

Iluminação e Lâmpadas

Conceitos básicos de luminotécnica e aplicações

Eletrotécnica Geral

Depto. de Engenharia de Energia e Automação Elétricas
Escola Politécnica da USP

11 de maio de 2017

Radiação eletromagnética

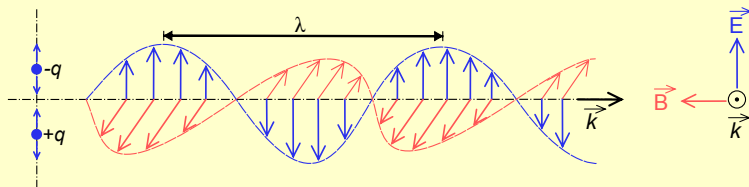
Introdução

- Radiação eletromagnética é uma forma de energia, que pode ser emitida e/ou absorvida por partículas carregadas;
- Exibe comportamento oscilatório e viaja através do espaço a uma velocidade característica e constante. No vácuo, a radiação eletromagnética se propaga à velocidade da luz;
- Caracteriza-se por possuir as componentes de campo elétrico e magnético, que oscilam perpendicularmente entre si, ambos perpendiculares à direção de propagação da energia.

Radiação eletromagnética

Ondas eletromagnéticas

- As curvas a seguir ilustram a relação entre os campos elétrico e magnético, produzidos por cargas elétricas em movimento:



- A equação de propagação no vácuo é dada por:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Radiação eletromagnética

Ondas eletromagnéticas

- Onde:

λ

Comprimento de onda [m];

f

Frequência de radiação [Hz];

$c = 3 \times 10^8$

Velocidade de propagação no vácuo [m/s].

Luz visível

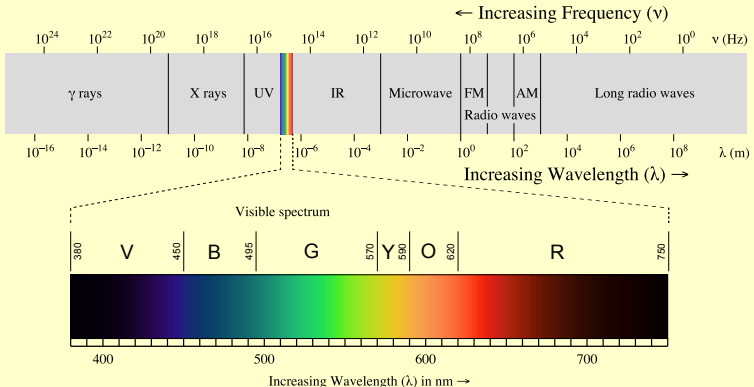
Definições

- Luz visível é a parcela da radiação eletromagnética que é visível pelo olho humano e é responsável pelo sentido da visão;
- Seu comprimento de onda varia de cerca de 380 [nm] a cerca de 740 [nm];
- Esses comprimentos de onda situam-se entre o infravermelho invisível, que possui comprimentos de onda mais longos, e o ultravioleta invisível, que possui comprimentos de onda mais curtos.

Luz visível

Detalhes do espectro de cores

- A figura ilustra a relação entre o espectro de cores e o comprimento de onda da luz visível:



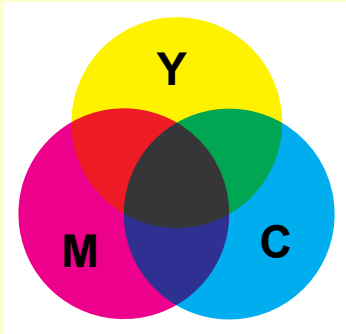
Luz visível

Síntese de cores

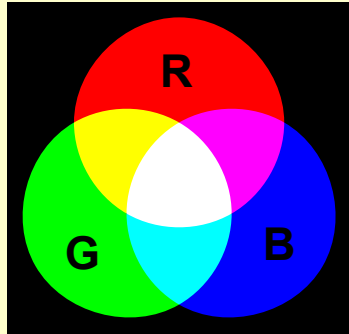
- Os sistemas de cores são tentativas de organizar informações sobre a percepção cromática humana. Pode-se tipificá-los como:
- Sistemas de Síntese aditiva: a cor é percebida diretamente a partir da fonte luminosa;
- Sistemas de síntese subtrativa: a cor é percebida a partir do reflexo da luz sobre uma superfície.

Síntese de cores

Aditiva e subtrativa



Síntese Subtrativa



Síntese Aditiva

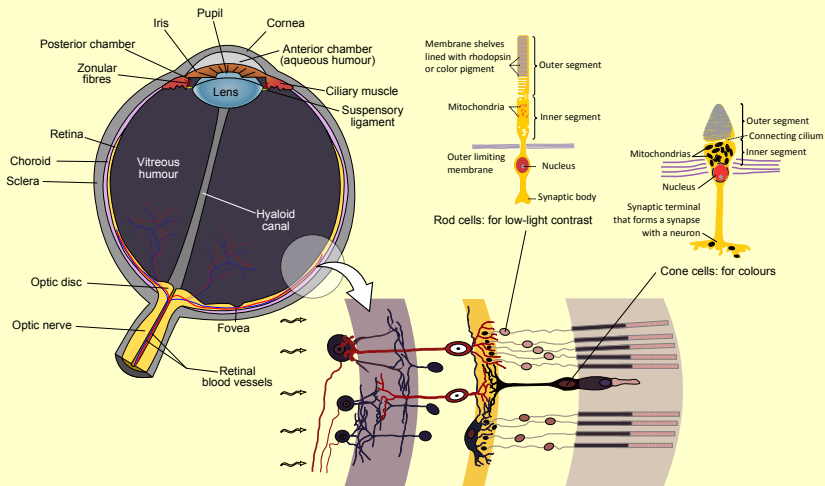
O olho humano

Introdução

- O olho humano é um órgão que reage à luz e permite a visão, incluindo diferenciação de cores e percepção de profundidade;
- Possui dois tipos de células que são essencialmente responsáveis pela visão, os cones e os bastonetes;
- Os cones são responsáveis pela percepção de cor e os bastonetes são responsáveis pelo contraste das imagens. O olho humano pode distinguir cerca de 10 milhões de cores;
- O olho possui uma estrutura capaz de regular a quantidade de luz incidente. Essa estrutura é denominada íris.

