

editorial

Agenda & Cursos
Serviços & Produtos
Livros & Catálogos
Galeria de fotos
Últimas notícias
Links úteis

Colunistas

Curso de Fotometria
Artigos & Pesquisas
Luz e Biofísica
Iluminação Cênica

editora lumière

Revista Lumière
Revista L+D
Revista GTD
Anuário
Glossário
Quem somos

publicidade

Anuncie
Pautas 2005

prêmio top10

2001
2002
2003
O que é

menu principal

home
fale conosco
Banco de
profissionais
Orçamento on-line

cadastro

Usuário

Senha

Login

Esqueceu a senha?

Sem conta? Crie uma

Aula 2 09/Jun/04 14:06

**CURSO DE FOTOMETRIA ON-LINE LUMIÈRE/IEE****Aula 2: Grandezas fotométricas**

Por Rinaldo Caldeira Pinto
Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE-USP)

Prezados Leitores, na aula anterior falamos um pouco sobre a história da iluminação. Nesta e na próxima aula abordaremos a conceituação de algumas grandezas envolvidas em medições fotométricas. Por uma questão de ordem no texto, algumas grandezas serão citadas antes de serem definidas. Aconselho aos alunos que leiam o texto pelo menos duas vezes para melhor entendimento.

O que é luz?

Os trabalhos de Planck, Einstein, Rutherford e Bohr geraram muitos anos de controvérsias no meio da física, culminando com a relutante aceitação de que a luz se apresenta de forma dualística na natureza: ora tem comportamento de onda eletromagnética, ora de partícula. Na fonte ou no receptor, o comportamento de partícula se aplica melhor ao entendimento dos fenômenos. No meio entre a fonte e receptor, o comportamento de onda se aplica melhor.

A Fotometria e a Radiometria se ocupam da medição da luz. A Fotometria só se preocupa com a luz propriamente dita (radiação visível) e a Radiometria, com toda a radiação emitida por uma fonte (visível e não-visível).

O principal objetivo da Fotometria é medir a radiação visível, de tal forma que os resultados tenham uma correlação, a mais estreita possível, com a sensação visual produzida num observador humano normal exposto a esta mesma radiação. Os instrumentos mais antigos para medição se utilizavam do olho humano como meio. Estes métodos eram deficientes em precisão, porque os resultados obtidos dependiam muito do observador. Para um mesmo observador, a repetitividade da medição era pobre por causa de um grande número de variáveis, que não podiam ser controladas ou explicadas e que influenciavam a medição. Estas técnicas predominaram até 1940. Em geral, um observador era solicitado para avaliar o brilho de dois objetos que eram mostrados, ou simultaneamente, ou alternadamente. Isto caracterizava os fotômetros visuais.

Hoje estes métodos são pouco utilizados. Sua utilização se restringe, na maioria das vezes, a pesquisas e trabalhos experimentais. As medições convencionais são realizadas por meio de instrumentos dotados de um fotelemento que, exposto à radiação, produz um sinal elétrico que tem uma relação matemática (de preferência linear) com a grandeza que está sendo medida.

A resposta visual humana está restrita a uma pequena faixa do espectro das radiações eletromagnéticas. Esta faixa do espectro está situada entre 380 e 770 nm, dependendo do observador. Devemos lembrar que uma fonte de luz raramente emite radiação somente nesta faixa do espectro e que a medição destas outras radiações pode ser importante também em função dos efeitos que elas possam causar aos seres humanos. Estas outras radiações se enquadram dentro do que chamamos radiações óticas, que são objeto de estudo da Radiometria. O ultravioleta e o infravermelho, por exemplo, são considerados radiações óticas.

Para que as medições fotométricas por instrumentos tivessem validade havia a necessidade de que os instrumentos possuíssem uma resposta semelhante a do olho humano. A partir dessa necessidade a Comissão Internationale de l'Éclairage (CIE), estabeleceu uma curva de resposta do observador padrão. Foram estabelecidas duas curvas: uma para visão fotópica (alta luminância) denominada $V(\lambda)$, e, uma para visão escotópica (baixa luminância) denominada $V'(\lambda)$ (figura 1).

