

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensibil. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

# Radiometria e fotometria

## Óptica visual

S. Mogo

Departamento de Física  
Universidade da Beira Interior

2020 / 21

## Introdução

Grand. radiométricas  
Fotometria  
- Grand. fotométricas  
- Observador padrão  
- F. sensib. espect.  
- Lei de Abney  
- Ilumin. retiniana  
Difusores coseno  
Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação  
Rad. corpo negro  
Leis do radimento  
Temperatura de cor  
Iluminantes padrão  
Níveis de iluminação  
Deslumbramento  
IRC

## Filtros

Filtros coloridos  
Mistura de cores  
Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

1

### Conceitos básicos de radiometria

Grandezas radiométricas  
Fotometria  
- Grandezas fotométricas  
- Observador padrão  
- Determinação da função de sensibilidade espectral  
- Lei da aditividade de Abney  
- Iluminação retiniana  
Difusores coseno  
Lei do inverso do quadrado da distância

2

### Especificação de fontes luminosas

Classificação das fontes luminosas  
Radiação do corpo negro  
Leis do radimento  
Temperatura de cor  
Iluminantes padrão  
Níveis de iluminação recomendados em locais públicos  
Deslumbramento  
Índice de restituição cromática

3

### Filtros

Filtros coloridos  
Mistura aditiva e subtrativa de cores  
Filtros de densidade neutra

4

### Efeitos biológicos da radiação eletromagnética (do UV ao IV)

## Introdução

Grand. radiométricas  
Fotometria  
- Grand. fotométricas  
- Observador padrão  
- F. sensib. espect.  
- Lei de Abney  
- Ilumin. retiniana  
Difusores coseno  
Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação  
Rad. corpo negro  
Leis do radiamento  
Temperatura de cor  
Iluminantes padrão  
Níveis de iluminação  
Deslumbramento  
IRC

## Filtros

Filtros coloridos  
Mistura de cores  
Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

1

### Conceitos básicos de radiometria

Grandezas radiométricas  
Fotometria  
- Grandezas fotométricas  
- Observador padrão  
- Determinação da função de sensibilidade espectral  
- Lei da aditividade de Abney  
- Iluminação retiniana  
Difusores coseno  
Lei do inverso do quadrado da distância

2

### Especificação de fontes luminosas

Classificação das fontes luminosas  
Radiação do corpo negro  
Leis do radiamento  
Temperatura de cor  
Iluminantes padrão  
Níveis de iluminação recomendados em locais públicos  
Deslumbramento  
Índice de restituição cromática

3

### Filtros

Filtros coloridos  
Mistura aditiva e subtractiva de cores  
Filtros de densidade neutra

4

### Efeitos biológicos da radiação eletromagnética (do UV ao IV)

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

**Radiometria** → ciência que se dedica ao estudo das transferências de energia radiativa.

→ dedica-se à medição da radiação desde o **ULTRAVIOLETA** até ao **INFRATERMELHO**.

Dois conceitos fundamentais:

- fluxo: para o transporte de energia;
- ângulo sólido: para definir uma direcção em 3D.

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

**Fluxo radiante** → taxa de energia que atravessa uma dada superfície por unidade de tempo.

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}$$

[J/s] ou seja **[W]**

Esta é a quantidade radiométrica fundamental.

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$ 

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

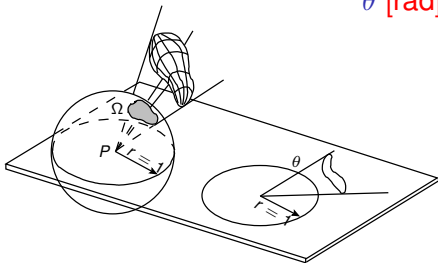
Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

## Ângulo sólido

Ângulo subtendido por um objecto  $\rightarrow$  comprimento do arco de projecção central do objecto num círculo de raio unitário.

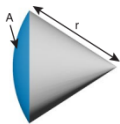
 $\theta$  [rad]


O ângulo sólido é uma extensão 3D do conceito de ângulo entre 2 linhas.

Círculo completo ocupa  $2\pi$

Esfera completa:  $4\pi$

Ângulo sólido subtendido por um objecto num ponto  $P \rightarrow$  é a área,  $A$ , da projecção do objecto numa esfera de raio unitário centrada em  $P$ .

 $\Omega$  [strad]


$$\Omega = \frac{A}{r^2}$$

# Grandezas radiométricas

## Introdução

### Grand. radiométricas

#### Fotometria

- Grand. fotométricas
- Observador padrão
- F. sensib. espect.
- Lei de Abney
- Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

### Fontes lumin.

#### Classificação

- Rad. corpo negro
- Leis do radimento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

### Filtros

- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

### Ef. biológicos

**Fluxo radiante** → taxa de energia que atravessa uma dada superfície por unidade de tempo.

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad [\text{J/s}] \quad [\text{W}]$$

**Densidade de fluxo radiante** → fluxo por unidade de área.

- **Irradiância** ( $E$ ) receptor
- **Emitância** ( $M$ ) emissor - fonte extensa

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad [\text{W/m}^2]$$

**Intensidade radiante** → fluxo radiante transportado por unidade de ângulo sólido.

fonte pontual

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad [\text{W/sr}]$$

**Intensidade (radiância)** → fluxo por unidade de ângulo sólido e por unidade de área normal.

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA \cos \theta} \quad [\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}]$$

## Introdução

Grand. radiométricas

### Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radiamento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

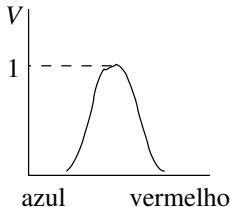
## Ef. biológicos

**Fotometria** → dedica-se à medição da luz VISÍVEL tal como ela é percebida pelo olho humano.

A distinção entre radiometria e fotometria é necessária porque o olho humano responde de maneira diferente aos diferentes c.d.o. espectrais:

- duas fontes monocromáticas podem apresentar o mesmo fluxo radiante mas diferente fluxo luminoso.

Ex.: estes 3 círculos podem perfeitamente apresentar a mesma radiância, no entanto, a percepção que deles temos é muito diferente:





## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- **Grand. fotométricas**

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

**Fluxo luminoso** → taxa de luz visível que atravessa uma dada superfície por unidade de tempo.

$$\Phi_v = \frac{dQ}{dt}$$

[talbot/s] ou seja **[lm]**

Esta é a quantidade fotométrica fundamental.

### Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

### Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

### Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

### Ef. biológicos

**lúmen** → é a unidade fotométrica que corresponde a um fluxo radiante monocromático de  $1/683$  W à frequência de  $540 \times 10^{12}$  Hz.



### Exercício:

Determine a que c.d.o. no ar, corresponde uma frequência de  $540 \times 10^{12}$  Hz.

O que lhe sugere o valor encontrado?

## Introdução

Grand. radiométricas

### Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. aspect.

- Lei de Abney

- Illumin. retiniana

### Difusores coseno

Lei do 1 /  $d^2$ 

Fontes lumin.

### Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radiament

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

### Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

### Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

**lúmen** → é a unidade fotométrica que corresponde a um fluxo radiante monocromático de  $1/683 \text{ W}$  à frequência de  $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$

↓

$540 \times 10^{12}$  Hz no ar, corresponde a um c.d.o. de 555 nm  
( $\lambda = Tc$ )

↓

555 nm é o pico da curva de sensibilidade espectral fotópica do olho humano,  $V(\lambda)$

↓

Como está normalizada,  $V(\lambda) = 1$  para 555 nm



1 W = 683 lm

# Grandezas fotométricas

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$ 

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

**Fluxo luminoso** → taxa de energia luminosa que atravessa uma dada superfície por unidade de tempo.

$$\Phi_V = \frac{dQ}{dt} \quad [\text{talbot/s}] \quad [\text{lm}]$$

**Densidade de fluxo luminoso** → fluxo por unidade de área.

- **Iluminância** ( $E_V$ ) receptor  $E_V = \frac{d\Phi_V}{dA} \quad [\text{lm/m}^2] = [\text{lux}]$
- **Excitância** ( $M_V$ ) emissor - fonte extensa

**Intensidade luminosa** → fluxo transportado por unidade de ângulo sólido.

fonte pontual  $I_V = \frac{d\Phi_V}{d\Omega} \quad [\text{lm/sr}] = [\text{cd}]$

**Luminância** → fluxo por unidade de ângulo sólido e por unidade de área normal.

$$L_V = \frac{d^2\Phi_V}{d\Omega dA \cos \theta} \quad [\text{lm m}^{-2}\text{sr}^{-1}] = [\text{cd/m}^2] = [\text{nit}]$$

# Visão fotópica e escotópica

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

A **curva de sensibilidade espectral** do olho humano varia consoante as condições de iluminação:

- Condições de visão fotópica (cones):  $>1 \text{ cd/m}^2$
- Condições de visão escotópica (bastonetes):  $<0,01 \text{ cd/m}^2$
- Condições de visão mesópica (cones + bastonetes):  $0,01\text{-}1 \text{ cd/m}^2$

## Grand. radiométricas

## Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. aspect.

- Lei de Abney

- Illumin. retiniana

### Difusores coseno

Lei do 1 /  $d^2$ 

Fontes lumin.

### Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radiament

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

#### Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

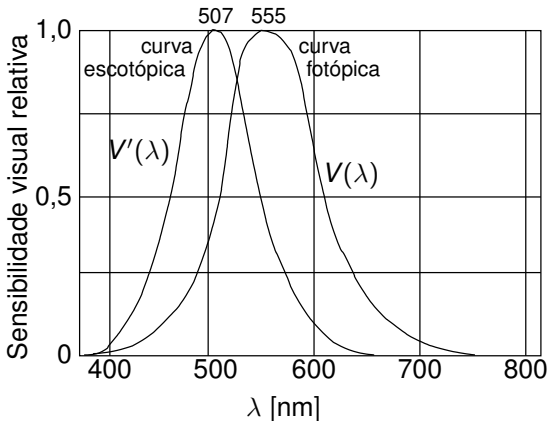
### Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

As grandezas fotométricas combinam as grandezas radiométricas com a sensibilidade espectral do olho humano.