O olho humano

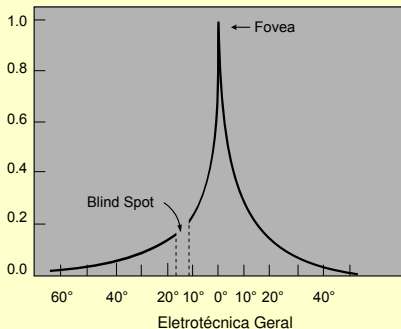
Detalhes



O olho humano

Acuidade visual da retina

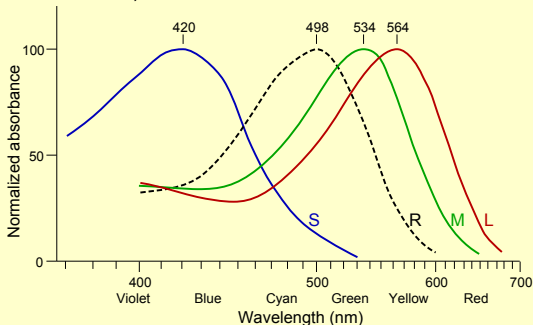
- O sistema foveal do olho humano é a única parte da retina que permite 100% de acuidade visual;
- A linha de visão é a linha virtual que liga a fóvea com o ponto de observação no mundo exterior.



O olho humano

Curva de sensibilidade dos cones

- Há três tipos distintos de cones, que reagem de forma diferente à radiações com diferentes comprimentos de onda;
- A figura a seguir ilustra esse comportamento (S – short; M – middle; L – Long; R – Rod cell).



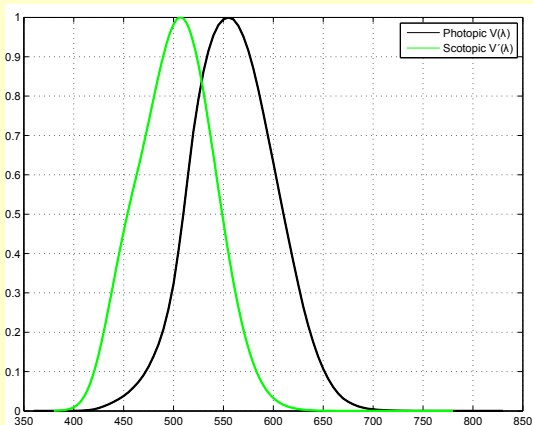
O olho humano

Curva de sensibilidade do olho humano

- O estudo de percepção de cores, conduzido pelo CIE – *Commission Internationale de l'Éclairage* resultou na curva de sensibilidade de um observador padrão;
- O observador padrão é a resposta cromática da visão humana média, através de um determinado ângulo (inicialmente esse ângulo foi definido como 2° da zona foveal);
- Em 1924 o CIE estabeleceu a curva fotóptica, correspondente à visão diurna, do observador padrão;
- Em 1951 o CIE estabeleceu a curva escotóptica, correspondente à visão noturna, do observador padrão.

O olho humano

Curva de sensibilidade do olho humano



Fotometria

Energia radiante

- Energia radiante é a energia da radiação eletromagnética e pode ser obtida a partir da energia irradiada em função do comprimento de onda. Sua unidade é o [J].

$$Q_E = \int_0^{\infty} J_E(\lambda) d\lambda \quad \text{e} \quad J_E(\lambda) = \int_0^t \phi_E(\lambda) dt \quad [\text{J}]$$

- Onde:

$J_E(\lambda)$ Energia irradiada em função de λ [J/nm];

$\phi_E(\lambda)$ Fluxo radiante em função de λ [W/nm].

Fotometria

Energia luminosa

- Energia luminosa é a parcela da energia da radiação eletromagnética, que é visível;
- Pode ser obtida a partir da energia luminosa irradiada em função do comprimento de onda;
- No entanto, deve-se considerar que o olho humano possui diferentes sensibilidades para cada comprimento de onda e, portanto, a determinação da energia luminosa é dada por:

$$Q = \int_{380}^{760} J_E(\lambda) \cdot K(\lambda) d\lambda \quad [\text{J}]$$

- Onde:

$K(\lambda)$ Fator relacionado à visão humana.

Fotometria

Fluxo radiante e fluxo luminoso

- Fluxo radiante ou luminoso é a medida da potência total da radiação eletromagnética total, ou apenas visível, emitida a partir de uma fonte ou incidente em uma determinada superfície;
- Tanto o fluxo radiante como o fluxo luminoso podem ser obtidos a partir da energia radiante e da energia luminosa, respectivamente.
- O fluxo radiante é dado por:

$$\Phi_E = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta Q_E}{\Delta t} \quad [\text{W}]$$

- O fluxo luminoso é dado por

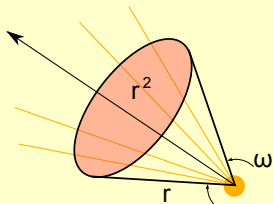
$$\Phi = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad [\text{lúmens}] = [\text{lm}]$$

Fotometria

Intensidade luminosa de fonte puntiforme

- Intensidade luminosa é uma medida do fluxo luminoso emitido por uma fonte numa direção particular, por unidade de ângulo sólido (esferorradiano ou esterradiano);
- A intensidade luminosa é dada por:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\omega} \quad [\text{candelas}] = \left[\frac{\text{lm}}{\text{sfr}} \right]$$

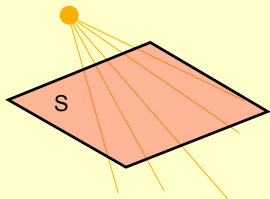


Fotometria

Densidade superficial de fluxo

- Iluminância, ou Nível de Iluminamento, é a medida de fluxo luminoso total incidente sobre uma superfície, por unidade de área dessa superfície;
- A iluminância é dada por:

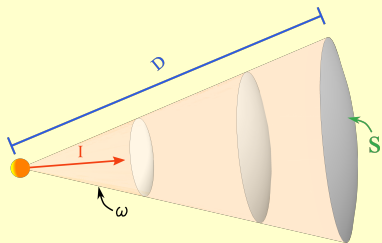
$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi}{\Delta S} \quad [\text{lux}] = \left[\frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \right]$$



Lei do inverso do quadrado

$$E = f(I, D)$$

- Iluminamento E na superfície S , definida pelo ângulo sólido ω , a uma distância D da fonte luminosa de intensidade I ;



$$\omega = \frac{S}{D^2}$$

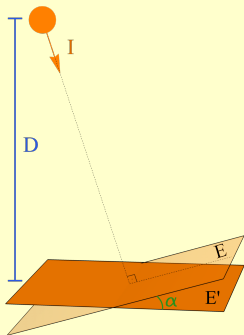
$$I = \frac{\phi}{\omega} \rightarrow \omega = \frac{\phi}{I}$$

$$\frac{S}{D^2} = \frac{\phi}{I} \rightarrow \frac{\phi}{S} = E = \frac{I}{D^2}$$

Lei do cosseno

$$E = f(\alpha)$$

- Iluminamento em plano não perpendicular ao raio incidente



$$\left\{ \begin{array}{l} E = \frac{I}{D^2} \rightarrow \text{plano perpendicular à fonte} \\ E' = E \cos \alpha \rightarrow \text{plano inclinado} \end{array} \right.$$

Lâmpadas elétricas

Conceitos gerais

- Lâmpadas elétricas são dispositivos capazes de converter energia elétrica em energia luminosa;
- Existem três tipos de lâmpadas elétricas:
 - Lâmpadas incandescentes: produzem luz por meio de um filamento aquecido;
 - Lâmpadas de descarga: produzem luz por meio de um arco elétrico através de um gás;
 - Light-emitting diode (LED): produzem luz por um fenômeno conhecido como eletroluminescência, que consiste na emissão de luz em um sólido em decorrência de uma corrente elétrica que o atravessa.

