

Alguns aspectos da óptica do olho humano

(Some aspects of the optics of the human eye)

Otaviano Helene¹ e André Frazão Helene²

¹Departamento de Física Experimental, Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

²Departamento de Fisiologia, Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

Recebido em 22/9/2010; Aceito em 29/8/2011; Publicado em 10/10/2011

Este trabalho descreve alguns aspectos da óptica do olho humano adotando uma abordagem progressiva. Iniciaremos estudando um sistema visual muito simples e iremos incluindo os vários ingredientes que compõem o olho humano. Inicialmente, o olho humano é aproximado apenas por uma esfera oca, na qual a luz penetra por um pequeno orifício e incide na superfície oposta a ele, onde está a retina. Entretanto, esse sistema simples não permite a formação de uma imagem nítida na retina. Para melhorar a qualidade da imagem, a esfera oca é então preenchida por um material com índice de refração igual ao das substâncias que preenchem o olho humano (humores aquoso e vítreo). A imagem formada na retina fica mais definida, mas não ainda completamente nítida. A seguir, nós estudamos o papel da córnea na melhora da imagem. Mas a córnea do olho humano ainda não garante a formação de imagens nítidas. Assim, o próximo passo é estudar o papel da lente interna (cristalino). Essa sequência, de um sistema visual muito simples até um completo olho humano, segue, aproximadamente, o caminho que se supõe tenha sido seguido pelo processo de evolução do olho ao longo dos últimos 500 milhões de anos. As deduções necessárias são feitas usando-se as equações básicas da óptica geométrica. Finalmente, é apresentado um modelo construído com uma esfera transparente que permite ilustrar vários aspectos da óptica da visão humana.

Palavras-chave: óptica, olho humano, visão.

This paper describes some aspects of the human eye adopting a progressive approach. We begin studying a simple visual system to which we progressively include the other eye components. Initially, the human eye is represented by a simple void sphere with a hole through which the light passes and strikes the opposite surface where is the retina. However, this simple model does not produce a sharp image on the retina. In order to improve the image quality, the sphere is filled with a material with a refractive index equal to that of the substances that fill the eye (vitreous and aqueous humors). The image formed in the retina becomes less blurred, but not completely sharp. After that, we study the role of the cornea to the improvement of the image quality. But the cornea does not ensure a perfect image. The next step is to study the role of the lens. The adopted approach is more or less similar to the evolutionary history of the eye during the last 500 million years, from a simple photosensitive sheet to the complex vertebrate eyes. Calculations are performed using the basic equations of the geometric optics. Finally, we present a model of the human eye made with transparent spheres which allows us to explore some aspects of the human vision.

Keywords: optics, human eye, vision.

1. Introdução

Em cerca de 95% das espécies animais são encontrados órgãos especializados para a detecção de luz. Uma parte desses animais possui órgãos apenas sensíveis à luz e outra parte é formada por animais que possuem o que poderíamos considerar serem olhos.

As mais simples estruturas biológicas de captação da luz, que podem ser tratadas como precursoras de um olho como o encontrado em vertebrados, surgiram há cerca de meio bilhão de anos. Se o sistema mais

primitivo consiste apenas de uma superfície sensível à luz, incapaz de sequer fornecer informação de onde ela provém (Fig. 1a), as estruturas mais simples e que têm alguma similaridade com os olhos mais sofisticados são concavidades em cujas paredes internas, opostas a uma abertura, há células sensíveis à luz (Fig. 1b). Nessas estruturas simples, a luz proveniente de um único ponto luminoso atinge várias regiões da superfície fotossensível, não havendo formação de imagens definidas. Esses sistemas apenas fornecem informações sobre a origem da fonte luminosa.

¹E-mail: otaviano@if.usp.br.

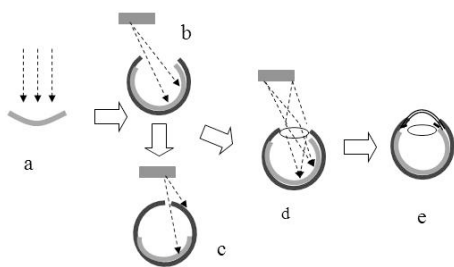


Figura 1 - Alguns tipos de órgãos sensíveis à luz encontrados na natureza. (Os arcos cinzentos indicam as regiões fotossensíveis.) De uma simples lâmina ou superfície com células sensíveis à presença de luz (a), o olho evoluiu para uma cavidade sem nenhum sistema de formação de imagem nítida (b). Um olho com um pequeno orifício por onde entra a luz (c) permite a formação de imagens, mas mal definidas. Olho dotado de uma única lente (d). Olho humano, com um sistema óptico que inclui a córnea e uma lente interna (e). Nos casos (d) e (e), a luz proveniente de um ponto luminoso atinge apenas um ponto ou uma pequena região da superfície fotossensível. As flechas indicam os caminhos seguidos pela evolução (adaptado da Ref. [1]).

