

Radiometria e fotometria:

Radiometria dedica-se à medição da radiação electromagnética. Uma fonte de radiação electromagnética emite energia que se propaga no espaço. Uma fonte luminosa, emite energia, sob a forma de luz visível, que se propaga pelo espaço e que os nossos olhos nos permitem ver. A fotometria trata da medição da radiação visível e portanto vai entrar em linha de conta com a forma como os nossos olhos veem. Todas as grandezas definidas em radiometria têm um correspondente direto em fotometria. As unidades fotométricas obtêm-se das radiométricas pela simples multiplicação por um parâmetro, que depende do comprimento de onda (na gama visível), chamado eficácia luminosa, $K(\lambda)$.

As fontes de radiação podem ser primárias ou secundárias (por exemplo a lua que reflecte a luz do sol).

Uma fonte pontual isotrópica emite energia de forma homogénea em todas as direcções. Assim a energia (Joule) radiante emitida na unidade de tempo pela fonte, vai ser igual à potência (Watt), ou **fluxo radiante**, P , que "atravessa" uma superfície esférica centrada na fonte, qualquer que seja o seu raio (a menos que haja absorção de luz no meio atravessado). A potência por unidade de superfície, também chamada de densidade de fluxo radiante, a uma distância r da fonte será:

$$p = P / A = P / 4\pi r^2 \quad (\text{esta variação com } 1/r^2 \text{ é extremamente importante! Figura 1})$$

em que P é a potência da fonte (em fotometria é chamada fluxo luminoso, P_l , e exprime-se em lumen, lm) e $4\pi r^2$ é a área da superfície esférica de raio r centrada na fonte (considerando que não há absorção).

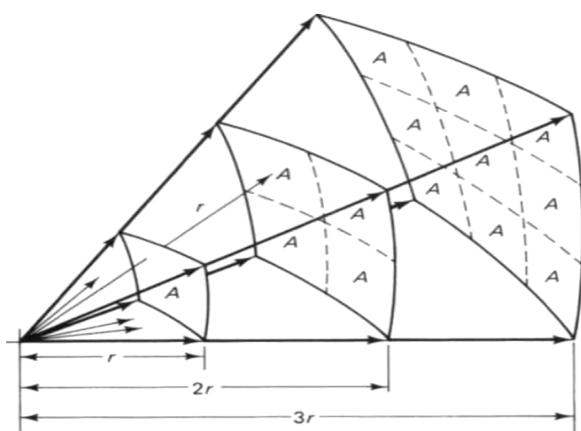


Fig 1

A p também se chama **densidade de fluxo radiante** (ou **emitância** se se refere a superfícies que emitem radiação, ou **irradiância** se se refere a superfícies irradiadas) e exprime-se em W/m^2 (a que corresponde o Lux, lx, em fotometria referindo-se à chamada iluminância. $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$).

O fluxo radiante emitido por unidade de ângulo sólido (por uma fonte pontual numa certa direção) (figura 2) é a **intensidade radiante**, I_r (expresso em W/sr):

$$I_r = dP / d\omega$$

em que o **ângulo sólido**, expresso em stereradianos, sr, subtendido por uma área dA a uma distancia r da origem (fonte) é:

$$d\omega = dA / r^2$$

O ângulo sólido correspondente a toda uma superfície esférica é de 4π stereradianos ($4\pi \text{ sr}$). Assim a intensidade radiante (valendo da mesma forma para intensidade luminosa) de uma fonte pontual ou esférica radiando de forma uniforme em todas as direções será simplesmente a sua potência (fluxo radiante – ou fluxo luminoso em fotometria) a dividir por 4π .

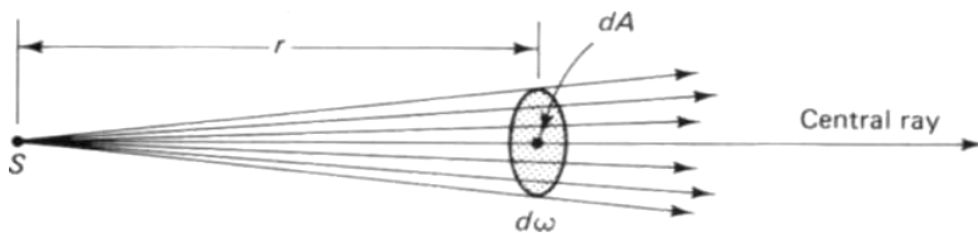


fig 2

A **irradiância** (densidade de fluxo radiante) pode ser expressa em função da intensidade radiante:

$$p = P / A = 4\pi I_r / 4\pi r^2 = I_r / r^2 \quad (\text{W/m}^2)$$

variando, portanto, de forma inversamente proporcional ao quadrado da distancia.