Lâmpadas elétricas

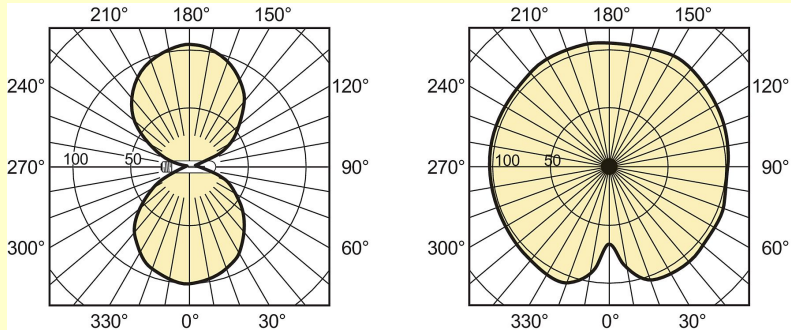
Parâmetros importantes

- Lâmpadas elétricas podem ser classificadas de acordo com os seguintes parâmetros:
 - Eficiência luminosa: razão entre o fluxo luminoso e a potência elétrica consumida [lm/W];
 - Vida útil: tempo de vida médio (MTTF – Mean Time To Failure);
 - Temperatura da cor: temperatura de um corpo negro ideal, que irradia luz de tonalidade comparável à da fonte de luz (para efeitos de projetos de luminotécnica, a temperatura está relacionada ao conforto visual);
 - Cor: corresponde ao espectro de cor da luz emitida;
 - Índice de reprodução de cores (IRC): medida quantitativa da capacidade para reproduzir as cores de vários objetos, em comparação com uma fonte de luz ideal.

Lâmpadas elétricas

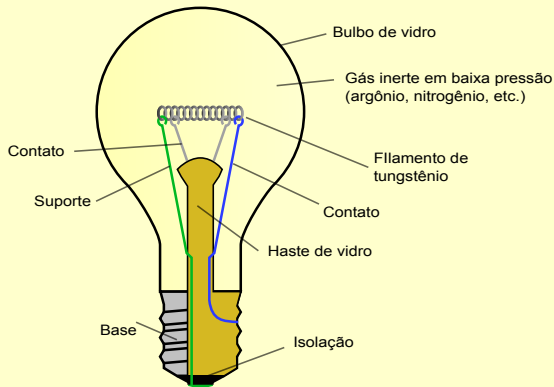
Parâmetros importantes

- Além dos parâmetros já descritos, os fabricantes fornecem também a curva de intensidade luminosa da lâmpada, conforme o exemplo a seguir.



Lâmpadas incandescentes convencionais

Estrutura interna



Lâmpadas incandescentes convencionais

Detalhes

- A emissão de luz ocorre por um filamento de tungstênio aquecido ao ponto de incandescência;
- O bulbo protege o filamento de tungstênio da oxidação de modo a aumentar sua vida útil;
- O filamento de tungstênio é construído na forma de dupla espiral, para aumentar a área radiante;
- Variação de tensão: influência no fluxo luminoso e na vida útil.

Lâmpadas incandescentes convencionais

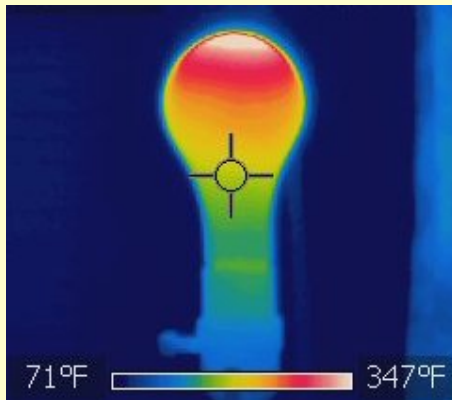
Informações sobre lâmpada incandescente de bulbo convencional

Características Técnicas da Lâmpada

Código do produto	Código Local	Nome do Produto	Fluxo Luminoso da Lâmpada	Índice de Reprodução de Cor	Código do produto	Código Local	Nome do Produto	Fluxo Luminoso da Lâmpada	Índice de Reprodução de Cor
920052835892	STD-127V25-I	STD 25W E27 127V A55 CL 1CT	-	100 Ra8	920056535892	STD-127V100-I	STD 100W E27 127V A55 CL 1CT	-	100 Ra8
920052842992	STD-220V25-I	STD 25W E27 220V A55 CL 1CT	260 Lm	100 Ra8	920056542992	STD-220V100-I	STD 100W E27 220V A55 CL 1CT	1340 Lm	100 Ra8
920053835892	STD-127V40-I	STD 40W E27 127V A55 CL 1CT	-	100 Ra8					
920053842992	STD-220V40-I	STD 40W E27 220V A55 CL 1CT	415 Lm	100 Ra8					
920054635892	STD-127V60-I	STD 60W E27 127V A55 CL 1CT	-	100 Ra8					
920054642992	STD-220V60-I	STD 60W E27 220V A55 Clear 1CT	-	100 Ra8					

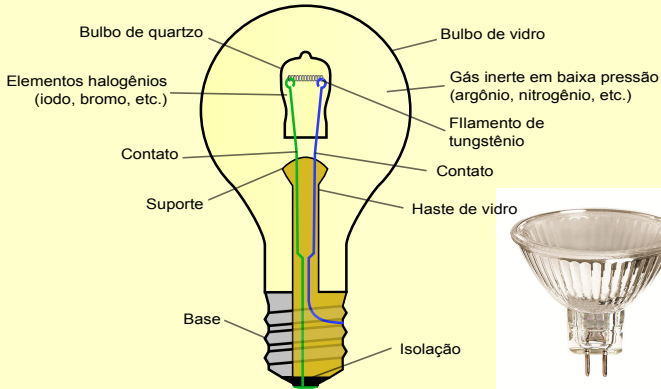
Lampadas incandescentes convencionais

Imagem térmica



Lâmpadas halógenas

Estrutura interna



Lâmpadas halógenas

Detalhes

- A emissão de luz ocorre por um filamento de tungstênio aquecido ao ponto de incandescência, porém a uma temperatura superior à temperatura da lâmpada incandescente convencional;
- O bulbo de quartzo, com os elementos halogênios, protege o filamento de tungstênio da oxidação de modo a aumentar sua vida útil;
- O bulbo de quartzo não deve ser tocado com a mão, para evitar depósito de gordura no vidro e a formação de microfissuras;

Lâmpadas halógenas

Detalhes

- A lâmpada halógena emite mais radiação ultravioleta e infravermelha do que as lâmpadas comuns;
- Normalmente o revestimento dicróico “absorve” parte do calor produzido pela radiação infravermelha, por meio de um fenômeno denominado interferência destrutiva, e o vidro possui filtro para radiação ultravioleta.