Ao longo do tempo, os processos evolutivos propiciaram o surgimento de órgãos visuais adequados à formação de imagens. Um desses é um olho no qual a luz penetra por um pequeno orifício (Fig. 1c), permitindo a formação de imagens pelo efeito “câmara escura”: desde que a abertura do orifício pelo qual a luz penetra seja suficientemente pequena quando comparada com o tamanho (raio ou diâmetro) do olho, cada ponto luminoso ilumina apenas uma pequena região da superfície fotossensível. Sistemas visuais que se beneficiam do efeito câmara escura são encontrados em alguns invertebrados.

Entretanto, o efeito câmara escura só permite a formação de imagens nítidas quando a abertura por onde entra a luz, a pupila, é muito pequena quando comparada com a dimensão típica do olho. Mas quanto menor a abertura, menos luz penetra no olho, prejudicando a acuidade visual, em especial em situações de pouca luminosidade. Portanto, pupilas bem pequenas resolveriam um problema, o da qualidade da imagem, mas criariam outro: o comprometimento da visão em ambientes com pouca luz. A necessidade de que haja entrada de luz em quantidade suficiente no olho é fundamental. (A observação dos olhos de diferentes vertebrados terrestres deixa isso bem claro: animais de hábito noturno têm, usualmente, olhos com aberturas para a entrada de luz maiores do que animais de hábito diurno e noturno e estes, por sua vez, têm olhos maiores do que aqueles animais de hábito apenas diurno.)

Alguns poucos animais apresentam olhos que usam apenas o efeito câmara escura para a formação de imagens. Entretanto, o processo evolutivo seguiu outros caminhos: um deles envolve a presença de algum tipo de aparato óptico que permita uma melhor focalização da imagem, como a lente ilustrada na Fig. (1d), ou uma superfície por onde a luz penetra com grande curvatura (raio pequeno). Nesse caso, cada região específica de um objeto será responsável pela iluminação de um único

ponto específico da retina. Isso permitiria a formação de imagens bem definidas mesmo quando a abertura por onde entra a luz é grande.

A Fig. (1e) ilustra um olho dotado de uma córnea e uma lente interna, como são os nossos. Se essa lente interna pode ter sua curvatura ajustável, então esse sistema permite focar objetos a distâncias diferentes. Usando a linguagem adequada dos textos didáticos de óptica, dizemos que a imagem conjugada pelo sistema óptico desse olho estará sempre na retina.

O olho é uma estrutura que surgiu várias vezes ao longo do processo evolutivo, de maneira independente, havendo diversos tipos de órgãos visuais na natureza (a Ref. [2] apresenta uma síntese do que se conhece hoje sobre a evolução do olho). Alguns têm sistemas de múltiplas lentes; outros combinam o efeito câmara escura com lentes; alguns são tão simples que apenas conseguem perceber a presença de luz. A Tabela 1 ilustra alguns tipos de olhos existentes.

Neste trabalho, vamos discutir alguns aspectos ópticos do olho humano. Entretanto, ao invés de estudar seu sistema óptico integralmente, atacaremos o problema de uma forma seqüencial, parecida com a hipótese de como a evolução teria agido. Primeiro, estudaremos a imagem formada na retina caso nosso olho fosse uma simples esfera oca, opaca e com um pequeno orifício (a pupila) por onde entra a luz, ou seja, beneficiando-se apenas do efeito câmara escura. Como veremos, esse sistema visual é muito ineficiente. O passo seguinte será preencher a esfera com um material transparente de índice de refração igual ao do material que preenche grande parte do nosso globo ocular, os humores vítreo e aquoso. A imagem, quando comparada com a do olho oco, será melhor, mas ainda sem nitidez suficiente para permitir perceber formas. O passo seguinte é estudar a função da córnea, que melhora a qualidade da imagem formada na retina, mas tem, ainda, duas limitações: não permite nitidez total nem adaptação para focar objetos a distâncias diferentes. Esses problemas ficam por conta de uma lente interna ao olho, de distância focal adaptável.

Tabela 1 - Alguns tipos de olhos encontrados na natureza [3].

Tipo de olho da Fig. 1	Animal
(a) Olho em lâmina	São encontrados em gastrópodes da espécie <i>Patella vulgata</i> , mas são mais frequentes em formas larvais de diversos grupos e como olhos acessórios nas formas adultas de muitos animais
(b) Olhos em forma de cálice	São olhos comuns a inúmeros tipos de invertebrados, incluindo planárias
(c) Olhos tipo câmara escura	Encontrado em moluscos, como o gastropode <i>Haliotis</i> ou o cefalópode <i>Nautilus</i>
(d) e (e) Olhos com uma ou mais lentes	Olho em câmara, como em humanos. Encontrado em vertebrados terrestres e aquáticos e alguns poucos invertebrados, como moluscos cefalópodes (entre eles, os polvos)

Finalmente, é apresentado um modelo de olho construído com uma esfera de material transparente (de vidro, por exemplo) e coisas simples que temos à mão. Com esse modelo, podemos ilustrar vários aspectos da óptica de um olho humano e perceber como vários ingredientes (o tamanho da pupila, os humores e a córnea) colaboram para a formação de uma imagem nítida na retina de um olho normal.