Se a superfície emissora, fonte, ou irradiada (iluminada) está **inclinada** em relação à direção de propagação da radiação, a “quantidade” de radiação será menor e definimos a **radiância**:

$$R = dI_r / dA \cos \theta \quad (\text{em W/sr.m}^2)$$

A lei de Lambert diz que para superfícies em que a radiância é igual para todas as direções (superfícies Lambertianas) a intensidade radiante diminui de um valor máximo na direção perpendicular à superfície:

$$I_r(\theta) = I_r(0) \cos \theta$$

Intensidade de uma fonte luminosa, I_L , é o fluxo luminoso (correspondente ao fluxo radiante, P , como consideramos na radiometria) emitido pela fonte por unidade de ângulo sólido e exprime-se em candelas (lumen/stereoradiano = candela. $1 \text{ lm/sr} = 1 \text{ cd}$):

$$I_L = dP_L / d\omega$$

Um candela, cd, - é a intensidade da luz emitida por uma superfície de $1/600000 \text{ m}^2$, perpendicularmente a esta, à temperatura de congelação da platina.

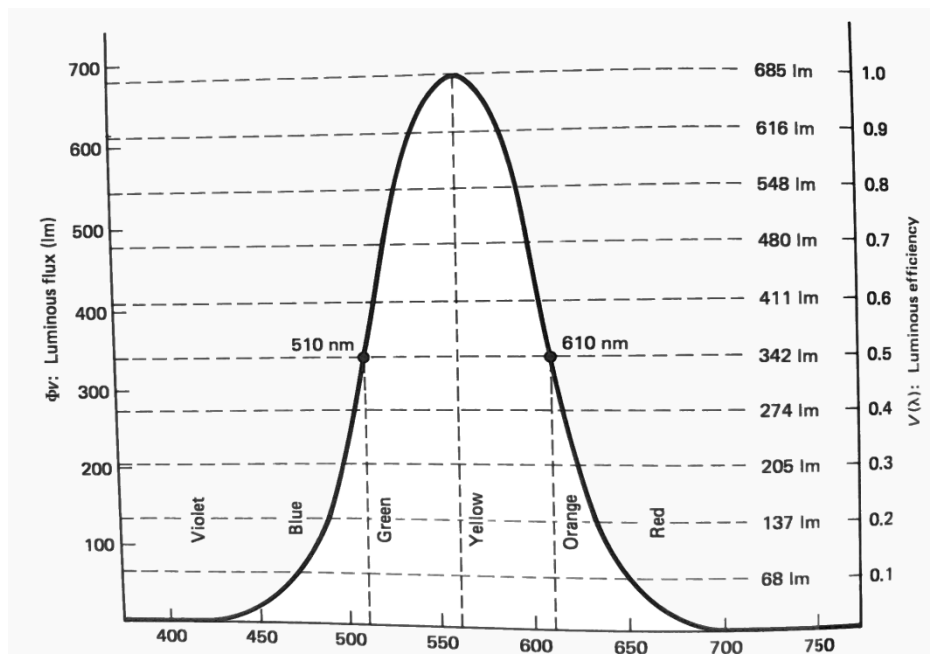


Fig 3.

Como vimos, as unidades fotométricas obtêm-se das radiométricas pela simples multiplicação por um parâmetro, que depende do comprimento de onda (na gama visível), chamado **eficácia luminosa**, $K(\lambda)$. A eficácia luminosa mede a eficiência de deteção de luz visível pelo olho humano médio. A **eficiência luminosa**, $V(\lambda)$, do olho humano é dada em função do comprimento de onda (luz visível) sob a forma de uma curva estabelecida pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE) (figura 3). A **eficácia luminosa** é obtida multiplicando o pico da curva (fluxo luminoso, em lumens, lm), 685 lm, pela eficiência luminosa:

$$K(\lambda) = 685 \cdot V(\lambda)$$

$$\text{Grandeza fotométrica} = \text{Grandeza radiométrica} \times K(\lambda)$$

Em fotometria, temos um emissor, um receptor e o meio que os separa.

A iluminação produzida num ponto do receptor, por uma fonte pontual de intensidade I_L , depende desta e da distância da fonte ao ponto (r).