Lâmpadas incandescentes halógenas

Informações sobre lâmpada incandescente halógena - Par 20

Características Gerais

Código do produto	Código Local	Nome do Produto	Bulbo	Base	Posição de Funcionamento	Vida útil a 50% de falhas	Vida útil nominal (horas)	Vida útil nominal (anos)
924713344283	PAR20-50W230-25	HalogenA PAR20 50W E27 230V 25D 1CT	PAR20	E27	qualquer uma	2000 hr	2000 hr	2 an

Características Técnicas da Lâmpada

Código do produto	Código Local	Nome do Produto	Ângulo do fecho	Índice de Reprodução de Cor	Intensidade Luminosa	Temperatura de cor
924713344283	PAR20-50W230-25	HalogenA PAR20 50W E27 230V 25D 1CT	25 D	100 Ra8	850 (max) cd	2800 K

Lâmpadas halógenas

Funcionamento do elemento halogênio



<http://www.lamptech.co.uk/Movies/Halogen Cycle.WMV>

Lâmpadas a descarga

Detalhes

- Lâmpadas a descarga são uma família de lâmpadas elétricas que produzem luz por meio da descarga elétrica entre eletrodos, através de um gás ionizado (plasma);
- A característica da descarga depende da pressão do gás (alta pressão ou baixa pressão, quando em operação), bem como a frequência do sinal de corrente;
- Tipicamente, essas lâmpadas utilizam algum gás nobre (argônio, neônio, criptônio e xenônio) ou uma mistura destes gases, que são responsáveis pela partida da lâmpada;
- Além de gases nobres, são preenchidas com materiais metálicos (p. ex. sódio, mercúrio e haletos), que são responsáveis pela emissão de radiação luminosa.

Lâmpadas a descarga

Princípio de operação

- Em funcionamento, o gás está ionizado e elétrons livres, acelerados pelo campo elétrico dentro da lâmpada, colidem com os átomos do gás e do metal;
- Alguns elétrons nos orbitais atômicos desses átomos são excitados pelas colisões e mudam para um estado de energia mais elevado;
- Quando o elétron retorna ao seu estado de menor energia há a emissão de um fóton, o que resulta em radiação luminosa (infravermelha, visível ou ultravioleta);
- Algumas lâmpadas convertem a radiação ultravioleta em luz visível com um revestimento fluorescente no interior da sua superfície de vidro;

Lâmpadas a descarga

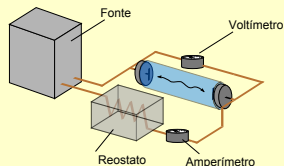
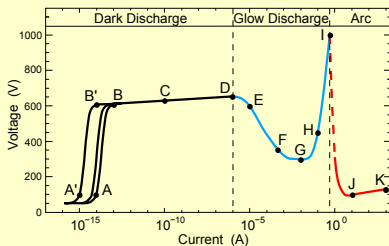
Classificação

- Lâmpadas a descarga podem ser classificadas quanto à pressão do gás no seu interior, bem como à operação dos seus eletrodos;
- Quando a pressão dentro do tubo de descarga é bem inferior à pressão atmosférica, diz-se que a lâmpada é do tipo baixa pressão, caso contrário, diz-se que a lâmpada é do tipo alta-pressão;
- Com relação aos eletrodos, há dois tipos:
 - Cátodo quente: consiste em um filamento de tungstênio que opera em altas temperaturas, emitindo elétrons por meio de um efeito termiônico, o que ajuda a manter o arco;
 - Cátodo frio: consiste em uma placa metálica que opera à temperatura da lâmpada. O início do processo de formação do arco elétrico ocorre quando os eletrodos são submetidos a uma tensão elevada, que deve ser aplicada para ionizar o gás.

Característica da descarga em gases

Relação da tensão e corrente

- A figura ilustra a curva característica (corrente *versus* tensão) de uma descarga luminosa de gás neônio a uma pressão de 1 [torr], entre dois eletrodos planos separados por 50 [cm].



C. F. Gallo, Coronas and Gas Discharges in Electrophotography: A Review, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.IA-13, No. 6, p.739 (1975)

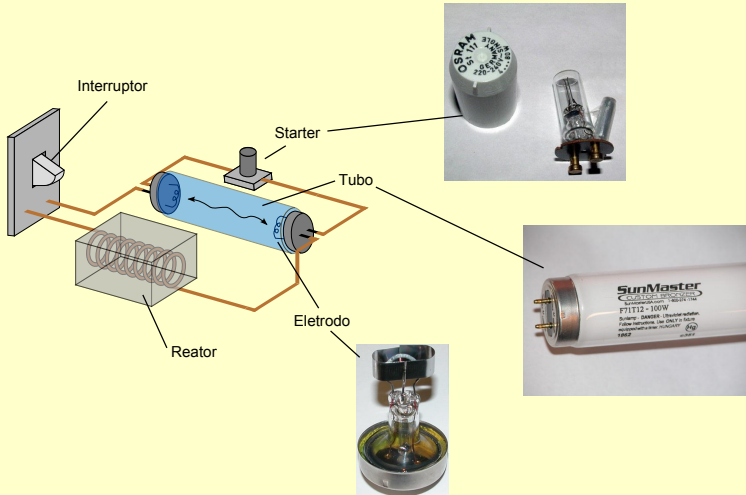
Lâmpadas a descarga

Lâmpadas de baixa pressão

- Trabalham com pressões internas bem inferiores à pressão atmosférica (p. ex. lâmpadas fluorescentes operam a uma pressão de cerca de 0,3% da pressão atmosférica);
- A potência do arco elétrico é de cerca de 0,5 a 2 [W/cm];
- Lâmpadas fluorescentes: comum na iluminação de escritórios e outras aplicações (possui eficiência luminosa elevada);
- Lâmpadas de neon: comum na iluminação de publicidade em placas, e consistem em longos tubos cheios de vários gases a baixa pressão;
- Lâmpadas de sódio de baixa pressão: são as lâmpadas de descarga mais eficientes. No entanto, a luz praticamente monocromática amarela só é aceitável para iluminação de rua e aplicações similares.

