

CONCEITOS ELEMENTARES DE ÓPTICA GEOMÉTRICA E SUA APLICAÇÃO À ÓPTICA DA VISÃO

JOÃO A. FERREIRA e SANDRA FRANCO

Departamento de Física, Universidade do Minho, 4710 Braga

Recorrendo ao uso dos conceitos simples de vergência de um feixe e de potência dum sistema óptico, obtêm-se as principais características das imagens formadas por sistemas ópticos refractivos simples. As conclusões são exemplificadas pela formação de imagens no olho, referindo-se as ametropias mais correntes e a sua correcção óptica.

1. Introdução

O sentido da visão é provavelmente o mais importante no homem. Embora o mecanismo da percepção visual envolva aspectos fisiológicos e psicológicos de grande complexidade, a primeira etapa da percepção dum objecto é o fenómeno puramente físico da formação duma imagem na retina.

É assim natural que uma primeira abordagem do ensino da óptica tenha em conta o processo de formação de imagens, dada a importância deste processo na vida quotidiana. A formação de imagens com características semelhantes às dos objectos pode ser tratada essencialmente através da óptica geométrica, isto é, da propagação rectilínea e do conceito associado de raio luminoso. Não obstante, nunca deverá ser esquecida a natureza ondulatória da luz e o facto de que a óptica geométrica é uma aproximação, válida apenas quando a luz passa por aberturas ou encontra obstáculos cujas dimensões são grandes comparadas com o comprimento de onda da luz.

O ensino da óptica a nível elementar encontra algumas dificuldades, nomeadamente porque os alunos não têm ainda os conhecimentos de matemática, em particular de trigonometria, necessários para entender e utilizar completamente leis tão fundamentais como as leis de

Snell. O percurso da luz através duma lente, por exemplo, não pode ser convenientemente explicado.

Neste trabalho tentou mostrar-se que é possível obter de uma forma simples as posições e características das imagens, recorrendo apenas ao conceito de vergência de um feixe e tratando os sistemas ópticos refractivos como "caixas pretas", que modificam as características do feixe, de acordo com a sua potência. A determinação da potência a partir das características físicas do sistema óptico, bem como uma abordagem mais rigorosa do percurso da luz, são normalmente tratadas num nível mais avançado.

O olho é um sistema ideal para aplicação destes conceitos, uma vez que na maior parte dos casos se pode recorrer a um modelo muito simplificado para descrever o seu comportamento óptico e que permite obter resultados de bastante qualidade.

2. Frentes de onda e raios

As ondas emitidas por uma fonte luminosa pontual propagam-se, num meio homogéneo, com a mesma velocidade em todas as direcções (ondas esféricas). Nestas condições, qualquer ponto do espaço é atingido por um raio luminoso

A óptica geométrica

Vergência e potência óptica

Lentes, imagens e aberrações

Óptica da visão

Óculos e lentes de contacto

Visão binocular

proveniente dessa fonte, que é a direcção perpendicular à frente de onda nesse ponto. Se considerarmos as ondas emitidas por uma fonte pontual, os raios luminosos correspondentes divergem da fonte. Uma barreira com uma abertura permite seleccionar apenas uma porção da frente de onda, ou seja, um conjunto de raios ou feixe luminoso (fig. 1).

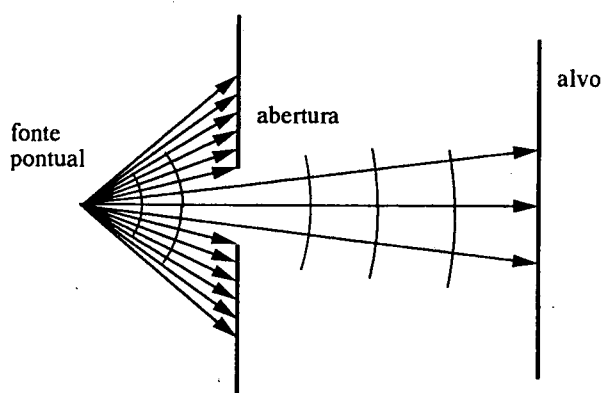


Fig. 1 — Frentes de onda e raios luminosos duma fonte pontual.

