

**Universidade de São Paulo
Instituto de Física de São Carlos - IFSC**

FCM 208 Física (Arquitetura)

Iluminação

Prof. Dr. José Pedro Donoso

Iluminação

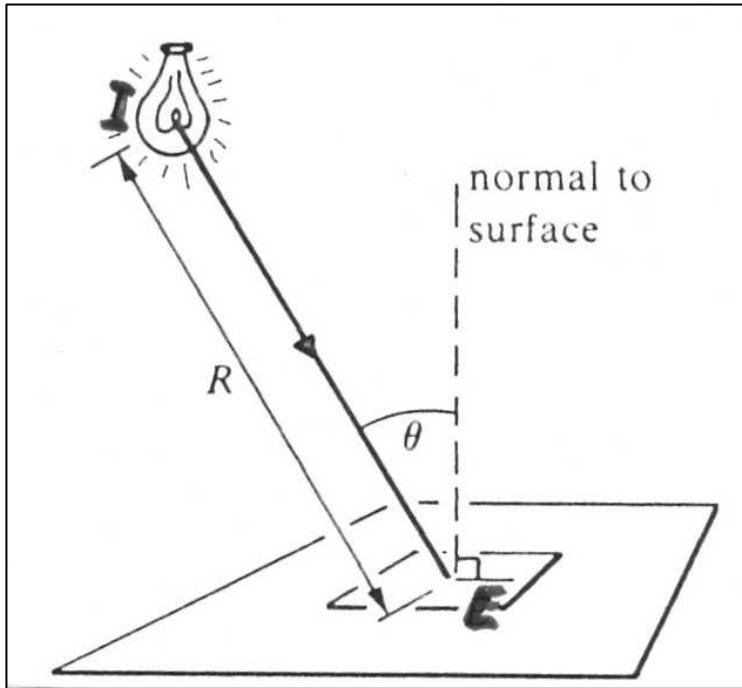
Intensidade luminosa (I): brilho de uma fonte luminosa. Unidade: *Candela* (cd)

Fluxo luminoso (F): quantidade de luz visível que atinge uma dada superfície.

Unidade: **lumen** (lm). Um lumen corresponde ao fluxo luminoso que atinge em cada 1 m^2 de uma esfera de 1 m de raio, quando uma fonte de luz de 1 cd é colocada no centro da esfera.

- O fluxo luminoso emitido por uma fonte de luz isotrópica é $F = 4\pi I$

- O fluxo luminoso que passa através da área A de uma esfera imaginária de raio R , com a fonte de intensidade I colocada no seu centro, é: $F = I \Omega$ onde $\Omega = A/R^2$ [esteroradiano]



Eficiência luminosa de uma fonte é a razão entre F e a potência elétrica de entrada.

Unidade: **lm/W**

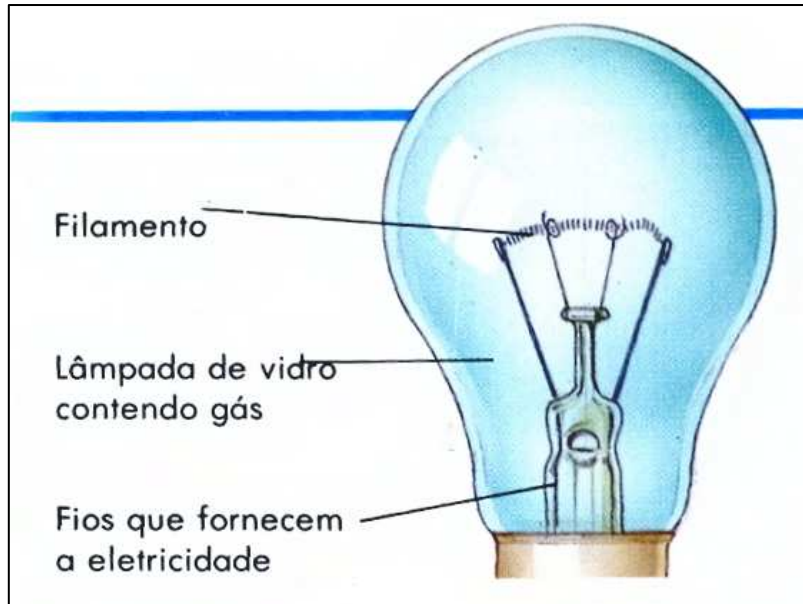
Exemplo: 16.3 lm/W (valor das lâmpadas incandescentes de 100 W)

Iluminação (E): fluxo luminoso por unidade de área, $E = F/A$.

Unidade: **lux** (lx) = 1 lm/m²

A iluminação numa superfície a uma distância R de uma fonte de luz isotrópica é: $E = I \cos\theta / R^2$ onde θ é o ângulo entre a direção do raio de luz e a normal a superfície.

Especificações de lâmpadas

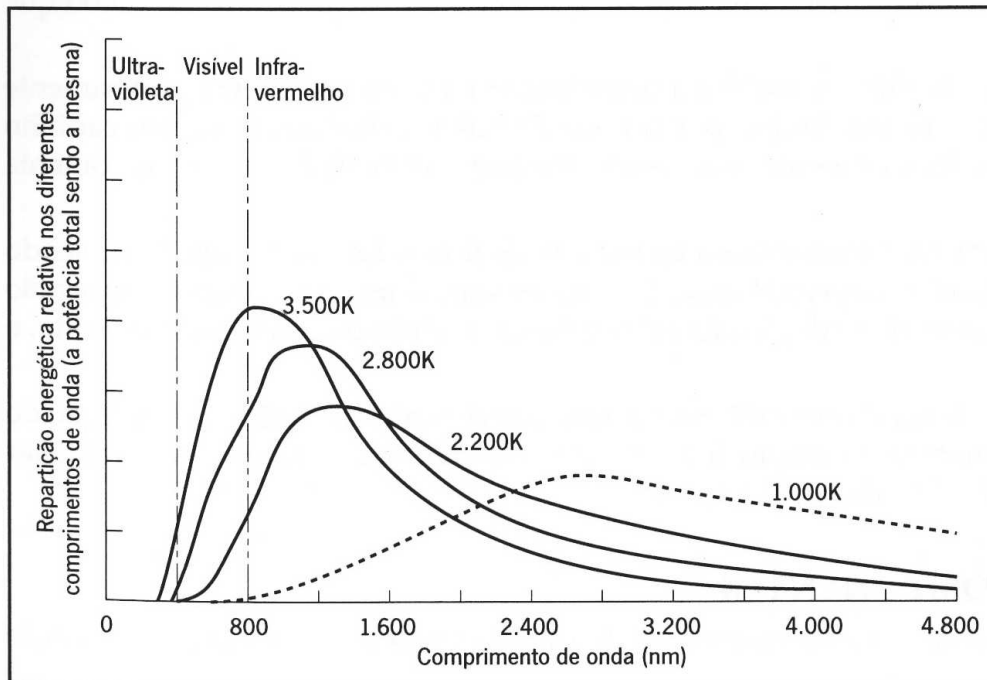


a) lâmpadas incandescentes:

Eficiência luminosa:

De 10.4 lm/W nas lâmpadas de 25 W
até 16.3 lm/W nas de 100 W

Vida média: 1000 h



O material utilizado no filamento deve possuir elevado ponto de fusão, pois a radiação emitida R :

$$R = \sigma T^4$$

onde $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{-K}^4$.

O **tungstênio** tem ponto de fusão de 3.655 K (3.382 °C).




O espectro mostra que cores são emitidas

Todas as cores se combinam para produzir o branco

LÂMPADA DE FILAMENTO BRILHANDO NORMALMENTE
Com uma corrente elétrica intensa, todo o espectro da luz visível é produzido (veja p. 39).

LÂMPADA DE FILAMENTO

COM BRILHO NORMAL



Vermelho, amarelo e verde combinam para produzir a cor laranja

A cor do filamento é alaranjada

Nenhuma radiação azul é emitida

LÂMPADA DE FILAMENTO COM BRILHO FRACO
Com uma corrente de baixa intensidade, a temperatura do filamento (veja p. 32-33) é baixa.

