SIMULAÇÃO DA VISÃO DAS CORES: DECODIFICANDO A TRANSDUÇÃO QUÂNTICA-ELÉTRICA[+*]

Élgion Lúcio da Silva Loreto
Departamento de Biologia – UFSM
Santa Maria – RS
Paulo Henrique dos Santos Sartori
Programa de Pós-Graduação em Educação em Ciências:
Química da Vida e Saúde
Departamento de Bioquímica – UFRGS
Porto alegre – RS

Resumo

Propomos uma simulação experimental, utilizando materiais acessíveis e de baixo custo, sobre o mecanismo biofísico da visão das cores em conformidade com a teoria tricromática de Young-Helmholtz, abordando, principalmente, o processo de codificação e decodificação de sinais elétricos que chegam ao córtex cerebral. O estímulo que desencadeia esse processo é dado via transformação da energia quantizada de um fóton de luz que ocorre nas fotocélulas da retina do olho humano. A construção de um sistema de coleta e análise de dados simples, utilizando basicamente um multímetro, filtros, LDR e LEDs, permite estabelecer conexões entre o sistema visual e o modelo de simulação.

Palavras-chave: *Visão das cores; simulação experimental; codificação; material de baixo custo.*

[+] Simulation of the color vision: decoding quantum-electric transduction

* *Recebido: julho de 2007.*
Aceito: junho de 2008.

Abstract

We propose an experimental simulation, using accessible and low cost materials, on the biophysical mechanism of the color vision in accordance with the Young-Helmholtz's Trichromatic Theory, approaching mainly the coding and decoding process of electric signs that arrive to the cerebral cortex. The stimulus that unchains this process is given through transformation of the quantized energy of a light photon that takes place in the photocells of the retina of the human eye. The construction of a simple system of collection and analysis of data, using a multimeter, filters, LDR and LEDs allows us to establish connections between the visual system and the simulation model.

Keywords: *Color vision; experimental simulation; coding; low-cost material.*

I. Introdução

A visão consiste numa espécie de interface entre um organismo e o meio exterior, capaz de distinguir entre as radiações eletromagnéticas existentes aquelas que são sensíveis. Apenas três filos do reino animal possuem tal capacidade (WALD, 1969). É um processo tão complexo que, no caso dos seres humanos, envolve cerca de quarenta por cento (40%) do cérebro; a maior proporção entre os cinco sentidos (WERNER; PINNA; SPILLMANN, 2007).

Enxergar cores é tido por alguns como um privilégio desnecessário. Certamente, inúmeras sensações e emoções seriam dramaticamente afetadas, mas afora conseqüências subjetivas, nada seria significativamente prejudicado em nível de sobrevivência sem o "plus" da visão colorida. Hoje, talvez isso faça algum sentido, porém, há milhões de anos, foi justamente em função da sobrevivência dos mais aptos que nossos ancestrais se beneficiaram de mutações genéticas que permitiram distinguir no ambiente as cores de frutos em meio à folhagem (GOLDSMITH, 2006). Esse luxo da humanidade e de poucos primatas, compartilhado apenas com aves, lagartos, tartarugas e alguns peixes teria, entretanto, funções mais relevantes que enfeitar a vida. Estudos recentes indicam uma grande dependência entre as cores e outros atributos dos objetos tais como a forma e a profundidade (WERNER; PINNA; SPILLMANN, 2007).

Uma das primeiras tentativas de explicar o processamento visual colorido foi proposta no início do século XIX, pelo físico inglês Thomas Young (*On the theory of light and colours,* 1802), e aprimorada pelo médico e físico alemão Hermann von Helmholtz (*Physiological Optics,* 1866), passando a compor os primórdios do que hoje conhecemos por teoria tricrômica. Obteve respaldo quando, em 1964, foram efetivadas medidas de absorção da luz em um único cone (fotocélula da retina) por intermédio de um microespectrofotômetro. Por não conseguir explicar certos aspectos da visão (como a inexistência de certas cores como, por exemplo, verdes avermelhados), outra teoria foi desenvolvida pelo fisiologista alemão Karl Ewald Hering, que propôs um sistema visual baseado na oponência de cores. Não há ainda um consenso ou uma teoria capaz de abranger a enorme variedade de questões em aberto (BARTHEM, 2005; NASCIMENTO, 2004).

A visão das cores vai muito além da simples absorção e reflexão de determinados comprimentos de onda da luz. É um fenômeno que requer uma abordagem bem mais ampla e multidisciplinar do conhecimento (PESA; BRAVO; COLOMBO, 2003; WERNER; PINNA; SPILLMANN, 2007). Para ilustrar esse aspecto, a Tabela 1 elenca alguns tópicos das principais áreas envolvidas.

Tabela 1 - Relação dos principais conhecimentos e seus respectivos elementos e propriedades relacionados com a visão das cores (PESA; BRAVO; COLOMBO, 2003; WERNER; PINNA; SPILLMANN, 2007).

Conhecimento	Físico		Biológico	Psicológico
Elemento(s)	Fonte de Iluminação	Características da Matéria	Sistema Visual	Ilusão
Propriedade ou Fenômeno	Faixas de Radiação (comprimentos de onda ou freqüências)	Absorção, Reflexão, Transmissão	Sensibilidade dos Cones (diferentes respostas às diferentes freqüências)	Engano na Interpretação em nível Cerebral (processamento)

De fato, a diversidade de institutos de pesquisa e de profissionais envolvidos corresponde a esta demanda: neurocientistas, psicofísicos, bioquímicos, físicos e biólogos, colaboram com esforços interdisciplinares para uma melhor compreensão dessa complexa interação entre matéria e energia.