# CIE - Observador padrão

## CIE - Commission Internationale de L'Eclairage

- Observador padrão  $V(\lambda)$  para visão fotópica
- Observador padrão  $V'(\lambda)$  para visão escotópica

### Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

### Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Luminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

### Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

### Ef. biológicos

$\lambda$ [nm], $V(\lambda)$
380, $2.00000 \times 10^{-4}$
400, $2.80000 \times 10^{-3}$
420, $1.75000 \times 10^{-2}$
440, $3.79000 \times 10^{-2}$
460, $6.00000 \times 10^{-2}$
480, $1.39020 \times 10^{-1}$
500, $3.23000 \times 10^{-1}$
520, $7.10000 \times 10^{-1}$
540, $9.54000 \times 10^{-1}$
550, $9.94950 \times 10^{-1}$
<b>555, 1.00010</b>
560, $9.95000 \times 10^{-1}$
580, $8.70000 \times 10^{-1}$
600, $6.31000 \times 10^{-1}$
620, $3.81000 \times 10^{-1}$
640, $1.75000 \times 10^{-1}$
660, $6.10000 \times 10^{-2}$
680, $1.70000 \times 10^{-2}$
700, $4.10200 \times 10^{-3}$
720, $1.04700 \times 10^{-3}$
740, $2.49200 \times 10^{-4}$
760, $6.00000 \times 10^{-5}$
780, $1.49890 \times 10^{-5}$
800, $3.70280 \times 10^{-6}$
820, $9.10920 \times 10^{-7}$

$\lambda$ [nm], $V'(\lambda)$
380, $5.890 \times 10^{-4}$
400, $9.290 \times 10^{-3}$
420, $9.660 \times 10^{-2}$
440, $3.281 \times 10^{-1}$
460, $5.670 \times 10^{-1}$
480, $7.930 \times 10^{-1}$
490, $9.040 \times 10^{-1}$
500, $9.820 \times 10^{-1}$
<b>505, 9.980 <math>\times 10^{-1}</math></b>
510, $9.970 \times 10^{-1}$
520, $9.350 \times 10^{-1}$
540, $6.500 \times 10^{-1}$
560, $3.288 \times 10^{-1}$
580, $1.212 \times 10^{-1}$
600, $3.315 \times 10^{-2}$
620, $7.370 \times 10^{-3}$
640, $1.497 \times 10^{-3}$
660, $3.129 \times 10^{-4}$
680, $7.150 \times 10^{-5}$
700, $1.780 \times 10^{-5}$
720, $4.780 \times 10^{-6}$
740, $1.379 \times 10^{-6}$
760, $4.250 \times 10^{-7}$
780, $1.390 \times 10^{-7}$





# Radiometria - Fotometria

## Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
- Grand. fotométricas
- Observador padrão
- **F. sensib. espect.**
- Lei de Abney
- Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

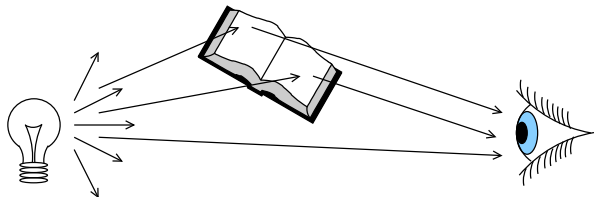
## Fontes lumin.

- Classificação
- Rad. corpo negro
- Leis do radiamento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

## Filtros

- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

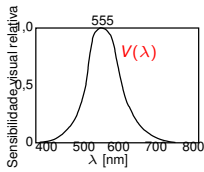
## Ef. biológicos



Luz física  
en. radiante

Luz percebida  
Percepção do olho humano

**RADIOMETRIA**  
en. radiante  
fluxo radiante  
irradiância  
radiância



**FOTOMETRIA**  
en. luminosa  
fluxo luminoso  
iluminância  
luminância

Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensibil. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

# Como convertemos grandezas radiométricas em grandezas fotométricas



$$1 \text{ W} = 683 \text{ lm}$$

Mas a conversão W - lm não se limita a 1 simples factor  
multiplicativo

**1 W = 683 lm apenas para radiação monocromática de  
555 nm**

Se queremos saber o que se passa nos outros c.d.o., temos  
que multiplicar pela curva de sensibilidade espectral,  $V(\lambda)$ :

$$\Phi_v(\lambda) = 683 \int_{\lambda_i}^{\lambda_f} V(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda$$

onde  $\Phi_v$  [lm]  
e  $\Phi$  [W]

# Lâmpadas em casa

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- **F. sensib. espect.**

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$



## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

Estamos acostumados a que as lâmpadas que compramos para iluminar a nossa casa estejam classificadas segundo o seu fluxo radiante: 20 W, 50 W



Este valor pode dar-nos uma ideia de com que rapidez vai aumentar a nossa conta de electricidade mas pouco nos diz sobre a efectividade da lâmpada para iluminar a nossa casa

...

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

Considere um LED,  $\ell_1$ , que emite um fluxo radiante de  $25 \mu\text{W}$  com pico máximo em 550 nm (verde). Outro LED,  $\ell_2$ , emite o mesmo fluxo radiante mas com pico máximo em 640 nm (vermelho).

Em condições diurnas determine:

- a) o fluxo luminoso emitido por cada LED;
- b) qual deveria ser o fluxo radiante do LED  $\ell_2$  de maneira que produzisse o mesmo efeito visual de  $\ell_1$ ?

## Exemplo

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$ 

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

Considere um LED,  $\ell_1$ , que emite um fluxo radiante de  $25 \mu\text{W}$  com pico máximo em 550 nm (verde). Outro LED,  $\ell_2$ , emite o mesmo fluxo radiante mas com pico máximo em 640 nm (vermelho).

Em condições diurnas determine:

a) o fluxo luminoso emitido por cada LED;

$$\Phi_v(\ell_1) = 683 * 0,99495 * 25 \times 10^{-6} = 16,99 \text{ mlm}$$

$$\Phi_v(\ell_2) = 683 * 0,175 * 25 \times 10^{-6} = 2,99 \text{ mlm}$$

b) qual deveria ser o fluxo radiante do LED  $\ell_2$  de maneira que produzisse o mesmo efeito visual de  $\ell_1$ ?

$$16,99 \times 10^{-3} = 683 * 0,175 * \Phi(\ell_2) \Rightarrow \Phi(\ell_2) = 142,14 \mu\text{W}$$

Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
  - Grand. fotométricas
  - Observador padrão
- F. sensib. espect.
- Lei de Abney
- Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

Fontes lumin.

- Classificação
- Rad. corpo negro
- Leis do radimento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

Filtros

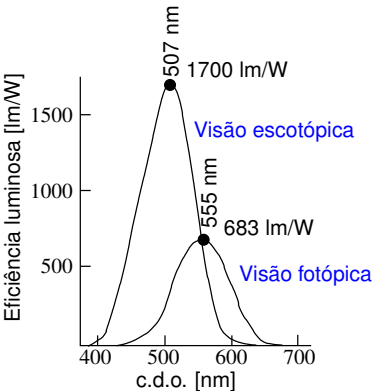
- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

# Eficiência luminosa

Eficiência luminosa do olho humano → é uma medida da eficiência do olho para detectar luz em diferentes c.d.o..

[lm/W]



# Unidades escotópicas

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$ 

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

## Por convenção:

- há 683 lm escotópicos por cada watt a 555 nm.

O numero de **lúmen escotópicos** nos restantes c.d.o. é determinado por proporcionalidade.

Por exemplo:

Se queremos saber quantos *lúmen escotópicos* há em 507 nm (pico da curva escotópica), temos:

$$\begin{array}{rcl} 683 \text{ lm/W} & \text{—} & V'(555 \text{ nm}) \\ x & \text{—} & V'(507 \text{ nm}) \end{array}$$

$$\frac{V'(555 \text{ nm})}{683 \text{ lm/W}} = \frac{V'(507 \text{ nm})}{x} \Rightarrow \frac{0,4}{683} = \frac{1}{x} \Rightarrow x \simeq 1700 \text{ lm/W}$$

Outro exemplo:

Para sabermos quantos *lúmen escotópicos* há em 580 nm:

$$\begin{array}{rcl} 683 \text{ lm/W} & \text{—} & V'(555 \text{ nm}) \\ x & \text{—} & V'(580 \text{ nm}) \end{array}$$

$$\frac{V'(555 \text{ nm})}{683 \text{ lm/W}} = \frac{V'(580 \text{ nm})}{x} \Rightarrow \frac{0,4}{683} = \frac{0,1}{x} \Rightarrow x \simeq 171 \text{ lm/W}$$

# Lei da aditividade de Abney

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- **Lei de Abney**

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

O sistema fotométrico é **aditivo**.

- A maioria dos objectos emite/reflecte luz de vários c.d.o. e não apenas luz monocromática;
- o fluxo luminoso total deste tipo de estímulo é determinado calculando o número de lúmen produzido por cada c.d.o. individualmente.





Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
- Grand. fotométricas
- Observador padrão
- F. sensib. espect.
- Lei de Abney
- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1 / d^2$

Fontes lumin.

- Classificação
- Rad. corpo negro
- Leis do radimento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

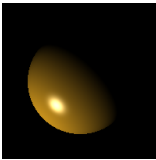
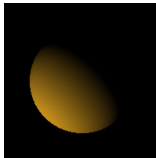
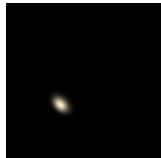
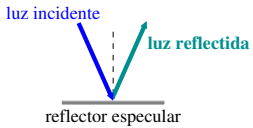
Filtros

- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

# Difusores coseno

## Reflexão especular e difusa



reflexão especular e difusa

Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
- Grand. fotométricas
- Observador padrão
- F. sensib. espect.
- Lei de Abney
- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

Fontes lumin.

- Classificação
- Rad. corpo negro
- Leis do radimento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

Filtros

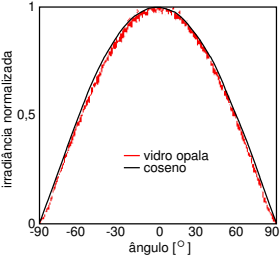
- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

# Difusores coseno

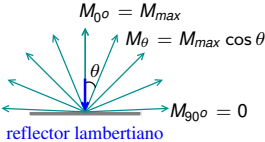
## Lei de Lambert

Difusores coseno ou difusores lambertianos → são aqueles que apresentam a mesma radiância (ou luminância) independentemente do ângulo em que a medimos.

