no qual são estabelecidos o tipo e o número de lâmpadas e luminárias necessárias para obter uma iluminação adequada em função da aplicação. São discutidos brevemente os principais métodos utilizados em projetos de iluminação: o *Método dos Lumens* e o *Método Ponto a Ponto*.

13.2 CONCEITOS BÁSICOS DE VISÃO E FOTOMETRIA

13.2.1 Considerações Gerais

Neste item são inicialmente apresentados os principais aspectos da estrutura e do funcionamento do olho humano, com destaque à sua curva de sensibilidade em função do comprimento de onda da radiação incidente, o qual determina a sensação de cor percebida pelos seres humanos.

Em seguida são apresentadas as principais grandezas utilizadas em luminotécnica, com as quais é possível caracterizar o funcionamento das lâmpadas elétricas. Finalmente são discutidos alguns aspectos relacionados a colorimetria.

13.2.2 O Olho Humano

O olho humano apresenta uma estrutura complexa, sendo constituído de uma lente (cristalino) que focaliza a radiação incidente, previamente colimada pela pupila, numa região da retina (fóvea) na qual se concentram os receptores fotossensíveis (bastonetes e cones) das células nervosas como mostra o diagrama da Figura 13.1 (a). Os bastonetes são totalmente insensíveis a cores, respondem a estímulos em baixa luminosidade e determinam as características da visão noturna (ou escotópica). A discriminação de cores resulta da sensibilização dos três tipos de cones, os quais se diferenciam pelo tipo de fotopigmento e necessitam de níveis mínimos de luminosidade que caracterizam a visão diurna (ou fotópica).

Curva de sensibilidade do olho humano

Sob o ponto de vista de engenharia, o olho pode ser considerado um sensor de radiação seletivo que detecta apenas uma parcela restrita do espectro ($380 \text{ nm} \leq \lambda \leq 780 \text{ nm}$) da energia radiante. A curva de resposta do olho é seletiva pois, para uma potência radiante constante, a luminância¹ na retina varia com o comprimento de onda λ . Em 1924, a CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*)², com o objetivo de tornar a avaliação da radiação visível (luz) independente das idiosincrasias do ser humano, criou um observador padrão, cujo olho encontra-se adaptado a luz do dia para caracterizar a visão fotópica representada por uma curva de sensibilidade $V(\lambda)$. Em 1951 foi elaborada uma curva suplementar $V'(\lambda)$ para caracterizar a visão escotópica de um observador padrão, cujo olho encontra-se adaptado à pouca luz. Os dados são fornecidos sob forma de tabelas [1], cujos gráficos apresentados na Figura 13.1 (b), são normalizados pelo valor de máxima sensibilidade da visão fotópica que ocorre para $\lambda = 555 \text{ nm}$ (amarelo esverdeado). Estas curvas revelam as diferentes sensações de claridade que os vários comprimentos de onda, com mesma intensidade de radiação, causam sobre o olho humano.

¹ Luminância é a intensidade luminosa (fluxo luminoso por unidade de ângulo sólido) por unidade de área medida segundo o eixo normal da superfície.

² CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*) com sede em Viena é um órgão internacional criado em 1913 como fórum para troca de informações e padronização de grandezas relacionadas com iluminação.

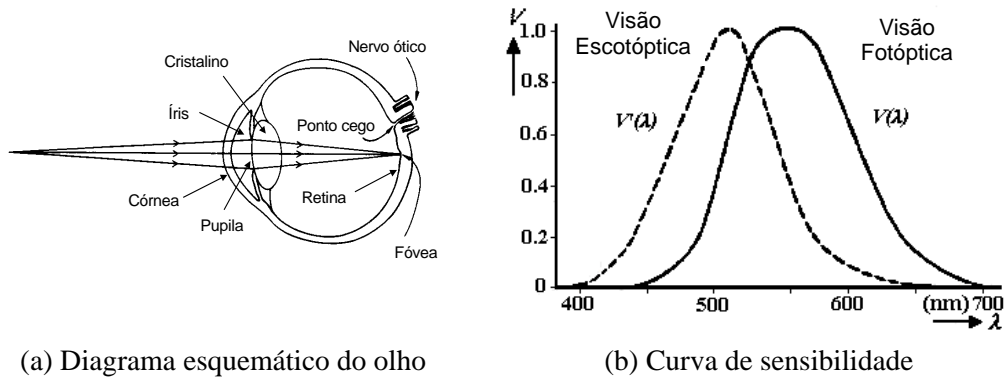


Figura 13.1 - Característica de um observador padrão segundo a CIE

13.2.3 Grandezas Físicas

Ângulo Sólido

Ângulo sólido é a região do espaço limitada por um cone, conforme ilustra a Figura 13.2. O conceito de ângulo sólido serve para definir direções no espaço, através de elementos infinitesimais de ângulo sólido.

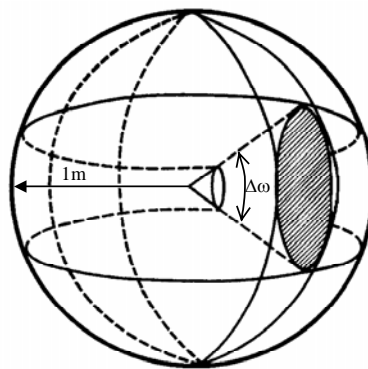


Figura 13.2 - Ângulo sólido $\Delta\omega$

A unidade de medida de ângulos sólidos é o **esferorradiano**, cuja definição é análoga à definição de 1 radiano no plano, conforme mostra a Figura 13.3.

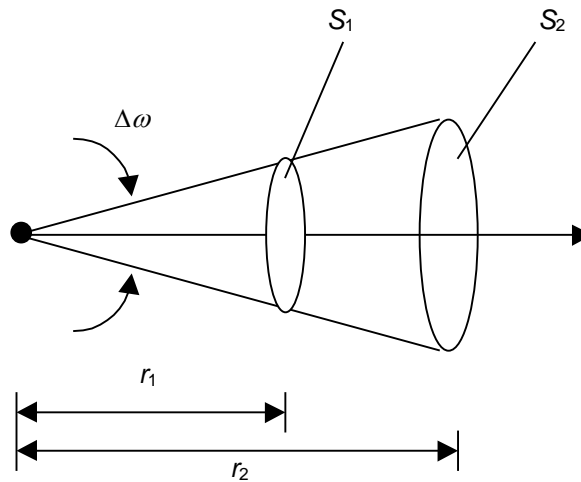


Figura 13.3 - Definição de esferradiano

Na Figura 13.3 tem-se:

$$\hat{\text{Ang. sol.}} = \Delta\omega = \frac{S_1}{r_1^2} = \frac{S_2}{r_2^2} = \dots = \text{const.} \quad , \quad (13.1)$$

em que S_1 representa a área da interseção do cone com uma esfera de raio r_1 e centro coincidente com o vértice do cone (da mesma forma, S_2 representa a área da interseção do cone com uma esfera de raio r_2). Da Eq. (13.1) nota-se que 1 esferradiano é um ângulo sólido cuja interseção com uma esfera de raio r possui uma área igual a r^2 . Como a área total da esfera de raio r é $4\pi r^2$, conclui-se que o ângulo sólido que abarca todas as direções (esfera completa) mede 4π esferradianos.

Fluxo Radiante - ϕ_R

Uma fonte luminosa é na verdade uma fonte de radiação eletromagnética, caracterizada pelo fluxo radiante ϕ_R , medido em **watt (W)**, que corresponde à energia total por unidade de tempo irradiada em todos os comprimentos de onda. A sua distribuição espectral $S(\lambda)$ é medida utilizando-se um espectroradiômetro.

Fluxo Luminoso - ϕ

O olho funciona como um filtro seletivo que aproveita somente uma parcela da energia recebida. Portanto para efeito de iluminação, uma fonte de luz é caracterizada pelo seu fluxo luminoso ϕ , definido pela convolução da distribuição espectral $S(\lambda)$ da fonte luminosa com a curva de sensibilidade fotóptica $V(\lambda)$ do observador padrão:

$$\phi = 683 \cdot \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (13.2)$$

O seu valor é dado em **lúmen (lm)**, que é o fluxo luminoso emitido em um ângulo sólido de 1 esferorradiano e uma dada direção por uma fonte pontual com intensidade luminosa uniforme de 1 candela.

Intensidade Luminosa - I

A intensidade luminosa I , medida em candela, é a unidade básica de luz estabelecida em 1979 pela 11th CGPM (*General Conference on Weights and Measures*). Um candela é a intensidade luminosa em uma dada direção emitida por uma fonte monocromática de $5,4 \times 10^{14}$ Hz ($\lambda = 555$ nm) cuja intensidade radiante nesta direção é de 1/683 W/esferorradianos. Uma direção é definida através de um elemento infinitesimal de ângulo sólido, conforme indica a Eq. (13.3):

$$I = \frac{d\phi}{d\omega} = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \frac{\Delta\phi}{\Delta\omega} \quad (13.3)$$

Eficácia Luminosa - ϵ

Define-se **eficácia luminosa** de uma lâmpada, medida em **lumen/watt (lm/W)**, como a razão entre o fluxo luminoso total emitido ϕ e a potência elétrica total P consumida pela mesma. A eficácia luminosa é um indicador da eficiência do processo de emissão de luz utilizada sob o ponto de vista do aproveitamento energético.

13.2.4 Conceitos Básicos de Colorimetria

A cor é um aspecto subjetivo da sensação visual fotóptica (para níveis de iluminação elevados) que permite a um observador distinguir diferenças entre duas fontes de luz de mesmo tamanho, forma e intensidade.

Os processos de avaliação da cor são fundamentados nas teorias de tricromaticidade de Young-Helmholtz (1896). As diferentes cores são obtidas por processos combinatórios (aditivos ou subtrativos) que obedecem aos seguintes postulados propostos em 1853 por Grassmann: *i*) qualquer cor pode ser obtida pela combinação linear de três cores primárias, desde que nenhuma delas possa ser obtida pela combinação das outras duas; *ii*) cores idênticas, porém com distribuições espectrais distintas (metâmeros), produzem o mesmo efeito num processo de combinação aditivo de cores, e *iii*) duas cores mantêm sua equivalência, independente dos níveis de luminância, desde que respeitados os limites da visão fotóptica [2].

A cor é avaliada através de modelos [3]. Para iluminação são adotados os modelos elaborados pela CIE [2,3] que representam a cor através de coordenadas de cromaticidade. Para esta finalidade a CIE especificou em 1931 um observador padrão com campo de visão de 2° (CIE *observer 1931*) e em 1964 criou um segundo observador para um campo de visão para 10° (CIE *observer 1964*). Cada um deles é representado por um conjunto de três curvas (vide Figura 13.4 (b)), geradas a partir da média dos resultados obtidos com grupos de 15 a 20 indivíduos adultos, com visão de cor considerada normal, submetidos ao seguinte teste. Cada candidato observava uma tela branca (100% de refletância) através de uma fenda (vide figura 3.14 (a)), sobre a qual, numa metade era projetada uma cor espectral³ gerada por uma lâmpada de teste. Na outra metade, a pessoa reproduzia a cor da lâmpada de teste ajustando a intensidade de três lâmpadas monocromáticas de mesma potência emitindo comprimentos de onda $\lambda_R=700,0$ nm (vermelho), $\lambda_G=546,1$ nm (verde) e $\lambda_B=435$ nm (azul) respectivamente. O procedimento foi repetido para comprimentos de onda entre 380 nm e 780 nm em intervalos de 5 nm, e a Figura 13.4 (b) apresenta a contribuição relativa das três lâmpadas monocromáticas para cada comprimento de onda.

³ Cor espectral é a cor produzida por uma fonte real, cujo espectro de emissão apresenta uma única raia com comprimento de onda bem definido.

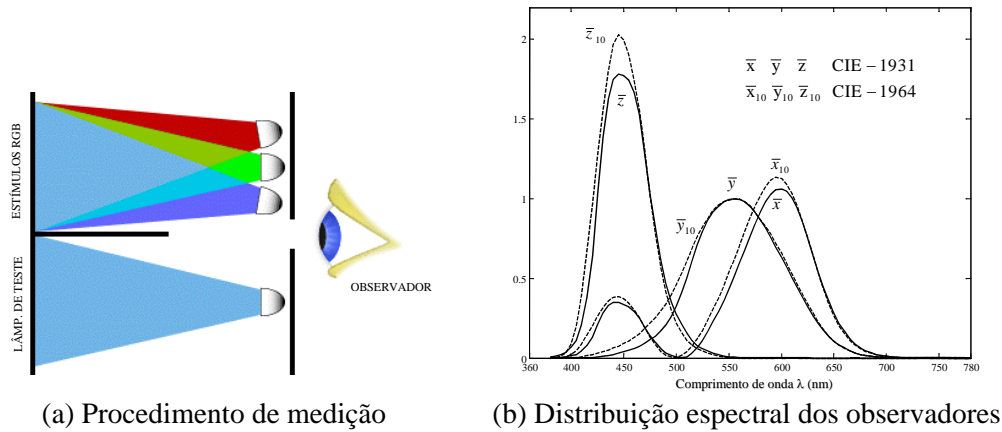


Figura 13.4 - Observadores padrão CIE

Para a determinação da cor de uma fonte luminosa, realiza-se a convolução da distribuição espectral $S(\lambda)$ da fonte luminosa com um observador padrão segundo as expressões:

$$X = \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \bar{X}(\lambda) \cdot d\lambda; \quad Y = \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \bar{Y}(\lambda) \cdot d\lambda; \quad Z = \int_{380}^{780} S(\lambda) \cdot \bar{Z}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (13.4)$$

As coordenadas de cromaticidade são os valores normalizados dados pelas expressões:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}; \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}; \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z}; \quad (x + y + z = 1). \quad (13.5)$$

Temperatura de Cor - TC

Como são necessárias duas coordenadas de cromaticidade para representação da cor, em iluminação adotou-se a **temperatura de cor TC** em Kelvin para caracterização colorimétrica de um fonte luminosa. Esta corresponde à temperatura absoluta de um corpo negro ou irradiador de Planck, cuja radiação emitida tem as mesmas coordenadas de cromaticidade da fonte em questão [2].