II. Sintonizando... de 428 a 750 terahertz

De todo o espectro eletromagnético (Fig. 1), apenas uma estreita faixa é "captada" pelos olhos humanos.

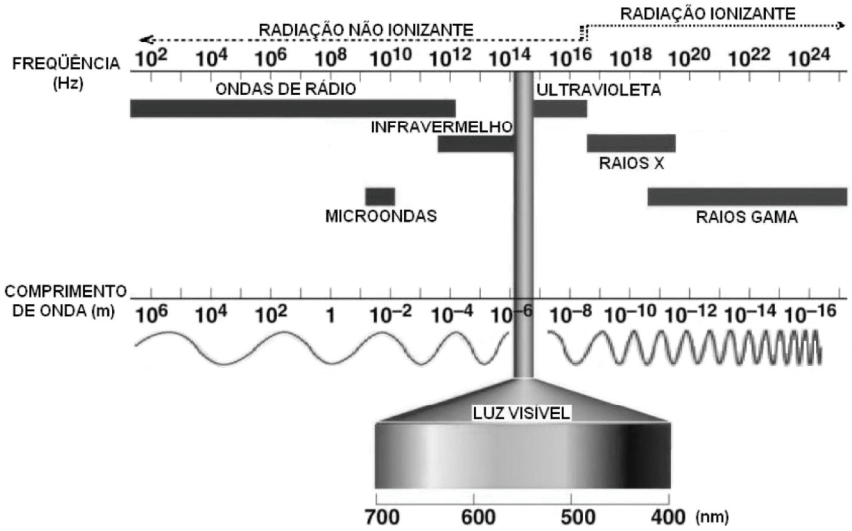

Fig. 1 - Espectro eletromagnético distribuído em função da freqüência e do comprimento de onda. A luz visível decomposta apresenta, na faixa entre 700 nm e 400 nm, a seqüência de cores: vermelho, alaranjado, amarelo, verde, azul, anil e violeta.

A mínima quantidade de energia capaz de desencadear o processo foto-químico da visão é a de um fóton de luz da radiação eletromagnética, cujo comprimento de onda é de 700 nm (entre o infravermelho e o vermelho).

Para toda onda, a velocidade é o produto de seu comprimento de onda pela sua freqüência ($v = \lambda f$), e no caso de ondas eletromagnéticas $v = c$ = velocidade da luz no vácuo/ar ($\sim 3{,}0 \times 10^8$ m/s), então:

$$f = \frac{3{,}0\,x\,10^8\,m/s}{700\,x\,10^{-9}\,m} = 4{,}28\,x\,10^{14}\,/\,s = 4{,}28\,x\,10^{14}\,Hz = 428\,x\,10^{12}\,Hz$$

ou 428 *THz*

f = 428 terahertz.

A energia desse fóton pode ser determinada multiplicando a freqüência (*f*) pela constante de Planck (*h*):

$$E = h f = 6{,}63 \times 10^{-34}\ J\,s \,.\, 4{,}28 \times 10^{14}\ /s \approx 2{,}84 \times 10^{-19}\ J.$$

Convertendo em termos de elétron-volt (1eV = 1,60 x 10^{-19} J), a energia desse fóton de luz será, aproximadamente, 1,77 eV. Energias inferiores a esse valor (infravermelho, ondas de rádio, microondas) não promovem reação nos fotorreceptores da retina sendo, portanto, invisíveis.

Quando a freqüência da radiação eletromagnética atinge 750 terahertz (o que corresponde a um comprimento de onda de 400 nm – limite do violeta com o ultravioleta), a energia do fóton é mais do que suficiente (cerca de 3,11 eV) para sensibilizar uma fotocélula da retina, porém não a atinge. O fóton da luz ultravioleta é absorvido, antes de chegar à retina, pelo cristalino e pelos humores do olho, sendo também invisível.

Logo, os limiares da visão humana situam-se entre 400 nm e 700 nm. Tais valores são usados apenas como parâmetros de referência, pois podem variar consideravelmente para cada pessoa. Alguns estudos apontam estes limites entre 380 nm (ultravioleta próximo ou UV A) e 760 nm (infravermelho próximo ou IV A). Outros, baseados em níveis de intensidade luminosa, demonstram, em investigações específicas, valores entre 312 nm (ultravioleta médio ou UV B) e 1.050 nm (infravermelho próximo ou IV A) (WALD, 1969).

Existem dois tipos de fotorreceptores celulares na retina: os bastonetes e os cones – que são de três tipos. A função dos bastonetes está relacionada com a visão sob pouca iluminação, cabendo aos cones a visão das cores.

Certos animais (pássaros, alguns répteis e peixes) foram evolutivamente privilegiados com um tipo de cone a mais (totalizando quatro tipos de cones contra apenas dois da maioria dos mamíferos) e desenvolveram um sistema visual tetracromático, que possibilita a visão ultravioleta (GOLDSMITH, 2006). Esta, aliás, motivo de controvérsia, pois dados da literatura científica indicam que pessoas cujos cristalinos foram removidos devido à cirurgia da catarata, passaram a ter ótima visão na faixa do ultravioleta (WALD, 1969). Porém, tal visão seria inviável sem os cones com sensibilidade apropriada. Alguns insetos e artrópodes também são capazes de perceber a radiação ultravioleta, mas possuem um sistema visual colorido diferenciado em relação ao do homem (ROBINSON, 2007; GOLDSMITH, 2006). A maioria dos insetos, por exemplo, não distingue a cor vermelha (OKUNO; CALDAS; CHOW, 1986)