Para formar uma imagem pontual da fonte é necessário fazer convergir o feixe num ponto, usando para isso um dispositivo óptico, por exemplo, uma lente ou um espelho. Um objecto extenso pode ser considerado como um conjunto de fontes pontuais. A imagem do objecto é então o conjunto das imagens dos diferentes pontos (fig. 2).

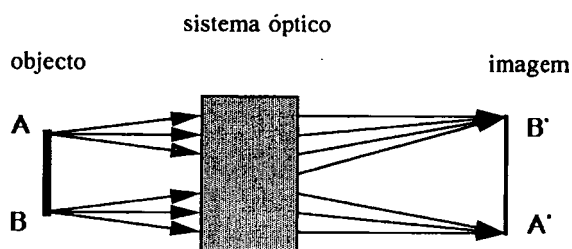


Fig. 2 — Formação duma imagem por um sistema óptico.

3. Vergência

Do ponto de vista óptico, um meio transparente é caracterizado pelo seu índice de refração, n , cujo valor é o quociente entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz no meio, isto é

$$n = \frac{c}{v}$$

Assim, por exemplo, $n \approx 1$ para o ar, $n \sim 1,5$ para o vidro e $n = 1,33$ para a água.

Define-se *vergência* da luz (V) como uma quantidade que é numericamente igual ao produto da curvatura da frente de onda pelo índice de refração, n . Como a curvatura é o inverso do raio de curvatura, podemos escrever:

$$V = \frac{n}{q} \quad (1)$$

em que q é o *raio de curvatura* da onda (medido em metros). Para o ar, teremos, simplesmente

$$V = \frac{1}{q} \quad (2)$$

A vergência é medida em *dioptrias* (D) e tem valor negativo para luz divergente e positivo para luz convergente. À medida que a onda emitida se afasta da fonte, o raio de curvatura vai aumentando e portanto a vergência diminui. Para distâncias muito elevadas entre a fonte e o observador (ou sistema óptico), $q \rightarrow \infty$ e portanto a vergência é zero. Neste caso a onda é plana e os raios são aproximadamente paralelos.

4. Efeito duma interface na vergência

Uma superfície de separação ou interface curva entre dois meios modifica a vergência da onda incidente, uma vez que os raios são refractados em diferentes direcções. Para uma interface esférica e na região paraxial (isto é, para raios próximos do eixo óptico e com pequenas inclinações relativamente ao eixo), as ondas transmitidas para o 2.º meio são também esféricas. Neste caso podemos escrever:

$$V' = P + V \quad (3)$$

em que V e V' são as vergências da luz incidente e da luz transmitida para o 2.º meio, respectivamente e P é a *potência* da interface.

A potência da interface é dada por $\frac{n' - n}{R}$, em que R é o raio de curvatura da interface e n e n' são os índices de refração. A eq. (3) é então equivalente a

$$V' = \frac{n' - n}{R} + V \quad (4)$$

No caso particularmente importante em que a superfície de separação entre os dois meios é plana, teremos $R = \infty$ e consequentemente $P = 0$. Uma interface plana não modifica portanto a vergência da onda. Porém, como o índice de refração se altera, a curvatura também se modifica. Considere-se, por exemplo, um objecto que se encon-

tra dentro de água a uma profundidade de 10 cm (fig. 3). A vergência da onda incidente junto à interface é $V = -1,33/0,1 = -13,3$ D (eq. 1). A onda mantém o valor da vergência ao entrar no ar, mas como aqui o índice de refração é 1, o raio de curvatura passa a ser $1/13,3 = 0,075$ m (eq. 2). Isto equivale a dizer que, para um observador no ar, o objecto parece estar a 7,5 cm da superfície da água (fig. 3). Esta é a posição da imagem (virtual).