Índice de Reprodução de Cor - CRI

Uma característica importante de uma fonte luminosa é a sua capacidade de reproduzir a cor natural de objetos iluminados pela mesma. O **índice de reprodução de cor CRI** (“Color Rendering Index”) [2] é definido como um número adimensional (de 1 a 100) que compara a qualidade da reprodução de cores de uma fonte de luz com a de um iluminante CIE padrão de mesma cor (na realidade com coordenadas de cromaticidade similares às da fonte).

13.3 LÂMPADAS ELÉTRICAS

13.3.1 Considerações Gerais

As lâmpadas comerciais utilizadas para iluminação são caracterizadas pela potência elétrica absorvida (W), fluxo luminoso produzido (lm), temperatura de cor (K) e índice de reprodução de cor. Em geral as lâmpadas são classificadas, de acordo com o seu mecanismo básico de produção de luz, em lâmpadas incandescentes e lâmpadas de descarga. Ambos tipos serão apresentados detalhadamente neste item.

13.3.2 Lâmpadas Incandescentes

13.3.2.1 Considerações Gerais

A lâmpada incandescente foi a primeira a ser desenvolvida e ainda hoje é uma das mais difundidas. A luz é produzida por um filamento aquecido pela passagem de corrente elétrica alternada ou contínua. O filamento opera em uma temperatura elevada e luz é somente uma parcela da energia irradiada pela transição de elétrons excitados para órbitas de maior energia devido à vibração dos átomos. A distribuição espectral da radiação emitida segue o comportamento descrito pela equação desenvolvida por Planck para descrever a radiação de um corpo negro.

As primeiras lâmpadas incandescentes surgiram por volta de 1840 e utilizavam filamento de bambu carbonizado no interior de um bulbo de vidro a vácuo. Seguiram-se as lâmpadas com filamento de carbono, até que, por volta de 1909, Coolidge desenvolveu um método para tornar o tungstênio mais dúctil e adequado para a elaboração de filamentos uniformes por trefilação. A característica de emissão, as propriedades mecânicas e o seu elevado ponto de fusão (3655 K) foram determinantes na escolha do tungstênio como o material mais adequado para fabricação de filamentos para lâmpadas incandescentes. As lâmpadas incandescentes podem ser classificadas de acordo com a sua estrutura interna em convencionais ou halógenas. Ambas serão abordadas neste sub-item.

13.3.2.2 Lâmpada Incandescente Convencional

Nas lâmpadas incandescentes convencionais (vide Figura 13.5 (a)) o filamento de tungstênio é sustentado por três ou quatro suportes de molibdênio no interior de um bulbo de vidro alcalino (suporta temperaturas de até 370 °C) ou de vidro duro (suporta temperaturas de até 470 °C). O bulbo apresenta diversos formatos, sendo a forma de pêra a mais comum, podendo ser transparente ou com revestimento interno de fósforo neutro difusor.

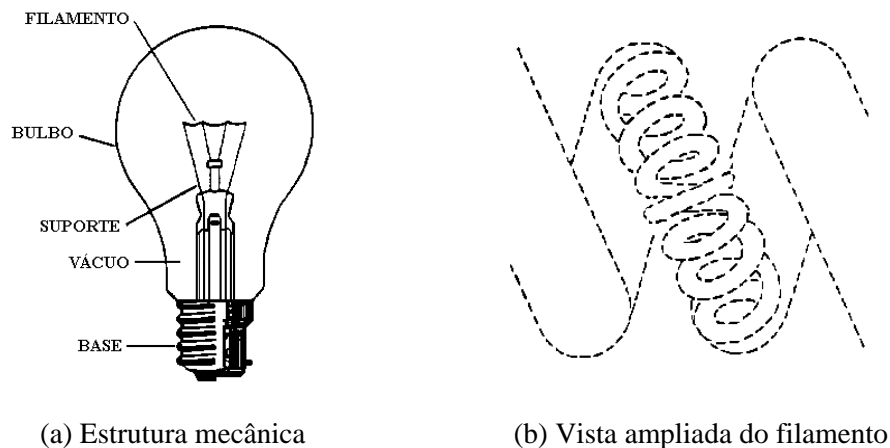


Figura 13.5 - Lâmpada incandescente convencional

Lâmpadas convencionais trabalham com temperaturas de filamento entre 2300 K e 2800 K. Devido à elevada temperatura de operação do filamento, nas lâmpadas comerciais injeta-se nitrogênio ou argônio a pressão de 0,8 atm no interior do bulbo para prover uma atmosfera protetora que reduz a taxa de sublimação do tungstênio, aumentando a vida da lâmpada e minimizando o depósito de tungstênio sobre a superfície interna do bulbo, evitando o enegrecimento da mesma. Os filamentos são constituídos de fio de tungstênio enrolado em dupla espiral (vide Figura 13.5 (b)) para aumentar a área radiante e otimizar o comprimento total do filamento para um dado valor de projeto de resistência elétrica.

A base da lâmpada incandescente é constituída de uma caneca metálica, geralmente presa com resina epóxi sobre o bulbo. Existem diversas padronizações, por exemplo, baioneta e tele-slide, ambas utilizadas em lâmpadas miniatura. As lâmpadas incandescentes de médio e grande porte geralmente utilizam uma base que suporta temperaturas até 250 °C e seguem um padrão conhecido por rosca Edison.

A eficácia luminosa resultante cresce com a potência da lâmpada, variando de 7 a 15 lm/W. Estes valores são relativamente baixos, quando comparados com lâmpadas de

descarga com fluxo luminoso semelhante. No entanto, esta limitação é compensada pelo elevado índice de reprodução de cor (CRI = 100).

A tensão de alimentação atua diretamente sobre a temperatura do filamento que, por sua vez, determina a vida útil da lâmpada incandescente. Cada tipo de lâmpada apresenta suas particularidades, porém as relações abaixo se aplicam com razoável precisão para maioria das lâmpadas comerciais, inclusive halógenas.

$$\frac{\text{Potência [W]}}{\text{Potência}_{\text{no min al}} [\text{W}]} = \left(\frac{\text{Tensão [V]}}{\text{Tensão}_{\text{no min al}} [\text{V}]} \right)^{1,6} \quad \frac{\text{Fluxo Lum [lm]}}{\text{Fluxo Lum}_{\text{no min al}} [\text{lm}]} = \left(\frac{\text{Tensão [V]}}{\text{Tensão}_{\text{no min al}} [\text{V}]} \right)^{3,4}$$

$$\frac{\text{Temp Cor [K]}}{\text{Temp Cor}_{\text{no min al}} [\text{K}]} = \left(\frac{\text{Tensão [V]}}{\text{Tensão}_{\text{no min al}} [\text{V}]} \right)^{0,42} \quad \frac{\text{Eficácia Lum [lm/W]}}{\text{Eficácia Lum}_{\text{no min al}} [\text{lm/W}]} = \left(\frac{\text{Tensão [V]}}{\text{Tensão}_{\text{no min al}} [\text{V}]} \right)^{1,3}$$

$$\frac{\text{Vida Útil [h]}}{\text{Vida Útil}_{\text{no min al}} [\text{h}]} = \left(\frac{\text{Tensão [V]}}{\text{Tensão}_{\text{no min al}} [\text{V}]} \right)^{-13}$$

A resistência específica do tungstênio na temperatura de funcionamento da lâmpada (2800 K) é aproximadamente 15 vezes maior do que à temperatura ambiente (25 °C). Portanto, ao ligar uma lâmpada incandescente, a corrente que circula pelo seu filamento a frio é quinze vezes a corrente nominal de funcionamento em regime. A temperatura do filamento sobe rapidamente, atingindo valores elevados em frações de segundo. Ligações muito frequentes reduzem a vida útil da lâmpada, pois o filamento geralmente não apresenta um diâmetro constante. A corrente de partida causa aquecimento excessivo e localizado nos pontos onde a seção do filamento apresenta constrictões, provocando seu rompimento. A vida útil de uma lâmpada incandescente comercial é da ordem de 1000 horas.

13.3.2.3 Lâmpada Incandescente Halógena

A lâmpada halógena é uma lâmpada incandescente na qual se substitui atmosfera no interior do bulbo por um elemento halógeno, em geral iodo ou bromo. O elemento halógeno reage quimicamente com as partículas de tungstênio sublimadas, formando haletos que apresentam uma temperatura de condensação inferior a 250 °C. Mantendo-se a temperatura do bulbo acima deste valor, evita-se o depósito de material sublimado sobre o mesmo. Por outro lado, correntes térmicas transportam os haletos novamente para as regiões de alta temperatura, próximas ao filamento, onde ocorre a sua dissociação e o tungstênio retorna em algum ponto do filamento. Este ciclo halógeno só se torna eficaz para temperaturas de filamento elevadas (3200 K) e para uma temperatura da parede do bulbo externo acima de 250 °C, evitando-se a condensação e o depósito dos haletos. A

necessidade de elevadas temperaturas de filamento exige a presença de uma atmosfera protetora, geralmente uma mistura de nitrogênio com um gás inerte (argônio ou criptônio) na proporção de 0.1% a 1% do elemento halógeno, para reduzir a taxa de evaporação do tungstênio.

A lâmpada incandescente halógena também apresenta um filamento de tungstênio enrolado em dupla espiral, o qual é sustentado por suportes de molibdênio no interior de um bulbo de quartzo, globular ou com formato de lapiseira. A base é, em geral, cerâmica para suportar temperaturas e pressões elevadas e além disso apresentar boa condutibilidade térmica, limitando a temperatura dos suportes de molibdênio em 350 °C para evitar fenômenos de corrosão.

O bulbo de quartzo não deve ser tocado com a mão para evitar que depósitos de gordura na sua superfície externa provoquem pontos de desvitrificação, isto é, alterações na rede cristalina com elevado coeficiente de expansão térmica, que podem resultar em microfissuras e rompimento do bulbo.

A Figura 13.6 apresenta uma vista em corte de um lâmpada halógena de 300 W do tipo lapiseira, mostrando as três zonas de temperatura e as reações químicas envolvidas.

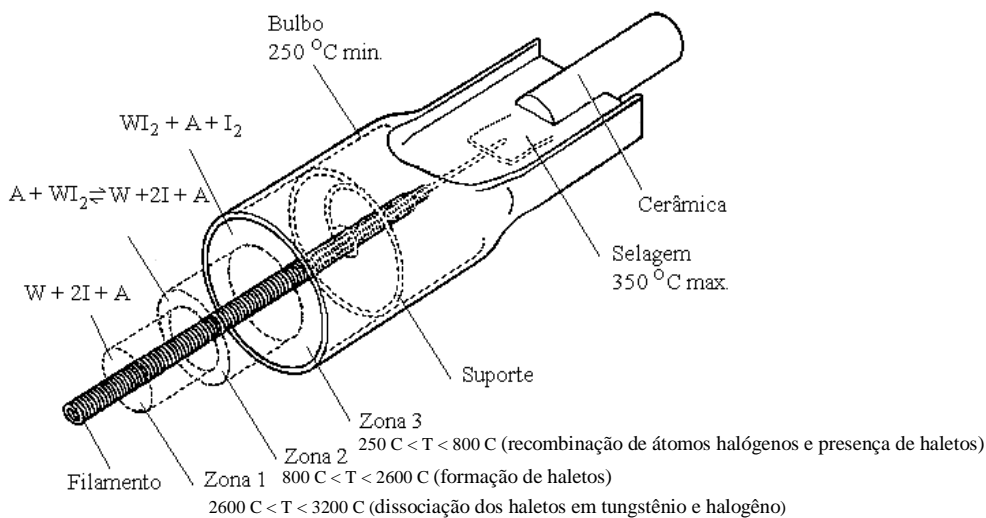


Figura 13.6 - Vista em corte de uma lâmpada incandescente halógena do tipo lapiseira

As temperaturas elevadas no filamento só são atingidas com a circulação de um nível mínimo de corrente. Por esta razão, lâmpadas com potências inferiores a 50 W são alimentadas em baixa tensão, geralmente 12 V ou 24 V.