III. Visão colorida

O mecanismo da visão humana é um dos exemplos mais fantásticos da capacidade de transdução que pode ser apresentado por uma estrutura biológica. Ondas luminosas (uma determinada gama de freqüências da radiação eletromagnética) atingem células fotossensíveis da retina (considerada uma espécie de prolongamento ou extensão do cérebro até os olhos) a todo instante. A energia transportada por essas ondas sob a forma de "pacotes", denominados fótons, é transformada em sinais elétricos codificados para serem decodificados pelo cérebro. Ocorre uma série de eventos físicos, biológicos e químicos, esquematizados na Fig. 2. Resumidamente, a energia do fóton de luz (estímulo físico) provocará alteração na estrutura química da molécula de retinal (ilustrada na Fig. 3), presente nas fotocélulas da retina e semelhante à vitamina A. A alteração na estrutura química da molécula de retinal acarretará variação no potencial elétrico de repouso de suas membranas celulares, gerando um potencial de ação. Este "pulso" elétrico propagar-se-á, através de sinais eletroquímicos mediados por neurotransmissores, como um código elétrico conduzido ao cérebro que o decodificará na forma de imagem (OKUNO; CALDAS; CHOW, 1986; GOLDSMITH, 2006).

IV. Simulação

A fim de promover uma melhor compreensão desses mecanismos e das funções de alguns dos principais elementos envolvidos, propomos uma simulação com investigações que permitem uma maior interação do aluno com um conteúdo interdisciplinar, fazendo as correspondências pertinentes.

Nosso interesse é, justamente, simular a ação das fotocélulas do olho humano responsáveis pela visão das cores – os cones. Ao combinarem diferentes graus de sensibilização à energia radiante, traduzem para sinais elétricos cores específicas a serem interpretadas. Foge do escopo deste trabalho detalhar toda a anátomo-fisiologia e a cascata de reações, mudanças e interações que ocorrem nesse intrincado processo. Então, focalizaremos apenas o ponto em questão.

Os cones são, geralmente denominados por cores, mas isso não significa que tenham as cores que os nomeiam; representa uma afinidade com o comprimento de onda associado às suas regiões de absorção. Modernamente, costuma-se identificar cada tipo de cone pelo comprimento de onda específico associado à sua máxima absorção. A Tabela 2 apresenta um conjunto de características desse tipo de fotocélula.

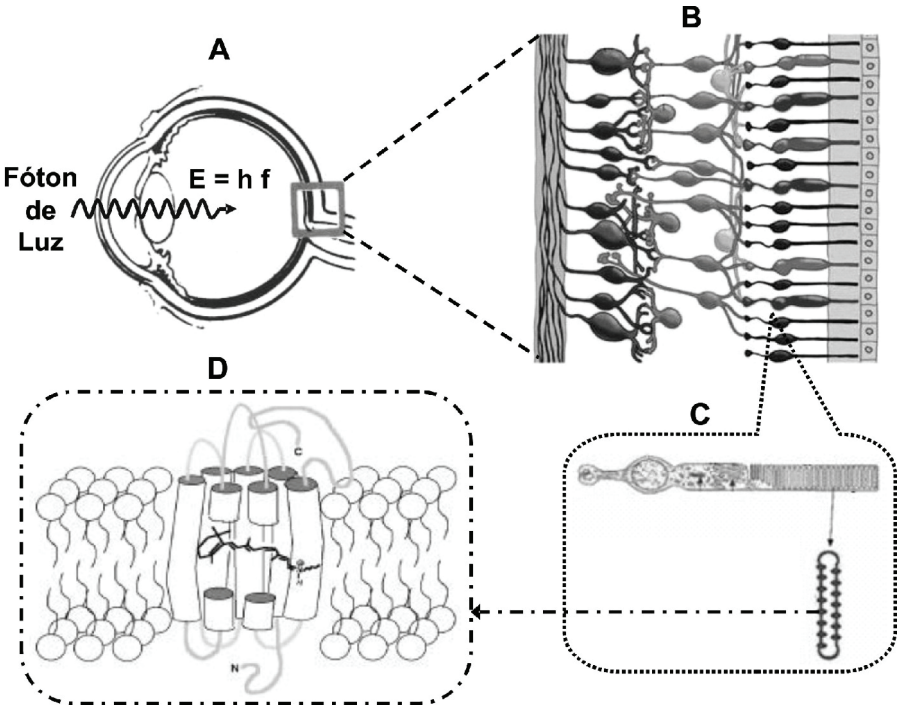

Fig. 2 - Esquema das estruturas envolvidas no sistema visual. (A) Olho humano recebendo energia luminosa de um fóton de luz. A retina é uma fina camada com cerca de 0,5 mm de espessura que reveste internamente o olho. (B) Retina ampliada: camadas de células nervosas e células fotossensíveis. (C) Uma célula fotossensível ampliada. No segmento externo existem diversos discos empilhados, cada um deles (em destaque) tem sua membrana crivada com milhares de complexos de rodopsina. (D) Cada complexo consiste de uma proteína atravessada na membrana em cujo âmago um nicho contém uma molécula de retinal (adaptado de KOLB, 2003; TERSTEGEN; KOLSTER; FALZEWSKI; BUSS, 2001; HARGRAVE, 2001).

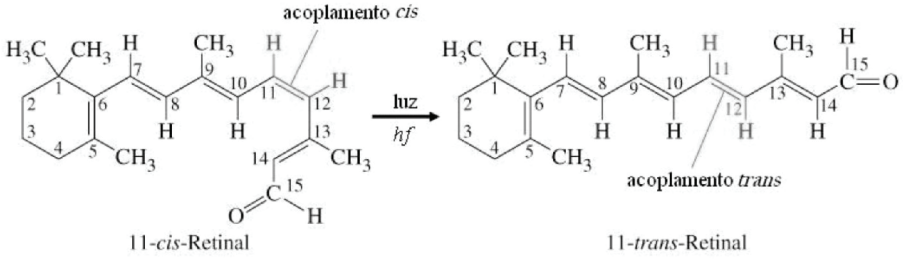

Fig. 3 - Molécula de retinal que, ao receber energia (hf) de um fóton de luz, sofre uma isomerização cis-trans, mudando de forma.