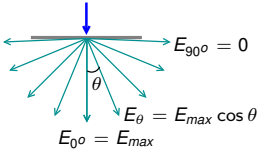


O perfil de irradiância (ou iluminância) de um difusor lambertiano varia de acordo com o **coseno** do ângulo de difusão:

$$E_{\theta} = E_{max} \cos \theta$$



transmissor lambertiano



## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

### Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

# Difusores coseno

## Lei de Lambert — Trabalho experimental

- 1 Luxímetro em torno do alvo
- 2 Fotómetro em torno do alvo
- 3 Luxímetro em torno de si próprio
- 4 Fotómetro em torno de si próprio

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$ 

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

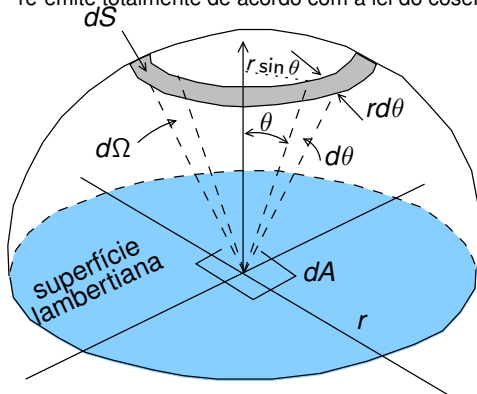
Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

## Difusores coseno

## Relação radiância - irradiância

Considere-se um elemento difusor perfeito,  $dA$ , que recebe um fluxo  $\phi$  e o re-emite totalmente de acordo com a lei do coseno:



- Irradiância:  $E = \frac{d\phi}{dA}$

- Radiância:  $L = \frac{d^2\phi}{d\Omega dA \cos \theta}$

$$d^2\phi = L d\Omega dA \cos \theta$$

$$\Rightarrow d^2\phi = L(2\pi \sin \theta d\theta) dA \cos \theta$$

$$\Rightarrow d\phi = 2\pi \int_0^{\pi/2} L dA \sin \theta \cos \theta d\theta$$

$$\Rightarrow d\phi = \pi L dA$$

$$\Rightarrow \boxed{E = \pi L}$$

$dS$  — elemento de superfície com área  $dS = 2\pi r^2 \sin \theta d\theta$

$d\Omega$  — ângulo sólido subtendido por  $dS$  no centro da esfera

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2} = \frac{2\pi r \sin \theta (rd\theta)}{r^2} = 2\pi \sin \theta d\theta$$

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$ 

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

# Difusores coseno

## Reflectividade e transmissividade

$$E = \pi L$$

Cuidado: Esta expressão apenas se verifica no caso de um elemento difusor perfeito (reflecte 100% da luz q lhe incide  $\Rightarrow$  reflectividade,  $r = 1$ ), caso contrário:

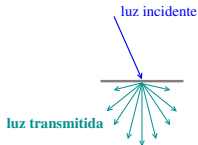
$$rE = \pi L$$

$r$  — **reflectividade** (grandeza adimensional que varia entre 0 e 1)

$r = 1 \Rightarrow$  superfície que reflecte 100% da luz q lhe incide

$r = 0,5 \Rightarrow$  superfície que reflecte 50% da luz q lhe incide

Se em vez de reflectir, o elemento em causa transmitir luz, também podemos falar de **transmissividade**,  $t$ .



## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$ 

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

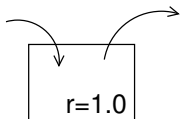
## Difusores coseno

Unidades imperiais

Uma **superfície lambertiana** com um factor de reflectividade igual a 1 tem uma luminância de **1 foot-lambert** quando a iluminância que lhe incide é **1 lm/ft<sup>2</sup>**.

iluminância

$$E_v$$
$$1 \text{ lm/ft}^2$$



luminância

$$L_v$$
$$\frac{1}{\pi} \frac{\text{lm}}{\text{sr} \cdot \text{ft}^2} = 1 \text{ foot-lambert}$$

$$1 \text{ foot} = 0,305 \text{ m} \quad \Rightarrow \quad 1 \text{ foot-lambert} = \frac{1}{\pi} \frac{\text{lm}}{\text{sr} \cdot \text{ft}^2} = 3,42 \frac{\text{lm}}{\text{sr} \cdot \text{m}^2}$$

igualmente podemos definir

$$1 \text{ foot-candela} = 1 \text{ lm/ft}^2 = 10,76 \text{ lm/m}^2 = 10,76 \text{ lux}$$

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

**Difusores coseno**

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radiamento

Temperatura de cor

Illuminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

# Difusores coseno

Relação luminância - iluminância  
em unidades imperiais

A luminância de uma superfície lambertiana pode ser  
obtida por:

$$L = rE$$



onde:

$L$  — luminância [foot lambert]

$E$  — iluminância [foot candela]

$r$  — reflectividade



## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$ 

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radiamento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

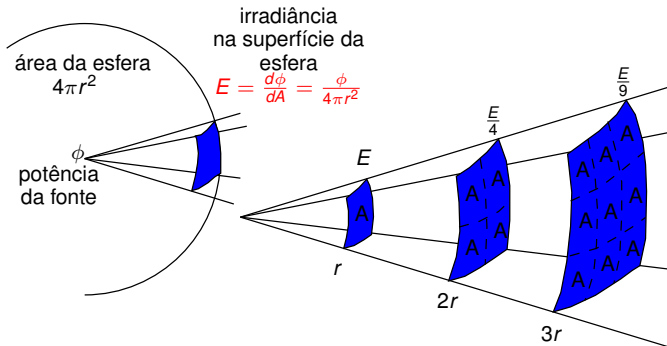
Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

Lei do inverso do quadrado da  
distância

À medida que uma superfície se afasta de uma fonte pontual, o fluxo radiante que incide sobre ela diminui com o quadrado da distância, resultando numa diminuição de irradiância:



Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
- Grand. fotométricas
- Observador padrão
- F. sensib. espect.
- Lei de Abney
- Ilumin. retiniana
- Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

Fontes lumin.

- Classificação
- Rad. corpo negro
- Lei do radiamento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

Filtros

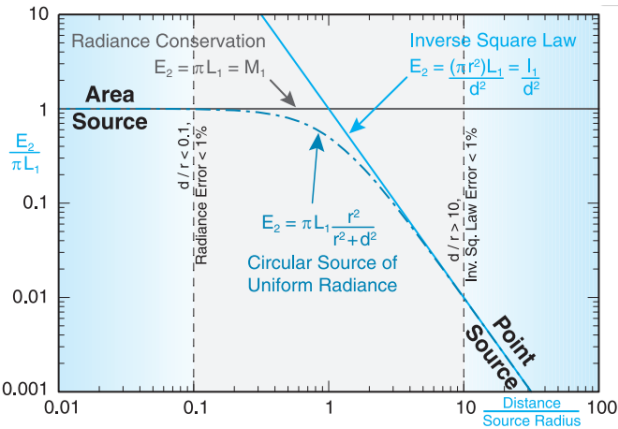
- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

# Lei do inverso do quadrado da distância

Fonte pontual × fonte extensa

A lei do inverso do quadrado da distância apenas funciona se a fonte luminosa for pontual.



Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
- Grand. fotométricas
- Observador padrão
- F. sensib. espect.
- Lei de Abney
- Ilumin. retina
- Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

Fontes lumin.

- Classificação
- Rad. corpo negro
- Leis do radiamento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

Filtros

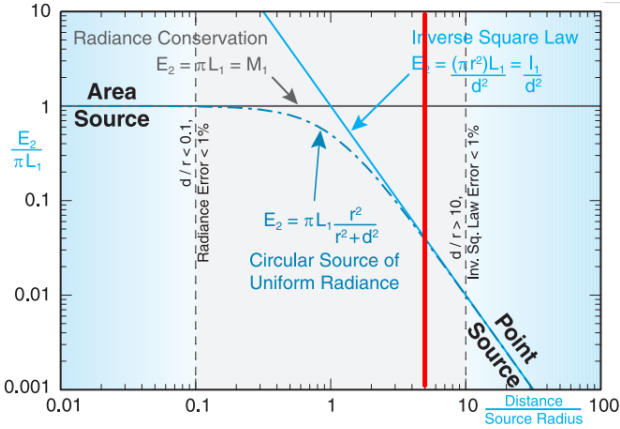
- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

# Lei do inverso do quadrado da distância

Fonte pontual × fonte extensa

**Regra empírica das 5x:** a distância à fonte luminosa deve ser maior que 5x o maior tamanho da fonte.



## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radiamento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

# Lei do inverso do quadrado da distância

Superfície inclinada

Lei do inverso do quadrado da distância:  $E = \frac{\phi}{4\pi r^2}$

Esta expressão assume que a superfície é normal à fonte  
luminosa

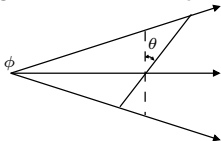


no entanto, se esta se encontrar inclinada, há um menor  
fluxo a incidir sobre ela



$$E = \frac{\phi}{4\pi r^2} \cos \theta$$

onde  $\theta$  é o ângulo de inclinação da superfície.



## Introdução

Grand. radiométricas  
Fotometria  
- Grand. fotométricas  
- Observador padrão  
- F. sensib. espect.  
- Lei de Abney  
- Ilumin. retiniana  
Difusores coseno  
Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação  
Rad. corpo negro  
Leis do radimento  
Temperatura de cor  
Iluminantes padrão  
Níveis de iluminação  
Deslumbramento  
IRC

## Filtros

Filtros coloridos  
Mistura de cores  
Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

1

### Conceitos básicos de radiometria

Grandezas radiométricas  
Fotometria  
- Grandezas fotométricas  
- Observador padrão  
- Determinação da função de sensibilidade espectral  
- Lei da aditividade de Abney  
- Iluminação retiniana  
Difusores coseno  
Lei do inverso do quadrado da distância

2

### Especificação de fontes luminosas

Classificação das fontes luminosas  
Radiação do corpo negro  
Leis do radimento  
Temperatura de cor  
Iluminantes padrão  
Níveis de iluminação recomendados em locais públicos  
Deslumbramento  
Índice de restituição cromática

3

### Filtros

Filtros coloridos  
Mistura aditiva e subtractiva de cores  
Filtros de densidade neutra

4

### Efeitos biológicos da radiação eletromagnética (do UV ao IV)

Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
- Grand. fotométricas
- Observador padrão
- F. sensib. espect.
- Lei de Abney
- Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

Fontes lumin.

Classificação

- Rad. corpo negro
- Leis do radiamento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

Filtros

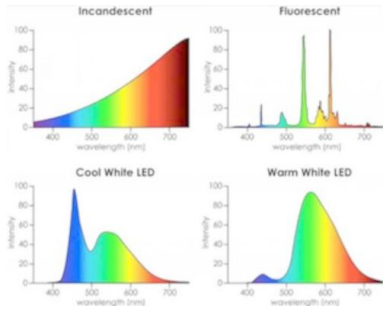
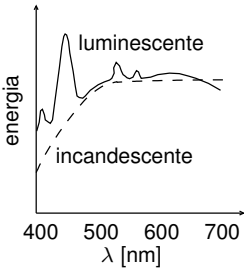
- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

# Classificação das fontes luminosas

Fonte incandescente → gera luz a partir de calor.

Fonte luminescente → gera luz a partir da excitação de átomos individuais.



<http://www.sunkissedsolar.com.au/led-light-globes-detrimental-health-environment/>

LED (*light emitting diode*) → gera luz a partir do movimento de electrões num material semiconductor (electroluminescência).

# Fontes incandescentes

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

### Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

**Fonte incandescente** → gera luz a partir de calor.

**Ex.:** lâmpada comum: a diferença de potencial ao longo do filamento faz com que este aqueça gerando luz.



Principal inconveniente: pouco eficientes a nível energético (gastam demasiados watt para os lúmen que produzem.)

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensibil. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

# Fontes luminescentes

**Fonte luminescente** → gera luz a partir da excitação de átomos individuais.

Ex.: tubo de luz fluorescente: tubo cheio de gás cujos átomos passam para um estado excitado quando se aplica uma diferença de potencial entre as extremidades do tubo.

este estado é instável logo os átomos voltam espontaneamente ao estado inicial emitindo energia

esta energia (UV) é usada para excitar o revestimento do tubo que então a re-emite sob a forma de luz visível



Principal inconveniente: em caso de se partirem, o gás no seu interior pode ser perigoso.

