

---

## A FÍSICA DO PROCESSO VISUAL

---

*Eleutério Conceição*

Departamento de Física – UFSC

Florianópolis, SC

No estudo dos instrumentos ópticos utilizados pelo homem existe um que, apesar de sua relevância e complexidade, tem merecido apenas rápidos comentários na maioria dos textos conhecidos. Referimo-nos ao olho humano. Os aspectos gerais do fenômeno da visão são conhecidos desde meados do século XVII. A formação da imagem nesse órgão foi pela primeira vez explicada com clareza por Johannes Kepler, em 1611, e mais tarde por René Descartes, no ano de 1664. No final desse mesmo século, surgiu um tratado de óptica escrito por William Molineaux, de Dublin, contendo vários diagramas claros e simples comparando a projeção de uma imagem real invertida em uma câmara escura, equipada com lentes, com o olho.

Na Fig. 1 temos uma representação esquemática de um olho humano em um corte segundo um plano horizontal. O globo ocular mede cerca de 2,5 cm de diâmetro e pode ser dividido para estudo em três meniscos diferentes (Fig. 2). O primeiro é formado pela córnea e o humor cristalino; o segundo pela lente propriamente dita, e o terceiro menisco pelo humor vítreo. Eles têm índice de refração com valores muito próximos (1,336 para os humores vítreo e aquoso e um valor médio de 1,437 para a lente cristalina). Após ser refratada no primeiro menisco, a luz incide sobre a pupila - o diafragma de abertura variável do olho, cujas dimensões assumem valores desde 2 mm, para um ambiente com alto nível de iluminação, até 8 mm, próximo do limite inferior da visão. A pupila ajusta-se, em um tempo de décimos de segundos, em nível de luz ambiental. O segundo menisco é composto por uma lente constituída de uma cápsula contendo uma substância fibrosa de aspecto gelatinoso, rija no centro e menos consistente nas regiões periféricas, chamada lente cristalina ou simplesmente "cristalino". O olho humano em repouso tem seu foco no infinito; para focalizar objetos mais próximos, os músculos ciliares pressionam o cristalino tor-

nando-o mais convexo, mudando assim seu raio de curvatura e distância focal.