2. Principais elementos ópticos do olho humano

A Fig. 2 mostra, de forma simplificada, os principais elementos ópticos do olho humano.

O globo ocular é aproximadamente esférico. Em sua maior parte é opaco, correspondente à região em tom escuro na Fig. 2, com exceção de uma região frontal, onde está a córnea, que é transparente. Após a córnea, há uma lente interna, antigamente chamada de cristalino. A região interna do globo ocular é preenchida por materiais transparentes: entre a córnea e a lente há um líquido, o humor aquoso; depois da lente, o globo ocular é preenchido pelo humor vítreo. Ambos os humores têm índices de refração 1,34, muito próximos ao da água (que é igual a 1,33).

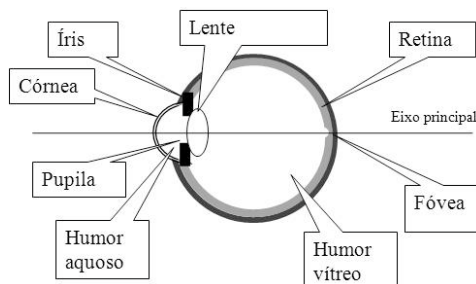


Figura 2 - Principais componentes ópticos do olho humano.

Na parte interna do olho, logo após a córnea, há uma pequena abertura por onde penetra a luz, a pupila, cujo diâmetro é variável. Diâmetros entre 2 mm e 6 mm, dependendo da iluminação, são bastante típicos. A abertura da pupila é controlada pelos músculos da íris, uma estrutura circular cuja cor da parte externa pode variar (marrom, azul ou verde são as cores mais comuns).

A focalização da imagem, ou seja, a imagem conjugada formada pelo sistema óptico do olho, deve estar sobre a retina, desenhada em tom claro de cinza na figura, em especial em uma região muito densa de células

sensíveis à luz, a fóvea, a qual fica na direção frontal do olho, ao longo de seu eixo principal.

Algumas características do olho humano aparecem na Tabela 2. O globo ocular em um olho normal é quase esférico, com raio da ordem de 1,2 cm. A córnea, cujo índice de refração é da ordem de 1,38, tem um raio de curvatura de aproximadamente 0,80 cm na sua parte anterior e de cerca de 0,65 cm na parte posterior. Sua espessura é de cerca de 0,06 cm na parte central (o polo, sobre o eixo principal) e um pouco maior na parte lateral.

A lente interna, também chamada de cristalino, tem raios de curvatura que podem variar, permitindo focar imagens mais próximas ou mais distantes. Embora no desenho da Fig. 2 as superfícies anterior e posterior da lente tenham raios iguais, na realidade o raio de curvatura no centro da superfície anterior é de cerca de 0,8 cm e da posterior da ordem de 0,6 cm. A espessura da lente é de aproximadamente 0,4 cm. A distância entre a superfície anterior da lente e a córnea é de cerca de 0,35 cm. O índice de refração da lente não é uniforme, variando do centro para a borda. Entretanto, o aproximaremos por 1,42.

As dimensões geométricas variam de pessoa para pessoa. Por exemplo, olhos míopes são mais longos e hipermetropes mais curtos ao longo da direção do eixo principal. Há, também, variações da distância entre a lente e a córnea; os raios da córnea também podem variar de pessoa para pessoa. Os valores adotados aqui servem apenas para fornecer aproximações adequadas para os propósitos deste texto.

3. Uma simples esfera

Para começarmos a estudar a óptica do olho humano, vamos fazer uma aproximação que será bastante útil. Em geral, estamos interessados na formação de imagens de objetos que estão a cerca de 30 cm ou mais do nosso olho. Como o diâmetro de uma pupila não excede alguns poucos milímetros, a abertura angular máxima entre raios luminosos que entrarão por ela será muito pequena, não mais do que uma fração de grau. Portanto, como é feito em muitos estudos da óptica de lentes, a primeira aproximação será considerar os raios de luz incidentes no olho e provenientes de um ponto luminoso como sendo paralelos. (A Fig. 3 ilustra essa aproximação.) Isso corresponde a um ponto luminoso no infinito.

Tabela 2 - Algumas características típicas do olho humano (a Ref. [4] apresenta alguns dados referentes ao olho humano).

	Raio de curvatura		Espessura	Índice de refração
Córnea	Anterior 0,80 cm	Posterior 0,65 cm	0,06 cm	1,38
Lente (cristalino)	Anterior 0,80 cm	Posterior 0,60 cm	0,40 cm	1,42
Humor vítreo e humor aquoso	-		-	1,34
Globo ocular	1,2 cm			

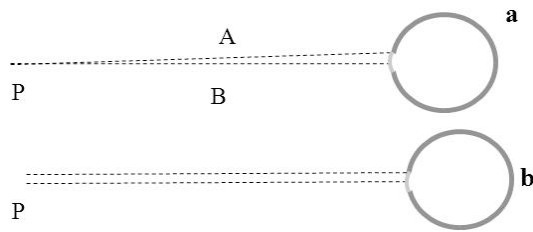


Figura 3 - Apesar dos raios de luz A e B provenientes de um ponto luminoso próximo não serem paralelos em sua chegada ao olho (a), como usualmente os ângulos de abertura do pincel luminoso são relativamente pequenos, vamos considerá-los paralelos (b).