Tabela 2 - Distribuição qualitativa e quantitativa dos tipos de cones (adaptado de BARTHEM, 2005).

Cones	Fotopigmento	Faixa Espectral de Sensibilidade	Quantidade aproximada	
			Valores Absolutos	Percentual do Total
Azuis	Cianolabe	400 – 550 nm	140.000	2%
Verdes	Clorolabe	435 – 635 nm	2.380.000	34%
Vermelhos	Eritrolabe	480 – 700 nm	4.480.000	64%
TOTAL	---	400 – 700 nm	7.000.000	100%

Ao observar o gráfico da Fig. 4, é possível verificar a combinação de diferentes "graus" de "sensibilização" (absorção relativa de luz) de cada cone em resposta aos diferentes estímulos visuais (cores).

Para entender como funciona a interpretação da informação codificada, conforme ilustra a Tabela 3, observe que, no gráfico da Fig. 4, onde as linhas verticais tracejadas (exemplos de algumas cores) "cortam" as curvas de absorção relativa de cada cone, formando os pontos de cruzamento correspondentes aos valores de absorção relativa daquele cone para aquela cor. Por exemplo: a linha vertical tracejada que indica a cor verde corta a curva do cone vermelho em 31%, do cone azul em 36% e do cone verde em 67%, ou seja, a combinação desses três percentuais de estimulação perfaz o código: '31 36 67' o qual será interpretado pelo cérebro como (uma das muitas gamas da) cor verde.

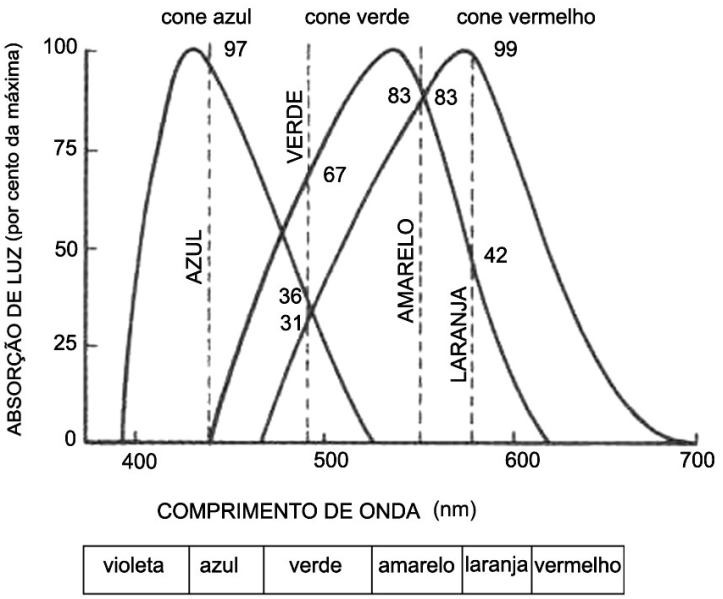

Fig. 4 - Gráfico da absorção relativa de luz para cada tipo de cone em função do comprimento de onda incidente (adaptado de GUYTON; HALL,1988. p. 370).

Tabela 3 - Interpretação codificada de algumas cores pelas diferentes sensibilizações dos três tipos de cones.

Propriedade	Tipo de Fotocélula			Cor Interpretada (combinação dos três)
	Cone Azul ou Pigmento 424	Cone Verde ou Pigmento 530	Cone Vermelho ou Pigmento 560	
Absorção de Luz (% da máxima)	97	00	00	Azul
	36	67	31	Verde
	00	83	83	Amarelo
	00	42	97	Laranja

Material:

- Metade de uma bola oca de isopor com cerca de 20 cm de diâmetro (existem embalagens em forma de esfera que podem servir de opção);
- Uma tampa de plástico com 7,0 cm de diâmetro e 2,0 cm de altura (por exemplo, tampa de vidro de maionese);
- Três caixas de fósforos;
- Filtros coloridos nas cores vermelho, verde e azul (a opção por filtros plásticos conhecidos como "gelatinas", encontradas em lojas de som e luz ou de luminotécnica, apesar de um pouco mais cara, torna-se vantajosa na medida em que estes materiais mantêm a coloração por mais tempo, mesmo sob forte iluminação e com propriedades filtrantes muito semelhantes às dos filtros de laboratório);
- LDR (Light Dependence Resistor ou resistor dependente de luz) de 1,0 cm de diâmetro;
- Resistor de 1/8 W e resistência elétrica entre 180 e 270 Ω;
- Fios para conexões elétricas;
- LEDs de alto brilho de 5 mm nas cores violeta, azul, verde, laranja (âmbar), amarelo e vermelho (Fig. 5-B);
- Fonte de alimentação de 6,0 V corrente contínua: 4 pilhas pequenas tipo AA de 1,5 V colocadas em série (Fig. 6-A) ou um carregador de celular 5,9 V c.c. (opcional: com garras do tipo "jacaré" – Fig. 5-A);
- Conector para LED ou porta-LED (conector para drive de disquete que pode ser retirado de sucatas de aparelhos estragados – Fig. 6-B);
- Tinta guache preta (opcional).