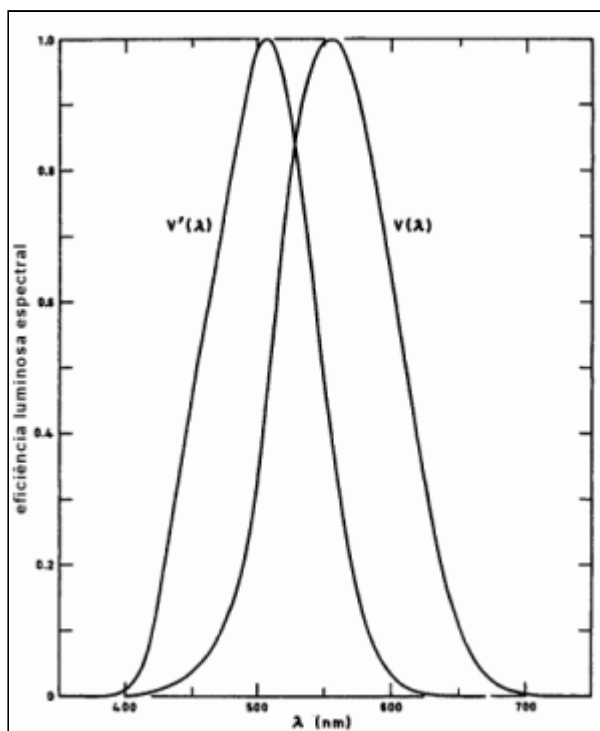


Figura 1: Curvas $V(\lambda)$ e $V'(\lambda)$ (Referência: CIE 18.2)

A retina

A retina é a parte do olho aonde se formam as imagens. Existem dois tipos de receptores na retina: os cones e os bastonetes. Eles transformam a energia radiante em energia química que produz impulsos elétricos que são enviados ao cérebro pelo nervo ótico. Existe uma região da retina chamada Fóvea que contém quase exclusivamente cones. Nesta região a visão é mais distinta.

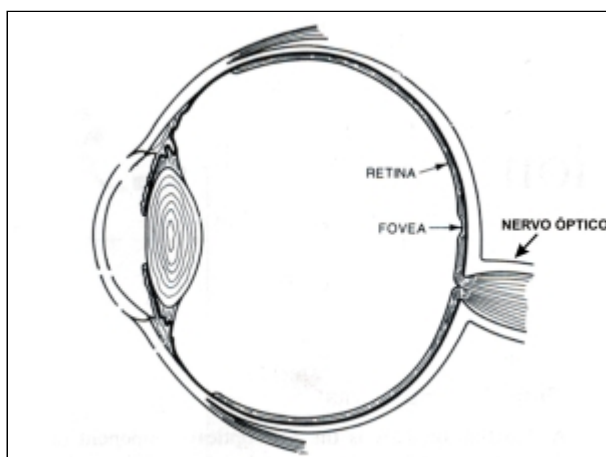


Figura 2: Vista em corte do olho humano

Na tabela abaixo temos algumas características dos cones e bastonetes.

	BASTONETES	CONES
Número	130×10^6	7×10^6
Formato	Cilíndricos, 0,07 mm de comprimento e 0,002mm de diâmetro.	Cônicos, 0,005mm de diâmetro da base por 0,07mm de altura.
Distribuição	Localizados do lado de fora da Fóvea. Proporção de bastonetes aumenta com o aumento de distância radial da Fóvea.	$150.000/\text{mm}^2$ na Fóvea, não do lado de fora.
Tempo de adaptação	30-40min	<2min
Sensibilidade	Escotópica, $<0,034 \text{ cd/m}^2$ alta sensibilidade à luminância, visão noturna. Baixa sensibilidade ao contraste.	Fotópica, $>3,4 \text{ cd/m}^2$ baixa sensibilidade à luminância, visão diurna. Excelente sensibilidade ao contraste.
Conexão ao nervo ótico	Conectado em grupos, proporcionando baixa acuidade visual mas alta sensibilidade.	Individualmente conectado, proporcionando imagem fiel mas baixa sensibilidade.
Características de visão	Acromática, todos os objetos aparecem cinza. Mais sensibilidade ao azul do que ao vermelho. Visão é periférica acima de 190° com pobre percepção de profundidade. Pobre para detalhes finos.	Cromática, com o pico de sensibilidade entre o amarelo e o verde. Visão é central e binocular acima de 120° dando boa noção de profundidade. Rica em detalhes.