3.1. Um olho oco

Como um primeiro modelo do olho humano, vamos usar uma simples esfera oca, quase totalmente opaca, com exceção de uma pequena região, a pupila, por onde entra a luz. Na parte oposta à pupila, até um pouco além do equador do olho, está a retina; ela é uma região revestida por células sensíveis à luz (os cones e bastonetes). Com esse modelo, é fácil perceber, por argumentos geométricos, que um ponto luminoso bem distante do olho iluminaria uma região circular da retina de raio igual ao da pupila. Para fins de comparações posteriores, vamos supor que o raio da pupila seja de 2 mm; esse seria, então, o raio do borrão formado pelo ponto luminoso. Com um olho assim tão simples, apenas poderíamos perceber de onde vem a luz, tendo pouca ou nenhuma informação sobre a forma do objeto.

É interessante vermos qual seria a resolução angular de um olho oco. Para isso, vamos fazer referência à Fig. 4. Considere dois pontos luminosos, P_1 e P_2 . Cada um desses pontos daria origem a um borrão na retina com um raio de 2 mm. Assim, para que fossem percebidos como duas fontes distintas de luz, os centros de suas imagens na retina precisariam estar pelo menos a cerca de 4 mm um do outro. Considerando o diâmetro do olho como sendo aproximadamente 2,4 cm, o ângulo θ indicado na figura deve ser tal que

$$\theta \geq \frac{4\text{mm}}{2,4\text{cm}} \cong 0,17 \cong 10^\circ \quad (1)$$

para que as imagens dos dois pontos não se superponham. Ou seja, com um olho simplesmente oco e uma pupila de raio 2 mm, não conseguiríamos perceber que uma pessoa com a qual conversamos tem dois olhos. Ao olharmos um fogão doméstico, não saberíamos quais nem quantos bicos de gás estariam acesos, não teríamos acuidade visual suficiente para encontrar um copo ou um prato sobre uma mesa e só conseguiríamos distinguir os dois faróis de um carro a menos do que 5 m de distância.

O passo seguinte é preencher esse olho, inicialmente oco, com um material de índice de refração igual a 1,34, o índice de refração dos humores vítreo e aquoso que preenchem nosso olho. Como veremos, isso melhorará

a qualidade da visão, mas ainda será insuficiente para o nosso dia-a-dia.

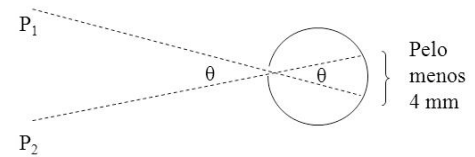


Figura 4 - Para que dois pontos luminosos sejam distinguíveis, a distância entre suas projeções da retina deve ser de 4 mm ou mais. Assim, a abertura angular, θ , deve ser da ordem de 10° ou mais.

3.2. O olho sem córnea e sem lente

A Fig. 5 ilustra o que ocorre com dois raios luminosos paralelos, A e B, que incidem na pupila de um olho esférico. (Lembre que esses dois raios são provenientes de um único ponto luminoso bem distante.) Um dos raios incide no centro da pupila e o outro em sua borda. Os ângulos α e β da Fig. 5 são suficientemente pequenos para que possamos aproximar seus senos pelos próprios valores dos ângulos (desde que estes sejam expressos em radianos); considerando as dimensões típicas envolvidas, podemos verificar que o erro dessa aproximação é desprezível em comparação com as precisões dos cálculos que faremos. Podemos também aproximar o comprimento do arco definido pelas interseções de A e B com o círculo que define o contorno do olho pela distância d indicada na Fig. 5.

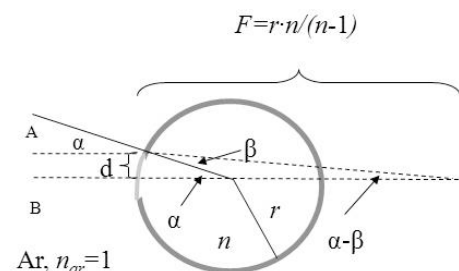


Figura 5 - Formação de imagem no caso de uma esfera preenchida por um material de índice de refração n .