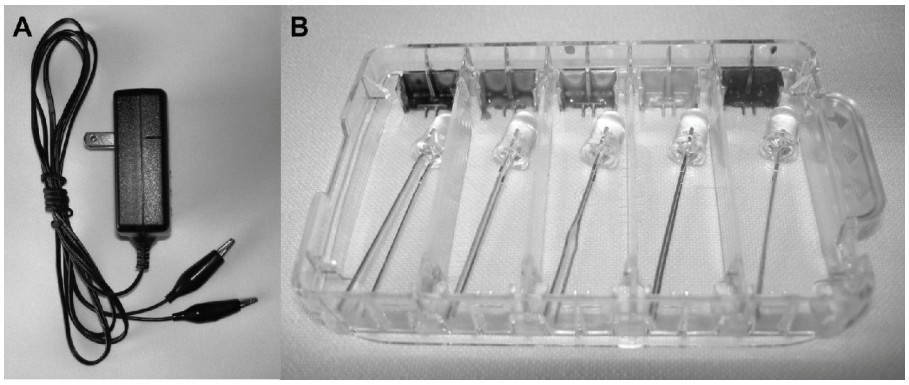

Fig. 5 - (A) Carregador de aparelho celular com garras tipo "jacaré". (B) LEDs de alto brilho nas cores violeta, azul, verde, laranja e vermelho.

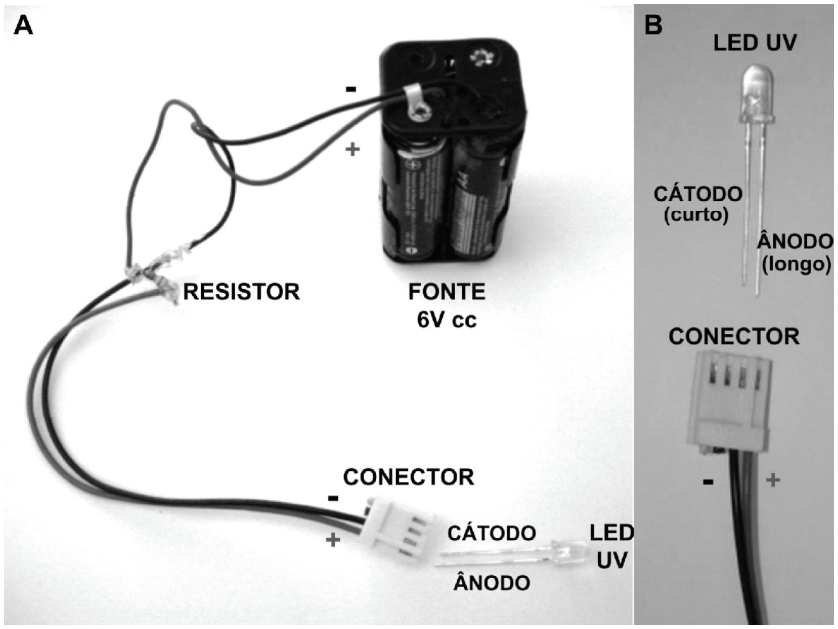

Fig. 6 – (A) Esquema das conexões elétricas entre a fonte de alimentação e o conector para LED. (B) Detalhe de identificação dos terminais do LED para conexão.

Montagem:

a) Sensor: Fazer uma janela (2,5 cm x 2,0 cm) no centro de uma das laterais maiores de uma caixa de fósforos. Na lateral oposta, fazer dois pequenos furos (com uma agulha ou alfinete) para passar os terminais do LDR, deixando-os voltados para o interior da caixa, colando, firmemente, o LDR na caixa. A configuração final é apresentada na Fig. 7.

b) Filtros: As "gavetas" das caixas de fósforos são recortadas fazendo-se janelas do mesmo tamanho da janela do sensor. Recortar as "gelatinas" (2,8 cm x 2,3 cm) prendendo-as, com auxílio de fita adesiva, na parte interna das gavetas. Na borda de cada gaveta, faz-se um recorte (rebaixo de 1,2 cm x 0,3 cm) para poder passar sobre o LDR quando as gavetas forem encaixadas no sensor. A Fig. 8 mostra os filtros prontos para serem encaixados no sensor.

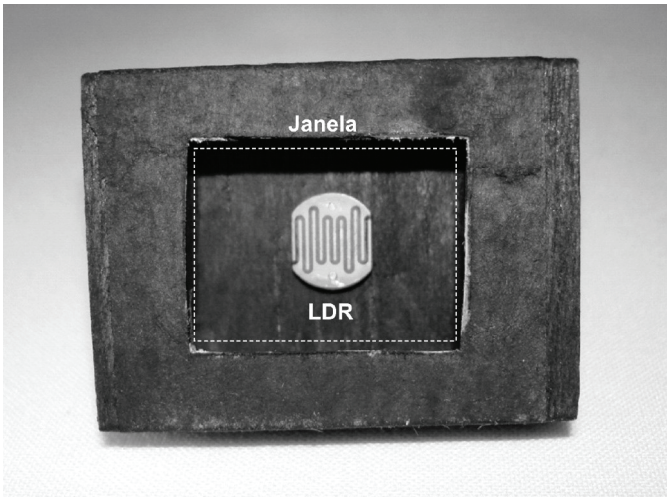

Fig. 7 - Caixa de fósforos com janela e LDR.

c) Olho: Recortar, em pontos diametralmente opostos da metade da bola de isopor, um encaixe para o conector para LED (ou similar) e outro para o sensor (do tamanho da caixa de fósforos). As abas de encaixe da bola podem servir para este fim. A fim de minimizar, durante o procedimento, os efeitos da luz espalhada pela superfície interna da semi-esfera de isopor, pode-se pintá-la com tinta guache preta. A caixa do sensor e o conector devem ficar bem firmes (para isso, use cola ou adesivo que não reaja com o isopor). A aparência do conjunto fica como a da Fig. 9. Para manter esta semi-esfera em equilíbrio, prende-se a tampa de plástico (na parte externa do "fundo" da bola) com fita adesiva fazendo uma base de sustentação, um apoio, conforme mostra a Fig. 10-C.

d) Conexões elétricas entre:

- LDR e multímetro (Fig. 10-A): Um dos terminais do LDR deve ser ligado na saída + e o outro na saída COM (−) do multímetro (não há preocupação com a ordem). Sugere-se adaptar a uma das extremidades de cada fio de conexão uma garra do tipo "jacaré" (para agarrar o terminal do LDR) e, à outra, conectores tipo "banana" (para "plugar" no multímetro).