O Experimento do $V(\lambda)$

A função $V(\lambda)$ para visão fotópica é baseada em medições de eficiência espectral luminosa que foram publicadas por vários pesquisadores, entre 1912 e 1923, e revistas por K.S. Gibson e E.P.T. Tyndall. O trabalho de Gibson e Tyndall foi terminado em 1932 e publicado sob o título: "Visibility of Radiant Energy".

Durante o período de 1921 à 1923, 52 observadores fizeram comparações de luminância. Para cada observador era pedido para ajustar a densidade de potência de uma fonte de luz de um dado comprimento de onda até que a sua luminância se igualasse a uma outra fonte de luz com comprimento de onda com 10 nm de diferença. As luminâncias eram comparadas num fotômetro de campo circular, com uma luminância no semicírculo da direita e outra no semicírculo da esquerda. O processo era repetido entre um dos dois comprimentos originais e um terceiro distante 10 nm dele, até que todo espectro fosse coberto.

Nessas condições foram usados pequenos campos de visão, subentendendo ângulos de abertura de 2° à 3° , com fixação central. As luminâncias no campo visual eram, muitas vezes, menores do que 10 cd/m^2 e apenas altas o suficiente para a condição de visão fotópica, particularmente no final do espectro visível. Mais tarde a CIE (1924) adotou intervalos de 10 nm para os valores de $V(\lambda)$.

Existe uma região intermediária entre as regiões fotópica e escotópica que é chamada região mesópica (luminância entre $0,034 \text{ cd/m}^2$ e $3,4 \text{ cd/m}^2$). Devido a dificuldades metodológicas não temos uma curva para esta região, mas, ela não deixa de ter sua importância para iluminação de vias, segurança e outros casos de iluminação noturna.

Principais grandezas e unidades

Entre as sete unidades de base do Sistema Internacional, a unidade básica para fotometria é a candela, que é a unidade de intensidade luminosa. Mais à frente vamos ver que o lúmen (unidade de fluxo luminoso) seria uma unidade de base mais adequada, porém, por razões históricas, a candela foi mantida como tal. Vamos abordar agora a definição das grandezas e unidades a partir do fluxo luminoso.

Em 1860, a unidade de intensidade luminosa conhecida como vela foi estabelecida usando uma vela de espermacete (***Veja aula 1***) como padrão primário. Mais tarde, chamas de gás foram calibradas de acordo com esta definição, sendo que a chama de gás mais comum tinha uma intensidade luminosa de 16 velas. As primeiras lâmpadas incandescentes trabalhavam numa tensão tal que sua intensidade luminosa fosse de 16 velas. Esta tensão era aproximadamente de 110 V, mas variava bastante em função do comprimento e do diâmetro do filamento da lâmpada, cuja fabricação não tinha o mesmo controle e padronização que tem atualmente.

Para iniciarmos a definição das grandezas Fotométricas precisamos partir de uma grandeza Radiométrica que é o Fluxo Radiante.

- Fluxo Radiante (Φ): Conjunto de toda radiação óptica emitida por uma fonte. Sua unidade é o watt (símbolo:W).
- Fluxo Luminoso(Φ_v): O fluxo luminoso é a porção do fluxo radiante emitido por uma fonte, na região do visível, segundo a curva de resposta do olho humano para visão fotópica $V(\lambda)$, multiplicado por um fator de escala. Sua unidade é o lúmen (símbolo:lm).

$$\Phi_v = K_m \int_{360nm}^{830nm} \phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda, \text{ onde:}$$

K_m = fator de escala (tema da próxima aula)
 $\Phi(\lambda)$ = Fluxo radiante ou Potência radiante

O lúmen é o fluxo luminoso emitido dentro de uma unidade de ângulo sólido por uma fonte pontual e isotrópica que tem a intensidade luminosa de 1 candela. Obs.: Fonte isotrópica = fonte que irradia energia igualmente em todas as direções.