LÂMPADA DE FILAMENTO COM BRILHO FRACO

A lâmpada emite cores

A porcentagem de energia radiada na região visível cresce com a elevação da temperatura, de acordo com a lei de Wien:

$$\lambda_{\max} T = \text{const.}$$

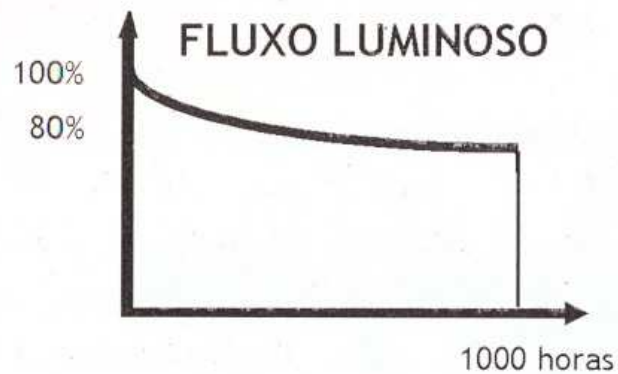
Praticamente todas as lâmpadas atuais utilizam filamentos de **tungstênio** trefilado e enrolados em forma de espiral, pois as perdas de calor são menores num filamento mais curto. Elas operam a 2500 – 3000 K

Vinicius A. Moreira, *Iluminação Elétrica* (Blücher, 2001)
J. Challoner, *Física, Atlas Visuais* (Editora Atica, 1997)

LÂMPADAS INCANDESCENTES

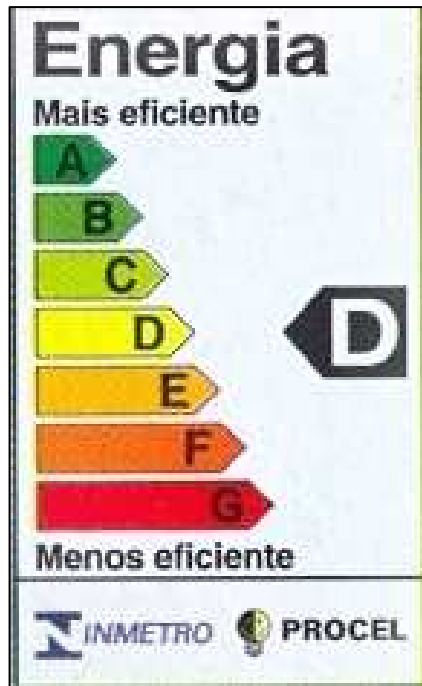
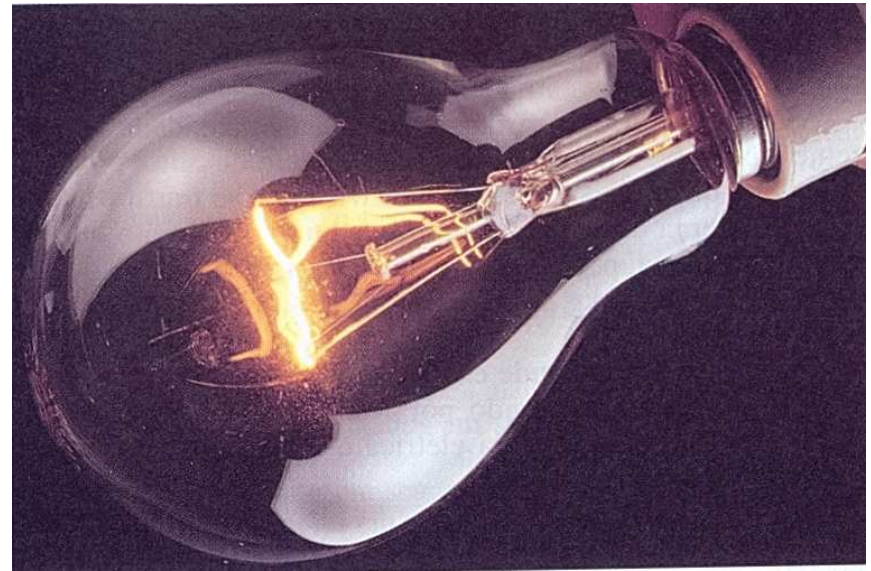
“Um Gênio deu luz à esta idéia”

São as menos eficientes, pois transformam em luz só 10% da energia que consomem. Mesmo assim, ainda representam o maior mercado de consumo de lâmpadas.



Mauri Luiz da Silva, Luz, lâmpadas e iluminação (Ciência Moderna, 2004)

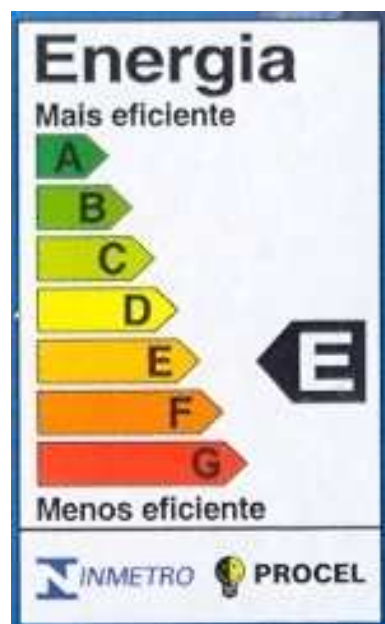
Lâmpada Standard



1 INFORMAÇÃO

Tensão (volt)	Potência (watt)	Emissão de luz (lúmen)	Eficiência luminosa (lm/W)	Vida** (hora)
127*	60	864	14,4	750
124	58	795	13,7	1000
120	55	704	12,8	1600
115	51	607	11,9	2850

INFORMAÇÃO				
Tensão (volt)	Potência (watt)	Emissão de luz ^{***} (lúmen)	Eficiência luminosa (lm/W)	Vida ^{**} (hora)
127*	100	1458	14,6	750
124	96	1339	13,9	1000
120	92	1209	13,1	1600
115	86	1045	12,2	2850



Lâmpada Soft

RECORDE ESTO
QUALIDADE EXTRA

PRETESTADA

100 watts **127** volts

CONTÉM 1 UNIDADE

b) lâmpadas fluorescentes:

Lâmpadas utilizadas nas salas de aula da USP:

- potência: 32W
- fluxo luminoso: $F \geq 2700$ lumens;
- eficiência luminosa: 85 lm/W;
- vida nominal: igual ou superior a 7500 horas;
- índice de Reprodução de Cor (ICR): igual ou superior a 85%



Lâmpadas fluorescentes

Nos materiais luminescentes devemos distinguir:

-O **hóspede** (*host*) : que define a rede cristalina (ZnS , CaWO_4 , $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$)

-o **ativador**: íons incorporados na rede que viram centros luminescentes (Ag^+ , Mn^{2-})

-O **sensitizador**: íons que quando incorporados na rede são capazes de transferir sua energia de excitação aos ativadores vizinhos, induzindo a luminescência