- Conector para LED e fonte de alimentação (Fig. 6-A): Do conector para LED partem dois fios de ligação: em um deles, soldar o resistor e, ao outro, ligar diretamente o pólo negativo da fonte. O pólo positivo deve ser ligado (soldado) ao resistor.

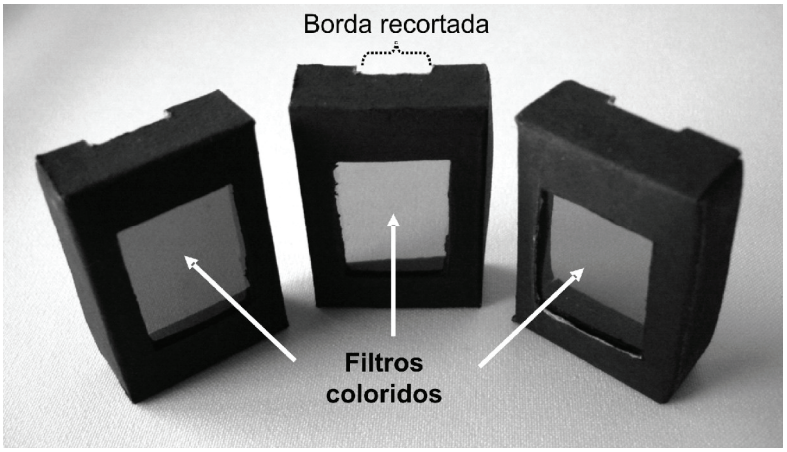

Fig. 8 - Caixinhas de fósforos cortadas e com filtros coloridos nas cores vermelho, verde e azul.

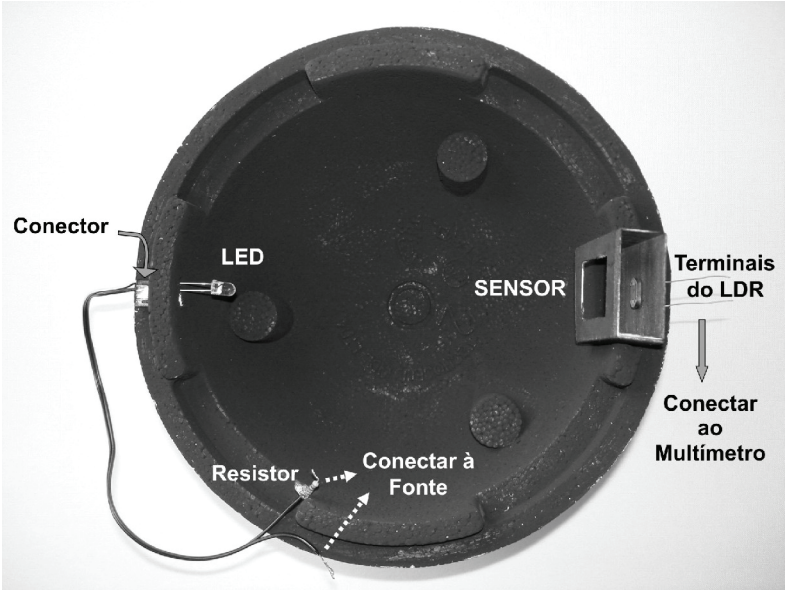

Fig. 9 - Olho de isopor com sensor e conector para LED encaixados.

- LED e conector para LED (Fig. 6-B): o ânodo do LED (terminal longo) deve ser encaixado na saída + do conector e o cátodo do LED (terminal curto) na saída – do conector, preferencialmente de forma simultânea.