- Intensidade luminosa(I): A intensidade luminosa é a parcela do fluxo luminoso de uma fonte luminosa, contida num ângulo sólido, numa dada direção. Sua unidade é a candela (símbolo:cd). A definição da candela é a seguinte: "A candela é a intensidade luminosa, em uma dada direção, de uma fonte que emite radiação monocromática de frequência de 540×10^{12} Hz e que tem uma intensidade radiante nesta direção de (1/683) watt por esterradiano."

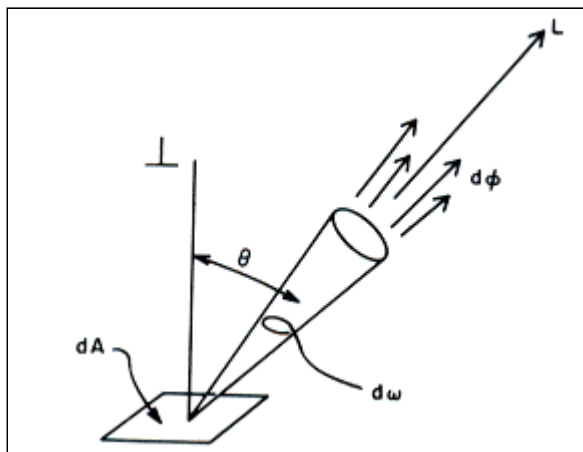
Podemos dizer que $I = \Phi_v / \omega$ [lm/sr], onde ω é o ângulo sólido na direção considerada.

- Iluminância(E): A iluminância é a relação entre a quantidade de fluxo luminoso que incide sobre uma superfície e a área desta. Sua unidade é o lux (símbolo:lx). Podemos dizer que:

$$E = \Phi_v / S \text{ [lm/m}^2\text{]}, \text{ onde:}$$

Φ_v = fluxo luminoso que atinge a superfície;
 S = área da superfície.

- Luminância(L): O conceito de luminância é o mais complicado para entendermos. A luminância se refere a uma intensidade luminosa que atinge o observador e que pode ser proveniente de reflexão de uma superfície, ou de uma fonte de luz, ou ainda simplesmente de um feixe de luz no espaço. Ela é dada como a relação entre a intensidade na direção considerada e a área aparente da superfície real ou imaginária de onde provém o fluxo luminoso. Sua unidade é candela por metro quadrado[cd/m²].



Podemos dizer que $L = \Phi_v / (\omega A \cos \theta)$ [cd/m²], onde:

ω = ângulo sólido na direção de visão do fecho;
 θ = ângulo entre a direção de visão e a normal;

A = área da superfície ou fonte de onde provém o fluxo luminoso.

Ou, podemos dizer também que $L = I/A_{ap}$ [cd/m²], onde:

I = intensidade luminosa;
 A_{ap} = área aparente da superfície na direção de visão do fecho.

- Refletância(ρ): É a relação entre o fluxo luminoso refletido e o incidente. É um número adimensional.

$\rho = \Phi_{vr}/\Phi_{vi}$, onde:

Φ_{vr} = fluxo luminoso refletido;
 Φ_{vi} = fluxo luminoso incidente.

O ângulo sólido

Relembrando a definição de radiano nós temos que:

- O radiano (símbolo:rad): Ângulo central que subtende um arco de círculo de comprimento igual ao do respectivo raio. (*figura 3a*)
- O esterradiano (símbolo:sr): Ângulo sólido que tendo vértice no centro de uma esfera, subtende na superfície uma área igual ao quadrado do raio da esfera. (*figura 3b*)

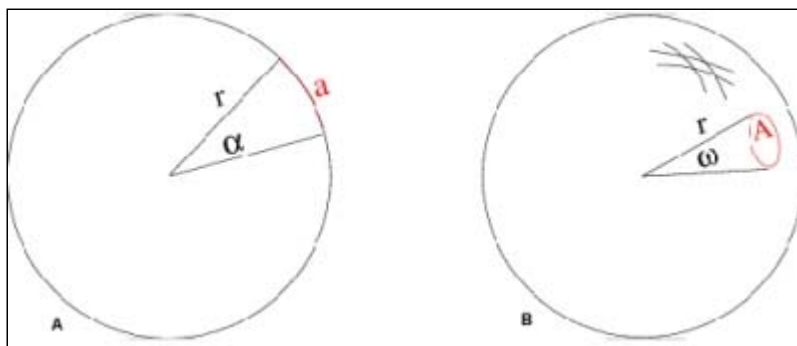


Figura 3 – o radiano(a) e o esterradiano(b)

Obs: A área da superfície, no ângulo sólido, pode ter qualquer formato.