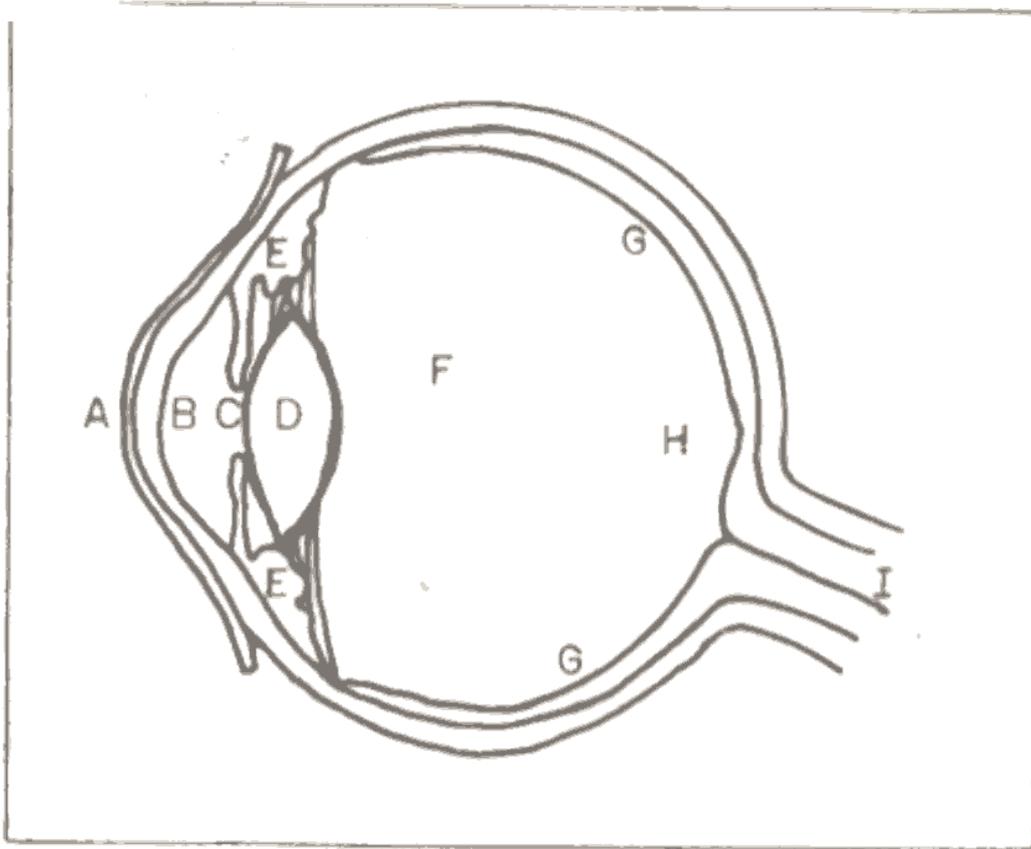


Fig. 1 – A- Córnea; B- Humor Aquoso; C- Pupila;  
D- Cristalino; E- Músculos Ciliares;  
F- Humor Vítreo; G- Retina; H- Fóvea;  
I- Nervo Óptico

O feixe luminoso que emerge do cristalino atravessa o humor vítreo com endereço definido - um diminuto ponto localizado sobre a retina, no fundo do olho. A retina é uma fina membrana constituída por fibras nervosas, que recobre o fundo do globo ocular. Sua espessura é de aproximadamente 0,5 mm. As fibras são ramificações do nervo ótico, diferenciadas em dois tipos de células foto sensíveis, os cones e os bastonetes, separados de 2  $\mu\text{m}$ . Na área total da retina (10  $\text{cm}^2$ ) existem cerca de  $10^8$  destes elementos, envoltos em um líquido azulado chamado púrpura visual. Os cones localizam-se principalmente na área central da retina e são responsáveis pela transmissão de cor e de luz intensa. A percepção das cores é um processo bastante complexo, pois esses cones são sensíveis apenas a

três delas, que são fundamentais: verde, vermelho e azul. As outras colorações e tonalidades visualizadas são o resultado da composição das impressões recebidas por estes três canais. Os bastonetes são mais sensíveis à luz de fraca intensidade e tons neutros. No centro da retina existe uma região de coloração amarela em cujo centro encontramos uma depressão chamada fóvea, composta apenas por cones. Enquanto a retina como um todo abrange um ângulo de  $240^\circ$ , a fóvea compreende um ângulo de apenas  $1,7^\circ$ . Quando mudamos o foco de nossos olhos de um ponto para outro, giramos os olhos de modo que o feixe luminoso incida sobre a fóvea. Seu tamanho é tão reduzido que se quisermos focalizar separadamente os pontos do sinal gráfico “dois pontos”, teremos que mudar a posição dos olhos. Na área restante da retina captamos os raios originados em outros pontos da cena observada, compondo a imagem total.

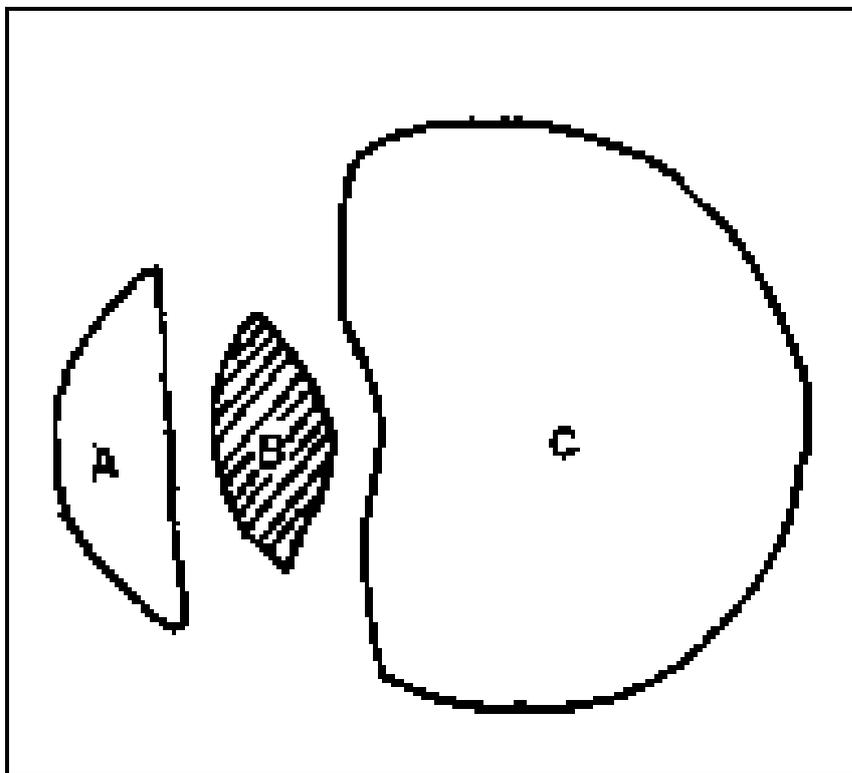


Fig. 2 – A- 1º Menisco – Córnea + Humor Aquoso  
B- 2º Menisco – Cristalino  
C- 3º Menisco – Humor Vítreo