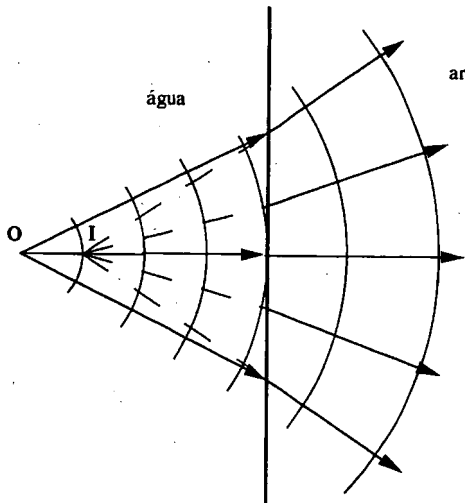


Fig. 3 — Efeito dum interface plana na propagação dum onda esférica; O-objecto, I-imagem.

5. Lentes

Uma lente é formada por duas interfaces, das quais pelo menos uma não é plana. Os raios que incidem numa lente são refractados duas vezes e emergem no ar com uma vergência modificada relativamente à inicial. Para pequenas espessuras, a forma da lente não influencia as suas propriedades convergentes ou divergentes e diz-se que a lente é delgada.

A potência dum lente delgada é dada pela expressão:

$$P = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (5)$$

em que R_1 e R_2 são os raios de curvatura das faces da lente e n é o índice de refração da lente. Esta expressão admite que o meio exterior à lente é o ar. R_1 e R_2 são positivos se o centro de curvatura estiver à direita da lente e negativos no caso contrário. Admite-se que a luz incide da esquerda para a direita.

Ao inverso da potência chama-se *distância focal*.

A equação (3) é aplicável ao caso das lentes com a definição de potência dada pela eq. (5). O valor da potên-

cia é positivo para as lentes convergentes e negativo para as lentes divergentes.

A aplicação daquela expressão permite determinar facilmente a posição da imagem do objecto pontual. Por exemplo, ao colocar um objecto a 10 cm dum lente, a eq. (2) mostra que a vergência da luz incidente na lente é $V = 1/(-0,1) = -10$ D. Se a lente tiver uma potência de +15 D, teremos

$$V' = -10 + 15 = 5 \text{ D}$$

isto é, a luz passa a ser convergente e a imagem forma-se a $1/5 = 0,2$ m da lente. Se o objecto estava à esquerda da lente, a imagem forma-se à direita (fig. 4). A equação (3) é válida para raios paraxiais e portanto aplicável para objectos não pontuais se forem de pequenas dimensões e/ou estiverem localizados longe da lente.

Pode mostrar-se que a ampliação lateral da lente (relação entre as dimensões da imagem e do objecto) é dada pela razão

$$M = V/V' \quad (6)$$

Um sinal negativo para M significa que a imagem é invertida em relação ao objecto. No exemplo anterior, teríamos $M = -2$, isto é, a imagem seria 2 vezes maior que o objecto e invertida.

Consideremos ainda duas outras situações:

a) Se o objecto estiver muito distante, $V = 0$ e portanto $V' = P$. A distância a que se forma a imagem neste caso é a distância focal. Para a lente considerada, $V' = 15$ D, isto é, a imagem forma-se a 0,066 m da lente.

b) Suponhamos agora que o objecto se encontra a 5 cm da lente em questão. Neste caso, ter-se-á

$$V' = -20 + 15 = -5 \text{ D}$$

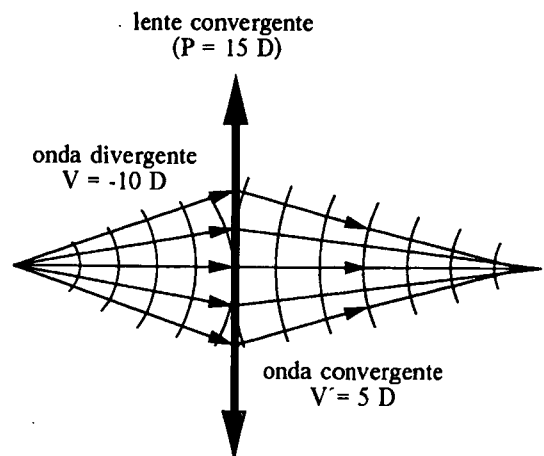


Fig. 4 — Efeito dum lente convergente na propagação dum onda esférica.