O passo seguinte é descobrir onde os raios A e B se encontrariam. Para isso, vamos usar a lei de Snell

$$\text{sen}\alpha = n \cdot \text{sen}\beta. \quad (2)$$

Usando a aproximação dos senos pelos próprios ângulos, temos

$$\alpha \cong n \cdot \beta. \quad (3)$$

Usando argumentos geométricos, é fácil deduzir a relação entre os ângulos na Fig. 5. Considerando as aproximações dos senos e das tangentes por seus argumentos e observando a Fig. 5, vemos que a distância d é dada por

$$d \cong r \cdot \alpha, \quad (4)$$

onde r é o raio do olho. A distância d também é dada por

$$d \cong F(\alpha - \beta), \quad (5)$$

onde F é a distância entre a superfície anterior desse olho esférico simples e o ponto em que os prolongamentos dos dois raios se encontrariam.

Combinando as Eqs. (3), (4) e (5), obtemos

$$F \cong \frac{n}{n-1}r. \quad (6)$$

(note que r é o raio de curvatura da superfície na qual a luz incide, no caso, o raio do olho.) Para que a imagem de um ponto na retina fosse nítida, F deveria ser igual a $2 \cdot r$, ou seja, os dois raios provenientes de um único ponto luminoso bem distante deveriam se encontrar exatamente na superfície da retina. Mas isso só ocorreria se o índice de refração do globo ocular fosse igual a 2. Entretanto, substâncias transparentes produzidas por seres vivos não têm índices de refração assim tão elevados, sendo, usualmente, bastante próximos do índice de refração da água ($n = 1,33$). No caso dos humores vítreo e aquoso, o valor médio do índice de refração é da ordem de 1,34. Assim, temos

$$F \cong 3,9r \approx 4,7 \text{ cm}, \quad (7)$$

onde usamos $r = 1,2$ cm, uma boa aproximação para o olho humano. Ou seja, os raios A e B se encontrariam muito além da retina. Portanto, um ponto luminoso distante não daria origem a um único ponto iluminado na retina, mas, sim, a uma mancha luminosa, um borrão.

Pela geometria indicada na Fig. 5 vemos que o raio do borrão, r_b , é dado por

$$(F - 2r)(\alpha - \beta) \cong r_b. \quad (8)$$

Combinando esse resultado com as Eqs. (5) e (6) e lembrando que $d = r_p$, onde r_p é o raio da pupila, obtemos

$$r_b = \frac{2-n}{n}r_p. \quad (9)$$

Se o índice de refração dos humores fossem iguais a 2, o borrão teria um raio nulo, o que significaria que a imagem de um ponto no infinito seria um ponto na retina. Entretanto, como $n = 1,34$, uma pupila com raio 2 mm daria origem a um borrão com raio de aproximadamente 1 mm de raio. Essa imagem é melhor do que aquela formada apenas por um olho oco; entretanto, é ainda um borrão.

Um aspecto interessante da Eq. (9) é que quanto menor o raio da pupila, menor o tamanho do borrão. Esse fato ilustra como o efeito câmara escura contribui, paralelamente ao sistema de lentes do olho, para a qualidade da imagem formada. Embora a Eq. (9) corresponde apenas a um olho sem córnea e sem lente,

é fácil mostrar que a regra é geral: se a correção óptica fita pela córnea e a lente não é perfeita, quanto menor a pupila melhor a definição da imagem.

4. A córnea

Apenas preencher a cavidade esférica do globo ocular com uma substância é insuficiente para garantir a formação de uma imagem nítida na retina. Assim, o processo de seleção natural nos forneceu outra solução: cobrir a parte frontal do olho com uma córnea. Como veremos, é o fato da curvatura da córnea ser maior (raio menor) do que a do globo ocular que garante a melhora da imagem formada.

A córnea é a parte transparente, frontal, do nosso olho, representada esquematicamente na Fig. 2. A córnea tem índice de refração de aproximadamente 1,38. Sua superfície anterior é quase esférica, com raio da ordem de 0,80 cm, inferior, portanto, ao raio do globo ocular. A superfície posterior, também aproximadamente esférica, tem um raio de cerca de 0,65 cm. A espessura da córnea em seu polo (seu ponto central) é de 0,06 cm.

Com essas características, é possível ver que a córnea é uma lente mais espessa nas bordas do que no centro. Com os meios nos quais ela está imersa, ar de um lado e humor aquoso do outro, têm índices de refração menores do que o dela, seu papel é de uma lente divergente. Essa característica divergente da córnea contribuiria para piorar a qualidade da imagem formada, pois faria com que o foco se afastasse ainda mais da retina. Entretanto, observe que a Eq. (6), que relaciona a posição em que a imagem está focada com o raio de curvatura da superfície na qual a luz incide, indica que quanto menor este último, menor o valor de F . Assim, o papel fundamental da córnea é dar à superfície do olho pela qual a luz penetra um raio de curvatura menor do que aquele que adotamos quando aproximamos o olho por uma simples esfera. A capacidade de convergência da córnea, por causa de seu raio de curvatura menor do que o raio do globo ocular, compensa o efeito de lente divergente que ela também tem.