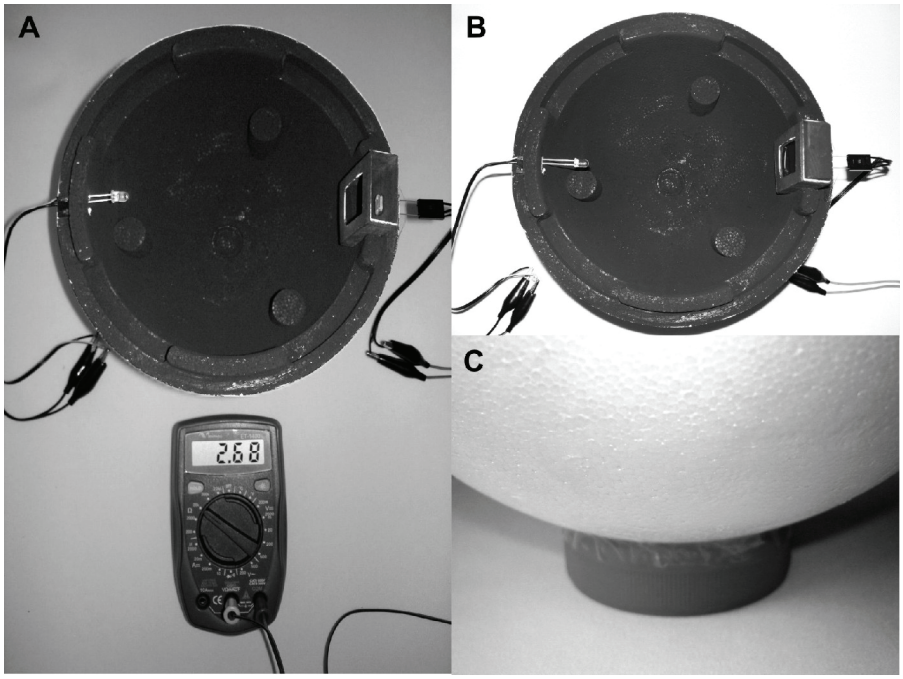

Fig. 10 - (A) Olho de isopor com sensor sem filtro conectado ao multímetro, LED ligado à fonte de alimentação e terminais do LDR conectados ao multímetro. (B) Olho de isopor com filtro encaixado no sensor. (C) Detalhe da base do olho de isopor.

Simulação

As analogias entre o sistema visual humano e o aparato simulador construído estão representadas na Fig. 11. As relações fisiológicas e funcionais entre esses dois sistemas são detalhadas na Tabela 4.

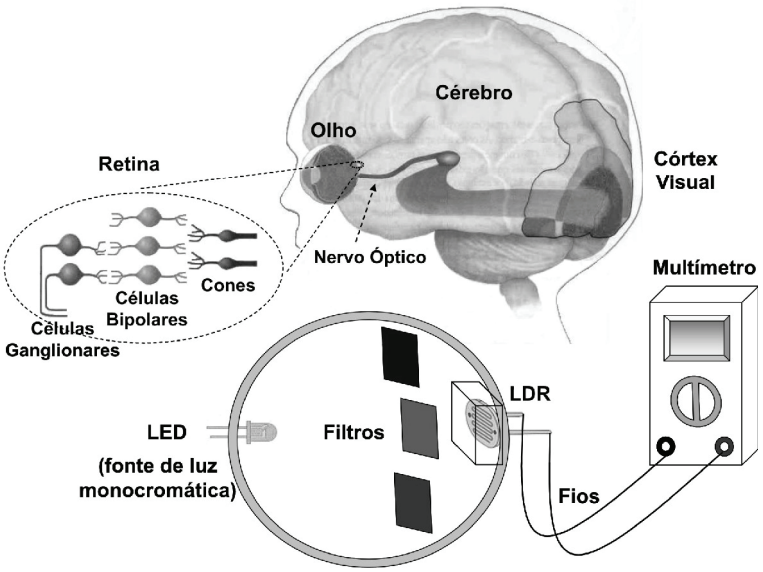

Fig. 11 - Esquema comparativo entre o sistema visual e o conjunto simulador (adaptado de WERNER; PINNA; SPILLMANN, 2007. p. 86).

Tabela 4 - Relações (paralelo comparativo) entre o sistema visual e o simulador referente aos seus elementos e às suas respectivas funções.

Elemento(s)	Função(ões)	Elemento(s)	Função(ões)
Cones	Absorver luz de certos comprimentos de onda e transmitir sinais elétricos codificados.	Filtros coloridos	Absorver e transmitir luz de certos comprimentos de onda (selecionar).
Células Bipolares e Ganglionares	Pré-processamento.	LDR	Sensor / Transdutor.
Nervo Óptico	Conduzir sinais elétricos.	Fios	Conduzir a corrente elétrica.
Córtex Visual	Decodificar os sinais elétricos e formar a imagem.	Multímetro	Converter a corrente elétrica em registro digital.

Procedimento

O LDR é um dispositivo semicondutor, também conhecido como fotoresistor, cuja resistência varia linearmente com a intensidade de luz incidente. O comprimento de onda dessa luz incidente sobre o LDR tem influência sobre sua resistência – é a chamada resposta espectral. O LDR, como o olho humano, não apresenta a mesma sensibilidade para as mesmas cores de luz.

A lógica de funcionamento do LDR segue o seguinte princípio: quanto mais luz incidir sobre sua superfície, menor o valor da resistência elétrica. Como esse valor será registrado pelo multímetro, espera-se que os menores valores correspondam às medidas sem o uso dos filtros. Como os filtros absorverão boa parte da intensidade luminosa de determinado comprimento de onda, os valores de resistência elétrica serão comparativamente maiores.

Primeiramente, ajusta-se a "mira" do LED, manipulando o conector ou porta-LED de tal maneira que a luz deste incida diretamente sobre o LDR. A medida da resistência pode auxiliar nessa tarefa: feitas as conexões elétricas necessárias e ligando-se o multímetro (com o seletor na faixa 200 kΩ ou 100 kΩ, conforme o modelo), quando este indicar o menor valor, ter-se-á o ponto ótimo de ajuste. Cada LED tem uma potência luminosa diferente, que poderia ser corrigida variando-se a distância entre o LED e o LDR. Outra alternativa seria o uso de um potenciômetro para regular a incidência de luz inicial. Porém, optamos por simplificar o sistema e contornar essa dificuldade tomando o valor inicial de cada medida dos LEDs sem o filtro como uma referência inicial de passagem de 100% (ou 0% de bloqueio) daquela cor.

Então, efetuam-se as medidas de cada LED sem nenhum filtro (Fig. 10-A) e com cada um dos três filtros (Fig. 10-B). Recomenda-se cobrir o conjunto com uma caixa para minimizar a incidência de luz ambiente que possa vir refletida de roupas e objetos ao redor, produzindo oscilações durante as medições.