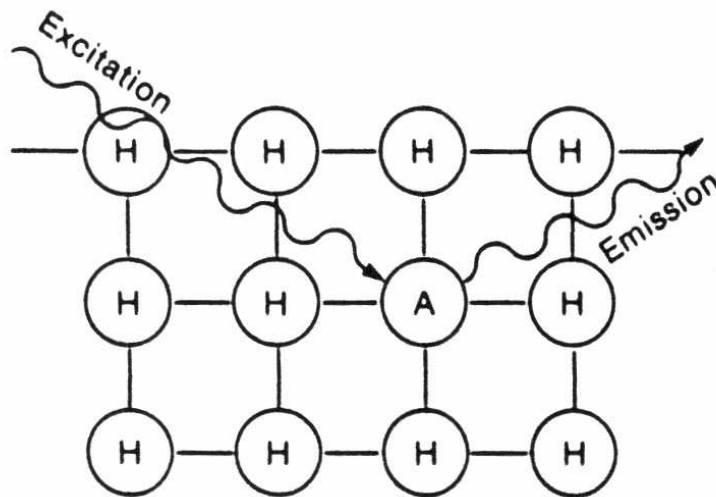
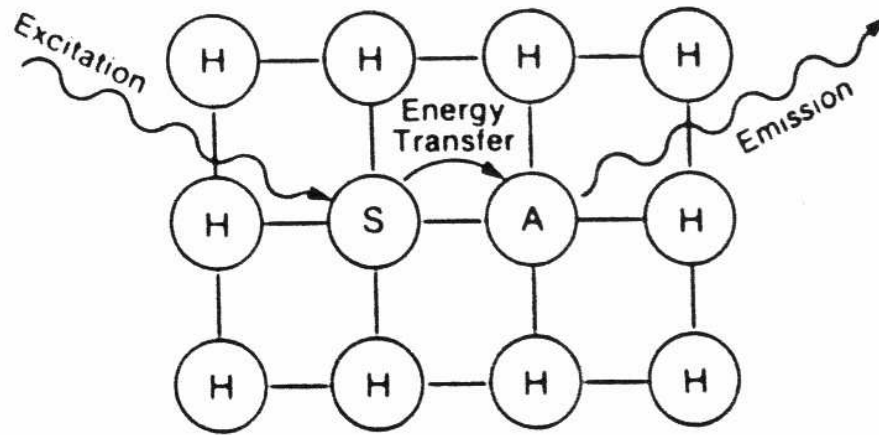


Figure 2. Diagrammatic representation of the role in the luminescence process of an activator (A) doped in a host (H) lattice.

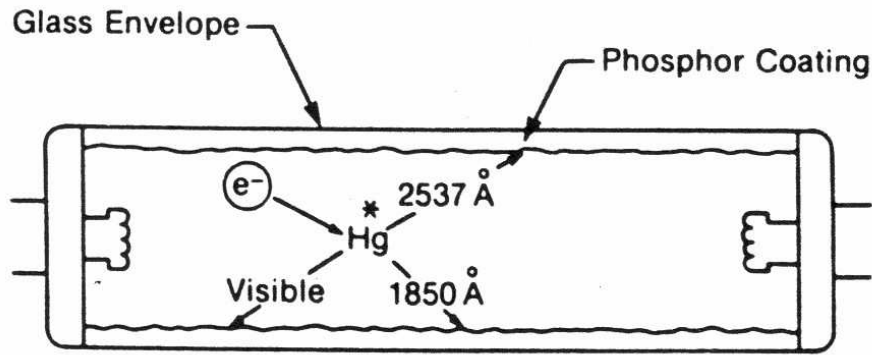


Figure 16. Schematic representation of a fluorescent lamp.

A corrente elétrica excita os átomos de Hg os quais decaim emitindo no visível e no ultravioleta (UV). O vidro do tubo é recoberto com uma substância fosforescente que converte eficientemente a radiação UV em visível. O íon Sb^{3+} atua como **sensitizer** e como **ativador** enquanto o Mn^{2+} atua só como **ativador**.

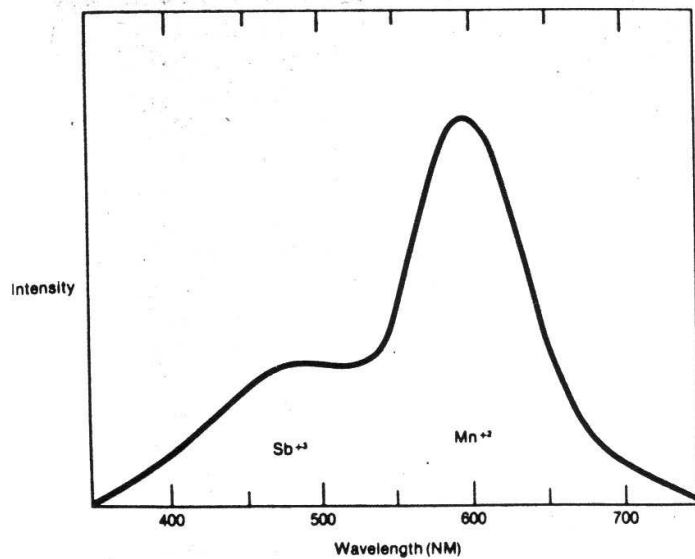
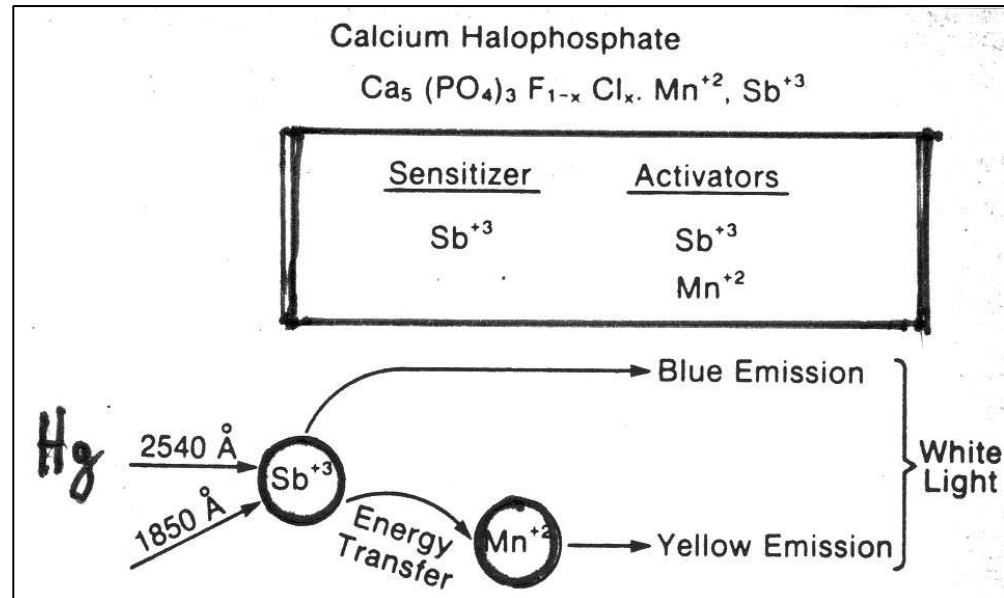


Figure 17. The emission spectrum of the commercial fluorescent lamp phosphor, calcium halophosphate, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}_{1-x}\text{Cl}_x:\text{Mn}^{2+},\text{Sb}^{3+}$.



LÂMPADAS FLUORESCENTES

T8 (26MM)

CARACTERÍSTICAS

- Pó trifósforo no bulbo
- Alta eficiência energética
- Versões: 16, 18, 32, 36 e 58W
- Vida útil: 7.500h
- Economia de energia em torno de 10% e maior eficiência que as fluorescentes comuns

APLICAÇÕES

Em instalações residenciais, comerciais ou industriais.



Mauri Luiz da Silva, Luz, lâmpadas e iluminação (Ciência Moderna, 2004)

FLUORESCENTES COMPACTAS

**DULUX[®] D (DUPLA) e DULUX[®] D/E (CORRENTE CONTÍNUA)
NECESSITAM DE REATOR**

CARACTERÍSTICAS

- Mesmo tamanho que a DULUX[®] S, mas com o dobro de fluxo luminoso
- Versões: 9, 18 e 26W
- Linha D/E para utilização com reator eletrônico, permitindo a *dimmerização*
- Disponíveis em duas tonalidades de cor
- Vida útil: 10.000h

APLICAÇÕES

- Ideal para pequenas luminárias, downlights, em áreas com necessidade de elevados níveis de iluminância.