Ao absorverem um fóton de luz, os cones e bastonetes em contato com a púrpura visual geram impulsos nervosos de origem elétrica (por mecanismos desconhecidos) que fluem pelo nervo ótico até o cérebro,

onde são decodificados e interpretados. Os processos envolvidos na emissão desses impulsos elétricos apresentam alguns problemas bastante interessantes. Por exemplo: a utilização da energia luminosa no processo da visão não se resume apenas à absorção eficiente de fótons, como ocorre nos processos de fotossíntese, mas exige também um processo de amplificação altamente sofisticado. A energia de um fóton é suficiente para afetar apenas um único átomo, ou molécula. Com essa pequena quantidade de energia, a informação de que um fóton foi absorvido não poderia ser transmitida além do próprio ponto de absorção. Um impulso nervoso envolve o movimento de alguns milhões de átomos ou íons, portanto a energia de cada fóton absorvido deve ser multiplicada, ou amplificada, acima de um milhão de vezes antes que possa dar origem a um impulso nervoso. O engenhoso amplificador desenvolvido pela natureza continua sendo um enigma não decifrado.

Outros problemas de diferentes ordens de complexidade tiveram que ser resolvidos no desenvolvimento de um sistema visual eficiente. Voltando nosso pensamento para a época em que a vida sobre a Terra estava em seu estado primitivo, quando a sobrevivência era o objetivo primordial, entendemos a importância de um sistema perceptivo rápido e preciso, pois, a menos que a presa pudesse detectar seu predador em tempo hábil, a vida terminaria abruptamente. Neste ambiente, a detecção visual não era apenas mais um processo de obtenção de informações, mas sim, um dos principais. Ela deveria ainda funcionar sob a fraca luz da madrugada, e mesmo à luz das estrelas, quando a corrente de fótons reduzia-se a um pequeno número de “gotas” de energia.

O primeiro passo na detecção visual seria o desenvolvimento de um contador de fótons; em seguida viriam as maneiras de processar essas informações. Os fótons absorvidos poderiam, por exemplo, ser acumulados até gerar uma imagem de alta qualidade, ou então, ser armazenados durante curtos intervalos de tempo, produzindo, assim, uma série de imagens de baixa qualidade. Um longo tempo de acumulação teria como resultado uma imagem borrada para objetos em movimento. Também o observador deveria, quando em movimento, diminuir sua velocidade de modo a não balançar seu sistema óptico durante a exposição. Por outro lado, um tempo de exposição extremamente curto produziria imagens de qualidade muito baixa, não apresentando dados suficientes para orientar uma resposta adequada. Para ser eficiente, um sistema visual deve funcionar de modo ajustado ao tempo de reação do sistema biológico. O tempo de reação é a soma do tempo transcorrido para que um pulso nervoso vá do

olho até o cérebro, e deste até o ponto apropriado do organismo, com o tempo necessário para vencer a inércia característica da parte do organismo considerada. Em geral, o tempo de reação para o ser humano é da ordem de 1 décimo de segundo.