Lâmpadas halógenas emitem mais radiação ultravioleta que as lâmpadas incandescentes normais, uma vez que a sua temperatura de filamento é significativamente maior e o bulbo de quartzo não absorve a radiação nesta faixa de comprimento de onda. Os níveis são inferiores aos presentes na luz solar, não oferecendo perigo à saúde. No entanto, deve-se evitar a exposição prolongada das partes sensíveis do corpo à luz direta e concentrada.

As características construtivas das lâmpadas incandescentes halógenas permitem uma substancial redução no seu tamanho (da ordem de 10 a 100 vezes) em relação às suas similares convencionais. Sua eficiência é da ordem de 15 lm/W a 25 lm/W, para uma vida útil de 2000 horas. Seu custo ainda é significativamente maior que o das lâmpadas incandescentes convencionais.

Refletores Dicroícos

A redução de volume torna as lâmpadas halógenas adequadas para iluminação direcionada ("spot light"), porém a irradiação térmica emitida é bastante elevada. Por esta razão, certos tipos de lâmpadas são providos de um refletor espelhado especial, chamado *dicroíco*, que reflete a radiação visível e absorve a radiação infravermelha. A Figura 13.7 mostra a fotografia de duas lâmpadas de 50 W com refletor dicroíco.

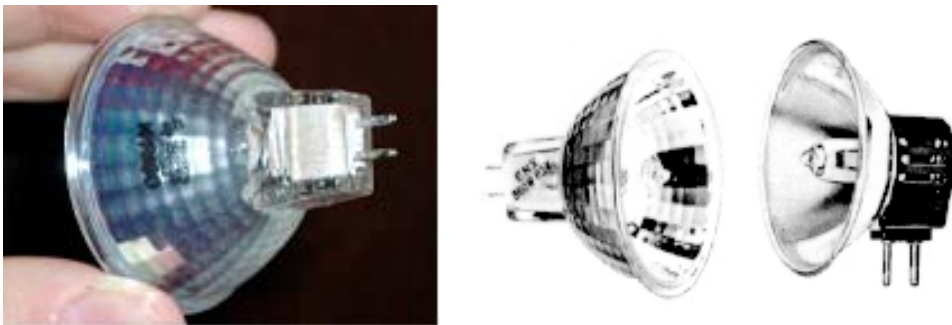


Figura 13.7 - Lâmpada incandescente halógena de 50 W com refletor espelhado dicroíco

O espelho dicroíco consiste de uma base de vidro, sobre a qual são aplicadas, alternadamente, camadas com espessuras quase moleculares, de materiais translúcidos com índices de refração diferentes, por exemplo, um deles com índice refração de 1.5 (sílica) e outro com 2.3 (sulfato de zinco). Este arranjo provoca uma defasagem de 180°

entre a radiação incidente e refletida para certos comprimentos de onda, resultando no seu cancelamento por interferência. A radiação visível, que apresenta um comprimento de onda da ordem da metade da radiação infravermelha, é refletida e emitida em direção ao objeto a ser iluminado. Por outro lado, através da escolha adequada do material e das espessuras das camadas, a maior parte da radiação infravermelha é absorvida pelo espelho e eliminada pela base da lâmpada. Com este tipo de espelho, consegue-se uma redução da ordem de 70% na radiação infravermelha, resultando um feixe de luz emergente "frio" ("cold light beam"), ou seja, que não aquece o ambiente.

13.3.3 Lâmpadas a Descarga

13.3.3.1 Considerações Gerais

Nas lâmpadas de descarga utilizadas em iluminação, a luz é produzida pela radiação emitida pela descarga elétrica através de uma mistura gasosa composta de gás(es) inerte(s) e vapor(es) metálico(s). A mistura gasosa encontra-se confinada em um invólucro translúcido (tubo de descarga) em cujas extremidades encontram-se inseridos eletrodos (hastes metálicas ou filamentos) que formam a interface entre a descarga e o circuito elétrico de alimentação.

A corrente elétrica através da descarga é formada majoritariamente por elétrons emitidos pelo eletrodo negativo (catodo) que são acelerados por uma diferença de potencial externa em direção ao eletrodo positivo (anodo) gerando colisões com os átomos do vapor metálico. A energia transferida ao átomo pelas colisões elásticas excita elétrons para órbitas mais elevadas e as colisões inelásticas provocam sua ionização gerando novos elétrons. A subsequente transição do átomo para um estado de menor energia é acompanhada da emissão de radiação. Dependendo da sua distribuição espectral, esta radiação é utilizada como fonte de luz ou absorvida por um revestimento, aplicado na parede interna do tubo de descarga (conhecido genericamente por "fósforo"), que emite uma radiação com uma distribuição espectral mais adequada.

Ao contrário da lâmpada incandescente, na qual o filamento metálico é um condutor elétrico, na lâmpada a descarga o composto metálico responsável pela emissão de radiação encontra-se em estado sólido ou líquido na temperatura ambiente e o gás inerte no interior do tubo (conhecido como gás de enchimento ou "filling gas") é isolante. Portanto, inicialmente é necessário um processo de ignição para o rompimento da rigidez dielétrica da coluna gasosa. O calor gerado pela descarga através do gás inerte nos instantes iniciais após a partida da lâmpada vaporiza o composto metálico.

Após a partida, a lâmpada a descarga apresenta uma impedância dinâmica (derivada da tensão em relação à corrente) negativa, ou seja, à medida que a corrente na lâmpada aumenta, a diferença de potencial entre os seus terminais diminui como mostra a Figura

13.8. Portanto, toda lâmpada de descarga necessita de um elemento com impedância positiva ligado em série para estabilizar a corrente no ponto de operação nominal da lâmpada. Caso contrário, para qualquer variação de tensão da fonte de alimentação, a lâmpada se comportaria como um curto-circuito e a corrente assumiria valores elevados. No jargão técnico o elemento de estabilização é denominado “reator”.

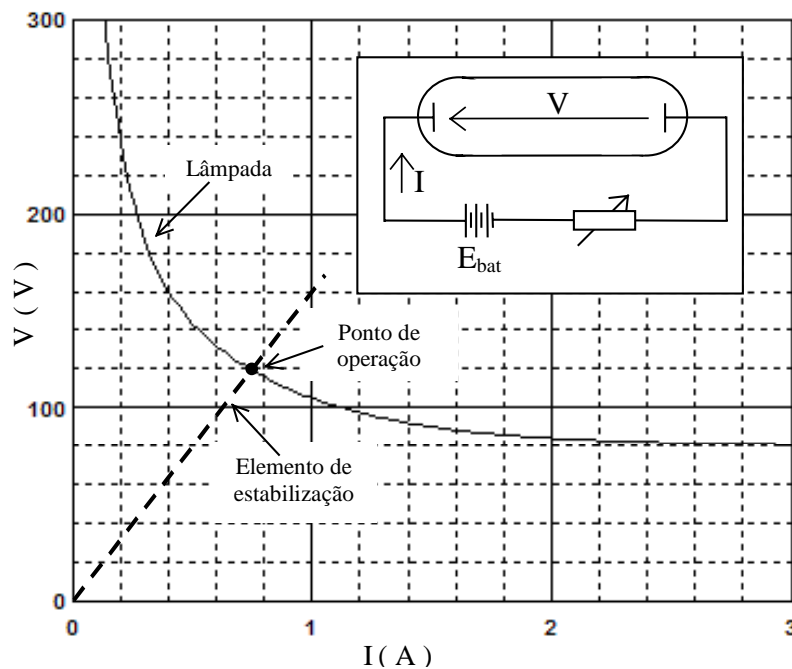


Figura 13.8 - Curva estática tensão vs. corrente de um tubo de descarga com gás neon

Na prática, as lâmpadas a descarga são alimentadas em corrente alternada (C.A.) para evitar processos cataforéticos⁴. Desta forma, cada eletrodo assume a função de cátodo e anodo em semiciclos consecutivos e a lâmpada passa a apresentar uma curva tensão versus corrente dinâmica, podendo ser modelada por uma resistência não linear equivalente. Por questões de eficiência, a estabilização da corrente em corrente alternada não é feita com resistores, utilizando-se no seu lugar uma associação de elementos reativos (capacitores e indutores) para evitar a dissipação desnecessária de potência ativa.

As lâmpadas a descarga podem ser classificadas pela pressão no interior do tubo com a lâmpada em operação em: a) lâmpadas de descarga de baixa pressão e b) lâmpadas de descarga de alta pressão. Ambos tipos serão abordados neste sub-ítem.

⁴ “Cataphoresis” caracteriza o processo de concentração de partículas carregadas do plasma nas vizinhanças do cátodo devido à presença de uma diferença de potencial CC entre os eletrodos.

13.3.3.2 Lâmpadas a Descarga de Baixa Pressão

As lâmpadas à descarga de baixa pressão apresentam as seguintes características: *i*) pressão dos vapores metálicos da ordem de 10^{-4} a 10^{-5} atmosferas; *ii*) densidade de potência da descarga de 0.5 W/cm a 2 W/cm; *iii*) eletrodos em forma de filamentos; *iv*) espectro da radiação caracterizado por bandas e *v*) tubo de descarga com diâmetro da ordem de cm e comprimento de dezenas de cm a metros. Existem basicamente dois tipos de lâmpadas comerciais: as lâmpadas de descarga de baixa pressão de vapor de mercúrio, conhecidas como lâmpadas fluorescentes, e as lâmpadas de descarga de baixa pressão de vapor de sódio. Neste capítulo serão analisadas somente as lâmpadas fluorescentes, uma vez que as lâmpadas de sódio de baixa pressão são monocromáticas e seu índice de reprodução cores é muito reduzido.

Lâmpadas Fluorescentes

Desenvolvida na década de 1940 [4,5] e conhecida comercialmente como lâmpada tubular fluorescente em função da geometria do seu tubo de descarga, este tipo de lâmpada encontra aplicações em praticamente todos os campos de iluminação. O tubo de descarga, de vidro transparente, é revestido internamente com uma camada de pó branco, genericamente conhecido como "fósforo". O "fósforo" atua como um conversor de radiação, ou seja, absorve um comprimento de onda específico ($\lambda = 253.7$ nm) de radiação ultravioleta, produzida por uma descarga de vapor de mercúrio a baixa pressão, para emitir luz visível.

As lâmpadas fluorescentes comercialmente disponíveis utilizam bulbos de vidro transparente, historicamente designados por uma letra T (de tubular) seguida de um número que indica o seu diâmetro máximo em oitavos de polegada. Por exemplo, T12 significa um bulbo tubular com diâmetro de 12/8 polegadas. O diagrama da Figura 13.9 mostra a estrutura interna de uma lâmpada fluorescente tubular e ilustra o seu princípio de funcionamento.

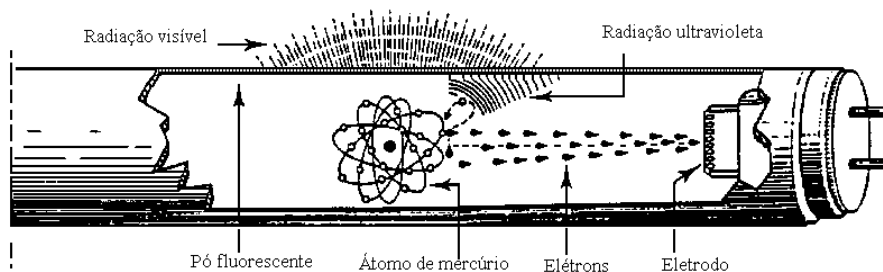
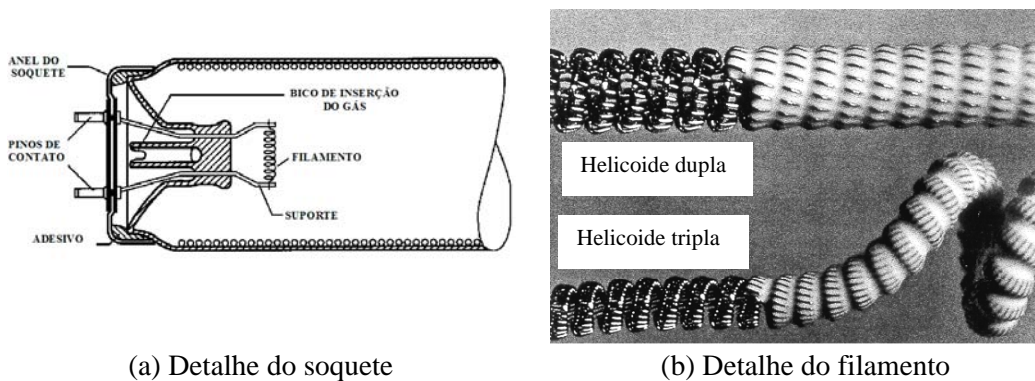


Figura 13.9 - Estrutura interna e princípio de funcionamento de uma lâmpada fluorescente tubular

Os eletrodos encontram-se hermeticamente selados no interior do tubo, um em cada extremidade. Existem basicamente dois tipos: a) o catodo frio, utilizado em lâmpadas com o mesmo nome e atualmente já fora de linha, constituído de um cilindro metálico coberto com uma substância que emite elétrons, quando aquecida pelo próprio calor gerado na descarga, e b) o catodo quente ou filamento, utilizado na quase totalidade das lâmpadas atualmente disponíveis.