Para caracterizarmos um ângulo sólido precisamos caracterizar um vértice, ou seja, no nosso caso, é necessário que possamos considerar a fonte de luz pontual. Vamos ver mais à frente quando poderemos considerar uma fonte como pontual. Dessa forma temos que para uma superfície de área S , qualquer de distância d , a partir de um ponto, o valor do ângulo sólido será de:

$$\omega = S/d^2 \text{ [sr]}$$

Bem, agora que nós já definimos algumas unidades, podemos tirar uma conclusão interessante:

$$E = \Phi_v/s \rightarrow \Phi_v = E.S, \text{ mas, } I = \Phi_v/\omega = (E.S)/\omega \text{ e } \omega = S/d^2$$

Daí, podemos concluir que: $E = I/d^2$. Isto quer dizer que a iluminância varia com o inverso do quadrado da distância.

Comentários sobre a curva $V(\lambda)$

Como em todas as medições, os instrumentos estarão de acordo com a curva $V(\lambda)$, e cabe aqui observar que esta curva tem determinadas limitações. Em geral se supõe que as fotometrias realizadas segundo a curva $V(\lambda)$ dão valores bem próximos aos que teríamos com o nosso próprio olho para condição de adaptação fotópica. Entretanto, na prática, só podemos considerar isto se as condições forem as mesmas em que a curva foi levantada, isto é, um campo visual centralizado com abertura angular entre 2° e 3° e sem diferenças de cor significativas.

Esta condição, em geral, não é a que temos no meio em que vivemos. Para ângulos maiores do que 4° ou muito menores que 2° (sinais de luz distantes), mesmo sem variação significativa de cor, a precisão já diminui. Não existem ainda métodos aceitos internacionalmente para efetuarmos estas correções, mas é bom termos em mente as limitações do método que estamos usando.

Exercícios propostos:

Envie a resposta do exercício para redacao@edlumiere.com.br, para ser corrigida pelo professor

1. Uma lanterna ilumina uma parede à uma distância de 10 metros (fonte pontual e uniforme). A lanterna está posicionada perpendicularmente à parede (incidência normal). O fecho da lanterna produz, na parede, uma circunferência de 1 metro de raio. Qual o valor do ângulo sólido formado pelo sistema? Se nós soubéssemos que a intensidade luminosa nesse ângulo sólido fosse de 10 cd, qual seria o valor do fluxo luminoso? Se um observador se posicionasse bem no centro do círculo iluminado ele estaria exposto à qual luminância (diâmetro do refletor da lanterna = 5 cm)?
2. Mostre que $E = I/D^2$
3. Cite três características dos cones e dos bastonetes.
4. Defina fluxo luminoso e intensidade luminosa.
5. Para uma mesma fonte de luz, qual a relação entre a iluminância sobre um ponto à uma distância d e um ponto a uma distância $4d$?

Bem, vamos ficando por aqui. Algumas das definições de grandezas constantes nessa aula são simplificações para facilitar o entendimento. No decorrer do curso aprofundaremos estas definições. Mudaremos um pouco a nossa programação e na próxima aula vamos discutir novamente as unidades em função deste assunto ser de vital importância. Até lá!

Referências Bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5461: Iluminação. São Paulo, 2002.
- COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE. CIE 18.2 : Physical Basis of Photometry. Vienna, 1986.
- ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. Lighting handbook: reference & application. New York : Illuminating Engineering Society of North America, 8ª Ed., 1993.
- MURDOCH, Joseph B. Illumination engineering : from Edison 's lamp to the laser, Visions Communications, Pennsylvania, 1994.
- ROZENBERG, Izrael Mordka O sistema internacional de unidades. Instituto Mauá de Tecnologia. São Paulo, 1998.

Organização e promoção

Lumière revista

Este material não pode ser reproduzido sem a devida autorização da Editora Lumière e do IEE/USP

Editora Lumière ©2003 - 2004 Todos direitos reservados.

Copyright (C) 2000 - 2004 Miro International Pty Ltd : Mambo Open Source is Free Software under GNU/GPL