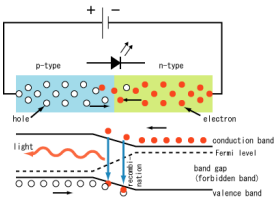


# Díodos emissores de luz: LED

**LED** → gera luz a partir do movimento de electrões num material semiconductor (electroluminescência).

Ao receberem uma pequena qtdd de energia os electrões livres de um material de *tipo n* passam da camada de valência para a camada de condução

↓  
tendem então a mover-se para preencher as lacunas de um material de *tipo p* emitindo energia sob a forma de luz



Principal inconveniente: são as mais caras mas este problema tende a diminuir à medida que a sua utilização se vai generalizando.

# Comparação

## Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
- Grand. fotométricas
- Observador padrão
- F. sensib. espect.
- Lei de Abney
- Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

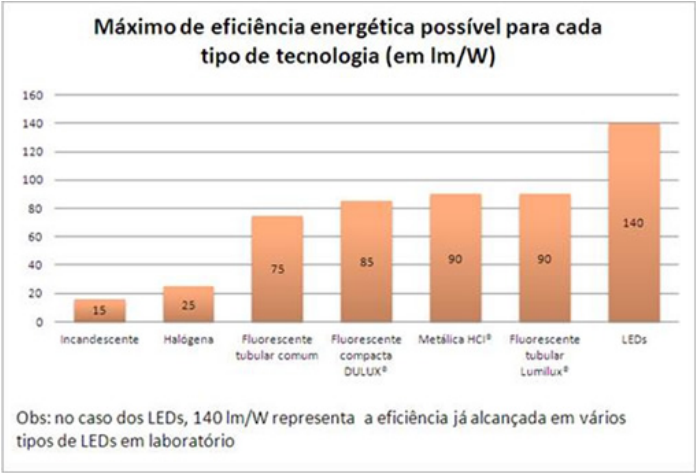
### Classificação

- Rad. corpo negro
- Leis do radimento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

## Filtros

- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos



<http://lednews.com.br/video/tabela-de-lumens-x-watts/>

Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
- Grand. fotométricas
- Observador padrão
- F. sensib. espect.
- Lei de Abney
- Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

Fontes lumin.

Classificação

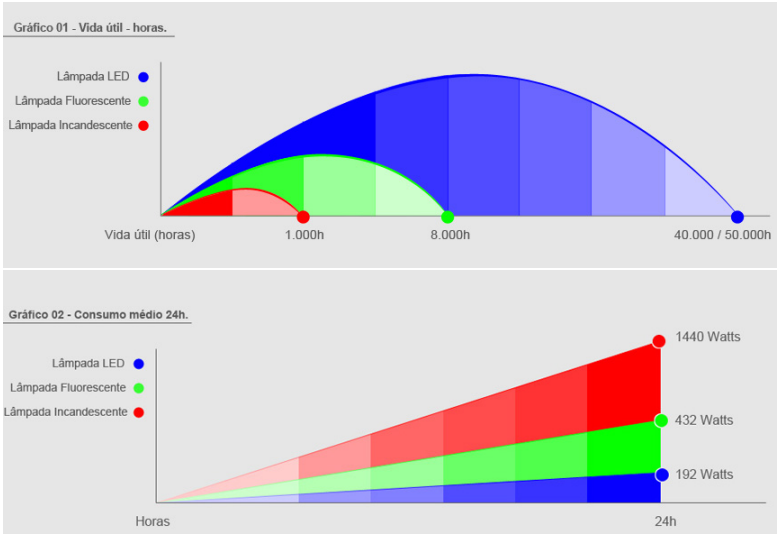
- Rad. corpo negro
- Leis do radiamento
- Temperatura de cor
- Luminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

Filtros

- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

# Comparação



## Introdução

Grand. radiométricas  
Fotometria  
- Grand. fotométricas  
- Observador padrão  
- F. sensib. espect.  
- Lei de Abney  
- Ilumin. retiniana  
Difusores coseno  
Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação  
**Rad. corpo negro**  
Leis do radimento  
Temperatura de cor  
Iluminantes padrão  
Níveis de iluminação  
Deslumbramento  
IRC

## Filtros

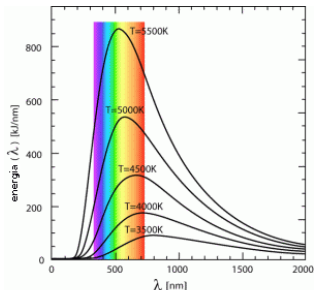
Filtros coloridos  
Mistura de cores  
Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

# Radiação do corpo negro

**Corpo negro** → corpo ideal que absorve (ou emite) integralmente toda a energia de todos os c.d.o. que nele incida.

- radia segundo um espectro contínuo característico que depende da temperatura do corpo.



Adapted by Frontiers of Science from "Wien's Law of Radiation" / Prawo Wiena.  
GNU Free Documentation License.



Trata-se de uma construção teórica muito conveniente para descrever fontes de radiação electromagnética.

# Leis do radiamento

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

**Leis do radiamento**

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

As características do corpo negro são descritas pelas leis do radiamento:

- lei de Stewart e lei Kirchhoff;
- lei de Plank;
- lei de Stefan-Boltzmann;
- leis de Wien.

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

**Leis do radiamento**

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

# Leis do radiamento

## Poder emissivo total

Poder emissivo total:

$$e, e_{\lambda} \quad [W/m^2]$$

Irradiância para todas as radiações de vários c.d.o. emitidos pelo corpo.

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

# Leis do radimento

Reflectividade, absortividade, transmissividade

Já tínhamos introduzido os conceitos de reflectividade e transmissividade quando falámos de receptores coseno.



Acrescentamos agora que, as interacções possíveis da luz com um corpo são:

(numa única frequência e num universo vazio)

$$E_{\lambda} = E_{\lambda}^{ref} + E_{\lambda}^{abs} + E_{\lambda}^{tra}$$

$$1 = \frac{E_{\lambda}^{ref}}{E_{\lambda}} + \frac{E_{\lambda}^{abs}}{E_{\lambda}} + \frac{E_{\lambda}^{tra}}{E_{\lambda}}$$

$$1 = r_{\lambda} + a_{\lambda} + t_{\lambda}$$

Variam entre 0 e 1.

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

**Leis do radimento**

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

# Leis do radimento

## Lei de Stewart

Se a quantidade de energia que o corpo emite,  $\varepsilon$ , for igual à quantidade de luz que ele absorve,  $a_\lambda$ , a sua temperatura deve manter-se constante.

$$\varepsilon = a_\lambda$$

**Emissividade,  $\varepsilon$**  → poder emissivo de um corpo.



## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

**Leis do radimento**

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

# Leis do radimento

## Lei de Kirchhoff

Para uma radiação de c.d.o.  $\lambda$ , o quociente  $\frac{e_\lambda}{a_\lambda}$  é independente da natureza do corpo e só depende da sua temperatura.

$$\frac{e_\lambda}{a_\lambda} = E(\lambda, T)$$

Então, a **emissividade** pode ser entendida como sendo a fracção do poder emissivo de um corpo real em relação ao poder emissivo do corpo negro teórico:

$$\varepsilon = a_\lambda = \frac{e_\lambda}{E(\lambda, T)}$$

Na verdade, a **lei de Kirchhoff** só é válida para um corpo absorvente perfeito. Ela falha se a absorção não for perfeita ou se se tratar de um corpo reflector (ainda que seja um reflector perfeito).

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

**Leis do radiamento**

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

# Leis do radiamento

## Lei de Plank

A lei de Plank descreve a radiação emitida pelo corpo negro a diferentes temperaturas.

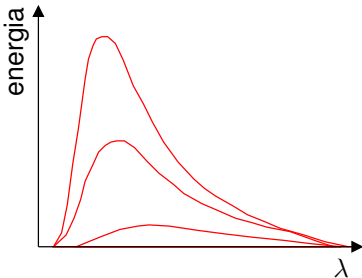
$$E(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{K\lambda T}} - 1)}$$

$K$  — constante de Boltzmann

$$K = 1,3806 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$$

$h$  — constante de Plank

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$$



Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
  - Grand. fotométricas
  - Observador padrão
  - F. sensib. espect.
  - Lei de Abney
  - Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

Fontes lumin.

- Classificação
- Rad. corpo negro
- Leis do radimento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

Filtros

- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

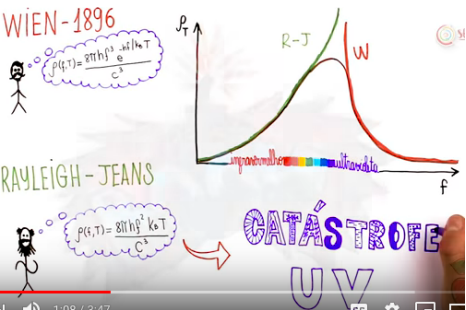
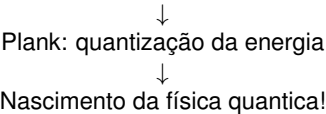
Ef. biológicos

# Leis do radimento

## Lei de Plank — Catástrofe do UV

### Catástrofe do UV:

- modelo de Rayleigh-Jeans: rebentava em altas frequências
- modelo de Wien: rebentava em baixas frequências



Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
  - Grand. fotométricas
  - Observador padrão
  - F. sensib. espect.
  - Lei de Abney
  - Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

Fontes lumin.

- Classificação
- Rad. corpo negro
- Leis do radiamento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

Filtros

- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

# Leis do radiamento

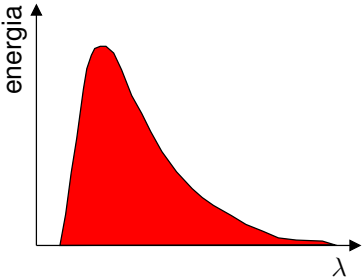
## Lei de Stefan-Boltzmann

A irradiância total de um corpo negro é proporcional à 4ª potência da temperatura.

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda = \sigma T^4$$

$\sigma$  — constante de Stefan-Boltzmann

$$\sigma = \frac{2\pi^5 K^4}{15c^2 h^3} = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$$



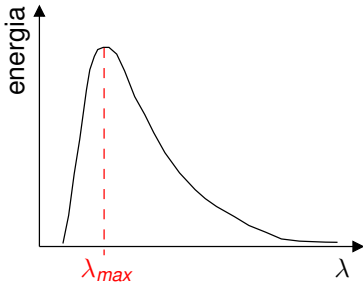
## Lei do deslocamento de Wien

O c.d.o. de emissão máxima do corpo negro varia na razão inversa da temperatura.

$$\lambda_{\max} T = A$$

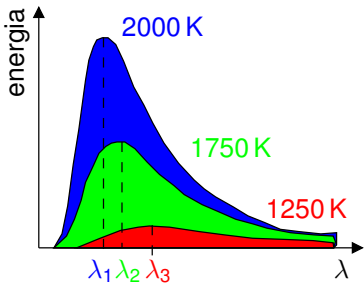
A — constante de Wien

$$A = 2897 \mu\text{mK}$$



# Leis do radiamento

Consequência da lei de Wien



Os c.d.o. máximos deslocam-se para a esquerda à medida que sobe a temperatura, por isso se chama lei do deslocamento de Wien.

azul = quente  
vermelho = frio

Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
  - Grand. fotométricas
  - Observador padrão
  - F. sensib. espect.
  - Lei de Abney
  - Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

Fontes lumin.