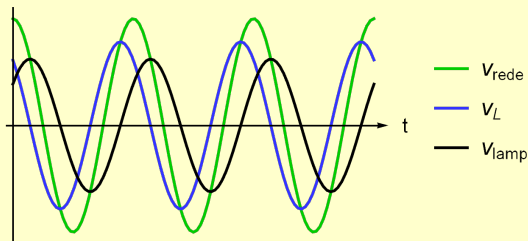
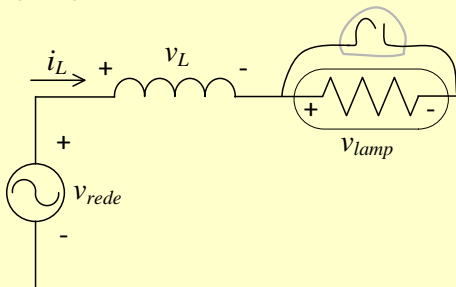
Lâmpadas fluorescente com *starter*

Estrutura interna



Lâmpadas fluorescente com *starter*

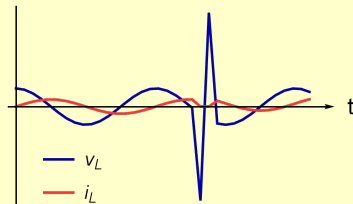
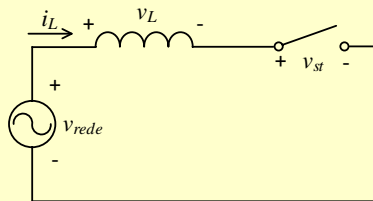
Comportamento em regime permanente



Queda de tensão no indutor reduz a tensão na lâmpada em regime permanente.

Lâmpadas fluorescente com *starter*

Comportamento do reator com variação de corrente

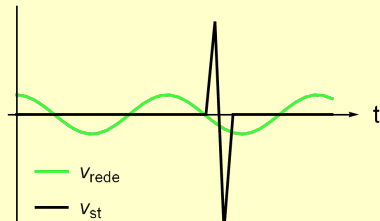


Chave abre e fecha bruscamente:

$$v_L(t) = e_{ind}(t) = \frac{d\lambda}{dt}$$

$$v_L(t) = \frac{d(L \cdot i(t))}{dt} = L \frac{di(t)}{dt}$$

$$v_{st}(t) = v_{rede}(t) - v_L(t)$$



Lâmpadas fluorescente com *starter*

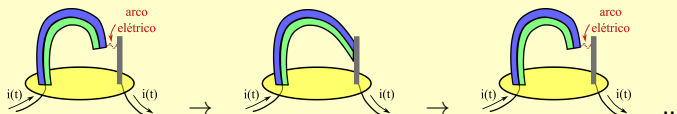
Operação do *starter*

- Seja uma lâmina bimetálica, na qual os metais têm coeficientes de dilatação térmica diferentes: α_1 (verde) e α_2 (azul), e $\alpha_1 > \alpha_2$:

$$T = T_0$$



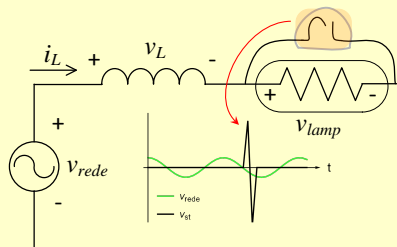
$$T = T_1 > T_0$$



$$T_{curto} < T_{arco}$$

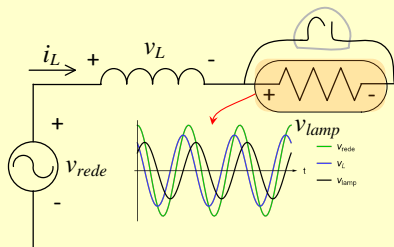
Lâmpadas fluorescente com *starter*

Tensões antes e após a descarga



Antes da descarga se estabelecer na lâmpada (lâmpada em circuito aberto), o starter em paralelo está submetido a elevados picos de tensão, devido à grande variação (di/dt).

Exemplo típico: 400 [V] para lâmpada de 40 [W], 127 [V].



Após a descarga, a queda de tensão através da lâmpada (e nos terminais do starter), em regime permanente, é menor que a tensão da fonte, devido à presença do reator no circuito.

Exemplo típico: 105 V para lâmpada de 40[W], 127 [V].