Assim, apesar de se tratar duma lente convergente ou positiva, a sua potência não é suficiente para fazer convergir os raios. A imagem forma-se do mesmo lado que o objecto e localiza-se no ponto de encontro dos prolongamentos dos raios, à distância de 20 cm da lente. Trata-se duma imagem virtual, que nunca pode ser projectada num alvo. É, além disso, uma imagem direita e menor que o objecto, dado que $M = 0,25$.

A mesma situação ocorre para uma lente divergente, cuja potência é negativa. Neste caso, a imagem é virtual, qualquer que seja a posição do objecto real. Ao interpor uma lente divergente no percurso dos raios provenientes duma fonte qualquer, nunca é possível projectar uma imagem da fonte, em contraste com o que ocorre com uma lente convergente.

6. Imagens reais e virtuais

Um objecto é real sempre que os raios divergem a partir desse objecto. Uma imagem é real se os raios convergirem a partir do sistema óptico. No caso da lente convergente anteriormente referida, se $|V| < 15D$, isto é, se o objecto estiver a mais de 6,67 cm da lente, a imagem é real, sendo virtual se $|V| > 15D$, o que corresponde a colocar o objecto mais próximo da lente que aquele valor.

Uma imagem real pode ser projectada num alvo. Por exemplo, o sistema de lentes dum projector de diapositivos forma uma imagem real do diapositivo. Uma máquina fotográfica forma na película uma imagem real do objecto fotografado. Uma imagem virtual não se pode projectar num alvo, mas é visível pelo olho, porque este faz convergir na retina os raios divergentes provenientes dessa imagem, formando na retina uma imagem real, que é posteriormente interpretada pelo cérebro. O processo é idêntico ao que ocorre quando se vê um objecto.

7. Aberrações e função das aberturas

Um sistema óptico perfeito ou estigmático faria corresponder sempre uma imagem pontual a um objecto pontual. As lentes mais usadas são esféricas e são só estigmáticas para pontos situados no eixo óptico. Para raios afastados do eixo óptico, as ondas produzidas já não são esféricas e convergem em pontos diferentes. Esta é a origem de fenómenos que são designados globalmente por aberrações monocromáticas. Para evitar estes efeitos que degradam a qualidade da imagem, limita-se o feixe a uma zona próxima do eixo óptico, usando anteparos com aberturas. Num sistema óptico é desejável que a abertura seja tão pequena quanto possível, para as condições de luminosidade presentes.

8. O olho

O olho é um órgão bastante complexo mas, do ponto de vista óptico as estruturas mais importantes são as que se encontram representadas na figura 5.

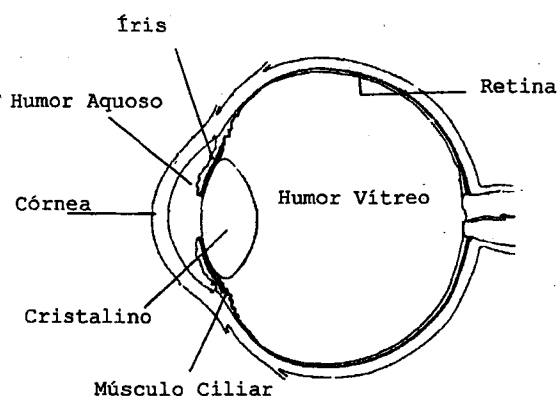


Fig. 5 — Esquema simplificado do olho humano.