A esta iluminação chama-se geralmente **Iluminância**, I_L , e será igual ao fluxo luminoso por unidade de área. É a grandeza fotométrica correspondente à irradiância, p :

$$p = dP_L / dA = I_L / r^2 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

$$I_L = p \cdot K(\lambda)$$

$$= [dP_L / dA] \cdot K(\lambda) = [I_L / r^2] \cdot K(\lambda) \quad (\text{em lumen/m}^2 = \text{lux, lx})$$

Caso a superfície emissora, fonte, ou irradiada (superfície iluminada) esteja **inclinada** em relação à direção de propagação da radiação, a **Luminância**, L , será a grandeza fotométrica correspondente à **radiância**:

$$R = dI_r / dA \cos \theta \text{ (em W/sr.m}^2\text{)}$$

$$L = R \cdot K(\lambda) \quad (\text{em cd/m}^2\text{)}$$

Resumo:

Grandezas Radiométricas	Grandezas Fotométricas
Potência ou fluxo radiante (P) (em W)	Fluxo luminoso (P_L) (em lm)
Potência por unidade de superfície ou densidade de fluxo radiante (ou emitância ou irradiância) (p) (em W/m ²) – $p = P / 4\pi r^2 = I_r / r^2$	Iluminância (I_L) (em lx=lm/m ²)
Intensidade radiante (I_r) (em W/sr) – $I_r = P / \omega$	Intensidade luminosa (I_L) (em cd = lm/sr)
Radiância (R) – é a irradiância quando a incidência não é normal (em W/sr.m ²) – $R = I_r / A \cos \theta$	Luminância (L) – é a iluminância quando a incidência não é normal (em cd/m ²)

Eficácia luminosa $K(\lambda) = 685 \times \text{eficiência luminosa}$, (eficiência luminosa = $V(\lambda)$).

Grandeza fotométrica = grandeza radiométrica $\times K(\lambda)$.

Problemas (fotometria/radiometria):

1. Uma lâmpada de 100W de potência é colocada a 2 metros de uma parede perpendicular à linha que une a lâmpada à parede.
Qual a irradiância na superfície?
Se a lâmpada emite 650 nm qual a iluminância na superfície?
2. Considere uma fonte luminosa pontual (distâncias em causa - emissor ao receptor - muito maiores que a dimensão da fonte) emitindo a 510 nm com uma potência de 8000 kW.
Qual o fluxo luminoso?
Qual a intensidade luminosa da fonte?
Qual a iluminância sobre um alvo de 20 cm de raio, colocado a 20Km da fonte?
3. Considere uma fonte luminosa pontual emitindo (isotropicamente em todas as direções) a 610nm com uma potência de 500W que ilumina um ecrã, colocado 2 metros da fonte, inclinado de 30° em relação à direção de iluminação.
Qual a densidade de fluxo radiante?
Qual o fluxo luminoso da fonte?
Qual a intensidade radiante?
Qual a iluminância no ecrã?
Qual a radiância e a luminância nesse ecrã?

Aberrações

Para além do brilho há também que considerar a “forma”. Aí há que garantir que o sistema óptico utilizado apresente o mínimo de aberrações possível:

Em óptica geométrica começa-se por considerar a chamada aproximação paraxial – os raios que incidem no sistema óptico são raios centrais (pequenas inclinações):

$\sin \theta_i = \theta_i$ e $\sin \theta_r = \theta_r$, mas de facto,

$$\sin \theta_i = \theta_i - \theta_i^3/3! + \theta_i^5/5! - \theta_i^7/7! + \theta_i^9/9! \dots$$

Na aproximação paraxial só usamos o primeiro termo da expressão.

As aberrações são uma medida de como a imagem dada pelo sistema óptico, difere da imagem indicada pela aproximação paraxial, ou seja da importância que os termos de ordem superior tem ...

Aberrações (Seidel):

em luz monocromática -

Aberração esférica
Curvatura do campo
Astigmatismo
Coma
Distorção

em luz policromática -

Aberração cromática
Cor lateral

Caracterizar as diferentes aberrações permite definir a "qualidade" do sistema óptico.

Aberração esférica: Se um feixe colimado (raios paralelos) incide no sistema óptico, o feixe emerge (não converge) num só ponto (foco), mas sim em vários e os raios mais afastados do eixo óptico convergem em pontos mais próximos ou afastados do sistema (lentes convergentes).