Um aspecto interessante desse processo é o da adaptação ao escuro. Quando alguém entra em uma sala escura, saindo de uma rua ensolarada, sente-se virtualmente cego por alguns minutos. À medida que o tempo passa, a visão começa a melhorar, até que, após cerca de meia hora, estará plenamente adaptada. Os objetos percebidos, então, são mais de mil vezes mais escuros do que aqueles vistos em plena luz. Somos levados a admitir que a “sensibilidade” do olho aumenta mais de mil vezes no transcurso da adaptação ao escuro. Entretanto, a análise de ruído visual (definido a seguir) da sensibilidade do olho mostrou que esta não poderia variar mais que 10 vezes ao nos deslocarmos de um ambiente iluminado para um sem iluminação. Se fizermos uma experiência iluminando uma pequena área com uma fonte de luz incandescente e contarmos o número de fótons que atingem a área em um dado intervalo de tempo  $\Delta t$ , encontraremos um número  $n_1$ ; repetindo a experiência para intervalos de tempo idênticos, encontraremos números  $n_2, n_3, \dots$  correspondentes ao número real de fótons que durante intervalos de tempo idênticos  $\Delta t$  chegaram à área de teste. Se chamarmos  $n_0$  à média desses valores, podemos definir o desvio quadrático médio como sendo  $\langle (n_i - n_0)^2 \rangle^{1/2}$ . O desvio quadrático médio é chamado “ruído”, e o número médio de fótons que atinge a área de teste é chamado “sinal”. A vantagem da análise de ruído é que suas conclusões são independentes de um modelo particular para o processo de visão, seja ele físico ou químico. A sensibilidade foi medida em uma escala absoluta cujos únicos postulados foram a natureza quântica da luz e o caráter aleatório da distribuição de fótons.

Como então explicar o aumento de mais de 1000 vezes na capacidade de enxergar ocorrido durante a adaptação ao escuro? A resposta é dada em termos familiares a quem lida com receptores de rádio e televisão. É comum que, ao mudarmos a sintonia de uma estação potente para outra mais fraca, seja necessário aumentar o volume do som até um nível confortável. A sensibilidade do aparelho já é fixada pelas propriedades eletrônicas da antena e do amplificador. O processo de “aumentar o volume” não altera a sensibilidade do aparelho receptor, mas apenas o nível em que o sinal é apresentado ao ouvinte. Lembrando que existe um intervalo de tempo entre a mudança de sintonia e o momento que o volume alcança um nível adequado, temos aqui um paralelo completo com a adaptação ao

escuro. Os minutos exigidos para a adaptação são necessários para que o ganho do amplificador seja elevado quimicamente ao nível apropriado de apresentação. A sensibilidade intrínseca do olho varia muito pouco durante o período de adaptação ao escuro. Esses resultados nos levam a concluir que o processo visual envolve um alto grau de amplificação entre a retina e o cérebro, e que o ganho do amplificador é variável: para a luz de alta intensidade o ganho é pequeno e para baixas intensidades o ganho é grande.

Outra propriedade do nosso sistema visual é a chamada imagem reversa. Quando olhamos um objeto brilhante e depois mudamos o olhar para uma parede neutra vemos uma imagem transitória complementar. Por exemplo, uma cena em preto e branco produz uma imagem que é o negativo do original. Um objeto vermelho brilhante produzirá uma imagem com sua cor complementar – o verde. Em cada um dos casos, o ganho da parte da retina atingida pelo padrão brilhante é reduzido, de modo que, quando a retina é exposta a uma superfície neutra, as áreas anteriormente brilhantes são transmitidas com um sinal de nível mais baixo e parecem mais escuras do que a região em volta. O mecanismo de ganho é variável para cada área da retina e também funciona de modo independente para cada um dos três padrões de cores fundamentais: vermelho, verde e azul.

Concluindo, observamos que existem algumas diferenças entre o que vemos e a realidade objetiva. Os impulsos nervosos saídos da retina, produziram em um sistema eletrônico apenas pontos de luz desiguais e confusos. O cérebro faz os ajustes necessários para dar sentido a esse conjunto de informações, compondo uma imagem reconhecível. Desde nosso nascimento aprendemos a associar as relações espaciais do mundo exterior com certos padrões de atividade nervosa estimulada através de nossos olhos. É função do cérebro exprimir uma representação desse mundo externo. Perceber não é, portanto, apenas um processo de coletar sensações, mas sim um efeito produzido pelas impressões sensoriais em nosso sistema interno de interpretação.

### Referências Bibliográficas

1. ROSE, A. Vision-human and electronic. New York, Plenum Press, 1973.

2. WALD, G. Eye and camera. In: Scientific American Reader. New York, Simon and Schuster, 1953. p. 555-68.
3. SEARS, F.; ZEMANSKY, M.W. & YOUNG, H.D. Física. Rio de Janeiro, Ed. Livros Técnicos e Científicos, p. 840-2, 1984.
4. OKUNO, E.; CALDAS, I. & CHOW, C. Física para ciências biológicas e biomédicas. São Paulo. Harbra, p.272-3, 1984.