EQUIVALÊNCIA
9W → 60W
18W → 100W
26W → 2 x 75W

Descrição

- *Lâmpada fluorescente compacta integrada*
- *Potência: 30W*
- *Tensão: 127V (90 a 130V)*
- *Corrente: 430mA*
- *Base: E27*
- *Fluxo Luminoso: 1.650 Lúmens*
- *Eficiência Luminosa: 55 lm/W*
- *Temperatura de Cor: 6.500K (branca)*
- *Fator de Potência: 0,55*
- *IRC - Índice de Reprodução de Cor: 80*
- *Equivalência: 1 incandescente de 100W*
- *Vida Útil Mediana: 8.000 horas**

Especificações de uma lâmpada fluorescente compacta comercial de 30 W

Dois tons de laranja muito próximos são emitidos



A luz emitida é alaranjada

LÂMPADA DE VAPOR DE SÓDIO
 Numa lâmpada de vapor de sódio a corrente elétrica excita os elétrons do vapor fornecendo-lhes um excesso de energia. Esses elétrons liberam essa energia na forma de luz.



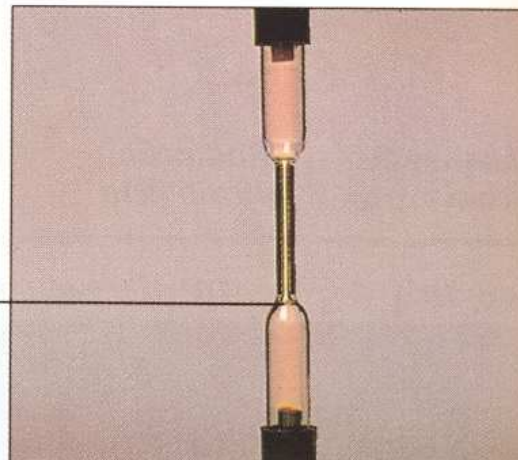
LÂMPADA DE VAPOR DE SÓDIO

O néon só emite determinadas cores características



A lâmpada emite luz laranja

LÂMPADA NÉON
 Da mesma forma que a lâmpada de vapor de sódio, uma lâmpada néon produz um brilho alaranjado característico.



LÂMPADA NÉON

Vinicius A. Moreira, *Iluminação Elétrica* (Blücher, 2001)
 J. Challoner, *Física, Atlas Visuais* (Editora Atica, 1997)

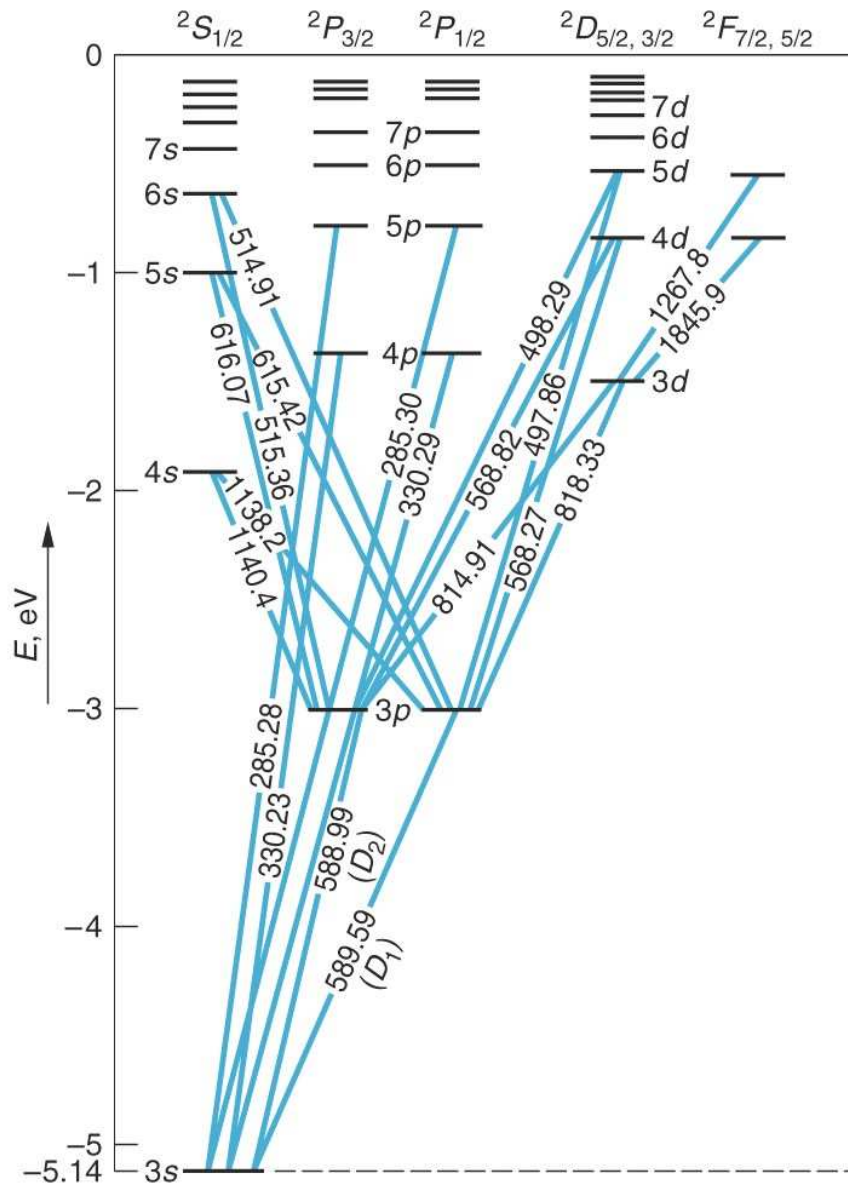
c) lâmpadas de vapores metálicos

Vapor de sódio

1 - Lâmpadas de baixa pressão
 eficiência luminosa: 100 lm/W
 vida nominal: 6000 h

Durante a partida, a descarga elétrica inicia-se no gás neônio, provocando uma cor rosa. A elevação da temperatura causa a evaporação do sódio metálico

2- Lâmpadas de alta pressão
 eficiência luminosa: 130 lm/W
 vida nominal: 24000 h



Física atômica

Diagrama de níveis de energia do átomo de sódio. A diferença de energia entre os estados $P_{3/2}$ e $P_{1/2}$ é de aproximadamente 0.002 eV. As transições destes estados para o estado fundamental $S_{1/2}$ dão origem ao conhecido **dubleto amarelo** do sódio: D_1 : 589.59 nm e D_2 : 588.99 nm

Comprimentos de onda das cores:

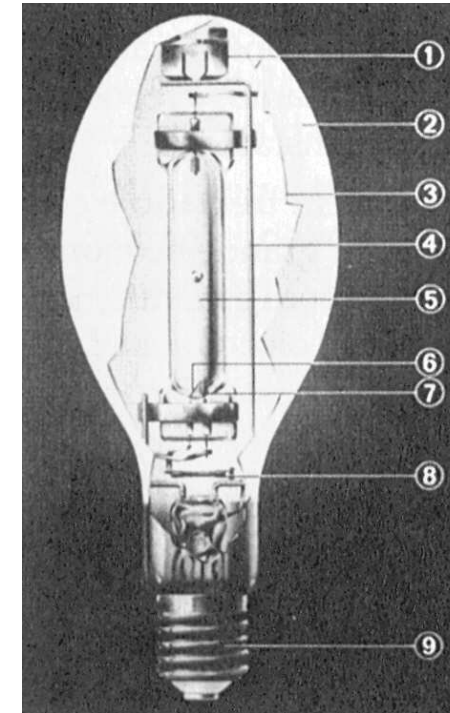
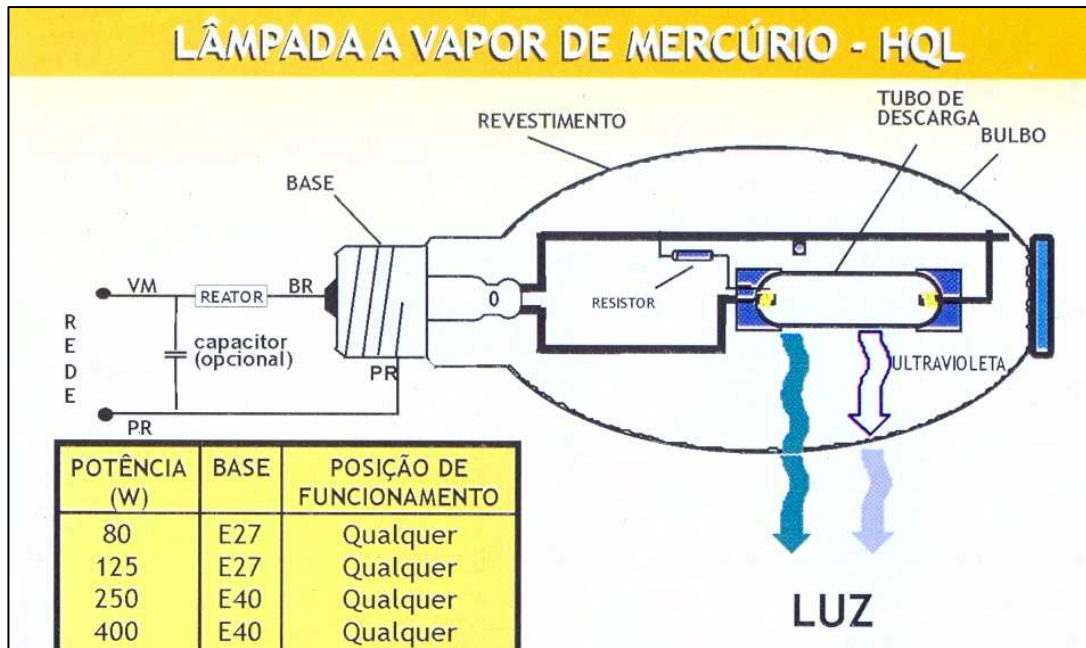
Vermelho: $\lambda = 700$ nm