Para determinar a trajetória de um raio luminoso considerando a córnea, vamos usar a equação básica de um dioptra esférico, representado na Fig. 6. Desde que os ângulos α e β sejam pequenos, tal que seus senos possam ser aproximados pelos próprios ângulos, então

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R}, \quad (10)$$

onde p e q são, respectivamente, as distâncias entre o ponto P e a superfície do dioptra e entre esta e o ponto imagem Q. A dedução desse resultado pode ser encontrada nos livros de física geral, como, por exemplo, a Ref. [5].

A Eq. (10) tem validade bastante geral desde que definamos adequadamente os sinais das grandezas en-

volvidas. Considerando incidência da luz da esquerda para a direita na Fig. 6: se o ponto P estiver à direita da superfície, então a distância p será negativa; se a superfície de separação entre os dois meios, considerando a direção de incidência da luz, for côncava, o raio R será negativo; se $q < 0$, então a imagem estará à esquerda da superfície que separa os dois meios.

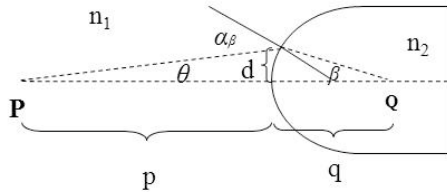


Figura 6 - Esquema de raios de luz incidindo em um dióptro esférico.

Vamos aplicar essa última equação considerando o ponto P infinitamente distante da superfície do olho. Acharemos, inicialmente, o ponto imagem para o qual a luz de um ponto objeto muito distante convergiria considerando apenas a primeira superfície da córnea (a superfície anterior); esse é o ponto imagem. A seguir, usaremos a posição desse ponto imagem como sendo o objeto para a segunda superfície da córnea e a partir dele localizamos o ponto imagem formado por essa superfície. A equação que obtemos para a distância entre a imagem formada por ambas as superfícies da córnea até sua superfície posterior, q , é

$$\frac{n_h}{q} = \frac{n_h - n_c}{R_p} - \frac{n_c}{e - \frac{n_c}{n_c - 1} R_a}, \quad (11)$$

onde n_h e n_c são, respectivamente, os índices de refração dos humores (1,34) e da córnea (1,38) e $e = 0,06$ cm é a espessura da córnea em seu polo. Substituindo os valores numéricos nessa última equação, obtemos $q = 3,16$ cm. Ou seja, a imagem de um ponto estaria focada a essa distância da superfície posterior da córnea. Como a superfície posterior da córnea coincide, muito aproximadamente, à superfície do globo ocular usada no cálculo da seção anterior, concluímos que o ponto no qual a imagem estará focada ainda está além da retina, entretanto, mais perto dela do que estaria sem a córnea (veja Eq. (7)) e, portanto, dando origem a um borrão menor.

Usando os mesmos argumentos geométricos da seção 3.2, podemos calcular o tamanho do borrão formado por um ponto luminoso infinitamente distante do olho:

ele teria, no caso de uma pupila de 2 mm, um raio de aproximadamente 0,5 mm. Lembre-se que sem a córnea o raio do borrão seria da ordem de 1 mm; essa redução ilustra o papel da córnea na formação da imagem na retina. A Tabela 3 compara o tamanho do borrão nos três casos estudados: apenas um orifício de raio 2 mm; um olho preenchido com um material de índice de refração igual a 1,34; e o mesmo olho com uma córnea.

A Fig. 7 ilustra, aproximadamente, como seriam vistos os faróis de um veículo a uma centena de metros de distância nos vários casos. A imagem formada na retina no caso de um olho preenchido pelos humores e com uma córnea é aquela inferior direita, ainda muito borrada.

Para que a imagem de um ponto seja um ponto, é necessária ainda uma lente adicional.

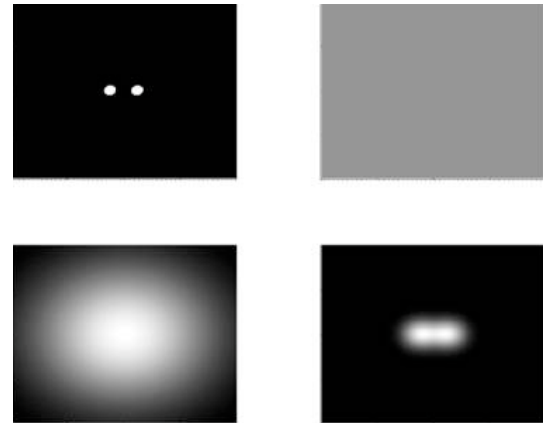


Figura 7 - Ilustração que mostra, qualitativamente, como seriam vistos os faróis de um veículo a cerca de 100 m de distância. Da esquerda para a direita e de cima para baixo: visão perfeita; se o globo ocular fosse oco; globo ocular preenchido por material de índice de refração 1,34; olho com córnea, mas sem lente. A distância entre os centros dos dois faróis, na imagem formada na retina, é da ordem de 0,5 mm.

5. A lente interna (cristalino)

A parte central da retina é uma região especial: ela é densamente populada por células sensíveis à luz e capazes de distinguir cores, os cones (essa região da retina é caracterizada por um abaulamento, uma espécie de buraco e, por causa disso, chamada de fóvea). Embora essa parte da nossa retina corresponda a bem menos do que a centésima parte de sua superfície, cerca de metade das fibras do nervo óptico estão ligados às células dessa região.