- Classificação
- Rad. corpo negro
- Lei do radiamento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

Filtros

- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

# Leis do radiamento

## 2ª lei de Wien

O poder emissivo máximo é proporcional à 5ª potência da temperatura.

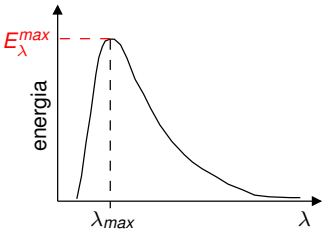
$$E_{\lambda}^{max} = BT^5$$

$$B = \frac{c_1 A^{-5}}{e^{\frac{c_2}{A}} - 1}$$

$A = 2897 \mu\text{mK}$  — constante de Wien

$$c_1 = 3,74 \times 10^{-16} \text{ W/m}^2$$

$$c_2 = 1,44 \times 10^{-2} \text{ mK}$$



# Temperatura de cor

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

**Temperatura de cor**

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

Como pode o corpo negro ajudar-nos a especificar fontes de luz?

- uma forma óbvia de descrever uma fonte de luz seria fornecendo um gráfico com o seu **espectro**;
- uma forma alternativa consiste em fornecer a sua **temperatura de cor**.

**Temperatura de cor** de uma fonte → é a temperatura à que irradiaria um corpo negro cuja cor fosse a mesma que a da fonte.



Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
- Grand. fotométricas
- Observador padrão
- F. sensib. espect.
- Lei de Abney
- Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

Fontes lumin.

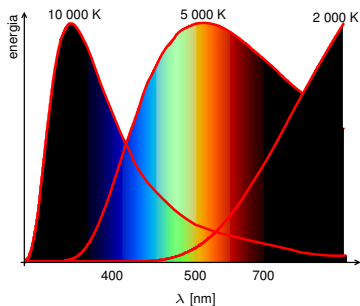
- Classificação
- Rad. corpo negro
- Leis do radimento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

Filtros

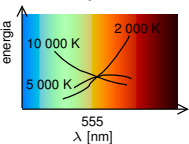
- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

# Distribuição espectral do corpo negro a 3 temperaturas



Normalizando em 555 nm as  
curvas do corpo negro para  
as 3 temperaturas:



## Grand. radiométricas

### Fotometria

- Grand. fotométricas
  - Observador padrão
  - F. sensib. espect.
  - Lei de Abney
  - Ilumin. retiniana
- Difusores coseno

Lei do 1 /  $d^2$ 

### Classificação

- Rad. corpo negro
- Leis do radiamento
- Temperatura de cor**
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

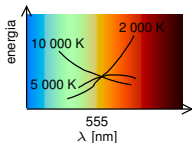
### Filtros coloridos

- Mistura de cores  
Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

## Exemplo

- ambas são percebidas como brancas;
- no entanto, a fonte de 2000 K aparecerá como + amarelada (possui + energia na zona dos  $\lambda$  maiores);
- e a fonte de 10000 K aparecerá como + azulada (possui + energia na zona dos  $\lambda$  mais baixos).



## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

# Temperatura de cor

## Utilidade prática

- Um talho poderia preferir utilizar uma fonte com  $< TC$  para iluminar a carne, salientando assim a cor vermelha da carne fresca;
- um ourives preferiria uma fonte com  $> TC$  para iluminar o mostrador dos diamantes, salientando a sua natureza azulada.

## Grand. radiométricas

## Fotometria

- Grand. fotométricas
  - Observador padrão
  - F. sensib. espect.
  - Lei de Abney
  - Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

### Classificação

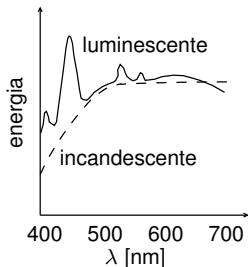
- Rad. corpo negro
- Leis do radiamento
- Temperatura de cor**
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

## Filtros coloridos

- Mistura de cores  
Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

O termo **temperatura de cor** é apenas aplicado no caso de fontes incandescentes, que emitem radiação cujo espectro apresenta a mesma forma daquele de um corpo negro.



O espectro de uma fonte luminescente não tem a mesma forma daquele de um corpo negro. Pelo contrário, apresenta picos em diferentes c.d.o..



Para especificar fontes luminescentes  
o termo utilizado é  
temperatura de cor correlacionada.

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

**Iluminantes padrão**

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

# Iluminantes padrão

## Iluminante natural

O **iluminante natural** que temos é a luz solar, que varia a cada hora do dia, a cada dia do ano e de acordo com a latitude.



Para uniformizar a observação de cor, a CIE adotou **iluminantes padrão** para colorimetria.

## Grand. radiométricas

### Fotometria

- Grand. fotométricas
  - Observador padrão
  - F. sensib. espect.
  - Lei de Abney
  - Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

### Classificação

- Rad. corpo negro  
Leis do radiação  
Temperatura de cor

Iluminantes padrão

- Níveis de iluminação  
Deslumbramento  
IRC

### Filtros coloridos

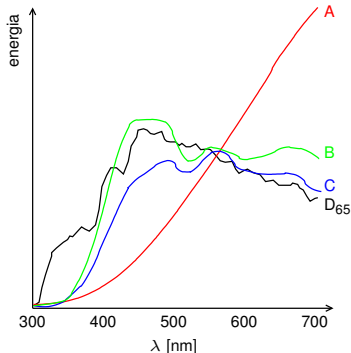
- Mistura de cores  
Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

## Iluminantes padrão

Para a realização de tarefas específicas torna-se necessária a utilização de **iluminantes padrão**:

CIE:



- **Iluminante A (2558 K)**  
(lâmpada de filamento de tungsténio)
- **Iluminante B (4870 K)**  
(luz solar directa)
- **Iluminante C (6770 K)**  
(luz diurna: luz solar + céu)
- **Iluminante D<sub>65</sub> (6504 K)**  
(luz média do dia tomada no norte da Europa)
- ...

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

# Níveis de iluminação recomendados em locais públicos

A iluminação em locais de trabalho e locais onde as pessoas circulem deve ser **suficiente** e **adequada** a cada tarefa ou situação.



A iluminância requerida para uma tarefa específica depende de:

- tamanho do detalhe;
- contraste entre o detalhe e o fundo;
- precisão e velocidade de realização da tarefa;
- idade do trabalhador;
- ...

# Níveis de iluminação devidos a fontes naturais

Condition	Illumination	
	( <i>ftcd</i> )	( <i>lux</i> )
Sunlight	10,000	107,527
Full Daylight	1,000	10,752
Overcast Day	100	1,075
Very Dark Day	10	107
Twilight	1	10.8
Deep Twilight	.1	1.08
Full Moon	.01	.108
Quarter Moon	.001	.0108
Starlight	.0001	.0011
Overcast Night	.00001	.0001

[https://www.noao.edu/education/QLTkit/ACTIVITY\\_Documents/Safety/LightLevels\\_outdoor+indoor.pdf](https://www.noao.edu/education/QLTkit/ACTIVITY_Documents/Safety/LightLevels_outdoor+indoor.pdf)



## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

**Níveis de iluminação**

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

## Illuminating Engineering Society of North America:

RP-11 Recommended Practice for Lighting for Interior and Exterior Residential Environments (2017)



## Chartered Institute of Building Services Engineers — Society of Light and Lighting (UK):

CIBSE SLL Code for Lighting - 2012



## European Standards:

EN 12464-1: 2011 Light and lighting. Lighting of work places. Indoor work places

EN 12464-2: 2014 Light and lighting. Lighting of work places. Outdoor work places

...

Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
- Grand. fotométricas
- Observador padrão
- F. sensibil. espect.
- Lei de Abney
- Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1 / d^2$

Fontes lumin.

- Classificação
- Rad. corpo negro
- Leis do radimento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

Filtros

- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

Type of Activity	Illuminance Category	Illuminance (lux)	Work Plane
Public spaces	A	20-30-50	General
Orientation	B	50-75-100	General
Occasional tasks	C	100-150-200	General
Tasks of high contrast or large size	D	200-300-500	Task lighting
Tasks of medium contrast or small size	E	500-750-1000	Task lighting
Tasks of low contrast or very small size	F	1000-1500-2000	Task lighting
Category F tasks of long duration	G	2000-3000-5000	Supplementary lighting
Very prolonged and exacting tasks	H	5000-7500-10000	Supplementary lighting
Special tasks	I	10000-15000-20000	Supplementary lighting

TABLE 5-1  
Illuminance categories and ranges for various visual tasks (interiors). Illuminances for categories G to H should be accomplished by a combination of general (ambient) and task lighting

D.Pitts, R.Kleinstei. Environmental Vision. Butterworth-Heinemann. 1989.



Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
- Grand. fotométricas
- Observador padrão
- F. sensib. espect.
- Lei de Abney
- Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

Fontes lumin.

- Classificação
- Rad. corpo negro
- Leis do radimento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

Filtros

- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

Table 8.6 Examples of activities/interiors appropriate for each standard service illuminance (from CIBS 1984, reproduced courtesy of the Chartered Institute of Building Services) **(cont.)**

Standard service illuminance (lx)	Characteristics of the activity/interior	Representative activities/interiors
750	Visual tasks difficult, i.e. details to be seen are small (3–5 min arc) and of low contrast, also good colour judgements may be required	Drawing offices, ceramic decoration, meat inspection
1000	Visual tasks very difficult, i.e. details to be seen are very small (2–3 min arc) and can be of very low contrast. Also accurate colour judgements may be required.	Electronic component assembly, gauge and tool rooms, retouching paintwork
1500	Visual tasks extremely difficult, i.e. details to be seen extremely small (1–2 min arc) and of low contrast. Visual aids may be of advantage	Inspection of graphic reproduction, hand tailoring, fine die sinking
2000	Visual tasks exceptionally difficult, i.e. details to be seen exceptionally small (< 1 min arc) with very low contrasts. Visual aids will be of advantage	Assembly of minute mechanisms, finished fabric inspection

R.North. Work and the Eye. Oxford. 1993.

Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
- Grand. fotométricas
- Observador padrão
- F. sensib. espect.
- Lei de Abney
- Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1 / d^2$

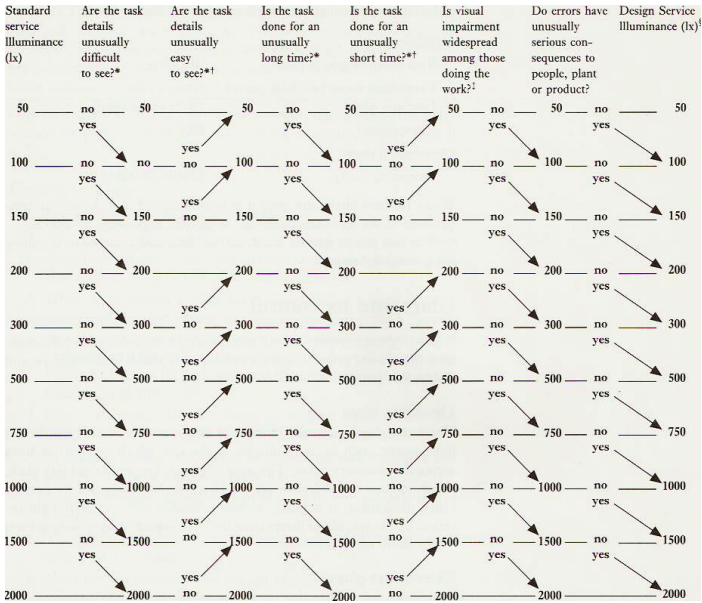
Fontes lumin.

- Classificação
- Rad. corpo negro
- Leis do radimento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

Filtros

- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos



## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

## Ophtalmology

- test room (working plane) 50 -300 lux
- consulting room (working plane) 300 lux
- vision chart (vertical plane) 300 lux
- chair (local) 1000 lux

## Operating theatre

- operating cavity 10 000 - 50 000 lux



When **Ishihara charts** are used it is recommended that the colour temperature of the light source should be as near as possible to 6500 K.



The **test rooms** require black-out facilities and a means of dimming the general lighting.

Introdução

Grand. radiométricas  
Fotometria  
- Grand. fotométricas  
- Observador padrão  
- F. sensib. espect.  
- Lei de Abney  
- Ilumin. retiniana  
Difusores coseno  
Lei do  $1/d^2$

Fontes lumin.

Classificação  
Rad. corpo negro  
Leis do radimento  
Temperatura de cor  
Iluminantes padrão  
Níveis de iluminação  
Deslumbramento  
IRC

Filtros

Filtros coloridos  
Mistura de cores  
Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

Estabelecimentos de ensino e salas de conferências

	Maintained Illuminance (Lux)	Limiting Glare Rating	Notes
Classrooms, tutorial rooms	300	19	1
Classroom for evening classes and adult education, lecture halls	500	19	1
Black board	500	19	2
Demonstration table	500	19	3
Art rooms	500	19	
Art rooms in art schools	750	19	4
Technical drawing rooms	750	16	
Practical rooms and laboratories	500	19	
Handicraft rooms, teaching workshops	500	19	
Music practice rooms, language laboratories	300	19	
Computer practice rooms	300	19	5
Preparation rooms and workshops	500	22	
Entrance halls	200	22	
Circulation areas, corridors	100	25	
Stairs	150	25	
Student common rooms, assembly halls	200	22	
Teachers rooms	300	19	
Stock rooms for teaching materials	100	25	
Sports halls, gymnasiums, swimming pools	300	22	6
School canteens	200	22	
Kitchen	500	22	

Notes:

1. Lighting should be controllable.
2. Prevent specular reflections.
3. In lecture halls 750 lux.
4. Colour temperature of the light should be greater than 5000K.
5. See Lighting of Workstations with Display Screen Equipment.
6. See CIBSE Lighting Guide LG4: Sports

Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
  - Grand. fotométricas
  - Observador padrão
  - F. sensib. espect.
  - Lei de Abney
  - Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

Fontes lumin.

- Classificação
- Rad. corpo negro
- Leis do radiamento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

Filtros

- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

3. SALAS DE EXAMEN				
Nº REF	TIPO DE INTERIOR, TAREA ACTIVIDAD	$E_{m lux}$	$UGR_L$	$R_a$
3.1	ALUMBRADO GENERAL	500	19	90
3.2	EXAMEN Y TRATAMIENTO	1.000	19	90
3.3	EXAMEN OCULAR EXTERNO	1.000	-	90
3.4	PRUEBAS DE LECTURA Y VISIÓN CROMÁTICA CON DIAGRAMA DE VISIÓN	500	16	90
3.5	EXAMEN AUDITIVO	1.000	-	90
3.6	ALUMBRADO GENERAL EXAMEN OCULAR Y AUDITIVO	300	19	90

$UGR_L$  — Índice de deslumbramento unificado

$R_a$  — Índice de restituição cromática

<https://www.saltoki.com/iluminacion/docs/03-UNE-12464.1.pdf>



## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Luminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

# Directivas em Portugal

Em 2002 a União Europeia aprovou uma resolução que introduziu no espaço europeu as normas **12464-1** e **12464-2** (iluminação interior e exterior) transpondo para a ordem jurídica europeia a versão inglesa, para serem seguidas em todos os estados membros, mas sem carácter vinculativo ou obrigatório, não se sobrepondo à legislação nacional de cada estado membro.



Em 2003, o Comité Europeu de Normalização (CEN) adoptou oficialmente aquela resolução do Parlamento Europeu. Como membro activo do CEN, Portugal está obrigado a aplicar todas as normas que aquela entidade adote.



Logo, as normas sobre iluminação passaram obrigatoriamente, desde 2003, a serem aplicadas em Portugal, independentemente de estarem ou não transpostas para a legislação nacional.



## Decreto-Lei 118/2013

### Portaria 349-D/2013

RECS — Regulamento de desempenho energético dos edifícios de comércio e serviços

Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
- Grand. fotométricas
- Observador padrão
- F. sensib. espect.
- Lei de Abney
- Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

Fontes lumin.

- Classificação
- Rad. corpo negro
- Leis do radimento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

Filtros

- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

# Portaria 349-D/2013

## Valores máximos de DPI

Tipo de espaço segundo a função	DPI		Fator de controlo	
	[(w/m²)/100lux]		Ocupação FO	Disponibilidade de luz natural FD
	Entrada em vigor	31 dez 2015		
Escritórios com mais de 6 pessoas, salas de desenho.	2,5	2,1	0,9	0,9
Escritório individual 1-6 pessoas	2,8	2,4	0,9	0,9
Show room e salas de exposição, museus	2,8	2,4	1,0	1,0
Salas de aula, salas de leitura, bibliotecas, salas de trabalho de apoio, salas de reuniões/conferências/auditórios	2,8	2,4	0,9	0,8
Laboratórios, salas de exames/tratamento (1), blocos operatórios (1)	2,8	2,4	1,0	1,0
Salas de pré e pós-operatório,	4,0	3,4	0,8	0,8

Tipo de espaço segundo a função	DPI		Fator de controlo	
	[(w/m²)/100lux]		Ocupação FO	Disponibilidade de luz natural FD
	Entrada em vigor	31 dez 2015		
Cozinhas, armazéns, arquivos, polidesportivos/ginásios e similares (2), salas técnicas (centros de dados, fotocópias e similares), parques de estacionamento interiores	4,0	3,4	0,9	1,0
Plataformas de transportes e similares	4,0	3,4	1,0	1,0
Lojas de comércio e serviços, retalhistas em geral - zona de público, espaços fabris em geral	4,0	3,4	1,0	1,0
Hall/Entradas, Corredores, escadas, salas de espera, instalações sanitárias, enfermarias e quartos individuais de clínicas e hospitais (3), salas de refeições (exceto restaurantes)	4,5	3,8	0,8	0,9

## Densidade de potência de iluminação:

$$DPI = \frac{(P_n F_O F_D) + P_C}{A} \quad [W/m^2]$$

- $P_n$  — potência total dos sistemas de luminárias instaladas,  $P_n = \sum P_i$
- $P_i$  — potência do sistema lâmpada + balastro
- $F_O$  — factor de controlo por ocupação, conforme Tabela
- $F_D$  — factor de controlo por disponibilidade de luz natural, conforme Tabela
- $P_C$  — potência total dos equipamentos de controlo para as luminárias em funcionamento
- $A$  — área interior útil da zona, [m²]

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensibil. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

**Níveis de iluminação**

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

# Para consulta durante a realização do trabalho prático

- **EN 12464-1:** Iluminação de interiores
- **EN 12464-2:** Iluminação de exteriores
- **EN 13201:** Iluminação de vias públicas
- **EN 15193:** Desempenho energético dos edifícios

Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
- Grand. fotométricas
- Observador padrão
- F. sensib. espect.
- Lei de Abney
- Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

Fontes lumin.

- Classificação
- Rad. corpo negro
- Leis do radimento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

Filtros

- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

# Importância das directivas

Tarefa (C de Landolt) × Iluminância

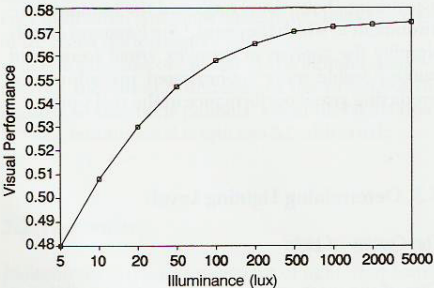


FIGURE 5-2  
Visual performance as a function of illuminance for a Landolt C task. Data from Weston HC: The Relation Between Illumination and Visual Efficiency; The Effect of Brightness Contrast. Industrial Health Research Board, Report No. 87. London, HMSO, 1945.

## Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas
- Observador padrão

- F. sensib. espect.
- Lei de Abney
- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Fontes lumin.

### Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radiamento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

### Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

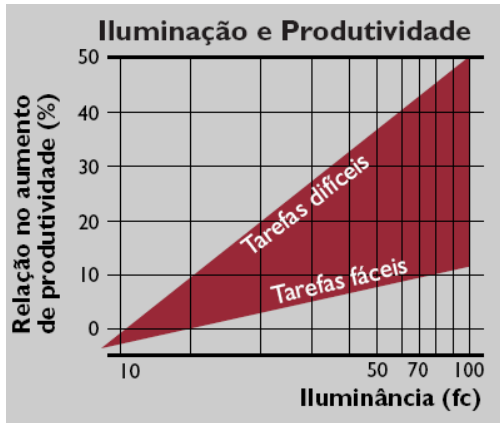
### Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

## Importância das directivas



<http://higiene-seguranca-trabalho.dashofer.pt>

# Importância das directivas

## Desperdício de energia / Poluição luminosa

Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas
- Observador padrão
- F. sensib. espect.
- Lei de Abney
- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radiamento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

Ef. biológicos



Foto de satélite tomada em 2012.12.10. NASA.

# Deslumbramento

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

**Deslumbramento**

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

Um bom sistema de iluminação, além de garantir níveis adequados de luz, deve evitar **deslumbramento**.

incapacitante

ex: Sol, faróis de 1 carro



impede a visão do detalhe

incapacidade de realizar a tarefa

desconforto

mts. x não nos damos conta



causa desconforto visual

não impede a realização da tarefa

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

# Deslumbramento

## Desconforto

O desconforto pode **não ser aparente** mas, os seus efeitos  
são **acumulativos**.