Amarelo: $\lambda = 580$ nm

Azul: $\lambda = 470$ nm

Violeta: $\lambda = 420$ nm

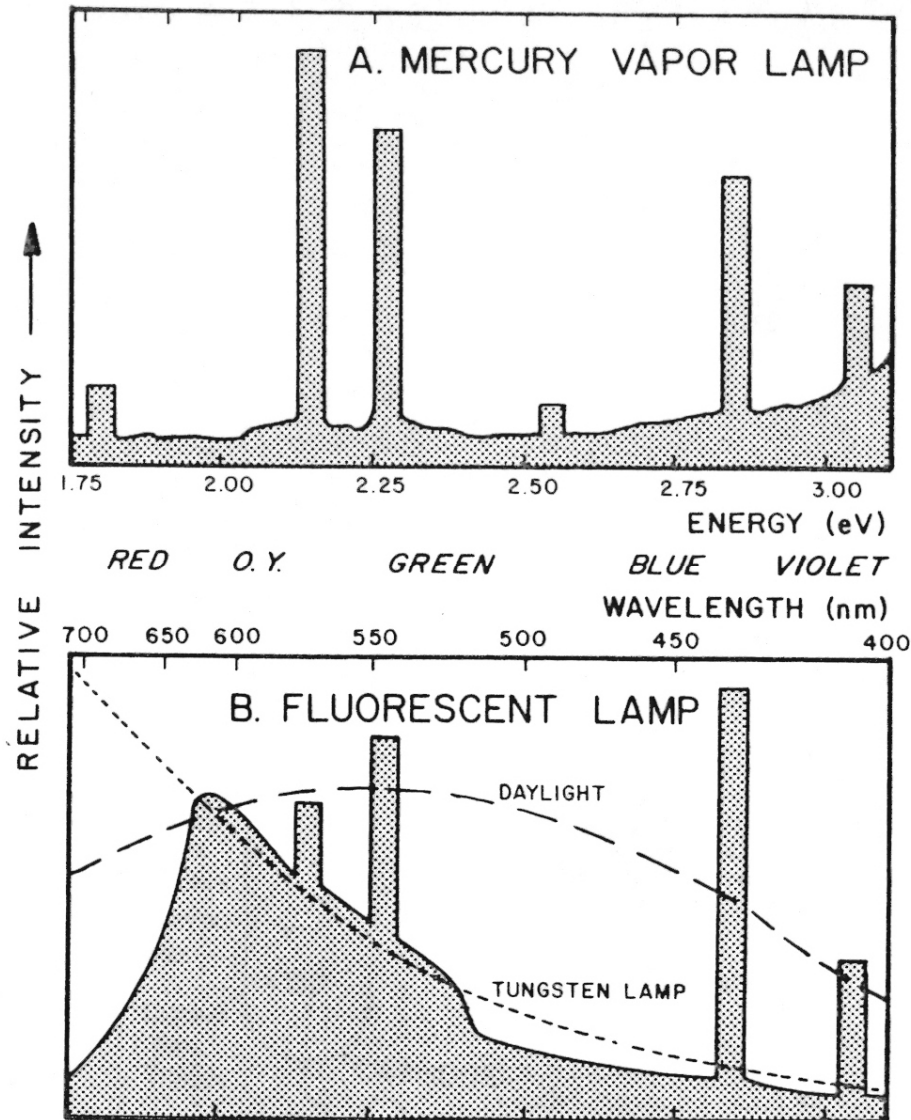
Ultravioleta: $\lambda < 300$ nm



A lâmpada de vapor de Hg consta de um tubo de descarga feito de quartzo, para suportar altas temperaturas, tendo os eletrodos nas duas extremidades. A operação eficiente da lâmpada requer a manutenção de uma alta temperatura no tubo de descarga. Por isso este tubo é encerrado num bulbo de vidro, reduzindo as perdas de calor. Se a lâmpada é apagada, o Hg não pode ser reionizado, até que a temperatura do arco elétrico seja diminuída, o que leva alguns minutos

Mauri Luiz da Silva, Luz, lâmpadas e iluminação (Ciência Moderna, 2004)
 Vinicius de Araujo Moreira, Iluminação Elétrica (Ed. E. Blücher, 2001)

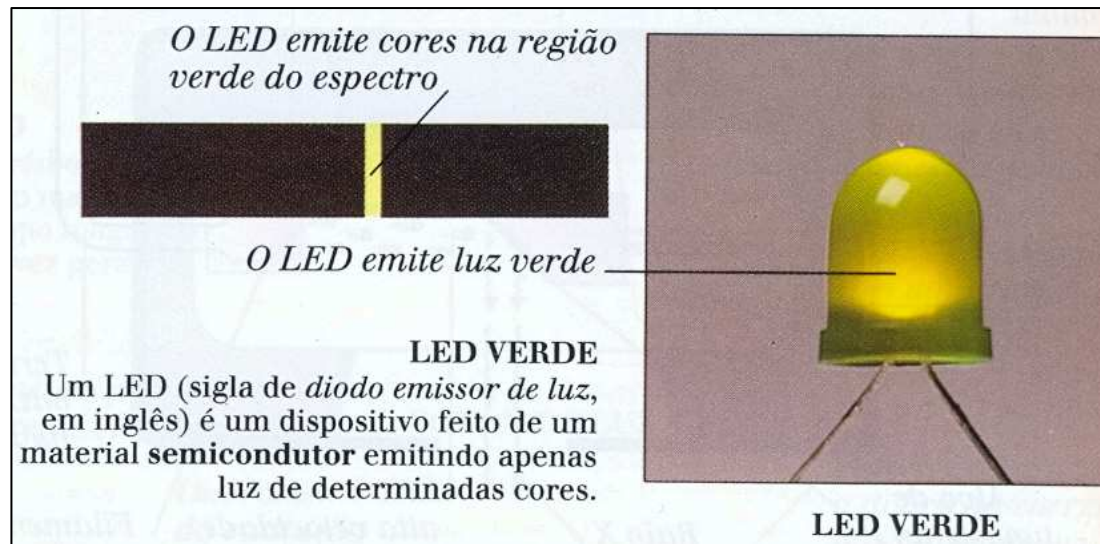
Comparação entre as lâmpadas Distribuição da energia luminosa



A : lâmpada de vapor de Hg: sua luz consiste de uma série de linhas no amarelo, verde e violeta, mais com pouco vermelho. Mais de 50% da emissão ocorre no ultravioleta (254 nm)