Lâmpadas fluorescente com *starter*

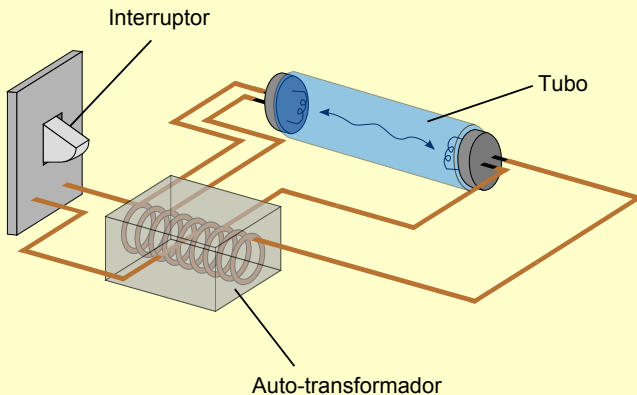
Funcionamento



<http://www.youtube.com/watch?v=z55566ep0Hg>

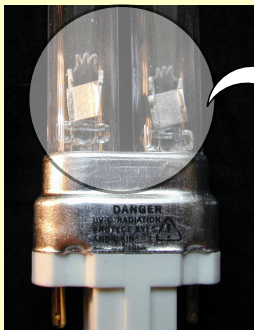
Lâmpadas fluorescente de partida rápida

Estrutura interna

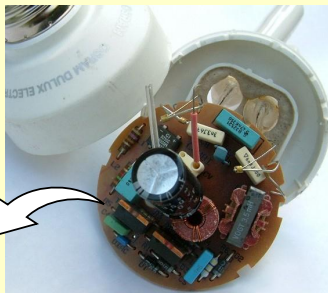


Lâmpadas fluorescentes compactas

Estrutura interna



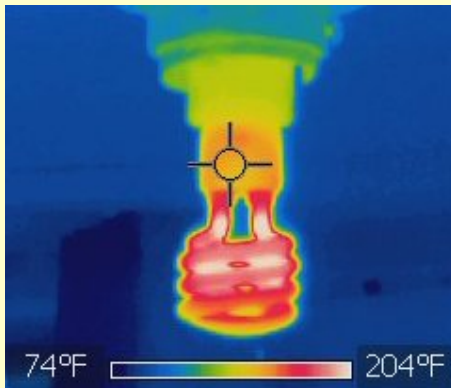
Eletrodos



Reator
Eletrônico

Lâmpadas fluorescentes compactas

Imagem térmica



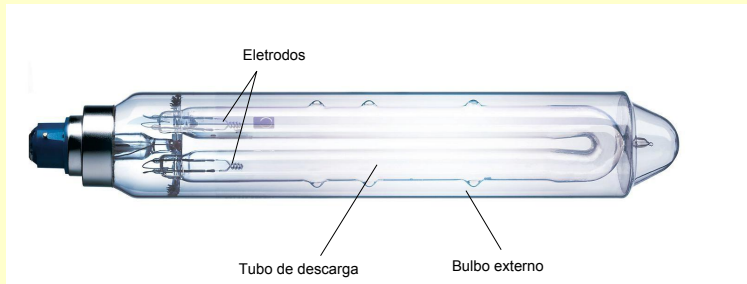
Lâmpadas fluorescentes compactas

Reatores Eletrônicos

- O reator eletrônico é constituído por uma placa de circuito, que possui um retificador, um filtro e um inversor, normalmente composto por dois transistores de comutação;
- A corrente de entrada é primeiro retificada, e depois invertida, pelos transistores, para uma corrente alternada de alta frequência;
- Como resultado, há os seguintes benefícios:
 - Redução do consumo de energia e aumento do fator de potência;
 - Aumento da eficiência luminosa;
 - Aumento da vida útil do conjunto;
 - Redução nas dimensões físicas e no peso do reator;
 - Partida rápida da lâmpada;

Lâmpadas de vapor de sódio de baixa pressão

Estrutura interna



Lâmpadas a descarga

Lâmpadas de alta pressão

- Trabalham com pressões internas levemente inferiores ou superiores à pressão atmosférica (p. ex. a lâmpada de vapor de sódio de alta pressão possui pressão de cerca de 14% a 28% da pressão atmosférica, no entanto algumas lâmpadas para uso automotivo podem possuir pressões de até 50 atmosferas);
- Lâmpadas de vapores metálicos: produzem luz com grande IRC e podem atingir eficiências elevadas. Usualmente são utilizadas em estacionamentos, lojas, quadras esportivas;
- Lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão: estas lâmpadas possuem um IRC inferior às lâmpadas de vapores metálicos, porém possuem uma eficiência superior. Podem ser utilizadas para iluminação pública;

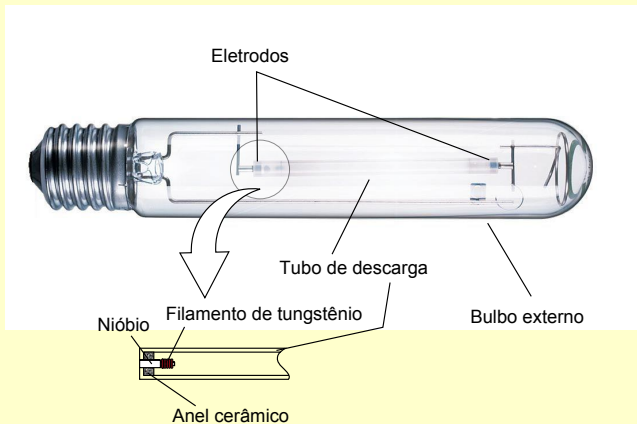
Lâmpadas a descarga

Lâmpadas de alta pressão

- Lâmpadas de vapor de mercúrio: são as mais antigas lâmpadas do tipo de alta pressão. Atualmente têm sido substituídas na maioria das aplicações pelas lâmpadas de vapores metálicos e pela lâmpada de vapor de sódio de alta pressão.

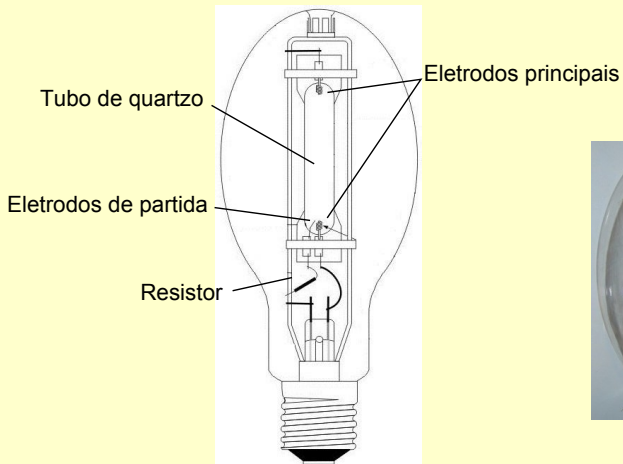
Lâmpadas de vapores de sódio de alta pressão

Estrutura interna



Lâmpadas de vapor de mercúrio

Estrutura interna



Lâmpadas de vapores metálicos

Características

- As lâmpadas de vapores metálicos estão substituindo as lâmpadas de vapor de mercúrio dada a sua eficiência superior e a qualidade do espectro da luz emitida;
- São bastante semelhantes às lâmpadas de vapor de mercúrio, porém no tubo de descarga há o acréscimo de haletos (iodo, bromo, etc.);

Lâmpadas a descarga

Características comparativas

Tipo de lâmpada	Eficiência [lm/W]	Vida útil [h]
Fluorescente	≈ 50-60	≈ 2000
Vapor de sódio de baixa pressão	≈ 200	≈ 18000
Vapor de sódio de alta pressão	≈ 100-150	≈ 20000
Vapor de mercúrio	≈ 35-65	≈ 24000
Vapor metálico	≈ 75-100	≈ 6000-15000

Para todos esses tipos de lâmpadas, variações de tensão podem produzir o desligamento do arco.

Diodos emissores de luz

Características básicas

- É uma fonte luminosa bastante utilizada como lâmpada indicadora em muitos dispositivos eletrônicos;
- Produzem luz por um fenômeno conhecido como eletroluminescência, que consiste na emissão de luz em um sólido em decorrência de uma corrente elétrica que o atravessa;
- Cada vez mais utilizados para a iluminação de outra natureza (residencial, iluminação pública, veicular, etc.);

Diodos emissores de luz

Características básicas

- Os primeiros emitiam luz de baixa intensidade no espectro vermelho, mas versões modernas estão disponíveis em outros comprimentos de onda visíveis (vermelho, verde e azul), bem como o ultravioleta e o infravermelho, com intensidades bastante elevadas;
- O led branco pode ser composto pela combinação de três leds (RGB) ou a partir do led azul, com a lente recoberta por fósforo.