Os filamentos das lâmpadas fluorescentes são construtivamente semelhantes aos das lâmpadas incandescentes, porém operam em temperaturas mais baixas (800 °C a 1100 °C) e apresentam um revestimento de material com baixa função de trabalho (por exemplo óxido de bário) que emite elétrons por efeito termo-iônico (vide detalhes na Figura 13.10). Durante a partida, os filamentos são alimentados por uma fonte de tensão, sendo aquecidos pela circulação da corrente, até atingir a temperatura de emissão desejada, a qual é mantida pelo calor gerado na descarga com a lâmpada já em funcionamento. Este procedimento é denominado pré-aquecimento dos filamentos. O pré-aquecimento influi na vida útil dos filamentos e, portanto, da própria lâmpada.



(a) Detalhe do soquete

(b) Detalhe do filamento

Figura 13.10 - Soquete e filamento de uma lâmpada fluorescente tubular

Como gás de enchimento é utilizado um gás inerte com baixo potencial de ionização (argônio puro ou uma mistura de argônio, neônio e criptônio) para facilitar a ignição da lâmpada. O gás e a sua pressão também influem na eficiência da lâmpada, já o gás inerte atua como um moderador que ajusta a velocidade média dos elétrons de forma a maximizar a produção de radiação ultravioleta com comprimento de onda $\lambda = 253.7$ nm.

As características colorimétricas (temperatura de cor correlata, reprodução de cores) e a eficácia da lâmpada fluorescente são determinadas pela composição e espessura do pó fluorescente ("fósforo"). Os "fósforos" são compostos que emitem luz por fluorescência quando expostos à radiação ultravioleta. São fabricados a partir de substâncias de elevada pureza, cuja estrutura cristalina é modificada pela adição de ativadores, que determinam a distribuição espectral da radiação emitida. Uma família amplamente utilizada são os

halofosfatos cuja composição química básica é $3\text{Ca}(\text{PO}_4)_2\text{CaF}_2$. Na década de 1980 foi desenvolvida uma nova família de "fósforos", conhecida comercialmente como "tri-fósforos" ou "fósforos tri-estímulo", que é constituída de três compostos, cada um com banda de emissão estreita e centrada nos comprimentos de onda do azul, vermelho e verde respectivamente. A combinação adequada destes compostos, juntamente com uma camada de halofosfato, possibilitou uma melhora no índice de reprodução de cores e um aumento considerável na eficácia luminosa, ou seja, permitiu a construção de lâmpadas com menor potência para emissão do mesmo fluxo luminoso. As lâmpadas fluorescentes de nova geração utilizam um tubo com diâmetro menor (T8 em vez de T12) e o custo mais elevado do tri-fósforo é compensado pelo aumento de eficiência resultante.

A Tabela 13.1 apresenta as principais características de algumas lâmpadas fluorescentes e incandescentes. Pode-se verificar que: a) as lâmpadas fluorescentes são aproximadamente 6 vezes mais eficientes que as incandescentes; b) as lâmpadas fluorescentes apresentam uma vida útil 8 vezes superior às incandescentes e c) as lâmpadas fluorescentes com tri-fósforo são mais eficientes que as com halofosfato e apresentam um índice de reprodução de cores mais elevado, porém ainda inferior às incandescentes.

Tabela 13.1 - Características de algumas lâmpadas fluorescentes e incandescentes

Tipo de Lâmpada	Fluorescente		Incandescente	
	Halofosfato (T12)	Tri-fósforo (T8)		
Potência (W)	40	36	60	100
Fluxo luminoso (lm)	3150	3275	730	1380
Eficácia lum.(lm/W)	78,7	90,9	12	13,8
Vida útil (horas)	8000	8000	1000	1000
Índ. Reprod. Cores	62	82	100	100

As lâmpadas fluorescentes tubulares são utilizadas para iluminação de interiores em instalações comerciais, industriais e residenciais. A lâmpada fluorescente não oferece riscos à saúde, pois a quase totalidade da radiação ultravioleta emitida pela descarga é absorvida pelo pó fluorescente e pelo vidro do tubo de descarga.

Lâmpadas Fluorescentes Compactas

A lâmpada fluorescente compacta CFL ("Compact Fluorescent Lamp") foi introduzida no mercado no início da década de 1980 para substituir a lâmpada incandescente. Estas lâmpadas apresentam alguns detalhes construtivos que as diferenciam das lâmpadas fluorescentes tubulares convencionais, porém, seu princípio de funcionamento é idêntico. Os modelos comerciais utilizam um tubo de vidro do tipo T4 ou T5, com revestimento de "tri-fósforo" e filamentos nas suas extremidades. Existem diversas formas construtivas

para o tubo de descarga, sendo duas as mais comuns: a) um tubo único curvado em “U” e b) dois tubos independentes, unidos por uma ponte. A Figura 13.11 apresenta uma lâmpada fluorescente com dois tubos independentes, mostrando um de seus filamentos e o percurso da descarga no interior da lâmpada.

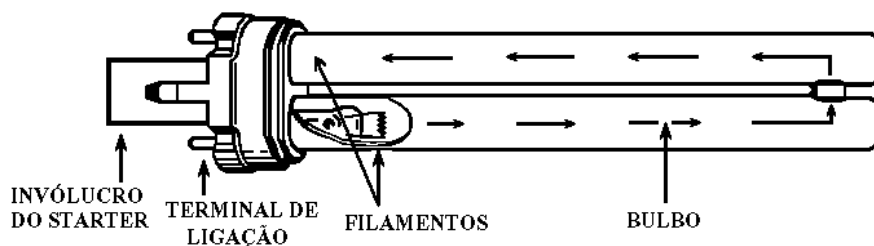


Figura 13.11 - Lâmpada fluorescente compacta com “starter” incorporado

A lâmpada fluorescente compacta, em geral só apresenta duas conexões elétricas, uma vez que os filamentos encontram-se ligados em série através de um “starter” (vide Figura 3.12 (b)), o qual fica alojado num invólucro na base da lâmpada. A estabilização da lâmpada é feita através de um reator indutivo, conectado externamente. Algumas lâmpadas já apresentam um reator incorporado na sua base, em geral do tipo rosca Edison, que é utilizada em lâmpadas incandescentes. O reator poder ser indutivo ou eletrônico, sendo este último mais leve de forma a reduzir o peso do conjunto.

A Tabela 13.2 apresenta as características de alguns modelos comerciais de lâmpadas incandescentes e fluorescentes compactas com dimensões físicas similares. Nota-se que a CFL consome um sexto da potência a apresenta uma vida útil 8 vezes maior, sendo adequada para aplicações onde a fonte de luz deve ser compacta e com baixo consumo de energia elétrica.

Tabela 13.2 - Características de algumas lâmpadas fluorescentes compactas e incandescentes

Tipo de Lâmpada	Fluorescente compacta				Incandescente			
Potência nominal (W)	7	9	13	18	40	60	75	100
Fluxo luminoso (lm)	400	600	900	1200	430	730	960	1380
Efic. lum. lamp. (lm/W)	57	67	69	67	10,8	12,2	12,8	13,8
Efic. lum. lamp+reat. (lm/W)*	36	46	60	57	-	-	-	-
Vida útil (horas)	8000	8000	8000	8000	1000	1000	1000	1000
Índice Reprodução Cor	81	81	81	81	100	100	100	100
Comprimento total (mm)	133	165	188	232	105	105	105	105

(*) Os valores da eficácia luminosa do conjunto lâmpada + reator foram obtidos com um reator indutivo

Reatores para Lâmpadas Fluorescentes

A maioria das instalações de iluminação com lâmpadas fluorescentes são alimentadas em corrente alternada na frequência usual de rede (50 ou 60 Hz). Para ignição e estabilização da corrente da lâmpada utiliza-se um dispositivo, conhecido popularmente por reator (em inglês "ballast"). Existem várias configurações, desde simples indutores até sofisticados circuitos eletrônicos. O reator deve realizar basicamente três funções: a) possibilitar a ignição da lâmpada; b) estabilizar a corrente da lâmpada no seu valor nominal de operação e c) atender às especificações da forma de onda normatizadas para a corrente da lâmpada⁵.

Reatores Eletromagnéticos

São constituídos basicamente de bobinas com um núcleo, obtido pelo empilhamento de chapas de ferro-silício, apresentando portanto características indutivas. Podem ser simples indutores ou transformadores com características especiais.

A tensão $v(t)$ sobre um indutor ideal em função da corrente $i(t)$ obedece a relação $v(t)=L(di/dt)$, onde L é uma constante denominada indutância. Portanto, qualquer variação de corrente imposta pelo circuito externo é transformada pelo indutor em uma diferença de potencial entre os seus terminais, que é proporcional à taxa de variação da corrente. Em corrente alternada, o indutor funciona como um dispositivo que oferece resistência às variações de corrente, o que justifica sua escolha como elemento de estabilização para lâmpadas de descarga. Um indutor real pode ser representado por um indutor ideal em série com a resistência elétrica (do fio de cobre) da bobina, sendo que esta última determina a potência dissipada (em watt) pelo conjunto.

Os reatores indutivos para lâmpadas fluorescentes tubulares são, em geral, classificados de acordo com o tipo de ignição em: a) reator com pré-aquecimento (utilizando "starter"), mostrado na Figura 13.12 (a); b) reator de partida rápida, apresentado na Figura 13.12 (c).

⁵ As normas de lâmpadas fluorescentes especificam que a corrente na lâmpada, operando em regime permanente, deve ter um fator de crista inferior a 1,7. O fator de crista é o quociente do valor de pico da forma de onda pelo seu valor eficaz.

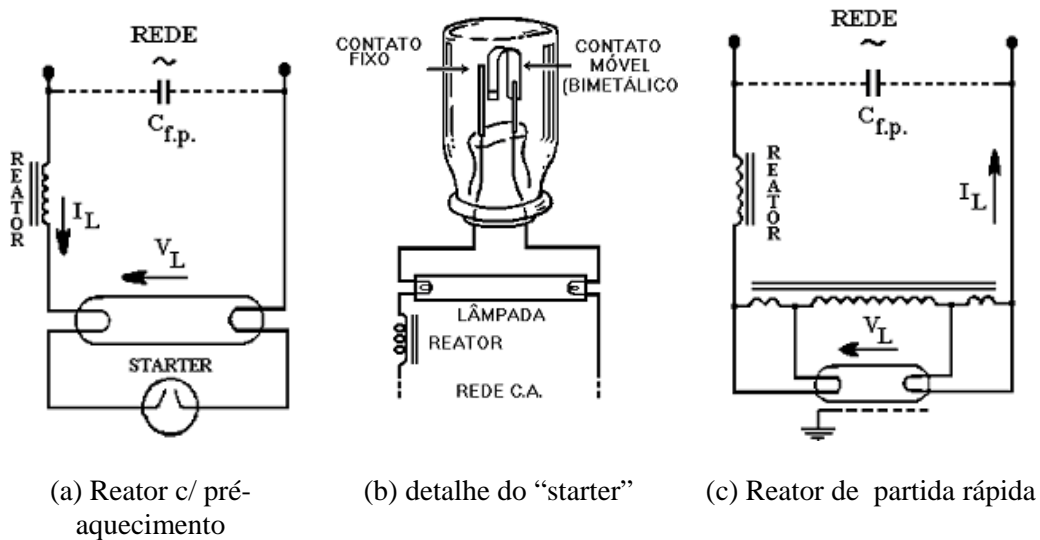


Figura 13.12 - Reatores indutivos para lâmpadas fluorescentes tubulares

Reator com Pré-Aquecimento (Utilizando "Starter")

Os reatores para lâmpadas fluorescentes que realizam pré-aquecimento dos filamentos são simples indutores, que operam em conjunto com um dispositivo de chaveamento, que pode ser do tipo mecânico (chave liga/desliga) ou térmico ("starter").

O valor de pico da tensão de alimentação C.A. fornecida pelas concessionárias de energia elétrica é, em geral, significativamente inferior à tensão de ignição, na temperatura ambiente, para a grande maioria das lâmpadas fluorescentes tubulares. Uma maneira de reduzir a tensão de ignição da lâmpada é realizar um pré-aquecimento dos seus filamentos, que passam a emitir elétrons livres, reduzindo a rigidez dielétrica (capacidade de suportar tensão) da coluna gasosa entre os eletrodos. Este processo é iniciado com o fechamento da chave em paralelo com a lâmpada, conforme indicado na Figura 13.12 (a). Desta forma, os filamentos da lâmpada são conectados em série e alimentados pela tensão C.A., para permitir a circulação de uma corrente elétrica (de 0,8 A a 1,2 A), cujo valor é determinado pelo reator. Quando os filamentos atingem a incandescência, a chave é aberta, interrompendo a corrente no circuito. A variação brusca da corrente provoca uma diferença de potencial momentânea e de valor elevado entre os terminais do reator, que, somada à tensão C.A. naquele instante, será aplicada sobre a lâmpada provocando a ignição da descarga.