Tabela 3 - Raios aproximados do “borrão” formado na retina por um ponto luminoso infinitamente distante considerando uma pupila com raio 2 mm.

	Olho oco (do tipo câmara escura)	Olho esférico preenchido pelos humores	Olho com córnea	Olho com córnea e lente
Raio do “borrão”	2 mm	1 mm	0,5 mm	É um ponto

A fóvea se diferencia do restante da retina por três razões: ela é populada apenas por cones (não possui bastonetes), o que confere uma alta capacidade para identificação de cores. Além disso, nesta região, cada célula ganglionar, formadora do nervo óptico, se liga a uma única célula fotossensível (no caso, um cone), o que confere uma alta resolução para a imagem que será enviada ao córtex visual. E, por fim, há um deslocamento lateral das células não fotossensíveis da retina, não havendo formação de sombras sobre os cones, aumentando sua sensibilidade e conferindo o formato abaulado da retina nessa região.

Um interessante exemplo da importância da projeção da imagem sobre a fóvea ocorre quando aproximamos o dedo centralmente de nosso rosto. Neste caso, vemos que para a acomodação visual ocorrer ambos os olhos convergem para o centro, para seguir o dedo, e a isso nos referimos como sendo, erroneamente, uma focalização da imagem. Na verdade, o que está ocorrendo é a manutenção da imagem do dedo sobre a fóvea em ambos os olhos, ou seja, estamos "foveando" o objeto e não focalizando. De outra forma, a imagem formada não teria acurácia, por não ser projetada na fóvea.

O diâmetro da fóvea é da ordem de 1 mm e é nela que são projetadas as imagens que somos capazes de distinguir com precisão, como as letras deste texto ou os detalhes da fisionomia de uma pessoa. Por exemplo, a imagem superior esquerda da Fig. 7 mostra a imagem projetada na retina de dois faróis de um veículo a cerca de cem metros de distância; a distância entre as imagens dos dois faróis é da ordem de meio milímetro e, portanto, se é para eles que estamos olhando, essa imagem é formada inteiramente na fóvea. Sem a lente, dispondo apenas do globo ocular, preenchido por um líquido, e da córnea, as imagens dos dois faróis estariam superpostas e, além disso, parte delas poderia estar fora da fóvea. Por essas duas razões não conseguiríamos distinguir claramente os dois faróis.

Uma das funções da lente é colocar ordem nas coisas e deixar a imagem no foco. A outra função da lente é adaptar a distância focal para objetos a distâncias diferentes.

Essa lente interna do nosso olho é biconvexa, cujos raios de curvatura anterior e posterior são da ordem de 0,8 cm e 0,6 cm, respectivamente. (De fato, esses raios são variáveis, pelo menos até os 40 anos de idade, pois a lente é flexível e tem sua curvatura controlada por pequenos músculos – os músculos ciliares.) Como o índice de refração da lente é superior ao dos humores, suas duas superfícies contribuem para fazer o feixe luminoso convergir. Vamos ver para que ponto eles convergiriam usando a Eq. (10). Inicialmente, vamos considerar apenas a contribuição de sua superfície anterior, de raio de curvatura $R_a = 0,8$ cm.

A imagem formada pela córnea está a 3,16 cm de-

pois dela como calculada na seção 4. Considerando que a distância entre a córnea e a superfície anterior da lente é de 0,35 cm, vemos que o ponto objeto está a $p = (-3,16 + 0,35)$ cm = -2,81 cm (negativa e, portanto, correspondendo a um objeto virtual) em relação à primeira superfície da lente. Assim, a Eq. (10) fornece

$$\frac{1,34}{-2,81 \text{ cm}} + \frac{1,42}{q_1} = \frac{1,42 - 1,34}{0,8 \text{ cm}}, \quad (12)$$

de onde obtemos $q_1 = 2,46$ cm.

Vamos aplicar a mesma equação para a superfície posterior da lente. Neste caso devemos considerar que q_1 é a distância entre a primeira superfície da lente e a imagem formada por ela. Portanto, considerando a espessura da lente (0,40 cm), o objeto para a segunda superfície está a uma distância (2,46 + 0,40) cm. Assim, temos

$$\frac{1,42}{-2,06 \text{ cm}} + \frac{1,34}{q_2} = \frac{1,34 - 1,42}{-0,6 \text{ cm}}. \quad (13)$$

(note que usamos o valor -0,6 cm para o raio dessa segunda superfície.) Portanto, $q_2 = 1,63$ cm é a distância entre a imagem e a superfície posterior da lente. Para sabermos a que distância esse ponto está em relação à superfície posterior da córnea, temos que somar a espessura da lente, 0,40 cm, e a distância entre esta e a córnea, 0,35 cm. O resultado é 2,38 cm. Ou seja, essa imagem estará quase exatamente na superfície da retina (lembre-se que o diâmetro do olho humano é da ordem de 2,4 cm). Esse "quase" não é devido a nenhum defeito da visão humana, mas, sim, fruto das muitas aproximações feitas aqui.