A córnea é um tecido transparente cujo índice de refração é 1.376. Funciona como uma lente convergente de aproximadamente +43 D.

Outra lente existente no olho é o cristalino. Tem uma forma biconvexa e o seu índice de refração varia entre 1.41 no centro e 1.38 na periferia. Sob a acção do músculo ciliar, o cristalino pode alterar a sua forma e consequentemente a sua potência. Este mecanismo tem o nome de *acomodação*. Entre a córnea e o cristalino existe uma substância líquida a que se dá o nome de humor aquoso ($n = 1.336$).

Imersa neste líquido encontra-se a íris que serve de diafragma de abertura controlando a quantidade de luz que entra no olho. O diâmetro da abertura circular (a pupila) pode variar entre 2 e 8 mm. A quantidade de luz que penetra no olho depende da área da pupila. Em condições de iluminação muito fraca, a pupila tem o seu diâmetro máximo (cerca de 8 mm). Quando a iluminação é intensa, este valor reduz-se a cerca de 2 mm. No primeiro caso, o olho capta $(8/2)^2 = 16$ vezes mais luz que no segundo. É claro que um maior diâmetro da pupila corresponde à entrada de mais raios oblíquos, o que, devido às aberrações já mencionadas, reduz a qualidade da imagem. Deste modo, a visão nocturna será em geral menos perfeita que a visão diurna. Há aspectos relacionados com a transmissão da imagem ao cérebro que não estão aqui a ser considerados, nomeadamente o facto de que os receptores de luz que constituem a retina são diferentes nos dois casos.

O humor vítreo ($n = 1.337$) é uma substância gelatinosa que se encontra na câmara posterior do olho.

A retina é o "alvo" onde se deve formar a imagem, sendo constituída por um mosaico de células sensíveis à luz (fotoreceptores).

8.1. O olho como lente delgada

O percurso dos raios pode ser calculado com rigor aplicando a equação (4) sucessivamente para as diferentes interfaces. No entanto, é muitas vezes suficiente adoptar um modelo muito simplificado que admite que o olho é constituído por uma lente delgada positiva (equivalente ao conjunto córnea - cristalino) e um alvo, que corresponde à retina. Neste modelo admite-se que existe ar entre a lente e o alvo. A potência da lente é tipicamente de +60 D. Tratando-se duma lente positiva, a imagem formada é naturalmente invertida em relação ao objecto.

Diz-se que um olho é *emétrope* quando a imagem dum objecto distante se forma na retina sem acomodação, isto é, sem qualquer esforço. Isto equivale a dizer que o *ponto remoto* do olho se localiza no infinito.

A acomodação acima referida corresponde a um aumento de potência da lente delgada. O olho necessita acomodação quando o objecto está próximo e portanto quando o feixe que atinge a lente é divergente. Uma vez que a vergência da luz que sai da lente não pode ser modificada (o tamanho do olho não se altera), o aumento de potência da lente deverá compensar a divergência da luz incidente. Recorrendo à eq. (3), pretende-se que V' seja constante e portanto quando V varia, P deverá variar em sentido contrário. O *ponto próximo* é o ponto para o qual se forma uma imagem na retina quando a acomodação é máxima, isto é, quando a potência da lente atinge o seu valor máximo. Se o ponto estiver ainda mais próximo do olho, não é possível obter uma imagem nítida. A perda de capacidade de acomodação corresponde à *presbiopia ou vista cansada*. Ao passar da visão dum objecto longínquo para um objecto próximo, ou vice versa, há necessidade de acomodar o mais rapidamente possível. Trata-se de uma situação que ocorre frequentemente, por exemplo, durante uma aula em que o aluno tem que fixar alternada e repetidamente o quadro e o caderno.

Num olho emétrope com um ponto próximo situado a 25 cm a luz proveniente dum objecto aí colocado chega ao olho com uma divergência de -4D. A potência do sistema córnea/cristalino deverá assim variar entre +60 D (formação da imagem de objectos muito distantes) e +64 D (objectos localizados no ponto próximo).