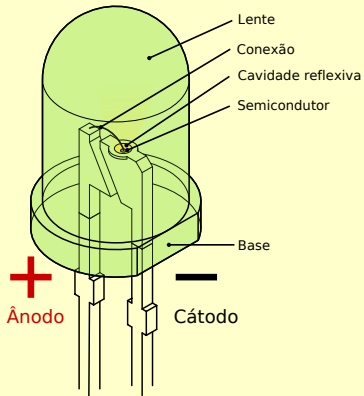
Diodos emissores de luz

Vantagens e desvantagens

- Consumo de energia mais baixo (melhor eficiência);
- Vida útil maior;
- Robustez física;
- Custo elevado, quando comparados com outras alternativas;
- Necessidade de mecanismos de dissipação de calor mais eficientes, pois a área de emissão de radiação luminosa é pequena e, portanto, o dispositivo produz bastante calor por unidade de área.

Diodos emissores de luz

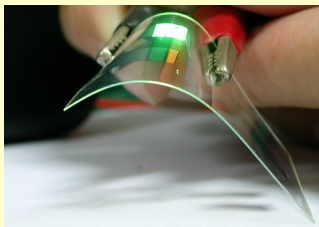
Estrutura interna



Diodos orgânicos emissores de luz

Características básicas

- É um diodo emissor de luz, cuja camada eletroluminescente é uma película de composto orgânico (carbono) que emite luz em resposta a uma corrente elétrica;



Luminárias

Conceitos gerais

- São os aparelhos de fixação das lâmpadas. Devem apresentar as seguintes características básicas:
 - Agradáveis ao observador;
 - Modificar o fluxo luminoso da fonte de luz;
 - Possibilitar a fácil instalação e manutenção.
- Classificação das luminárias:
 - Direta: o fluxo luminoso é dirigido diretamente ao plano de trabalho;
 - Indireta: o fluxo luminoso é dirigido diretamente em oposição ao plano de trabalho;

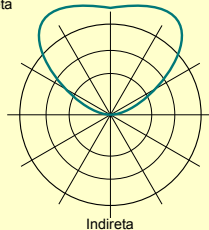
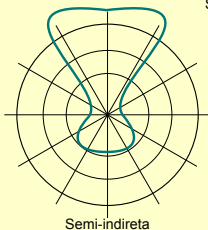
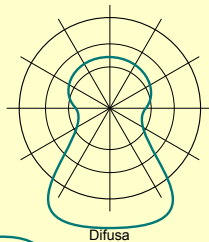
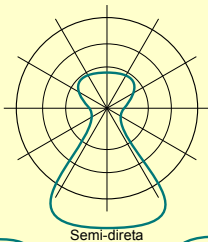
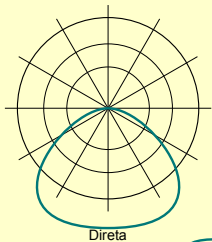
Luminárias

Conceitos gerais

- Classificação das luminárias (cont.):
 - Semi-direta: quando a maior parte do fluxo luminoso atinge o plano de trabalho diretamente e o restante, por reflexão;
 - Semi-indireta: quando a maior parte do fluxo luminoso atinge o plano de trabalho por reflexão e o restante, diretamente;
 - Geral-difusa: quando o fluxo luminoso apresenta praticamente a mesma intensidade em todas as direções (consultar literatura específica com os fabricantes).

Luminárias

Classificação das luminárias



Projeto de luminotécnica

Método dos lúmens e Método ponto a ponto

- O projeto de luminotécnica consiste em:
 - Definição do aparelho de iluminação a ser empregado (lâmpada e luminária);
 - Determinação da quantidade de aparelhos de iluminação para atingir o fluxo luminoso desejado;
 - Definição dos pontos de instalação dos aparelhos de iluminação.
- Existem dois métodos que podem ser utilizados para o projeto de luminotécnica:
 - Método ponto a ponto: utilizado normalmente em espaços abertos;
 - Método dos lúmens: utilizado normalmente em espaços fechados.

Método dos lúmens

Detalhamento do método

- O método consiste nas seguintes etapas:
 - Determinação do nível de iluminação (E) requerido, para a atividade a ser desenvolvida no local;
 - Escolha do aparelho de iluminação (eficiência, cor, índice de reprodução de cores, etc.);
 - Determinação do fator de utilização (F_u), em função do fator do local (k);
 - Determinação do fator de depreciação (F_d), em função do período de manutenção pretendido e das condições do local;
 - Cálculo dos aparelhos de iluminação necessários e fixação do espaçamento entre aparelhos.

Método dos lúmens

Determinação do número de aparelhos a partir do fluxo luminoso total

- A partir do fluxo luminoso total necessário (Φ_{Total}) e do fluxo individual de cada aparelho de iluminação (Φ_{Aparelho}), é possível determinar o seu número (N);

$$N = \frac{\Phi_{\text{Total}}}{\Phi_{\text{Aparelho}}}$$

- O cálculo do fluxo luminoso total é feito por meio da equação a seguir:

$$\underbrace{\Phi_{\text{Total}}}_{\text{fluxo luminoso total}} = \frac{E \times C \times L}{F_u \times F_d}$$

Método dos lúmens

Determinação do número de aparelhos a partir do fluxo luminoso total

- Onde:

E Iluminamento [lux]

F_u Fator de utilização

C Comprimento do local [m]

F_d Fator de depreciação

L Largura do local [m]

Método dos lúmens

Determinação do nível de iluminamento – E

- O nível de iluminamento é dado pela norma ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 - Iluminação de ambientes de trabalho.
- Exemplos:
 - Área de circulação e corredores: 100 lux
 - Refeitórios/cantinas: 200 lux
 - Enfermarias: 500 lux
 - Indústria de borracha, indústria plástica e química: produção farmacêutica: 500 lux
 - Indústria de borracha, indústria plástica e química: inspeção de cor: 1000 lux

Método dos lúmens

Determinação do fator de utilização – F_u

- O fator de utilização descreve a influência do tipo de aparelho de iluminação escolhido do tipo de execução de paredes, teto e piso, bem como do índice do local;
- O primeiro passo é calcular o índice do local k , que pode ser obtido a partir da equação:

$$\underbrace{k}_{\text{índice do local}} = \frac{C \times L}{h_{\text{útil}} \times (C + L)}$$

- Onde:

C Comprimento do local [m];

L Largura do local [m];