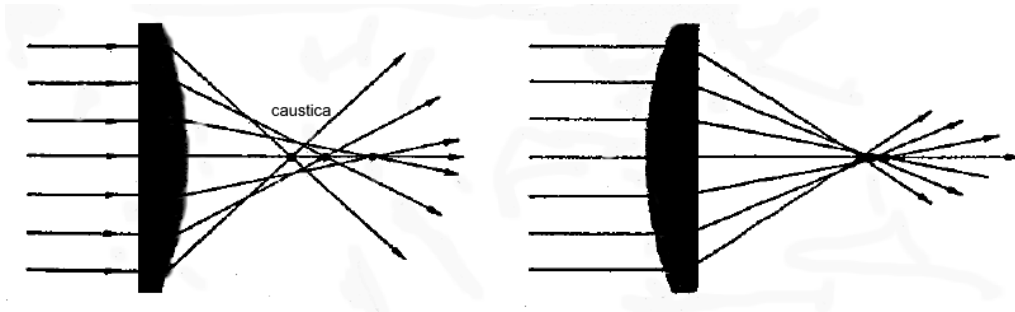


Fig. 4 Aberração esférica

Para eliminar a aberração esférica, teríamos de ter lentes de raios com curvaturas diferentes consoante caminhamos do centro (eixo óptico) para os bordos da lente (lentes "asféricas"). A utilização de lentes compostas (dobletos,...) é uma boa alternativa.

Curvatura de campo – os planos focais são superfícies esféricas (e não planas).

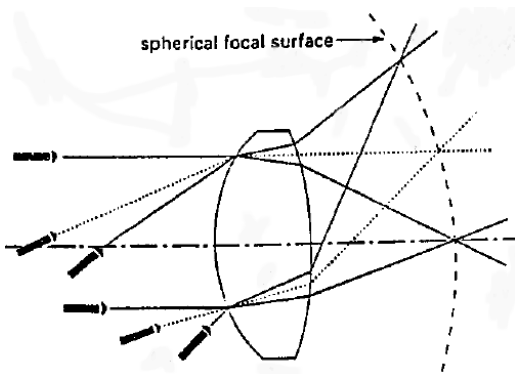


Fig 5. Curvatura de campo

O astigmatismo é uma aberração muito frequente incluindo no sistema óptico do olho humano (muitas pessoas usam óculos por terem astigmatismo).

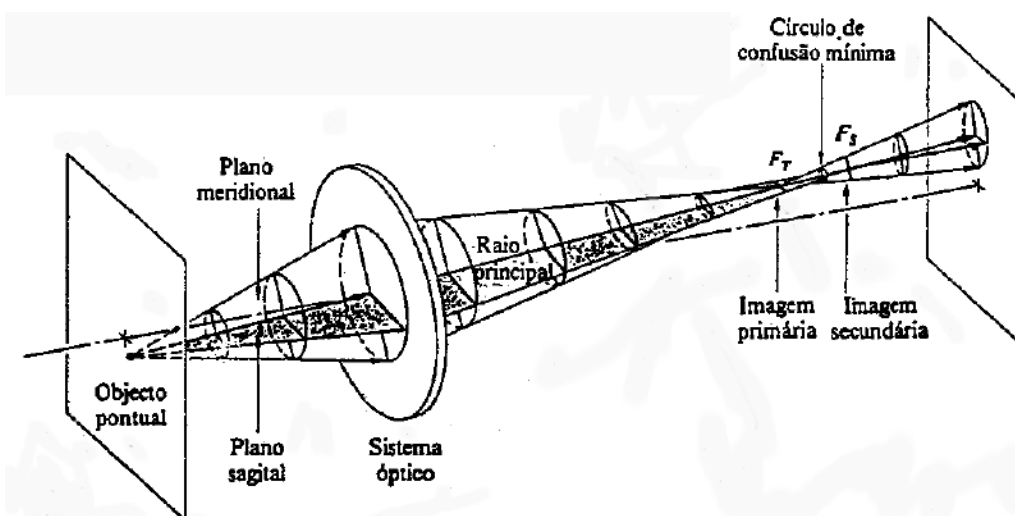


Fig 6. Astigmatismo

Coma – surge de diferentes magnificações dadas por diferentes zonas da lente (de centrais para periféricas). Pode ser reduzido com a utilização de diafragmas.