A maioria das instalações que adotam esta técnica, utiliza uma chave térmica, denominada "starter", mostrada em detalhe na Figura 13.12 (b). O "starter" é constituído de uma ampola de vidro (com aproximadamente 20 mm de comprimento e 10 mm de diâmetro), contendo um gás (em geral neônio ou hélio) a uma certa pressão, além de dois contatos separados entre si. Um contato é fixo em forma de haste e o outro, constituído de uma lâmina bimetálica em forma de U, é móvel. O elemento bimetálico é obtido laminando-se duas chapas metálicas com coeficientes de dilatação térmica significativamente diferentes.

O princípio de funcionamento do reator com "starter" é similar à seqüência de eventos descrita anteriormente. A tensão da rede C.A., insuficiente para realizar a ignição da lâmpada, consegue abrir um arco de baixa resistência elétrica entre os contatos do "starter", provocando a circulação de corrente pelos filamentos. O calor gerado pelo arco deforma a lâmina bimetálica, aproximando-a da haste fixa até estabelecer contato mecânico. Neste instante o "starter" se comporta como um curto-circuito, extinguindo o arco. Na ausência do arco a lâmina bimetálica esfria rapidamente, afastando-se do contato fixo (o aquecimento próprio por efeito Joule na lâmina bimetálica é desprezível).

Quando os contatos do "starter" se separam, ouve-se um "clic" característico. A interrupção brusca da corrente provoca uma tensão de valor elevado entre os eletrodos da lâmpada que pode ou não provocar a ignição da descarga. Em caso afirmativo, o "starter" permanecerá em circuito aberto, pois a tensão da lâmpada acesa é insuficiente para abrir um arco entre os seus contatos. Caso contrário, o ciclo de pré-aquecimento se inicia novamente.

A partida da lâmpada demora, em geral, alguns segundos e a escolha do "starter" é feita em função da tensão da lâmpada. O sucesso da ignição da lâmpada após o primeiro ciclo de pré-aquecimento depende, entre outros fatores, da temperatura ambiente e da umidade atmosférica. Em ambientes frios e úmidos são necessários, em geral, de três a seis ciclos. A partida com pré-aquecimento implica a utilização de um conjunto individual, formado por reator e "starter", para cada lâmpada.

Reator de Partida Rápida

Os reatores de partida rápida não utilizam "starter". Portanto, para se garantir a partida da lâmpada, esta topologia deve aplicar um valor de tensão suficientemente elevado para realizar a partida da lâmpada (numa ampla faixa de temperatura ambiente) ou reduzir a tensão de ignição da lâmpada de alguma forma.

Estes reatores utilizam um transformador, cujos enrolamentos encontram-se magneticamente acoplados com um indutor, para realizar o aquecimento adequado dos filamentos de forma a reduzir a tensão de ignição da lâmpada para valores próximos da

tensão C.A. de alimentação. A Figura 13.12 (c) mostra uma versão simplificada desta configuração.

O transformador dispõe de enrolamentos de baixa tensão (3 V a 4 V), ligados em série com o enrolamento secundário, aos quais são conectados os filamentos. Ao contrário dos reatores com pré-aquecimento, existe circulação permanente de corrente pelos filamentos, cujo valor é significativamente reduzido, após a ignição da lâmpada, pelo aumento da resistência dos filamentos com a temperatura e pela queda de tensão no indutor, imposta pela circulação de corrente na lâmpada.

A ignição da lâmpada ocorre em menos de 1 segundo, justificando a denominação "partida rápida". Para o bom funcionamento, é necessária uma superfície metálica plana e aterrada, de mesmo comprimento da lâmpada e disposta a uma distância não superior a 25 mm da mesma. Em geral utilizam-se luminárias metálicas, as quais devem ser adequadamente aterradas. A presença de uma superfície equipotencial aterrada sob a lâmpada possibilita uma distribuição de cargas estáticas na parede do tubo, que altera a distribuição de potencial entre os eletrodos, reduzindo ainda mais a tensão de ignição da lâmpada.

Reatores eletrônicos

Reator eletrônico é a denominação popular de um equipamento que converte a tensão de rede (50 Hz ou 60 Hz) em uma tensão de alta frequência (acima de 18 kHz), adequada para alimentar lâmpadas fluorescentes.

Um reator eletrônico, representado pelo diagrama funcional da Figura 13.13, é composto de: a) um conversor C.A./C.C., que transforma a tensão da rede em tensão contínua; b) um inversor que converte a tensão C.C. em uma tensão C.A. de alta frequência e c) circuitos que realizam a ignição e estabilização da corrente na lâmpada.

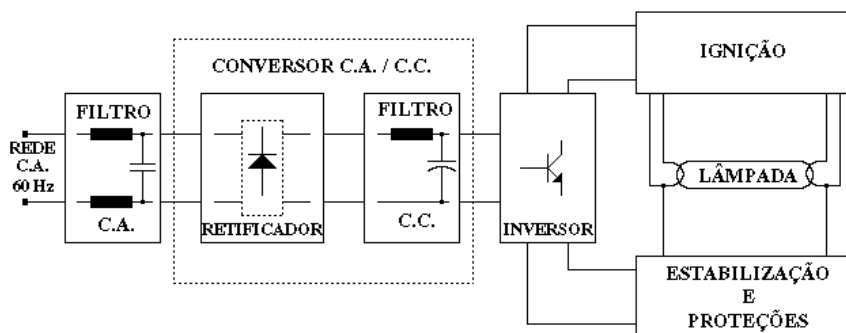


Figura 13.13 - Diagrama de blocos de um reator eletrônico

O inversor gera uma tensão com frequência constante, cujo valor é superior ao limiar da audição (18 kHz) e inferior a 50 kHz para evitar problemas de interferência em transmissões por rádio. A maioria dos reatores eletrônicos alimenta a lâmpada com corrente senoidal.

Um reator eletrônico de boa qualidade apresenta filtros nos seus terminais de alimentação com a finalidade de: a) evitar a circulação pela rede de correntes de frequência elevada que podem provocar interferência em sistemas de comunicação; b) providenciar a filtragem adequada da corrente absorvida pelo reator, eliminando os seus componentes harmônicos e mantendo-a em fase com a tensão de alimentação para assegurar um fator de potência elevado.

As funções de ignição e estabilização da corrente da lâmpada são em geral realizadas por circuitos utilizando indutores e capacitores. Os indutores apresentam dimensões físicas reduzidas, uma vez que os valores de indutância são, em geral, 2 a 3 ordens de grandezas inferiores aos utilizados nos reatores indutivos convencionais.

A versatilidade e diversidade de recursos oferecidos pela eletrônica permitem incluir o pré-aquecimento de filamentos e funções de proteção, as quais desligam o reator em caso de falha de ignição da lâmpada ou desconectam-no da rede em caso de curto-circuito interno.

Alguns reatores eletrônicos permitem variar a luminosidade da lâmpada (“dimming”) e possuem interfaces para sistemas de controle centralizado.

Vantagens dos reatores eletrônicos sobre os eletromagnéticos

a) Redução de perdas no reator

As perdas dos reatores eletrônicos são significativamente inferiores aos de seus similares indutivos. Por exemplo, o conjunto constituído de um reator indutivo de partida rápida e duas lâmpadas fluorescentes de 40 W (T12), ambas operando na condição nominal de fluxo luminoso, absorve 102 W. Já um conjunto equipado com reator eletrônico nas mesmas condições consome apenas 79 W, resultando uma economia de energia elétrica de 25%. No entanto, a escolha do reator eletrônico deve ser criteriosa, pois existem diversos modelos que alimentam a lâmpada fora da sua especificação nominal de fluxo luminoso.

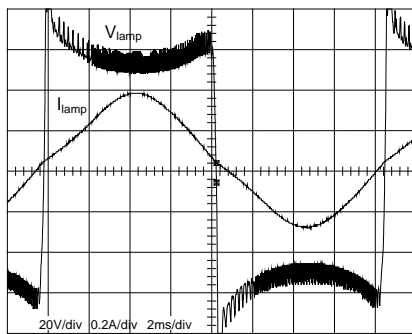
As normas estabelecem que a temperatura da carcaça de reatores indutivos deve ser tal que o salto térmico (ΔT) entre ela e a temperatura ambiente não pode ultrapassar 65 °C, ou seja, a temperatura da carcaça de um reator indutivo não pode exceder 100 °C quando a temperatura ambiente for 35 °C. Por outro lado, nos reatores eletrônicos comerciais a elevação de temperatura na carcaça não ultrapassa 20 °C. Portanto, luminárias com

reatores eletrônicos aquecem menos, reduzindo a carga térmica do sistema de ar condicionado e proporcionando uma economia adicional de energia elétrica.

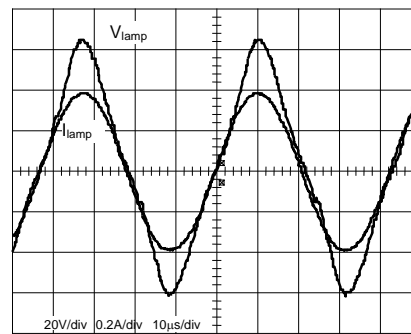
b) Aumento de eficiência da lâmpada

Lâmpadas fluorescentes, alimentadas em alta frequência (acima de 5 kHz) com tensão senoidal operando na sua potência nominal, apresentam uma elevação de fluxo luminoso de 6% a 12%, em relação ao valor obtido na frequência da rede. A eficiência da lâmpada aumenta com a elevação da frequência da tensão de alimentação, até atingir um patamar para frequências em torno de 10 kHz. O valor percentual do aumento de fluxo luminoso depende, entre outros fatores, das dimensões físicas do tubo de descarga.

Analisando o oscilograma da Figura 13.14 (a) obtido com a lâmpada alimentada em 60 Hz, verifica-se que a tensão sobre a lâmpada tem um formato aproximadamente retangular, com oscilações de alta frequência provocadas por instabilidades da descarga nas proximidades da região anódica. Quando a frequência de alimentação ultrapassa a frequência destas instabilidades, as oscilações desaparecem, o valor eficaz da tensão na lâmpada diminui assim como a potência fornecida à lâmpada. Esta passa se comportar como um resistor, pois a tensão torna-se praticamente senoidal, em fase com a corrente (vide Figura 13.14 (b)).



(a) Reator eletromagnético – $f = 60$ Hz



(b) Reator eletrônico – $f = 25$ kHz

Figura 13.14 - Tensão e corrente de uma lâmpada CFL de 9 W emitindo fluxo luminoso nominal

c) Redução da modulação da intensidade luminosa

A intensidade luminosa de lâmpadas fluorescentes, alimentadas por reatores indutivos, apresenta uma modulação de amplitude que acompanha a frequência da rede. Quando a luz da lâmpada ilumina um corpo que gira com uma rotação igual ou próxima a um múltiplo da frequência da rede, o observador vê a imagem de um corpo em repouso ou girando lentamente. Este fenômeno, conhecido por efeito estroboscópico, desaparece

quando se utilizam reatores eletrônicos, devido à alimentação da lâmpada ser de alta frequência.

13.3.3.3 Lâmpadas a Descarga de Alta Pressão

As lâmpadas à descarga de alta pressão, também conhecidas como lâmpadas HID (High Intensity Discharge) utilizam vapores metálicos (em geral mercúrio e/ou sódio) a pressões da ordem de 1 a 10 atmosferas e operam com uma densidade de potência de arco da ordem de 20 a 200 W/cm. A radiação emitida pela descarga apresenta uma distribuição espectral contínua, sobre a qual se encontram superpostas as raias predominantes dos átomos que constituem o vapor metálico. Os eletrodos são bastões irradiadores e o tubo de descarga tem dimensões reduzidas (diâmetro de mm e comprimento de cm).

Existem basicamente três tipos básicos de lâmpadas comerciais: a) a lâmpada de vapor de mercúrio de alta pressão; b) a lâmpada de sódio de alta pressão, e c) as lâmpadas de alta pressão de vapores metálicos.

Lâmpada de Vapor de Mercúrio de Alta Pressão

A lâmpada de vapor de mercúrio de alta pressão HPM (High Pressure Mercury), apresentada na Figura 13.15 é constituída de um tubo de descarga transparente, de dimensões reduzidas inserido em um bulbo de vidro, revestido internamente com uma camada de "fósforo" para correção do índice de reprodução de cor.