$h_{\text{útil}}$ Altura do plano de trabalho até a luminária. **ATENÇÃO!**

Método dos lúmens: determinação de F_u

Fatores de reflexão

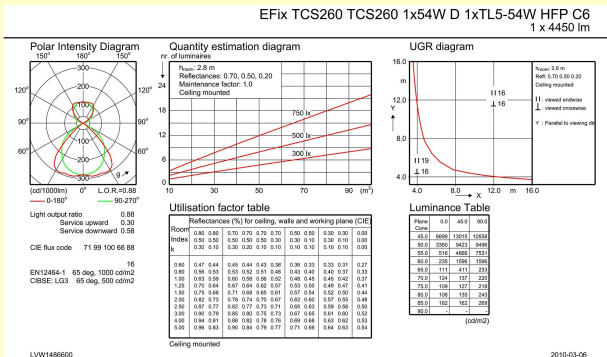
- Em seguida, deve-se obter o fator de reflexão;
- Esse fator é composto por três números e quantiza a influência da execução das paredes, teto e piso na determinação do fator de utilização;
- Normalmente, os valores utilizados são:

Cor	Teto	Parede	Plano de trabalho
Branca	0,7 (70%)	0,5 (50%)	0,1 (10%)
Clara	0,5 (50%)	0,3 (30%)	0,1 (10%)
Média	0,3 (30%)	0,1 (10%)	0,1 (10%)

Método dos lúmens

Determinação de F_U

- A partir do fator do local – k – e dos índices de reflexão de paredes, teto e piso, pode-se consultar o *datasheet* do conjunto lâmpada e luminária para se obter F_U ;



Método dos lúmens

Detalhes da tabela fator de utilização

Utilisation factor table

Room Index k	Reflectances (%) for ceiling, walls and working plane (CIE)										
	0.80	0.80	0.70	0.70	0.70	0.70	0.50	0.50	0.30	0.30	0.00
	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.30	0.30	0.10	0.30	0.10	0.00
	0.30	0.10	0.30	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00
0.60	0.47	0.44	0.45	0.44	0.43	0.38	0.36	0.33	0.33	0.31	0.27
0.80	0.56	0.53	0.53	0.52	0.51	0.46	0.43	0.40	0.40	0.37	0.33
1.00	0.63	0.59	0.60	0.58	0.56	0.52	0.48	0.45	0.45	0.42	0.37
1.25	0.70	0.64	0.67	0.64	0.62	0.57	0.53	0.50	0.49	0.47	0.41
1.50	0.75	0.68	0.71	0.68	0.65	0.61	0.57	0.54	0.52	0.50	0.44
2.00	0.82	0.73	0.78	0.74	0.70	0.67	0.62	0.60	0.57	0.55	0.48
2.50	0.87	0.77	0.82	0.77	0.73	0.71	0.65	0.63	0.59	0.58	0.50
3.00	0.90	0.79	0.85	0.80	0.75	0.73	0.67	0.65	0.61	0.60	0.52
4.00	0.94	0.81	0.88	0.82	0.78	0.76	0.69	0.68	0.63	0.62	0.53
5.00	0.96	0.83	0.90	0.84	0.79	0.77	0.71	0.69	0.64	0.63	0.54

Ceiling mounted

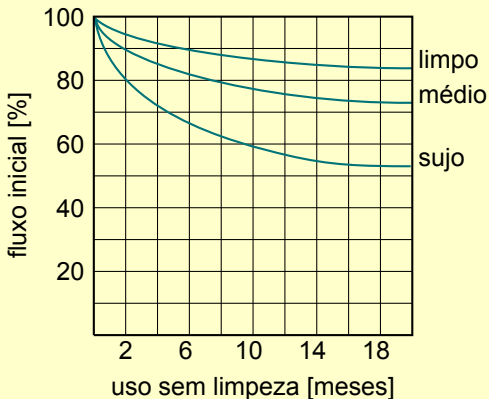
Método dos lúmens

Determinação do fator de depreciação – F_d

- O fator de depreciação é a relação entre o fluxo luminoso no fim do período de manutenção e o fluxo luminoso no inicial;
- O fluxo luminoso reduz com o uso devido a:
 - Diminuição do fluxo luminoso decorrente do envelhecimento das lâmpadas;
 - Sujeira que se deposita sobre os aparelhos de iluminação;
 - Diminuição da reflexão nas paredes e no teto, em conseqüência de seu envelhecimento.
- O fator de depreciação é fornecido pelo fabricante da luminária e depende do seu modelo.

Método dos lúmens

Determinação do fator de depreciação – F_d



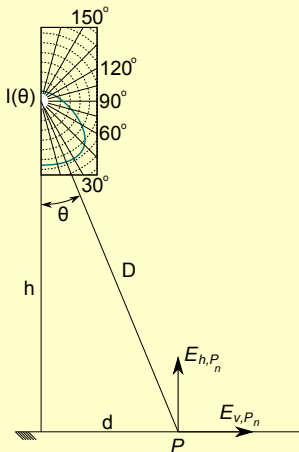
Método ponto a ponto

Determinação do nível de iluminamento total

- O cálculo do nível de iluminamento total utiliza as parcelas de contribuição individual de cada aparelho de iluminação;
- Para tanto, é necessário utilizar a curva de intensidade luminosa de cada aparelho e selecionar um ponto de interesse (P);
- Deve-se então determinar a contribuição de cada aparelho de iluminação para o nível de iluminamento do ponto de interesse.

Método ponto a ponto

Determinação do nível de iluminamento total



- O nível de iluminamento é dado por:

$$E_{h,P_n} = \frac{I(\theta)}{D^2} \cdot \cos(\theta) \quad \text{e} \quad E_{v,P_n} = \frac{I(\theta)}{D^2} \cdot \sin(\theta)$$

- Além disso:

$$h = D \cdot \cos(\theta) \quad \text{e} \quad d = D \cdot \sin(\theta)$$

- Sendo assim, o nível de iluminamento de uma fonte arbitrária (n) é dado por:

$$E_{h,P_n} = \frac{I(\theta)}{h^2} \cdot \cos(\theta)^3 \quad \text{e} \quad E_{v,P_n} = \frac{I(\theta)}{d^2} \cdot \sin(\theta)^3$$

Método ponto a ponto

Determinação do nível de iluminamento total

- Para o cálculo do nível de iluminamento total, deve-se considerar todas as fontes de luz:

$$E_{h,P} = \sum_{n=1}^N E_{h,P_n} \quad \text{e} \quad E_{v,P} = \sum_{n=1}^N E_{v,P_n}$$

OBRIGADO!

Este material é resultado da modernização dos materiais elaborados pelos professores do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para as diversas disciplinas da área de Eletrotécnica Geral e foi desenvolvido pelo professor Giovanni Manassero Junior, com a colaboração da professora Milana Lima dos Santos e a coordenação do professor Hernán Prieto Schmidt.