Contribui para o cansaço, principalmente ao final do dia.



Pessoas com a saúde debilitada e idosos são mais  
susceptíveis ao cansaço causado pelo deslumbramento.



## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

**Deslumbramento**

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

# Deslumbramento

## Desconforto

$$g = \frac{L_S^a \times \Omega^b}{L_{bg}^c \times f(\theta)}$$

(*glare*)

$L_S$  — luminância da fonte [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]

$L_{bg}$  — luminância do fundo [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]

$\Omega$  — ângulo sólido subtendido pela fonte no olho

$a, b, c$  — constantes

$f(\theta)$  — indica o efeito da posição da fonte em relação ao olho.

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

# Deslumbramento

## Níveis deslumbramento

Os níveis de deslumbramento máximo aceitável também estão definidos em directivas.



Normalmente os valores aceitáveis estão entre  $g = 10$  (baixo deslumbramento) e  $g = 30$  (alto deslumbramento).

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

# Deslumbramento

## Controle do deslumbramento

Muitas vezes é possível diminuir os níveis de deslumbramento:

- controle da **reflectividade do objecto e do fundo** de modo a conseguir contraste adequado para ver a tarefa mas sem ser tão alto que provoque desconforto;
- quando a tarefa requer **iluminação local**, a **iluminação ambiente** não deve ser inferior a 1/3 da iluminação local;
- **superfícies brilhantes** devem ser evitadas (reflectem a imagem);
- utilizar **difusores**;
- o **ângulo sólido subtendido pela fonte no olho do observador** deve ser o menor possível;
- mover a fonte de deslumbramento para fora da linha do olhar (**aumentar  $f(\theta)$** );
- **evitar janelas** próximo da linha do olhar.

Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
  - Grand. fotométricas
  - Observador padrão
  - F. sensib. espect.
  - Lei de Abney
  - Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

Fontes lumin.

- Classificação
- Rad. corpo negro
- Leis do radimento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

Filtros

- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

# Índice de restituição cromática

Índice de restituição cromática, IRC → é uma medida da capacidade de uma fonte de luz em reproduzir as cores o mais perto possível da realidade.



Uma fonte de luz muito semelhante à luz do Sol mostra todas as cores correctamente: IRC = 100.



Quanto menor for este valor, pior é a restituição de cores.



## Níveis de restituição de cor (CIE, DIN5035):

Nível	Classificação	IRC	Aplicação indicada
1A	Muito bom	90-100	Comparação de cores, exames clínicos, galerias de pintura
1B		80-89	Moradias, hotéis, restaurantes, lojas, escritórios, hospitais
2A	Bom	70-79	Indústria gráfica de tinta e têxteis
2B		60-69	Indústria
3	Mau	40-59	Edifícios
4		20-39	Indústria (com menos exigência)
			-

## Introdução

Grand. radiométricas  
Fotometria  
- Grand. fotométricas  
- Observador padrão  
- F. sensib. espect.  
- Lei de Abney  
- Ilumin. retiniana  
Difusores coseno  
Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação  
Rad. corpo negro  
Leis do radimento  
Temperatura de cor  
Iluminantes padrão  
Níveis de iluminação  
Deslumbramento  
IRC

## Filtros

Filtros coloridos  
Mistura de cores  
Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

1

### Conceitos básicos de radiometria

Grandezas radiométricas  
Fotometria  
- Grandezas fotométricas  
- Observador padrão  
- Determinação da função de sensibilidade espectral  
- Lei da aditividade de Abney  
- Iluminação retiniana  
Difusores coseno  
Lei do inverso do quadrado da distância

2

### Especificação de fontes luminosas

Classificação das fontes luminosas  
Radiação do corpo negro  
Leis do radimento  
Temperatura de cor  
Iluminantes padrão  
Níveis de iluminação recomendados em locais públicos  
Deslumbramento  
Índice de restituição cromática

3

### Filtros

Filtros coloridos  
Mistura aditiva e subtractiva de cores  
Filtros de densidade neutra

4

### Efeitos biológicos da radiação eletromagnética (do UV ao IV)

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

**Filtros coloridos**

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

# Filtros coloridos

Para obtermos luz com uma determinada distribuição espectral diferente da emitida pela fonte podemos utilizar **filtros**.

De uma forma muito simples podemos dizer que os **filtros** subtraem luz de uma fonte de maneira a produzir uma determinada distribuição espectral (cor) pretendida.

Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
  - Grand. fotométricas
  - Observador padrão
  - F. sensib. espect.
  - Lei de Abney
  - Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

Fontes lumin.

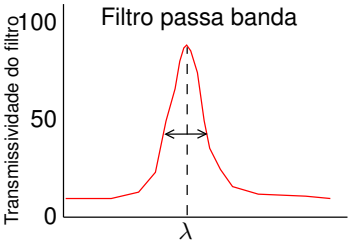
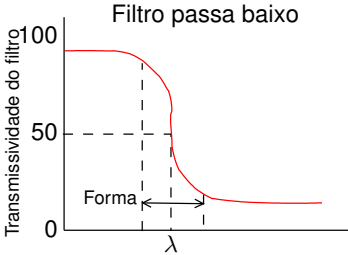
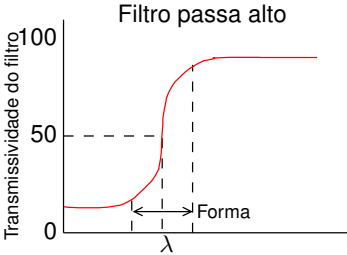
- Classificação
- Rad. corpo negro
- Leis do radiamento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

Filtros

- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

# Filtros coloridos



Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
  - Grand. fotométricas
  - Observador padrão
  - F. sensib. espect.
  - Lei de Abney
  - Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

Fontes lumin.

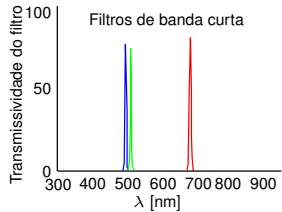
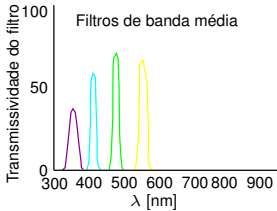
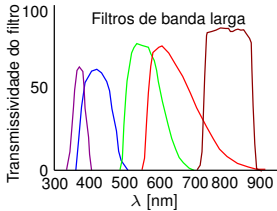
- Classificação
- Rad. corpo negro
- Leis do radimento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

Filtros

- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

# Filtros coloridos





## Grand. radiométricas

## Fotometria

- Grand. fotométricas
  - Observador padrão
  - F. sensib. espect.
  - Lei de Abney
  - Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

### Classificação

- Rad. corpo negro
- Leis do radiação
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

### Filtros coloridos

- Mistura de cores  
Filtros densid. neutra

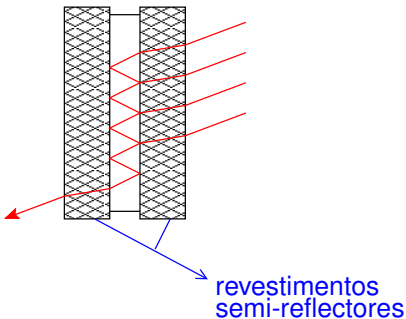
Ef. biológicos

## Filtros de interferência

Um pequeno espaçamento entre 2 revestimentos semi-reflectores pode ser calculado de modo a produzir **múltiplas reflexões** e **interferência destrutiva** entre os c.d.o. de modo a seleccionar apenas o c.d.o. de interesse.



Com este método é possível conseguir filtros de banda tão estreita que podem ser considerados quase monocromáticos.



Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
  - Grand. fotométricas
  - Observador padrão
  - F. sensib. espect.
  - Lei de Abney
  - Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

Fontes lumin.

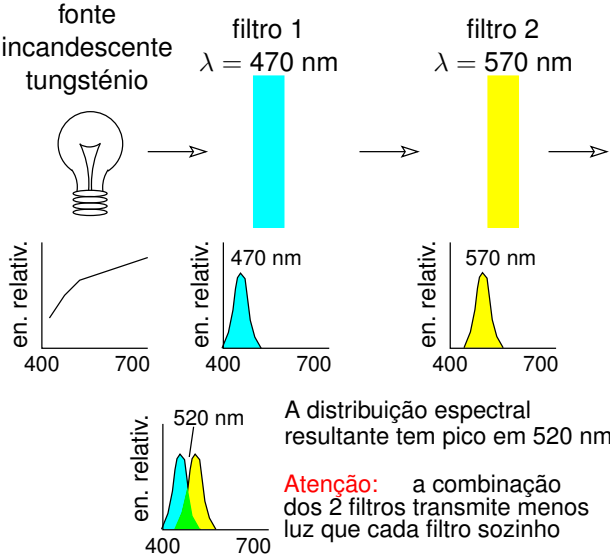
- Classificação
- Rad. corpo negro
- Leis do radiamento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

Filtros

- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

# Mistura subtractiva de cores



# Mistura subtractiva de cores

## Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
  - Grand. fotométricas
  - Observador padrão
  - F. sensib. espect.
  - Lei de Abney
  - Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

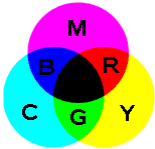
## Fontes lumin.

- Classificação
- Rad. corpo negro
- Leis do radiamento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

## Filtros

- Filtros coloridos
- Mistura de cores**
- Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos



# Mistura aditiva de cores

Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
  - Grand. fotométricas
  - Observador padrão
  - F. sensib. espect.
  - Lei de Abney
  - Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

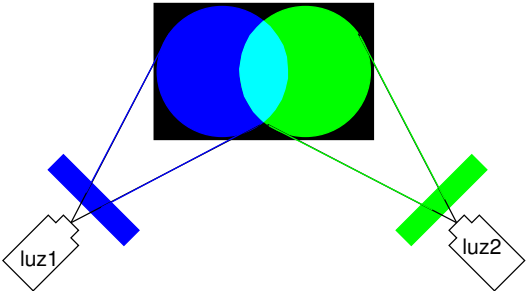
Fontes lumin.

- Classificação
- Rad. corpo negro
- Leis do radiamento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

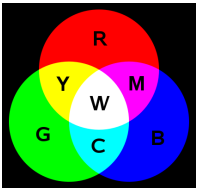
Filtros

- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos



A luz existente na mistura aditiva é maior que aquela que é emitida por qualquer uma das fontes por separado.



# Filtros de densidade neutra

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

**Filtro de densidade neutra** → atenua da mesma maneira a luz de todos os c.d.o..



Densidade óptica de um filtro:

$$DO = \log \frac{1}{t} = \log 1 - \log t = -\log t$$

Nota: Em certos domínios (como na química ou em filtros ópticos) é costume utilizar logaritmos de base 10, enquanto noutras áreas do saber se utiliza tradicionalmente o logaritmo natural.