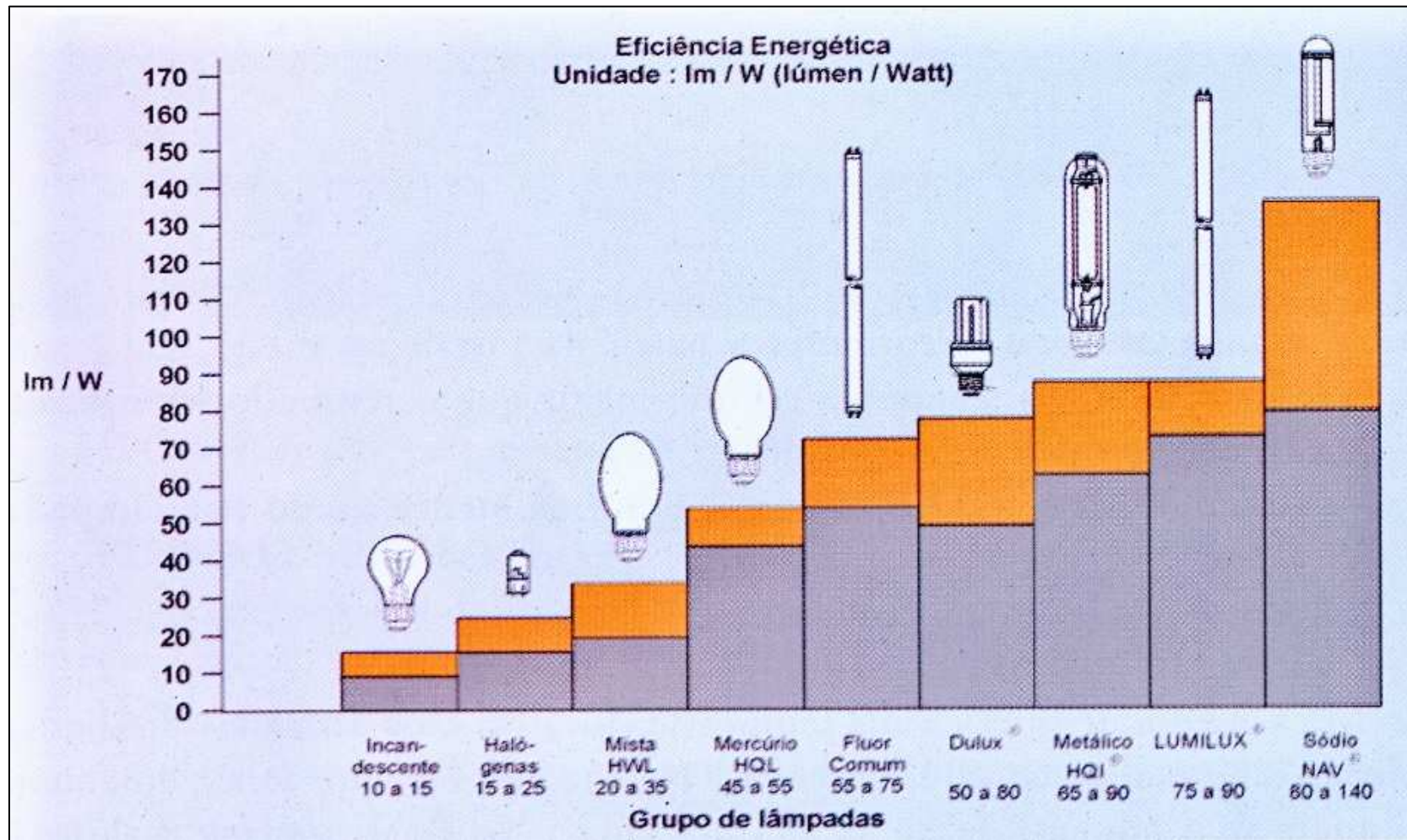
B : lâmpada fluorescente, comparada com a luz diurna e com uma lâmpada incandescente (filamento de tungstênio). A fluorescente ainda é deficiente no vermelho e excessiva no violeta.

Diodo emissor de luz (LED)



P. Tipler, R.A. Llewellyn
Física Moderna
(Editora LTC, 2001)

O funcionamento de dispositivos semicondutores, como diodos e transistores, se baseia em **junções** entre semicondutores *tipo n* e *tipo p*. Os portadores de carga nos de tipo *n* são os elétrons (partículas negativas) enquanto que nos de tipo *p* são buracos (partículas positivas). O diodo fotoemissor (LED) é uma junção **pn** de corrente elevada, onde muitos elétrons se recombinaem com buracos, emitindo fótons no processo. Os LED são usados em lâmpadas piloto e mostradores digitais.



Mauri Luiz da Silva, Luz, lâmpadas e iluminação (Ciência Moderna, 2004)

O ICR mede a correspondência entre a cor real de um objeto e sua aparência diante de uma fonte de luz

ÍNDICE DE REPRODUÇÃO DE CORES				
100	EXCELENTE	NÍVEL 1	1a - Ra 90 a 100	Testes de cor, floricultura, escritórios, residências, lojas
	MUITO BOM		1b - Ra 80 a 89	
80	BOM	NÍVEL 2	2a - Ra 70 a 79	Áreas de circulação, escadas, oficinas, ginásios esportivos
	RAZOÁVEL		2b - Ra 60 a 69	
60	REGULAR	NÍVEL 3	Ra 40 a 59	Depósitos, postos de gasolina, pátio de montagem industrial
40	INSUFICIENTE	NÍVEL 4	Ra 20 a 39	Vias de tráfego, canteiros de obras, estacionamentos

Mauri Luiz da Silva, Luz, lâmpadas e iluminação (Ciência Moderna, 2004)

Cálculos de iluminação: norma 5413 da ABNT

Tabela 7.1 – Alguns exemplos de Níveis de Iluminância recomendados (resumo da Norma Brasileira NBR 5413 da ABNT)

Local a iluminar	Iluminância (lux)
* Bancos: atendimento, contabilidade, guichês, gerência	300/500/750
Saguão, recepção, cantinas	100/150/200
* Escolas: Salas de aula e de trabalhos manuais	200/300/500
Salas de desenho	300/500/750
* Garagens: Oficinas	150/150/300
Bancadas, hangares, manutenção de motores	300/500/750
* Hotéis: Corredores, escadas, geral, restaurantes	100/150/200
Recepção, lanchonete	150/200/300
* Teatros: Auditórios, salas de espera, platéia	100/150/200
Tribuna	300/500/750

Notas: Valores da iluminância média no plano de trabalho ou a 0,75m do piso.

Vinicius de Araujo Moreira, *Iluminação Elétrica* (Ed. E. Blücher, 2001)

Aplicações

1 - Uma lâmpada incandescente de 60 W tem uma intensidade luminosa de 66.5 cd. Determine o fluxo luminoso F e a eficiência luminosa da lâmpada.

Respostas: 836 lm; 13.9 lm/W

2 - Um spotlight concentra toda a luz de uma lâmpada de 100 cd num círculo de raio $r = 1.3$ m na parede. Se o feixe de luz é perpendicular à parede, determine a iluminação que o spotlight produz.

Resposta: $E = 237$ lux

3 - Um campo de esportes, de 2×10^4 m² de área, deve ser iluminado em dias de jogo noturno com 200 lux. A iluminação é fornecida por 6 torres, cada uma delas sustenta um banco de lâmpadas incandescentes de 1000 W (eficiência 30 lm/W). Supondo que 50% do fluxo luminoso das lâmpadas chega ao campo, (a) quantas lâmpadas serão necessárias em cada torre? (b) qual a potência elétrica de entrada em cada torre? (c) Se a potência para as torres for fornecida por um gerador externo, qual deveria ser a potência do motor do gerador?

Respostas: (a) 44; (b) 44 kW; (c) 354 hp

Projetos de Iluminação

Para projetar a iluminação de uma sala ou ambiente deve-se consultar primeiro a **norma NBR-5413** para definir a iluminação média (E em *lux*) para esse ambiente.

A seguir se escolhe o **tipo de lâmpada** para o projeto.

A potência da lâmpada e sua eficiência determinam o fluxo luminoso F .