Assim, é a lente que temos no interior do olho a responsável pelo *ajuste fino* do foco, fazendo com que a imagem conjugada pelo sistema óptico do olho esteja sobre a retina. Claro que esse ajuste poderia também ser feito pela córnea, desde que sua curvatura fosse maior (raio menor). Entretanto, a lente interna tem uma característica adicional muito importante: as curvaturas de suas superfícies são ajustáveis, o que permite que foquemos objetos a diferentes distâncias. Infelizmente essa capacidade de adaptação da lente é reduzida com a idade e após os 40 ou 50 anos pode estar bastante comprometida.

6. Modelo do olho humano

Como a característica mais marcante do olho humano é ser uma esfera transparente, podemos começar a estudá-lo construindo um modelo com uma esfera maciça de vidro,² que pode ser encontrada em lojas de produtos de decoração ou de vidros em geral. Esferas com diâmetro de 5 cm são suficientemente boas para construir o modelo proposto. Com essa esfera e alguns com-

²Além de esferas de vidro, há outras soluções para a construção do modelo do olho humano aqui apresentado. Qualquer esfera transparente pode ser usada; caso seja oca, pode ser preenchida com água. Objetos quase esféricos também servem.

ponentes mais, podemos fazer um modelo simples de um olho humano [6].

Para que uma esfera de vidro se pareça com um olho, a primeira coisa que devemos fazer é uma retina e uma pupila. A pupila pode ser feita cobrindo aproximadamente metade da esfera com papel alumínio, com um pequeno orifício que chamaremos de pupila. Para que possamos ver a imagem formada na retina, a outra metade da esfera deve ser coberta com um material branco translúcido, como os materiais usados para fazer sacos plásticos de embalagens. A Fig. 8 ilustra esse modelo.

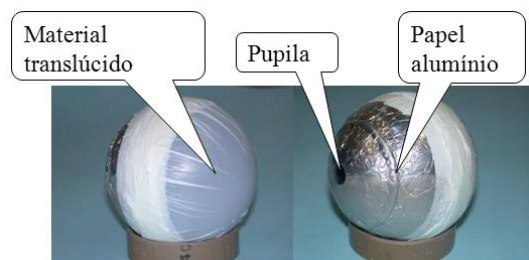


Figura 8 - Um modelo de olho construído com uma esfera de vidro. Metade dessa esfera é coberta com papel alumínio no qual um pequeno orifício simula a pupila. A outra metade é coberta com material translúcido (como sacos de plástico usados em embalagens), que simula a retina.

A Fig. 9 mostra a paisagem vista por uma janela e projetada na retina; note as inversões superior-inferior e esquerda-direita. A nitidez da paisagem é devida à presença de uma lente convergente colocada na frente da pupila (que não aparece na fotografia). Como o modelo é maciço, não é possível colocar uma lente interna; assim, a lente convergente faz as funções da córnea e da lente interna.

Usando várias lentes, mais ou menos convergentes e até lentes divergentes, podemos, com o modelo, ilustrar como são vistas as imagens por pessoas com miopia ou hipermetropia e, também, qual o efeito de lentes corretoras.

Outro aspecto interessante que pode ser explorado com o modelo de olho humano é quanto à função do tamanho da pupila na qualidade da imagem formada.

Quando a correção óptica é insuficiente para garantir a formação de uma boa imagem, ou porque não há uma lente corretora na frente da pupila desse modelo de olho ou porque ela é inadequada, a qualidade da imagem é tão melhor quanto menor for a abertura por onde entra a luz. E o inverso, claro, também é verdade: quanto maior a pupila, pior a qualidade da imagem (esse efeito também pode ser percebido quando alguém, com miopia ou hipermetropia, olha por meio de um pequeno orifício feito em um papel ou outro material opaco; mesmo sem lentes corretoras, a qualidade da imagem é tão melhor quanto menor for o orifício). Entretanto, na medida em que a abertura da pupila é reduzida, a luminosidade da imagem também é reduzida.



Figura 9 - Paisagem vista através de uma janela aparece projetada na retina. Pode-se observar que a imagem está invertida.

Referências

- [1] Michael F. Land and Russell D. Fernald, *Annu. Rev. Neurosci.* **15**, 1 (1992).
- [2] T.D. Lamb, *Scientific American Brasil* **111**, 46 (2011).
- [3] C.D. Moyes e P.M. Schulte, *Principles of Animal Physiology* (Pearson Education, Inc., San Francisco, 2008), 2nd ed.
- [4] E.V. Costa e C.A. Faria Leite, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **20**, 289 (1998).
- [5] H.M. Nussenzveig, *Curso de Física Básica: Ótica, Relatividade e Física Quântica* (Ed. Blücher, São Paulo, 1998).
- [6] O. Helene, *Phys. Teach.* **48**, 142 (2010).