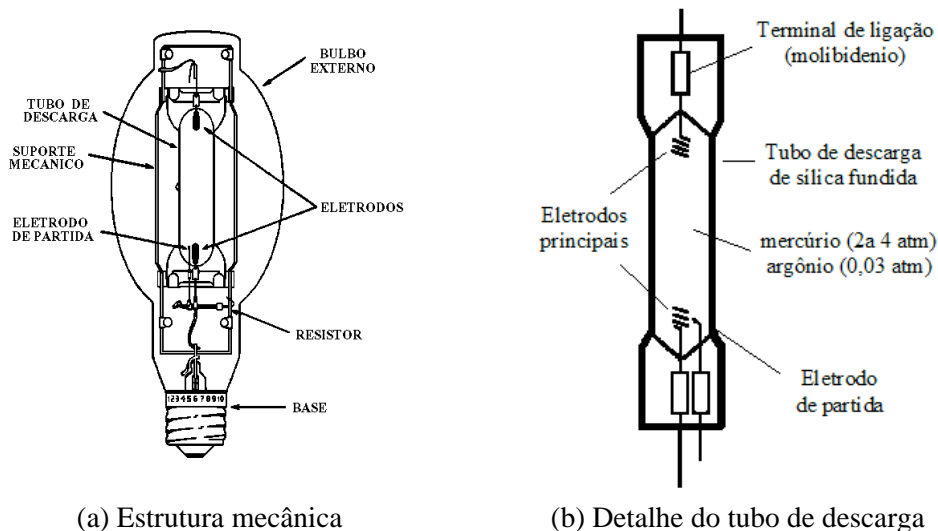


Figura 13.15 – Lâmpada de vapor de mercúrio de alta pressão

O tubo de descarga contém vapor de mercúrio à pressão de 2 a 4 atmosferas e argônio a 0.03 atmosferas. O argônio atua como gás de partida, reduzindo a tensão de ignição e gerando calor para vaporizar o mercúrio. O tubo de descarga é de quartzo para suportar temperaturas superiores a 340°C e evitar absorção da radiação ultravioleta emitida pela descarga.

O bulbo de vidro transparente, com formato ovóide, contém nitrogênio, formando uma atmosfera protetora para: a) reduzir a oxidação de partes metálicas, b) limitar a intensidade da radiação ultravioleta que atinge o revestimento de "fósforo" e c) melhorar as características de isolamento térmica.

A lâmpada de vapor de mercúrio de alta pressão apresenta três eletrodos, dois principais, um em cada extremidade do tubo de descarga, e outro auxiliar, próximo de um dos eletrodos principais, conforme mostra a Figura 13.16 (b). Cada eletrodo principal é constituído de fio de tungstênio, coberto com um material que emite elétrons (óxido de bário) e enrolado em dupla camada sobre uma haste do mesmo metal.

A estabilização da descarga é realizada através de um reator indutivo, mostrado no diagrama da Figura 13.16 [8]. O eletrodo auxiliar encontra-se conectado em série com o eletrodo principal, localizado na extremidade oposta do tubo, através de um resistor de partida. Nestas condições a tensão C.A. da rede é suficientemente elevada para realizar a ignição da descarga de argônio entre o eletrodo auxiliar e o principal adjacente, que vaporiza o mercúrio líquido e produz íons necessários para estabelecer o arco entre os eletrodos principais. Após a ignição do arco principal, a queda de tensão sobre o resistor de partida reduz a diferença de potencial entre os eletrodos auxiliar e principal adjacente, extinguindo o arco entre ambos.

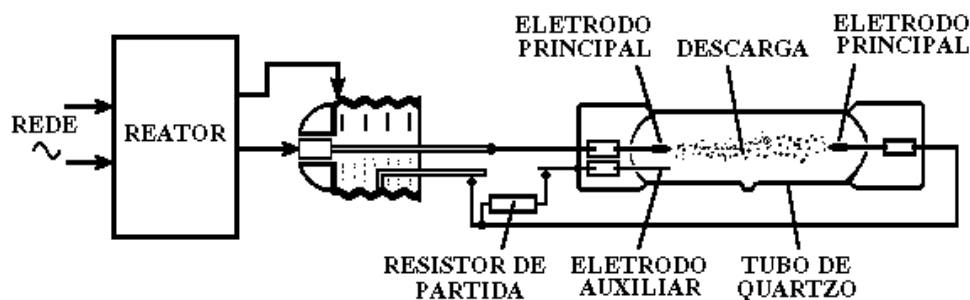


Figura 13.16 – Reator para lâmpada de vapor de mercúrio de alta pressão

Nos instantes iniciais da descarga, a lâmpada emite uma luz verde clara. A intensidade luminosa aumenta gradativamente até estabilizar-se após 6 a 7 minutos, quando a luz se torna branca com uma tonalidade levemente esverdeada.

A radiação visível emitida pelo tubo de descarga apresenta um espectro contínuo, de baixa intensidade, sobre o qual se encontram superpostas as raias características do mercúrio. A luz emitida por uma lâmpada sem revestimento de fósforo, apresenta um baixo índice de reprodução de cor (CRI = 20), devido à ausência de raias vermelhas. O "fósforo" utilizado em lâmpadas de vapor de mercúrio de alta pressão tem uma banda de emissão de 620 nm a 700 nm e consegue melhorar o significativamente o índice de reprodução (CRI = 50).

A tensão de ignição da lâmpada aumenta com a pressão vapor de mercúrio, ou seja, com a temperatura do tubo de descarga. Quando se desliga uma lâmpada alimentada por um reator indutivo convencional, a sua reignição só é possível após 3 a 5 minutos, intervalo de tempo necessário para o esfriamento da lâmpada e consequente queda de pressão.

A Tabela 13.3 apresenta as características de alguns modelos comerciais com revestimento de "fósforo" e base com rosca tipo Edison, utilizada nas lâmpadas de vapor de mercúrio de alta pressão.

Tabela 13.3 - Características de alguns modelos de lâmpadas de vapor de mercúrio de alta pressão

Potência (W)	50	80	125	250	400
Fluxo luminoso (lm)	1800	3700	6300	13000	22000
Eficácia lum.(lm/W)	36	46	50	52	55
Comprimento total (mm)	129	156	177	227	292
Diâmetro máximo (mm)	56	72	77	92	122
Vida útil (horas)	16000	16000	16000	16000	16000

A lâmpada de mercúrio apresenta fluxo luminoso elevado e vida útil longa, porém, a sua eficácia luminosa é relativamente baixa. Este tipo de lâmpada é utilizado em sistemas de iluminação de exteriores, em especial, na iluminação pública urbana.

Lâmpada de Luz Mista

A lâmpada de luz mista, mostrada na Figura 13.17, é uma lâmpada de vapor de mercúrio de alta pressão que dispensa reator, substituído por um filamento interno (semelhante ao de uma lâmpada incandescente), localizado no interior do bulbo conectado em série com o tubo de descarga.

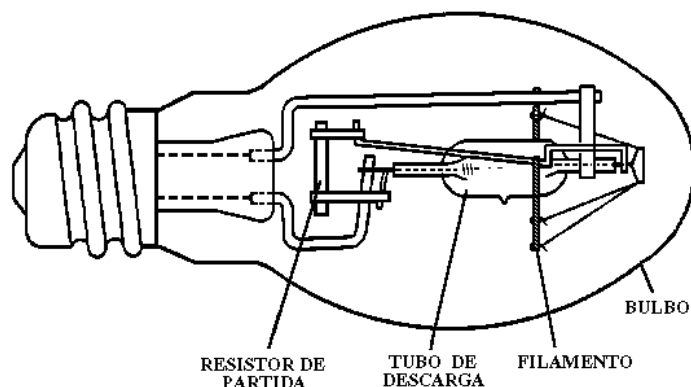


Figura 13.17 - Lâmpada de luz mista

Este tipo de lâmpada apresenta um índice de reprodução de cor variando de 50 a 70, porém sua eficácia luminosa é baixa em razão da potência dissipada no filamento, que determina a sua vida útil, em geral de 6000 horas a 10000 horas. A Tabela 13.4 apresenta as características de alguns modelos comerciais com base tipo rosca Edison.

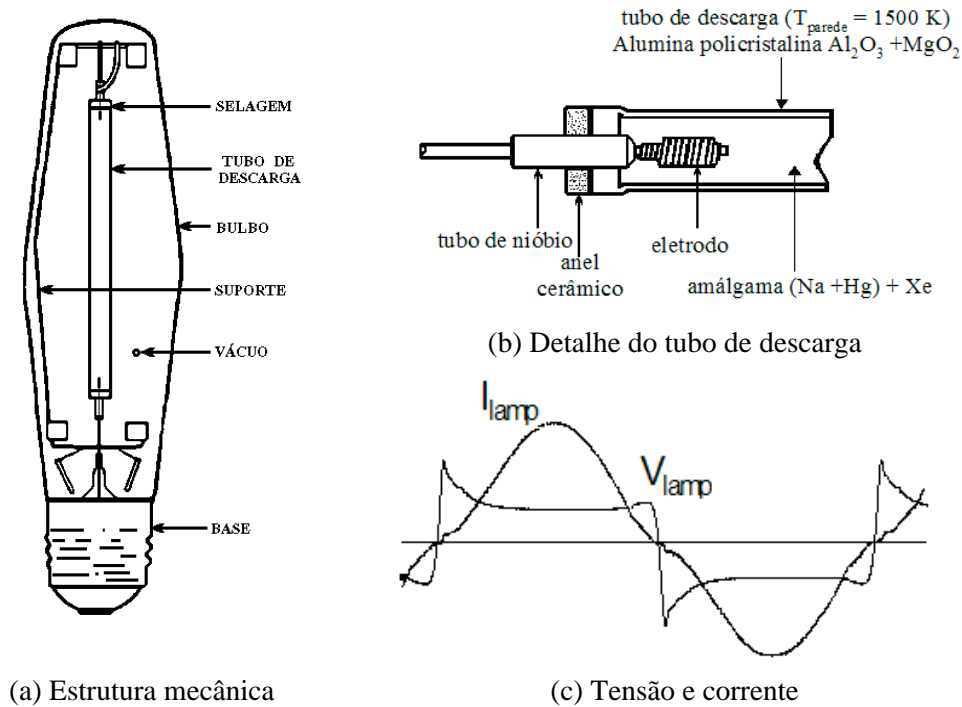
Tabela 13.4 - Características de alguns modelos de lâmpadas de luz mista

Potência (W)	160	250	500
Fluxo luminoso (lm)	3150	5500	14000
Eficácia lum.(lm/W)	20	22	28
Comprimento total (mm)	129	156	177
Diâmetro máximo (mm)	56	72	77

Esta lâmpada é utilizada no Brasil em sistemas de iluminação de interiores no setor comercial em substituição às lâmpadas incandescentes.

Lâmpada de Vapor de Sódio de Alta Pressão

A lâmpada de vapor de sódio de alta pressão HPS (“High Pressure Sodium”), é constituída de um tubo de descarga cilíndrico e translúcido, com um eletrodo em cada extremidade. O tubo de descarga é sustentado por uma estrutura mecânica, sob vácuo, no interior em um bulbo de vidro borossilicado, com formato ovóide ou cilíndrico. A Figura 13.18 apresenta a estrutura interna de uma lâmpada HPS com bulbo cilíndrico.



(a) Estrutura mecânica

(c) Tensão e corrente

Figura 13.18 - Lâmpada de vapor de sódio de alta pressão

A lâmpada de vapor de sódio de alta pressão começou a ser produzida em escala industrial na década de 60 [7], após a síntese da alumina policristalina ou p.c.a. (“policrystalline aluminium oxide”). O p.c.a. é um material cerâmico com elevado ponto de fusão, translúcido (coeficiente de transmissão de luz de 90%) e resistente quimicamente ao vapor de sódio sob alta pressão e a temperatura elevada.

Em lâmpadas convencionais, o tubo de descarga contém vapor de sódio a pressão de 0.13 atmosferas, vapor de mercúrio a pressão de 0.5 a 2 atmosferas e xenônio, que atua como gás de partida, gerando calor para vaporizar o mercúrio e o sódio. O mercúrio, na forma de vapor e a uma pressão significativamente superior ao sódio, reduz a perda por calor e eleva a tensão de arco da lâmpada.

O tubo de descarga possui uma secção reduzida, com espaço suficiente para alojar apenas um eletrodo em cada extremidade. O eletrodo, mostrado em detalhe na Figura 13.18, é construtivamente similar ao da lâmpada de vapor de mercúrio de alta pressão. A haste de tungstênio é fixada por solda no interior de um tubo passante de nióbio que funciona como uma camisa e oferece um grau de liberdade para o posicionamento do tubo de descarga no interior do bulbo.

O bulbo das lâmpadas HPS é em geral transparente ou apresenta um revestimento de “fósforo” neutro para tornar a superfície difusa, sem alterar a distribuição espectral da luz emitida. A lâmpada de vapor de sódio convencional apresenta, em geral, um baixo índice de reprodução de cor ($CRI \approx 20$), porém, uma elevada eficácia luminosa (120 lm/W para a lâmpada de 400 W) e vida útil longa (24 000 horas). No entanto, existem lâmpadas especiais que apresentam um elevado índice de reprodução de cor ($CRI = 85$), porém, com uma eficácia luminosa de 80 lm/W.

Para a estabilização da lâmpada, a utilização de reatores indutivos é atualmente a melhor solução sob o aspecto técnico-econômico. Para a ignição da lâmpada, aplicam-se pulsos de tensão com amplitude de 1.8 a 5.0 kilovolts e largura de $1\mu\text{s}$ a $15\mu\text{s}$ entre os seus eletrodos. Nas lâmpadas HPS convencionais, esta função é desempenhada por um dispositivo externo à lâmpada, conhecido por ignitor. Os ignitores podem ser classificados em dois tipos: a) ignitor conjugado, utilizado em conjunto com um reator indutivo com derivação, conforme mostrado na Figura 13.19 (a), e b) ignitor independente do reator, apresentado na Figura 13.19 (b).