Se introduz um fator de depreciação de 50% no parâmetro F devido as perdas de luz pelas refletância das superfícies, desgaste das luminárias e poeira no local.

Como o fluxo luminoso por unidade de área é: $E = F/A$, onde A representa a área do recinto, o número de luminárias n necessárias é:

$$n \approx \frac{EA}{F(0.5)}$$

Projetos de Iluminação (cálculo mais elaborado)

Com base nas dimensões do recinto (comprimento a , largura b e altura para efeitos de iluminação h) se calcula o índice K do recinto. Com este parâmetro e com os coeficientes de reflexão do teto, paredes e piso, se consulta as tabelas para conhecer o Fator de Utilização da luminária (FU).

Se introduz um Fator de Depreciação (Fd) o qual evita que o desgaste das luminárias comprometa o nível de iluminação recomendado. Se considera uma depreciação de 20% (ou seja $Fd = 1.25$) para ambientes com boa manutenção (escritórios e afins) e de 40% ($Fd = 1.67$) para ambientes industriais, garagens e afins.

O número de luminárias n é calculado com a relação:

$$n = \frac{EAF_d}{F(FU)} \qquad K = \frac{ab}{h(a+b)}$$

Aplicações:

1 - Projetar a iluminação de uma sala de 10 m × 6 m e 3.8 de altura, de 400 lux a ser realizado com lâmpadas fluorescentes de 40 W (branca fria, eficiência 75 lm/W). Quantas lâmpadas serão necessárias?

Resposta: ~16

2 - Projetar a iluminação de uma sala de aula de 9 m × 7 m. (a) Consulte a norma NBR-5413 para determinar o nível de iluminação requerido para esse ambiente. (b) a lâmpada escolhida é fluorescentes de 32 W (eficiência 70 lm/W, ICR =85). Calcule o fluxo luminoso da lâmpada. (c) Calcule o índice K do recinto. (d) Considerando que os coeficientes de reflexão do teto, paredes e piso estão numa razão de 70 : 50 : 10, verifique na tabela que o Fator de Utilização da luminária é $FU = 0.6$. (e) Calcule o número de lâmpadas necessárias para a sala, considerando um fator de depreciação de 20% (ou seja, $F_d = 1.25$).

Solução:

(a) Da norma NBR-5413, $E = 300$ lux

(b) $F = (32 \text{ W}) \times (70 \text{ lm/W}) = 2240 \text{ lm}$

Tabela do Fator de Utilização

Fator de Área K	70			50		30		
	50	50	30	30	10	30	10	- Fator de reflexão do teto - Fator de reflexão das paredes - Fator de reflexão do piso
0.60	.39	.38	.34	.33	.30	.33	.30	.29
0.80	.47	.45	.42	.40	.37	.40	.37	.36
1.00	.53	.50	.48	.45	.43	.45	.42	.41
1.25	.59	.55	.54	.50	.48	.50	.48	.46
1.50	.63	.58	.58	.54	.52	.53	.51	.50
2.00	.69	.63	.65	.59	.57	.58	.57	.55
2.50	.73	.65	.69	.62	.60	.61	.60	.58
3.00	.75	.67	.72	.64	.63	.63	.62	.60
4.00	.78	.69	.76	.66	.65	.65	.64	.63
5.00	.80	.70	.78	.68	.67	.66	.66	.64

Solução:

(c) Dimensões do recinto: $a = 9$ m,
 $b = 7$ m. Altura para efeitos de
 iluminação na carteira da sala de
 aula: $h = 3 - 0.8 = 2.2$ m

$$K = \frac{ab}{h(a+b)} = 1.8$$

(d) Se os coeficientes de reflexão do teto, paredes e piso estão numa razão de 70 : 50 : 10, o Fator de Utilização da luminária é $FU \approx 0.6$ (Tabela)

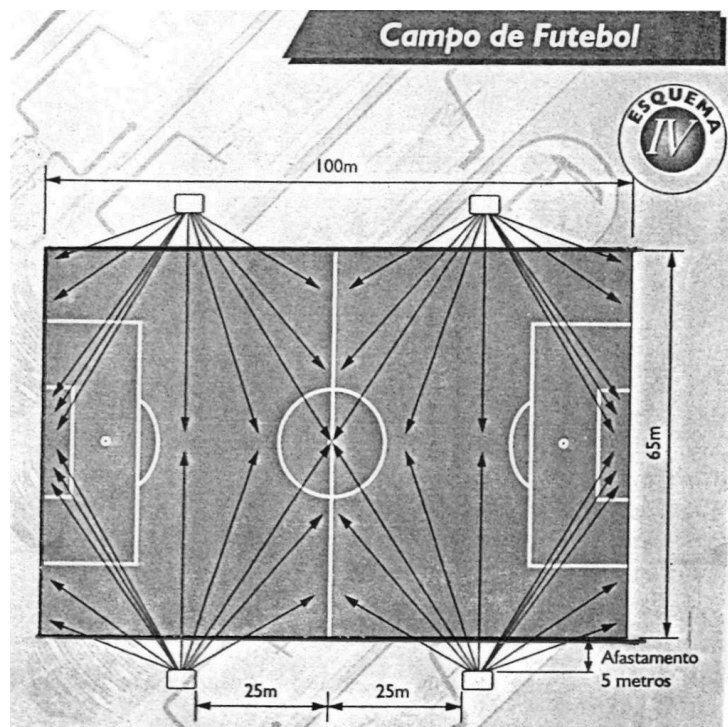
(e) Como a área da sala é $A = 63$ m², o número de lâmpadas necessárias para atender a norma é:

$$n = \frac{EAF_d}{F(FU)} = 18$$

Anexo 2 - Coeficiente de Reflexão de Alguns Materiais e Cores

Materials	%
Rocha	60
Tijolos	5..25
Cimento	15..40
Madeira clara	40
Esmalte branco	65..75
Vidro transparente	6..8
Madeira aglomerada	50..60
Azulejos brancos	60..75
Madeira escura	15..20
Gesso	80

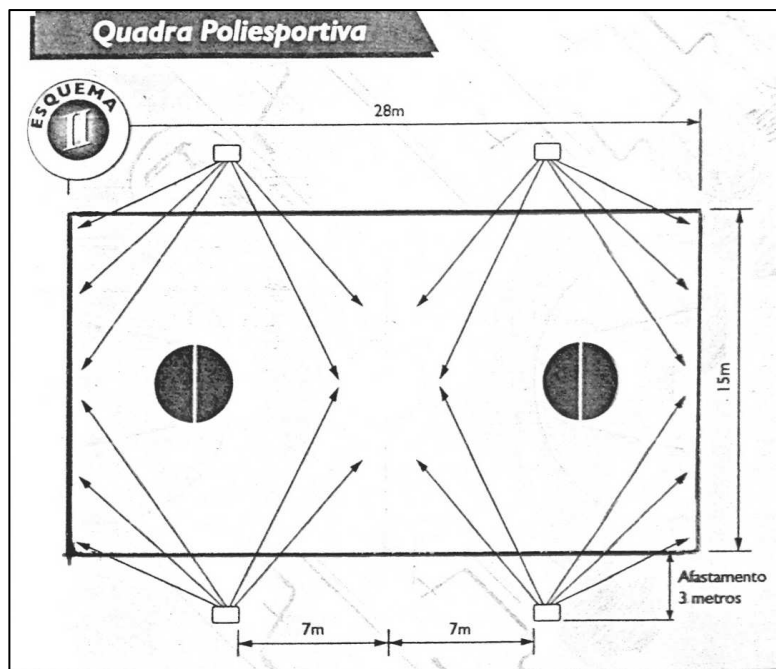
Cores	%
Branco	70..80
Creme claro	70..80
Amarelo claro	55..65
Rosa	45..50
Verde claro	45..50
Azul celeste	40..45
Cinza claro	40..45
Bege	25..35
Amarelo escuro	25..35
Marrom claro	25..35
Verde oliva	25..35
Laranja	20..25
Vermelho	20..35
Cinza médio	20..35
Verde escuro	10..15
Azul escuro	10..15
Vermelho escuro	10..15
Cinza escuro	10..15
Azul marinho	5..10
Preto	5..10