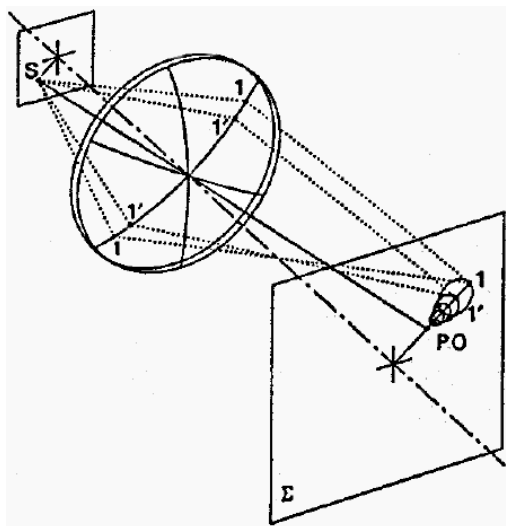
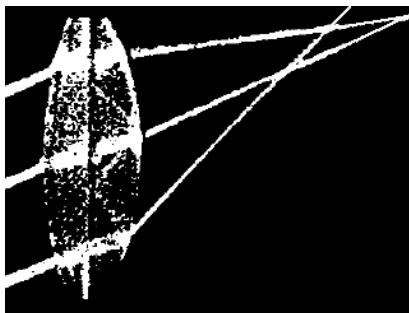


Fig 7. Coma

Com a distorção, a imagem de pontos num plano perpendicular ao eixo, forma-se num só plano, mas a forma perpendicular ao eixo do objecto aparece distorcida e geralmente tanto mais, quanto mais afastada do eixo estão os objectos.

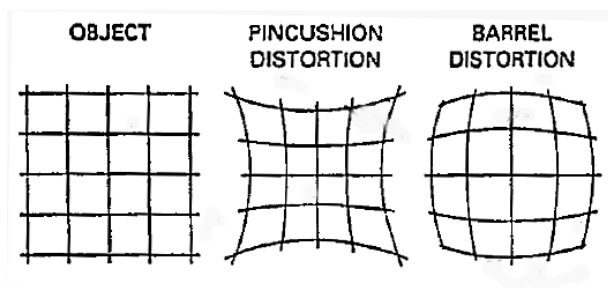


Fig 8. Distorção

A aberração cromática surge pelo facto do índice de refração ser função do comprimento de onda. Por exemplo: para uma lente positiva, sobre a qual se faz incidir um feixe colimado (raios paralelos) de luz branca, como o índice de refração é maior para menores comprimentos de onda, para estes o foco imagem estará mais perto da lente (*luz vermelha menos refratada que luz violeta*). Esta dependência faz com que a magnificação dependa também do comprimento de onda (aberração cor lateral).

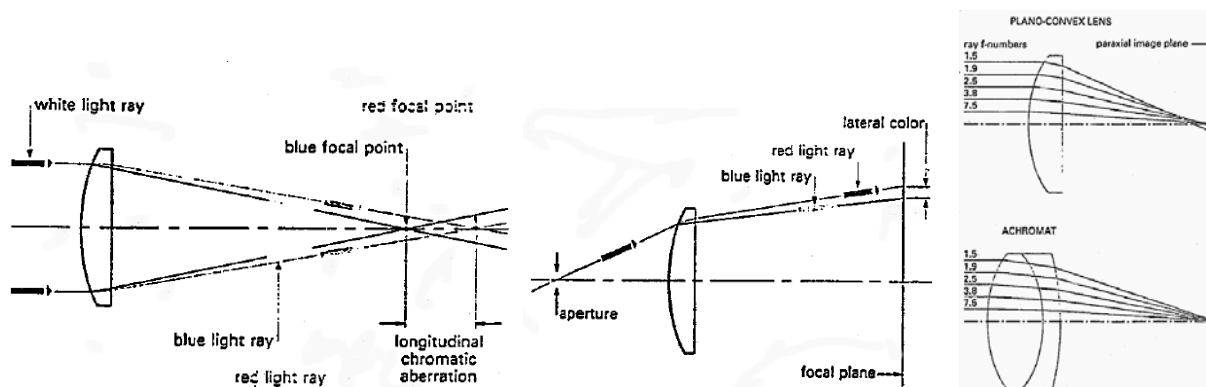


Fig 9. Aberração cromática e cor lateral. A aberração cromática pode ser reduzida pelo acoplamento de duas ou mais lentes de efeitos cromáticos opostos (acromatas).

A utilização de diafragmas colocados quer antes quer depois das lentes pode usar a reduzir o efeito das aberrações e a sua utilização é extremamente importante.