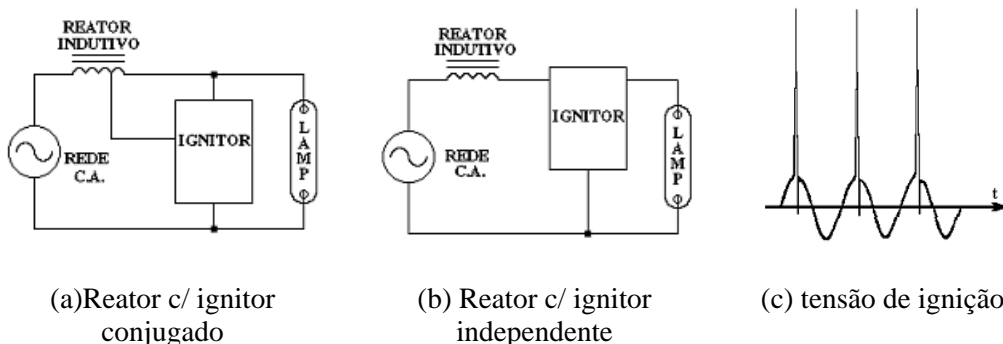


Figura 13.19 – Reator e ignitores para lâmpada de vapor de sódio de alta pressão

Os pulsos de alta tensão são aplicados entre os eletrodos da lâmpada somente até que se estabeleça a circulação de corrente pelo tubo de descarga, devendo ser inibidos em seguida. As normas internacionais especificam que o ignitor deve fornecer pelo menos um pulso a cada ciclo da rede (50 ou 60 Hz), o qual deve estar sobreposto à tensão da rede no instante de pico (máxima amplitude) da senóide, conforme mostra a Figura 13.19 (c).

A tensão de arco da lâmpada é fortemente dependente da temperatura e aumenta naturalmente ao longo da sua vida útil. Portanto, as lâmpadas HPS necessitam de luminárias com características geométricas especiais, para limitar o aquecimento do tubo de descarga pela reflexão das componentes infravermelhas do espectro geradas pela

lâmpada. Caso contrário, podem ocorrer aumentos anormais da tensão de arco e uma redução significativa da vida útil da lâmpada.

Quando se desliga uma lâmpada HPS alimentada por um reator indutivo com ignitor convencional, a sua reignição só é possível após 3 a 7 minutos, intervalo de tempo necessário para o esfriamento da lâmpada.

A Tabela 13.5 apresenta as características de alguns modelos comerciais de lâmpadas HPS convencionais com bulbo em forma de ovóide, utilizadas em instalações de iluminação pública.

Tabela 13.5 - Características de alguns modelos de lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão

Potência (W)	70	125	250	400
Fluxo luminoso (lm)	6500	14000	25000	47000
Eficácia lum.(lm/W)	93	93	100	117
Comprimento total (mm)	156	227	227	292
Diâmetro máximo (mm)	72	92	92	122
Vida útil (horas)	24000	24000	24000	24000

Pode-se verificar que a eficácia da lâmpada HPS é quase o dobro da lâmpada de vapor de mercúrio de alta pressão. Por outro lado, o investimento inicial para uma instalação com lâmpadas HPS é significativamente superior, mas a economia de energia ao longo da vida útil viabiliza a instalação.

Lâmpada HPS com Dispositivo de Ignição Interno

As lâmpadas HPS com dispositivo de ignição interno são projetadas para serem intercambiáveis com lâmpadas de vapor de mercúrio, ou seja, utilizando o mesmo reator e dispensando o ignitor. O tubo de descarga é monolítico e similar ao da lâmpada HPS convencional. Geralmente adiciona-se argônio ou neônio para reduzir a tensão de ignição e utiliza-se uma concentração de mercúrio mais elevada, para se obter uma tensão de arco próxima à da lâmpada de mercúrio de alta pressão.

O dispositivo de ignição, ilustrado na Figura 13.20, é constituído de uma chave térmica (disjuntor bimetálico), inicialmente em curto-circuito e uma espiral de fio envolvendo o tubo de descarga. A circulação de corrente elétrica pela espiral impõe uma distribuição de potencial eletrostática no interior do tubo de descarga, que reduz a tensão de ignição da lâmpada. Após a ignição, o tubo de descarga aquece e a espiral é eletricamente desconectada do circuito pelo disjuntor térmico.

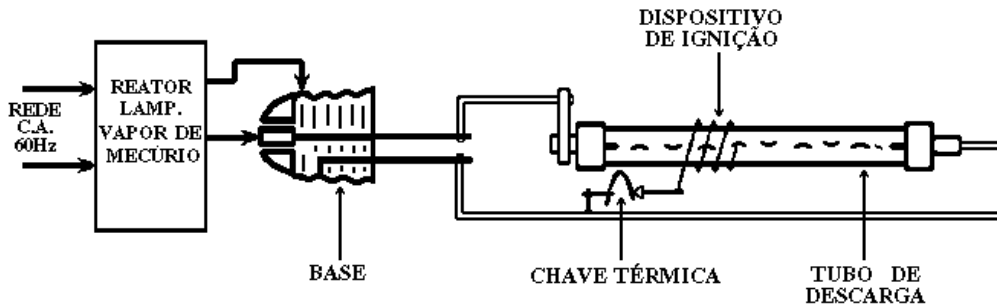


Figura 13.20 - Reator para a lâmpada HPS com ignitor incorporado

As lâmpadas HPS com ignitor incorporado de 110 W, 210 W e 350 W podem ser utilizadas no lugar das lâmpadas de mercúrio de alta pressão de 125 W, 250 W e 400 W respectivamente. A eficácia da lâmpada HPS com ignitor interno é similar à da HPS convencional, porém, sua vida útil é 30% menor.

Lâmpadas de vapor metálico

A lâmpada de vapor metálico HPMH (High Pressure Metal Halide) é construtivamente semelhante à lâmpada de mercúrio de alta pressão, ou seja, utiliza um tubo de descarga de sílica fundida inserida no interior de um bulbo de quartzo transparente. Os modelos mais comuns são do tipo lapiseira, ilustrado na Figura 13.21 (a).

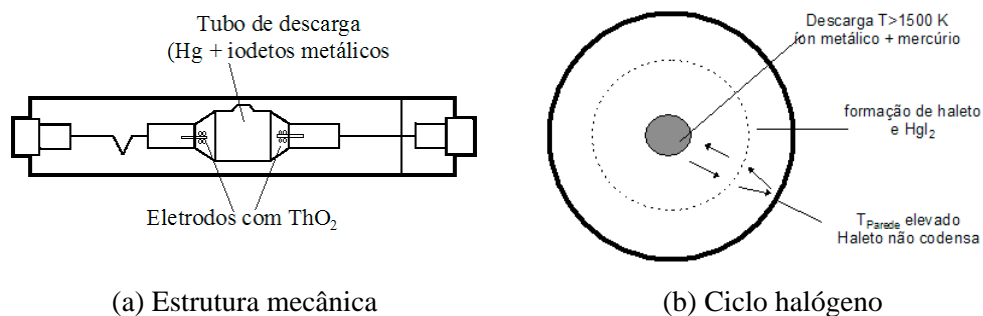


Figura 13.21 - Lâmpada de vapor metálico

O tubo de descarga contém vapor de mercúrio, um gás para ignição (argônio) e haletos metálicos. A temperatura de vaporização dos metais é em geral superior à máxima temperatura suportável pelo material do tubo de descarga. Já o metal na forma de um

halo vaporiza a uma temperatura significativamente inferior. Geralmente utilizam-se iodetos, pois são quimicamente menos reativos. A adição de metais introduz raios no espectro que melhoram as características de reprodução de cores da lâmpada. Um ciclo regenerativo similar ao das lâmpadas incandescentes halógenas ocorre nas lâmpadas HPMH.

A maioria das lâmpadas com potências entre 70 e 400 W utilizam os mesmos ignitores e reatores das lâmpadas HPS.

As lâmpadas de vapor metálico apresentam uma eficácia luminosa de 65 a 100 lm/W e um índice de reprodução de cores superior a 80. A sua vida útil é em geral inferior a 8000 horas. São comercialmente disponíveis lâmpadas de 70 W a 2000 W, sendo utilizadas em aplicações onde a reprodução de cores é determinante, como por exemplo, em estúdios cinematográficos, iluminação de vitrines e na iluminação de eventos com transmissão pela televisão.

13.4 PROJETO DE ILUMINAÇÃO

13.4.1 Considerações Gerais

O projeto de iluminação tem por objetivo estabelecer o melhor sistema de iluminação para uma dada aplicação, notando que muitas vezes a definição de “melhor” é complexa e leva em conta fatores subjetivos. Na elaboração de um projeto de iluminação são considerados, por um lado, os diferentes tipos de lâmpadas e luminárias disponíveis comercialmente e, por outro lado, os requisitos da aplicação, os quais incluem o tipo e o grau de precisão da atividade a ser desenvolvida no local, as pessoas que desenvolverão essa atividade, etc.

De uma forma geral, o sistema de iluminação deve garantir níveis de *iluminamento médio* adequados em função das características do local e da atividade a ser desenvolvida (o iluminamento médio será definido em seguida). Para tanto, as normas técnicas possuem valores de referência [9] habitualmente utilizados em projetos de iluminação. Uma vez escolhida a luminária a ser utilizada, a etapa final do projeto consiste em determinar o número de luminárias necessárias para alcançar o valor de iluminamento médio especificado e ainda proceder a ajustes de uniformização levando em conta a simetria do local.

Define-se **iluminamento médio** E_m em uma dada superfície como sendo o fluxo luminoso total que atravessa a superfície dividido pela área da mesma:

$$E_m = \frac{\phi}{S} , \quad (13.6)$$

em que:

- ϕ - é o fluxo luminoso total que atravessa a superfície (lm);
 S - é a área da superfície considerada (m^2).

A unidade do iluminamento é lm/m^2 , mais conhecida por **lux**. É através do iluminamento médio que são fixados os requerimentos de iluminação em função da atividade a ser desenvolvida em um determinado local [9].

Outro conceito fundamental em luminotécnica é o de *curva fotométrica*. A curva fotométrica consiste em um diagrama polar que fornece a intensidade luminosa (em candela) de uma luminária em cada direção (o ângulo zero, de referência, corresponde à direção vertical descendente). Os valores de intensidade luminosa são sempre fornecidos considerando que a luminária está equipada com uma fonte luminosa padrão com fluxo luminoso total de 1000 lm. Caso a lâmpada utilizada produza um fluxo diferente, os valores de intensidade da curva fotométrica deverão ser corrigidos proporcionalmente. A Figura 13.22 apresenta um exemplo de curva fotométrica.

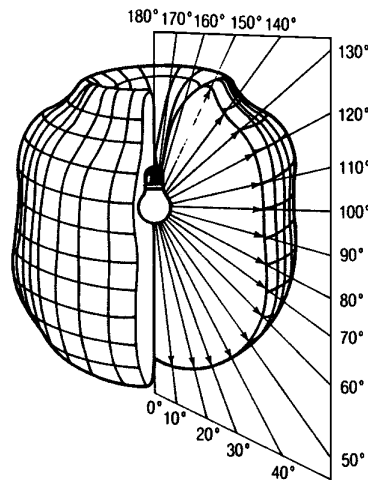


Figura 13.22 - Exemplo de curva fotométrica

Nos próximos itens serão abordados o Método dos Lumens e o Método Ponto a Ponto. O primeiro se destina principalmente a projetar a iluminação de recintos fechados, onde a luz refletida por paredes e teto contribui significativamente no iluminamento médio do plano de trabalho (o plano onde serão desenvolvidas as atividades; por exemplo, o plano das mesas em um escritório). O Método Ponto a Ponto se destina principalmente ao projeto de iluminação de áreas externas, onde a contribuição da luz refletida pode ser

desprezada sem incorrer em erros significativos. Além disso, o Método Ponto a Ponto pode ser utilizado como cálculo verificador de um projeto elaborado pelo Método dos Lumens.

13.4.2 Método dos Lumens

O Método dos Lumens tem por finalidade principal determinar o número de luminárias necessárias para garantir um valor de iluminamento médio especificado a priori. Ele pode ser resumido nos passos a seguir.

Passo 1

Estabelecer o iluminamento médio do local, em função das dimensões do mesmo e da atividade a ser desenvolvida. Conforme mencionado anteriormente, as normas técnicas [9] possuem valores de referência para o iluminamento médio.

Passo 2

Estabelecer o tipo de lâmpada e de luminária a serem utilizadas no local. A experiência do projetista é muito importante neste passo, pois um determinado conjunto lâmpada/luminária disponível comercialmente pode-se adaptar melhor a algumas aplicações e não a outras. Por exemplo, iluminação fluorescente convencional é bastante indicada para iluminação de escritórios, e iluminação incandescente é a opção preferencial para galerias de arte, devido a sua excelente reprodução de cores.