8.2. Ametropias e sua correcção (lentes de contacto e óculos)

A miopia é um tipo de ametropia em que a imagem do objecto longínquo se forma antes da retina (fig. 6). O olho míope é caracterizado por uma potência demasiado elevada. Assim, o feixe que atinge a retina é já divergente e

portanto a imagem dum ponto muito distante não é pontual mas sim circular (a forma circular é devida à forma circular da pupila). O ponto remoto situa-se a uma distância finita.

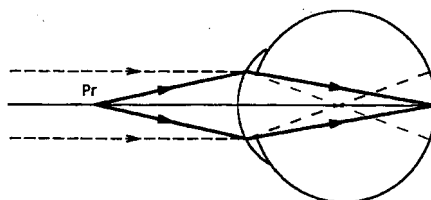


Fig. 6 — Percurso dos raios luminosos no olho míope.

A situação oposta designa-se por hipermetropia (fig. 7) e corresponde a uma potência insuficiente do olho e, nestas condições, a imagem de um objecto distante só se forma depois da retina. Ao encontrar a retina os raios ainda estão a convergir. Qualquer que seja a posição do objecto nunca se forma uma imagem nítida na retina. Isto corresponde a dizer que o ponto remoto é virtual e está atrás do olho.

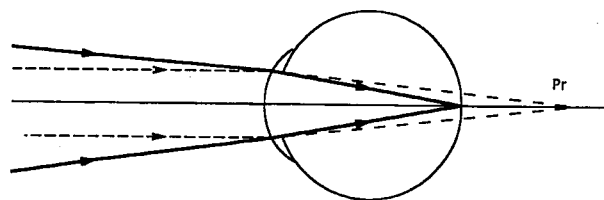


Fig. 7 — Percurso dos raios luminosos no olho hipermetrope.

Para compensar estes erros refractivos é necessário recorrer a lentes que alterem a vergência da luz incidente de modo a que a imagem se forme na retina.

No caso da miopia é necessário colocar uma lente que torne o feixe incidente divergente. Para isso tem que se utilizar uma lente negativa. Para compensação da hipermetropia é necessário recorrer a lentes positivas para fazer convergir o feixe incidente.

A potência da lente a utilizar depende do grau da ametropia e da distância ao olho a que se coloca essa lente, como se pode ver através dos dois exemplos numéricos seguintes.

Considere-se um olho míope com o ponto remoto a 125 mm. Como já foi dito, o objecto tem que estar neste ponto para que seja visto com nitidez. Como não é possível colocar todos os objectos a esta distância, é necessário recorrer a lentes que tornem o feixe proveniente do infinito ($V = 0$ D) num feixe com a mesma vergência que teria se tivesse origem no ponto remoto. ($V' = 1/-0.125 = -8.00$ D).

Se se utilizarem lentes de contacto, a sua potência pode ser deduzida utilizando a equação (3):

$$V' = V + P \quad P = -8.00 \text{ D}$$

Em vez de lentes de contacto podem-se utilizar óculos. Neste caso é necessário saber a que distância a que se colocam as lentes.

Se colocarmos os óculos a 12 mm do plano da córnea, a vergência neste ponto é dada pelo inverso da distância ao ponto remoto (ver figura 8) ou seja,

$$V' = 1/0.113 \quad V' = -8.84 \text{ D}$$

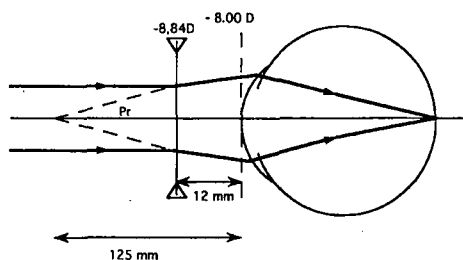


Fig. 8 — Correção da miopia com óculos e lentes de contacto.