(densidade óptica ↔ espessura óptica)

## Introdução

Grand. radiométricas  
Fotometria  
- Grand. fotométricas  
- Observador padrão  
- F. sensib. espect.  
- Lei de Abney  
- Ilumin. retiniana  
Difusores coseno  
Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação  
Rad. corpo negro  
Leis do radimento  
Temperatura de cor  
Iluminantes padrão  
Níveis de iluminação  
Deslumbramento  
IRC

## Filtros

Filtros coloridos  
Mistura de cores  
Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

# Outline

1

### Conceitos básicos de radiometria

Grandezas radiométricas  
Fotometria  
- Grandezas fotométricas  
- Observador padrão  
- Determinação da função de sensibilidade espectral  
- Lei da aditividade de Abney  
- Iluminação retiniana  
Difusores coseno  
Lei do inverso do quadrado da distância

2

### Especificação de fontes luminosas

Classificação das fontes luminosas  
Radiação do corpo negro  
Leis do radimento  
Temperatura de cor  
Iluminantes padrão  
Níveis de iluminação recomendados em locais públicos  
Deslumbramento  
Índice de restituição cromática

3

### Filtros

Filtros coloridos  
Mistura aditiva e subtractiva de cores  
Filtros de densidade neutra

4

### Efeitos biológicos da radiação eletromagnética (do UV ao IV)

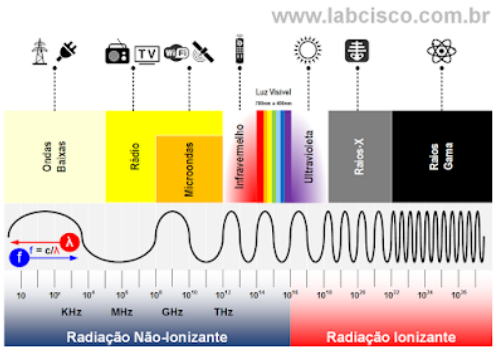
# Efeitos biológicos da radiação eletromagnética

Radiação ionizante

Radiação não ionizante

Diferença: energia

Possui ou não energia suficiente para arrancar electrões de um átomo.



# Efeitos biológicos da radiação óptica (do UV ao IV)

Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
  - Grand. fotométricas
  - Observador padrão
  - F. sensib. espect.
  - Lei de Abney
  - Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

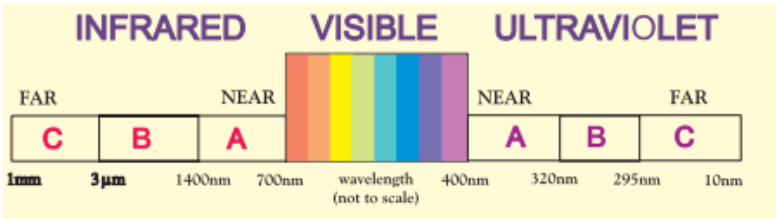
Fontes lumin.

- Classificação
- Rad. corpo negro
- Leis do radimento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

Filtros

- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos



<https://saunaspace.com/wp-content/uploads/2015/03/Radiation-effects-on-the-eye.pdf>



Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
- Grand. fotométricas
- Observador padrão
- F. sensib. espect.
- Lei de Abney
- Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

Fontes lumin.

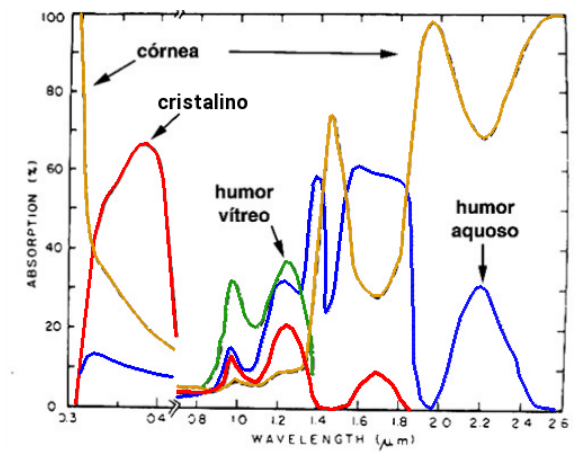
- Classificação
- Rad. corpo negro
- Leis do radimento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

Filtros

- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

# Absorção espectral dos meios oculares



**Figure 11.2** Spectral absorption of human ocular media. Broken curve, cornea; dotted curve, aqueous humour; full curve, lens; chain curve, vitreous humour (from Sloney and Wolbarsht 1980).

Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
- Grand. fotométricas
- Observador padrão
- F. sensib. espect.
- Lei de Abney
- Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

Fontes lumin.

- Classificação
- Rad. corpo negro
- Leis do radimento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

Filtros

- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

# Efeitos biológicos da radiação óptica (do UV ao IV)

<u>Região espectral</u>	Tecido afetado	Local de absorção	Tipo de dano
UVC (< 280nm) UVB (280–320nm)	Córnea	Epitélio	Fotoquímico: fotoqueratite e opacidades na córnea
UVB (280–320nm) UVA (320–400nm)	Cristalino	Núcleo	Fotoquímico: Catarata
Visível (400–750nm)	Retina	Epitélio pigmentário Hemoglobina Pigmento macular	- Térmico: diminuição da visão - Hemorragia intraocular - Alterações na percepção de cores
IVA (780–1400nm)	Retina Cristalino	Epitélio pigmentário Epitélio	- Térmico: diminuição da visão - Catarata
IVB (1400– 3000nm)	Córnea	Epitélio	Opacidades
IVC (3000–10000nm)	Córnea	Epitélio	Queimaduras superficiais

<http://www.master.lag.usp.br/indiceUV/olho.html>

## Introdução

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. aspect.

- Lei de Abney

- Illumin. retiniana

### Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$ 

### Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radramento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de ilumina

Deslumbramento

IRC

### Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. ne

Ef. biológicos

<http://player.slideplayer.com.br/3/1271714/#>

# Efeitos biológicos da radiação UV

Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
- Grand. fotométricas
- Observador padrão
- F. sensib. espect.
- Lei de Abney
- Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

Fontes lumin.

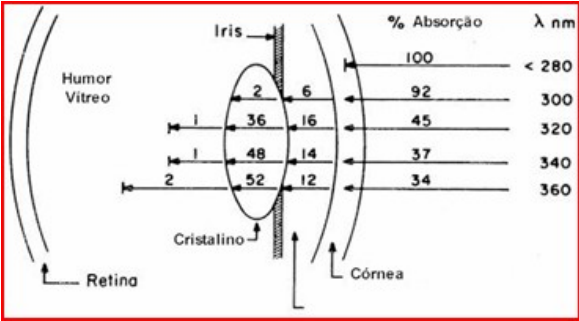
- Classificação
- Rad. corpo negro
- Leis do radimento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

Filtros

- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos

Absorção da radiação UV pelas estruturas oculares:



# Efeitos biológicos da radiação IV

Introdução

- Grand. radiométricas
- Fotometria
- Grand. fotométricas
- Observador padrão
- F. sensib. espect.
- Lei de Abney
- Ilumin. retiniana
- Difusores coseno
- Lei do  $1/d^2$

Fontes lumin.

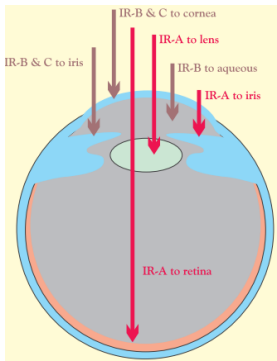
Classificação

- Rad. corpo negro
- Leis do radimento
- Temperatura de cor
- Iluminantes padrão
- Níveis de iluminação
- Deslumbramento
- IRC

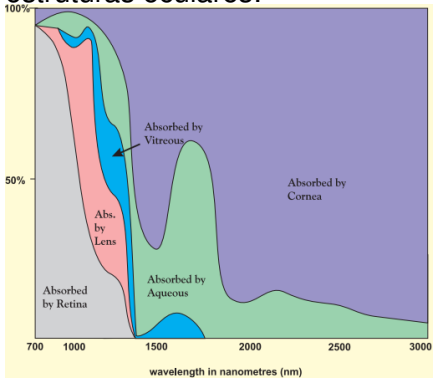
Filtros

- Filtros coloridos
- Mistura de cores
- Filtros densid. neutra

Ef. biológicos



## Absorção da radiação IV pelas estruturas oculares:



<https://saunaspace.com/wp-content/uploads/2015/03/Radiation-effects-on-the-eye.pdf>

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensibil. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

# Luz azul: benéfica ou não?

O excesso de luz azul emitida por monitores, *tablets*, telemóveis, etc, tem sido associado a aumento do risco de envelhecimento precoce da retina e risco de degeneração macular.



Mas, por outro lado:

- Transtorno afetivo sazonal — países nórdicos;
- ciclo circadiano — regulação dos horários de sono.

# Limites de exposição para o olho

## Introdução

Grand. radiométricas

Fotometria

- Grand. fotométricas

- Observador padrão

- F. sensib. espect.

- Lei de Abney

- Ilumin. retiniana

Difusores coseno

Lei do  $1/d^2$ 

## Fontes lumin.

Classificação

Rad. corpo negro

Leis do radimento

Temperatura de cor

Iluminantes padrão

Níveis de iluminação

Deslumbramento

IRC

## Filtros

Filtros coloridos

Mistura de cores

Filtros densid. neutra

## Ef. biológicos

Ocular Plane and Guideline	Exposure Guideline	Damage
<b>Cornea</b>		
UV	3 mJ/cm <sup>2</sup> effective for $S(\lambda)$	4 mJ/cm <sup>2</sup> at 270 nm
<b>Lens</b>		
UV-B	3 mJ/cm <sup>2</sup> effective for $S(\lambda)$	600 mJ/cm <sup>2</sup> at 300 nm
UV-A	1.0 J/cm <sup>2</sup>	Photochem > 2 J/cm <sup>2</sup> at > 315 nm. Thermal at 351–364 nm: 33 J/cm <sup>2</sup> , 1s
IR	0.1 W/cm <sup>2</sup>	4 W/cm <sup>2</sup>
<b>Retina</b>		
Photochemistry	100 J/cm <sup>2</sup> sr effective for $B(\lambda)$ or $A(\lambda)$	3 J/cm <sup>2</sup> at the retina at 320 nm and 22 J/cm <sup>2</sup> at 442 nm
Thermal	$5/\alpha t^{0.25}$ W/cm <sup>2</sup> sr effective for $R(\lambda)$	1–1000 W/cm <sup>2</sup> with retinal spot size
<b>Cornea and Lens</b>		
IR-A and IR-B	$1.8 t^{-0.75}$ W/cm <sup>2</sup> for $t < 1000$ s	>4 W/cm <sup>2</sup>
<b>Cornea</b>		
IR-C	0.1 W/cm <sup>2</sup>	1 W/cm <sup>2</sup>