Passo 3

Para a luminária escolhida no passo anterior determina-se o *Coefficiente de Utilização*, C_{Uv} . Este coeficiente, menor ou igual a 1, representa uma ponderação que leva em conta as dimensões do local e a quantidade de luz refletida por paredes e teto. A contribuição das dimensões do local é feita através do chamado *Índice do Local*, K , definido de acordo com:

$$K = \frac{C \cdot L}{H \cdot (C + L)} , \quad (13.7)$$

em que:

C - comprimento do local, considerado como tendo formato retangular (m);

L - largura do local (m);

H - altura de montagem das luminárias (m).

O índice do local permite diferenciar locais com mesma superfície total mas com formato diferente (quadrado, retangular, retangular alongado, etc.), e também incorpora a influência da distância entre o plano das luminárias e o plano de trabalho.

De posse do índice do local, o coeficiente de utilização é facilmente obtido através de tabelas cujas outras variáveis de entrada são a fração de luz refletida por paredes e teto [9].

Passo 4

Para o local de instalação determina-se o *Coefficiente de Manutenção*, C_{Man} . Este coeficiente, menor ou igual a 1, representa uma ponderação que leva em conta a perda de eficiência luminosa das luminárias devido à contaminação do ambiente. Existem ábacos [9] que fornecem valores deste coeficiente em função do grau de contaminação do local e da frequência de manutenção (limpeza) das luminárias.

Passo 5

Determina-se o fluxo luminoso total ϕ (em lumen) que as luminárias deverão produzir, de acordo com a seguinte expressão:

$$\phi = \frac{E \cdot S}{C_{Ut} \cdot C_{Man}} \quad , \quad (13.8)$$

em que:

E - iluminamento médio (em lux) estabelecido no Passo 1;
 $S = C \cdot L$ - área do local (m^2).

Note-se que na Eq. (13.8) os coeficientes de utilização e de manutenção, por serem menores ou iguais a 1, impõem normalmente um aumento no fluxo luminoso que seria obtido se ambos não fossem levados em conta.

Passo 6

Determina-se o número necessário de luminárias n_L :

$$n_L = \frac{\phi}{\phi_L} \quad , \quad (13.9)$$

em que ϕ_L representa o fluxo luminoso (em lumen) de uma luminária (este valor é conhecido uma vez escolhidas a luminária e a lâmpada - Passo 2).

Passo 7

Ajusta-se o número de luminárias de forma a produzir um arranjo uniformemente distribuído (por exemplo, um certo número de linhas cada uma com o mesmo número de colunas de tal forma que o número de luminárias resulte o mais próximo possível do valor determinado no Passo 6).

13.4.3 Método Ponto a Ponto

Para descrever o Método Ponto a Ponto é imprescindível apresentar antes duas leis básicas da Luminotécnica, a Lei do Inverso do Quadrado e a Lei dos Cosenos.

A Lei do Inverso do Quadrado estabelece que o iluminamento médio cai com o quadrado da distância à fonte luminosa. De fato, conforme ilustra a Figura 13.23, o mesmo fluxo luminoso $\Delta\phi$ atravessa as superfícies S_1 e S_2 , situadas a distâncias d_1 e d_2 da fonte luminosa, respectivamente.

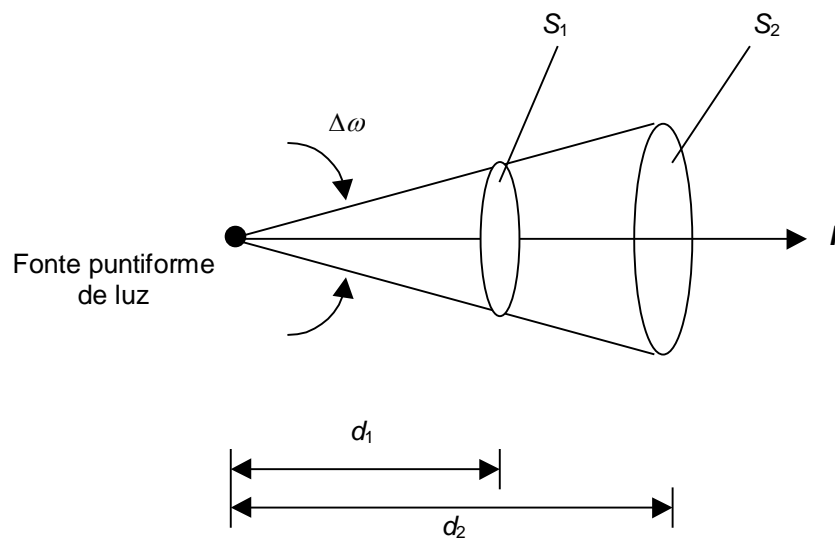


Figura 13.23 - Lei do Inverso do Quadrado

Como o ângulo sólido correspondente às duas superfícies é o mesmo, conclui-se que é válida a seguinte relação:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{\Delta\omega \cdot d_1^2}{\Delta\omega \cdot d_2^2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2. \quad (13.10)$$

Por outro lado, da definição de intensidade luminosa $I = \frac{\Delta\phi}{\Delta\omega}$ resulta:

$$I = \frac{\Delta\phi}{\Delta\omega} = \frac{\Delta\phi}{\left(\frac{S_1}{d_1^2}\right)} = \frac{\Delta\phi}{S_1} \cdot d_1^2 = E_1 \cdot d_1^2, \quad (13.11)$$

$$I = \frac{\Delta\phi}{\Delta\omega} = \frac{\Delta\phi}{\left(\frac{S_2}{d_2^2}\right)} = \frac{\Delta\phi}{S_2} \cdot d_2^2 = E_2 \cdot d_2^2$$

em que E_1 e E_2 indicam o iluminamento médio nas superfícies S_1 e S_2 , respectivamente. Das Eqs. (13.11) resulta imediatamente que:

$$E(d) = \frac{I}{d^2}, \quad (13.12)$$

em que $E(d)$ indica o iluminamento médio a uma distância genérica d da fonte luminosa. A Eq. (13.12) é a expressão matemática da Lei do Inverso do Quadrado.

A Lei dos Cosenos estabelece que se a superfície (plana) considerada não for normal à direção definida pela intensidade luminosa, o iluminamento médio na superfície será menor que no caso da superfície ser normal e, ainda, a relação entre ambos valores é dado pelo cosseno do ângulo formado entre as normais das duas superfícies. A Figura 13.24 ilustra esta situação.

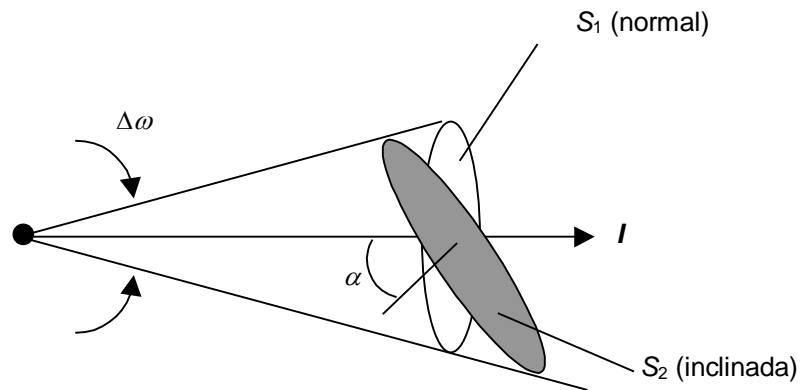


Figura 13.24 - Lei dos Cosenos

Entre as superfícies S_1 e S_2 é válida a relação:

$$\frac{S_1}{S_2} = \cos \alpha . \quad (13.13)$$

Nestas condições, a relação entre os iluminamentos médios em S_1 e S_2 é:

$$E_2 = \frac{\Delta \phi}{S_2} = \frac{I \cdot \Delta \omega}{\left(\frac{S_1}{\cos \alpha} \right)} = \frac{I \cdot \Delta \omega}{S_1} \cdot \cos \alpha = E_1 \cdot \cos \alpha . \quad (13.14)$$

A Eq. (13.14) é a expressão matemática da Lei dos Cosenos.

O Método Ponto a Ponto permite calcular, em qualquer ponto do plano de trabalho, o iluminamento médio causado por uma fonte luminosa localizada em qualquer ponto do local. Inicialmente considere-se a situação da Figura 13.25. O problema é determinar o iluminamento médio no plano horizontal no ponto P , causado pela fonte luminosa.

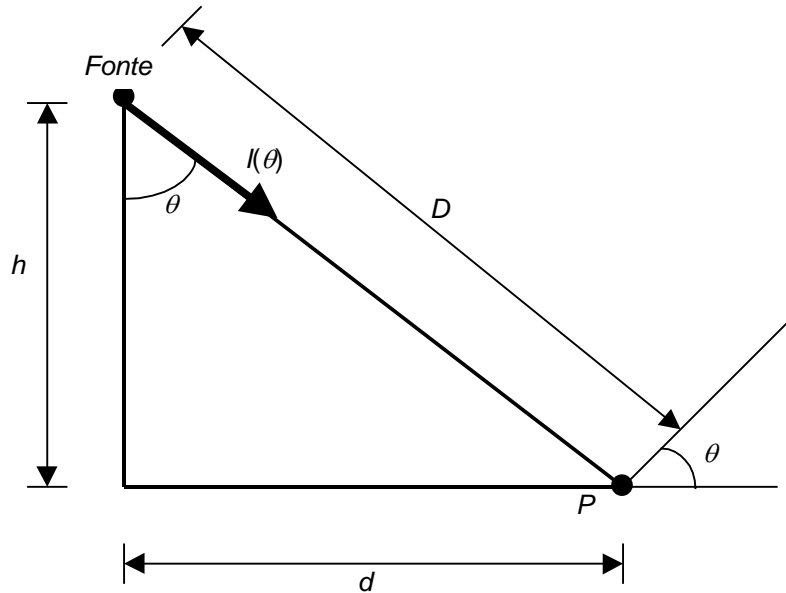


Figura 13.25 - Método Ponto a Ponto

Destaca-se que a intensidade luminosa $I(\theta)$ é dada pela curva fotométrica da luminária, considerada conhecida. O iluminamento no ponto P , no plano perpendicular à intensidade luminosa, é calculado através da Lei do Inverso do Quadrado:

$$E_P = \frac{I(\theta)}{D^2} = \frac{I(\theta)}{\left(\frac{h}{\cos \theta}\right)^2} = \frac{I(\theta)}{h^2} \cdot \cos^2 \theta . \quad (13.15)$$

No ponto P , o iluminamento no plano horizontal é determinado através a Lei dos Cossenos:

$$E_{PH} = E_P \cdot \cos \theta = \frac{I(\theta)}{h^2} \cdot \cos^3 \theta . \quad (13.16)$$

Finalmente, considerando todas as luminárias existentes no local, o iluminamento total no plano horizontal em P é determinado através de:

$$E_{PH \text{ Total}} = \sum_{i=1}^n E_{PH i} , \quad (13.17)$$

em que n indica o número total de luminárias e $E_{PH i}$ é o iluminamento horizontal em P causado pela luminária i . Para obter o iluminamento médio do local, aplica-se a Eq. (13.17) a um conjunto adequado de pontos de verificação e calcula-se finalmente a média aritmética de todos os valores de iluminamento obtidos.

Na prática o iluminamento total em um determinado ponto tem contribuição significativa apenas das luminárias mais próximas ao ponto, sendo que a contribuição das luminárias distantes é muito pequena por causa da Lei do Inverso do Quadrado. De todos modos, o cálculo do iluminamento através do Método Ponto a Ponto (Eq. (13.17)) é feito normalmente através de programa computacional, pois o cálculo manual só é viável em casos simples com poucas luminárias e poucos pontos de cálculo.

Referências Bibliográficas do Capítulo 13

- [1] KAUFMANN, J. E. HAYES, H., ed., **IES Lighting Handbook**, New York, Illuminating Engineering Society of North America, 1981, Vol.1.
- [2] GRUM, F.; BARTLESON, C. J., **Optical Radiation Measurement, Vol 2 Color Measurement**, New York, Academic Press, 1980.
- [3] ADOBE SYSTEMS, **Color and color management and technical guides**, <http://www.adobe.com/support/techguides/color>, visitado em 08/2001.
- [4] ELENBAAS, W., **Light Sources**, Crane Rusch & Company, New York, 1972.
- [5] HENDERSON, S. R., MASDEN A. M., **Lamps and Lighting**, Crane Rusch & Company, New York, 2. edition, 1972.
- [6] COATON, J.R., **Special Issue on Lighting Sources Technology**, IEE Proceedings, Part A, Vol. 127, No. 3, April 1981.
- [7] GROOT, J., van VLIET, J., **The High Pressure Sodium Lamp**, London MacMillan Educational, 1986.
- [8] WAYMOUTH, J. F., Levin, R. E., **Designers Handbook, Light Sources and Applications**, Sylvania GTE Products, Danvers, 1980.
- [9] NBR-5413 - Iluminância de Interiores (Norma Técnica ABNT).