E, mais uma vez utilizando a equação (3), pode-se concluir que a potência da lente tem que ser de -8.84 D .

Daqui se pode concluir que um míope precisa de menos potência nas lentes de contacto do que se usar óculos.

Vejam agora o que se passa com os hipermetropes.

Se no caso da miopia era difícil colocar os objectos no ponto remoto, no hipermetrópe é completamente impossível fazê-lo pois o ponto remoto é virtual. Por isso, para que um hipermetrópe veja nítido um objecto distante sem acomodar é necessário recorrer sempre a lentes (fig. 9).

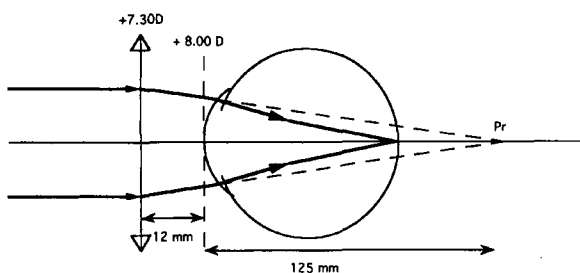


Fig. 9 — Correção da hipermetropia com óculos e lentes de contacto.

A vergência do feixe que incide no olho tem que ser igual à de um feixe que se dirige para o ponto remoto. Se considerarmos um caso em que o ponto remoto está 125 mm atrás do plano da córnea, a vergência do feixe nesse plano será:

$$V' = 1/0.125 = +8.00 \text{ D}$$

Para saber a potência que uma lente de contacto deverá ter basta utilizar a equação (3).

$$V' = V + P \quad P = +8.00 \text{ D}$$

Se utilizarmos óculos a 12mm, potência da lente será igual a vergência nesse ponto:

$$P = V' = 1/0.137 = +7.30 \text{ D}$$

Na hipermetropia as lentes de contacto têm que ter mais potência que os óculos.

8.3. Visão binocular

Retomando a eq. (6), que nos dá a relação entre as dimensões lineares da imagem e do objecto, consideremos um objecto à distância de 1 m dum olho emétrepe. Nestas condições, $V = -1 \text{ D}$ e portanto $m = -1/60$. Assim, se o objecto tiver 12 cm de altura, a imagem retiniana terá uma dimensão de 2 mm.

Suponhamos agora que se tem um objecto com 1,20 m à distância de 10m do observador. Como neste caso $V = -0,1$, vem $m = -0,1/60 = 1/600$ e portanto a imagem tem também 2 mm.

Nestes dois exemplos, as imagens retinianas têm as mesmas dimensões, não sendo portanto possível avaliar a distância apenas pelas dimensões da imagem formada.

Acontece, porém, que as imagens formadas nos dois olhos se localizam em pontos diferentes em cada uma das retinas. Esta diferença é tanto maior quanto mais próximo se encontrar o objecto. É este facto, conjuntamente com outros factores (por exemplo, a presença de objectos vizinhos ou o conhecimento prévio das verdadeiras dimensões do objecto) que permite ao cérebro avaliar a distância a que se encontra o objecto ou as distâncias das diferentes partes dos objectos ao observador. Torna-se assim possível, a partir de imagens bidimensionais, obter uma percepção tridimensional do mundo que nos rodeia.

Os autores agradecem os comentários e sugestões da Dra. Helena Lopes.

BIBLIOGRAFIA

- HECHT, E. — *Optics*, 2nd edition, Addison Wesley Publishing Company, 1987; tradução portuguesa: Óptica, Fundação Calouste Gulbenkian, 1991.
- MEYER-ARENDE, J. R. — *Introduction to Classical and Modern Optics*, 3rd edition, Prentice-Hall, 1989.
- KEATING, M. P. — *Geometrical, Physical and Visual Optics*, Butterworths, 1988.

João A. Ferreira é professor associado do Departamento de Física da Universidade do Minho e Sandra Franco é assistente estagiária na mesma instituição.