Projetos de Iluminação de quadras Esportivas

Ref: Philips (www.philips.com.br)

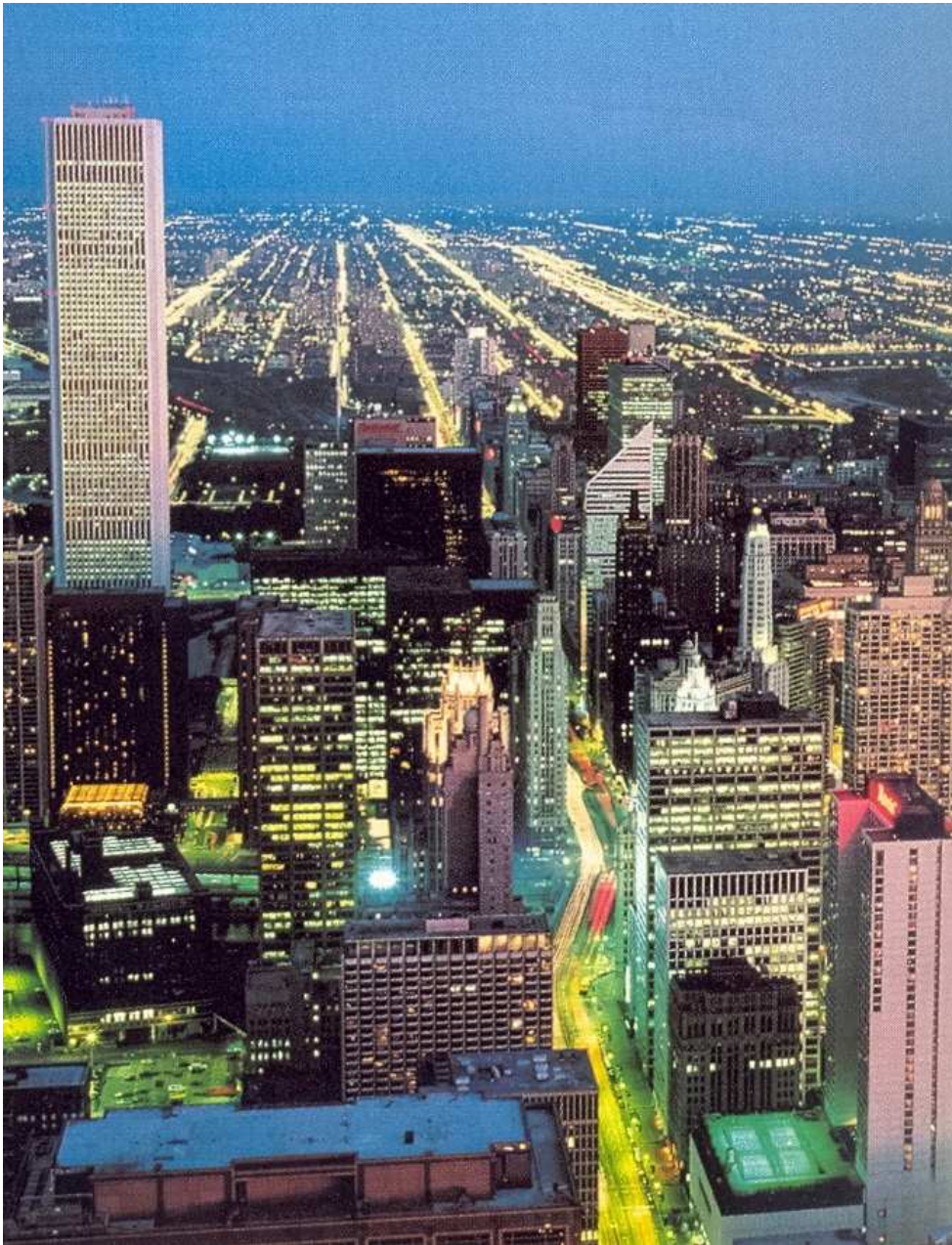
	Recreação	Competição
Tênis	200 lux	350 lux
Poliesportiva	150 lux	300 lux
Minicampo	150 lux	300 lux
Campo Futebol	150 lux	300 lux



Projetos de Iluminação de quadras Esportivas

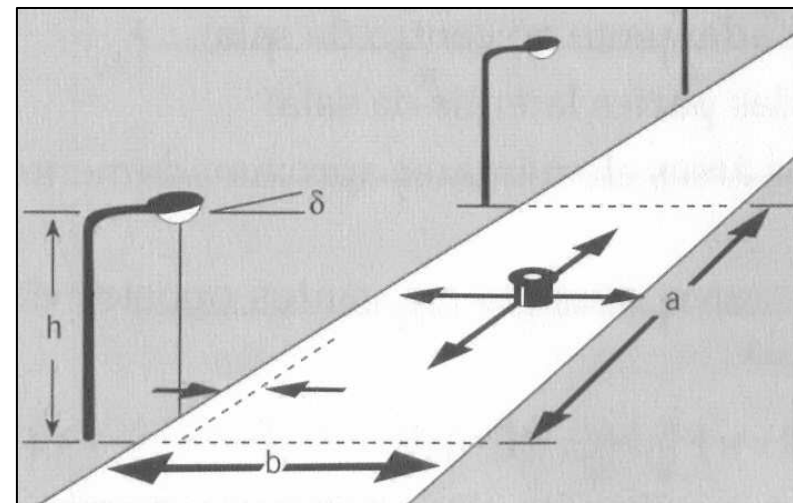
Ref: Philips (www.philips.com.br)

Esporte (dimensões em m)	Atividade	Tipo de Projeter	Lâmpada	Quantidade	Nível Iluminação (lux)
Quadra de Tênis (11 x 24)	Recreação	HLF 432 ou HLF 400	HPI/T 400W	12	273
Quadra de Tênis (11 x 24)	Competição	HLF 432 ou HLF 400	HPI/T 400W	16	354
Poliesportiva (15 x 28)	Recreação	HLF 432 ou HLF 400	HPI/T 400W	12	179
Poliesportiva (15 x 28)	Competição	HLF 432 ou HLF 400	HPI/T 400W	20	335
Mini Campo (18 x 36) af. 3m	Recreação	HLF 432 ou HLF 400	HPI/T 400W	16	176
Mini Campo (18 x 36) af. 3m	Competição	HLF 432 ou HLF 400	HPI/T 400W	28	303
Mini Campo (25 x 40) af. 3m	Recreação	HLF 432 ou HLF 400	HPI/T 400W	20	157
Mini Campo (25 x 40) af. 3m	Competição	HLF 432 ou HLF 400	HPI/T 400W	40	318
Mini Campo (30 x 50) af. 3m	Recreação	HLF 432 ou HLF 400	HPI/T 400W	28	151
Mini Campo (30 x 50) af. 3m	Competição	HLF 432 ou HLF 400	HPI/T 400W	60	319
Campo de Futebol (65 x 100)	Recreação	SLS 1500-44 +REFL 158	HPI 1500W BU	20	152
Campo de Futebol (65 x 100)	Competição	SLS 1500-44 +REFL 158	HPI 1500W BU	40	312



Iluminação pública

Ref: Vinicius de Araujo Moreira,
Iluminação Elétrica
(Ed. E. Blücher, 2001)



Referências bibliográficas

Vinícius de Araújo Moreira, *Iluminação e fotometria*. 3ª ed. (Blucher, 1993)

Vinícius de Araújo Moreira, *Iluminação Elétrica*. 1ª ed. (Blucher, 1999)

Mauri Luiz da Silva, *Luz, lâmpadas e iluminação* (Ciência Moderna, 2004)

Gilberto J. Corrêa da Costa. *Iluminação Econômica* (EDIPUCRS, 2005)

P.C. Sorcar, *Architectural lighting for commercial interior* (Wiley, 1987)

H. Semat, *Fundamentals of Physics, Chapter 30*