A Tabela 5 mostra algumas medidas de resistência elétrica feitas com o multímetro com o seletor na faixa 200 kΩ (ou 100 kΩ, conforme o modelo). Consideramos as seguintes variáveis:

R_0 = Resistência medida sem filtro.

R = Resistência medida com filtro.

$\Delta R = R - R_0$ = Diferença de resistência elétrica observada com e sem filtro.

$p = |\Delta R|/R_0$ = Percentual da diferença de resistência elétrica observada com e sem filtro em relação ao valor de referência R_0 (resistência medida sem filtro).

Tabela 5 - Dados de resistência elétrica, em kΩ, coletados durante a simulação.

LED = COR	R_0	FILTRO = CONE								
		AZUL			VERDE			VERMELHO		
		R	ΔR	p(%)	R	ΔR	p(%)	R	ΔR	p(%)
VIOLETA	4,6	6,4	1,8	39	32,7	28,1	611	16,1	11,5	250
AZUL	2,5	2,9	0,4	16	7,2	4,7	188	28,7	26,2	1048
VERDE	3,0	4,9	1,9	63	4,0	1,0	33	42,0	39,0	1300
LARANJA	3,8	13,8	10,0	263	11,6	7,8	205	6,8	3,0	79
VERMELHO	1,5	6,5	5,0	333	6,3	4,8	320	1,8	0,3	20

Para exemplificar, observemos os dados do LED violeta: o valor registrado sem filtro (R_0) foi de 4,6 kΩ e com filtro azul (R) 6,4 kΩ. Teremos a diferença (ΔR) 6,4 kΩ – 4,6 kΩ = 1,8 kΩ. O valor de p indica que 1,8 kΩ representam 39% sobre 4,6 kΩ, ou seja, 1,8 kΩ ÷ 4,6 kΩ = 0,39 = 39/100 = 39%.

A passagem de luz através do filtro depende da sua capacidade de absorção. Portanto, quanto menos luz passar pelo filtro (menor transmissão), maior será a absorção. Logo, os percentuais obtidos representam um "bloqueio" da luz em relação ao valor inicial. Poderíamos interpretar esse "bloqueio" como sendo o quanto de luz seria aproveitado pelo cone, ou seja, o quanto ele foi "sensibilizado". Porém, para que os resultados da simulação se aproximem ainda mais do sistema visual real, nos interessa o estímulo (o sinal enviado pelo "cone" – filtro), ou seja, a luz que é transmitida (e não a bloqueada) manipulando os dados conforme os critérios e convenções da Tabela 6.

Tabela 6 - Critérios para interpretação dos dados obtidos e convenção para o desempenho dos filtros.

Desempenho dos Filtros	Convenção	Interpretação Proposta
Absorção = p% Transmissão = 100% – p%	Se p ≥ 100% Transmissão = 00 ("bloqueio total" da luz)	Cone não é sensibilizado; não há propagação do estímulo (sinal codificado)
	Se p < 100% Transmissão = 100 – p ("passagem parcial" da luz)	Cone é sensibilizado; há propagação do estímulo (sinal codificado)

O patamar de 100%, dito de outra forma, deve ser interpretado como um limiar superior de "funcionamento" ou da sua "fisiologia", ou seja, o nosso "cone" (filtro) não enviará o sinal codificado. Tal comportamento é similar ao envio do sinal elétrico que ocorre nas células da retina e do sistema nervoso humano, para as quais também há um patamar. A alteração do potencial de repouso da célula, ao receber o estímulo, deve ultrapassar um valor limiar – potencial limiar (abaixo do qual não ocorre a propagação) resultando no potencial de ação que se propaga ao longo do axônio.

Aplicando os critérios e as convenções estabelecidos na Tabela 6 nos dados das colunas "p(%)" da Tabela 5, obtemos os códigos de sensibilização, para cada tipo de cone (filtros), apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Aplicação dos critérios de interpretação dos dados.

LED = COR	FILTRO = CONE					
	AZUL		VERDE		VERMELHO	
	p(%)	Convenção	p(%)	Convenção	p(%)	Convenção
VIOLETA	39	100-39 = 61	611	≥ 100 = 00	250	≥ 100 = 00
AZUL	16	100-16 = 84	188	≥ 100 = 00	1048	≥ 100 = 00
VERDE	63	100-63 = 37	33	100-33 = 67	1300	≥ 100 = 00
LARANJA	263	≥ 100 = 00	205	≥ 100 = 00	79	100-79 = 21
VERMELHO	333	≥ 100 = 00	320	≥ 100 = 00	20	100-20 = 80

Finalmente, podemos comparar os códigos obtidos do simulador com os códigos do sistema visual humano. As correspondências são mostradas na Tabela 8.

Tabela 8 - Comparação entre os valores reais do sistema visual (ver Tabela 3 e Fig. 4) e os resultados da simulação.

LED = COR	FILTRO = CONE					
	AZUL		VERDE		VERMELHO	
	Sistema Visual	Simula-ção	Sistema Visual	Simula-ção	Sistema Visual	Simu-lação
VIOLETA	40	61	00	00	00	00
AZUL	97	84	00	00	00	00
VERDE	36	37	67	67	31	00
LARANJA	00	00	42	00	97	21
VERME-LHO	00	00	00	00	50	80

V. Considerações

Ao comparar os valores da Tabela 8, é possível verificar uma correspondência de 60% dos resultados: nove em quinze são fidedignos com as medidas reais. Em 2/3 dos resultados (dez em quinze), a diferença com o real é menor que 13%. Em apenas 13% dos resultados não houve concordância "bruta", ou seja, o filtro "bloqueou mais que 100%" quando deveria bloquear menos que esse valor. O LED laranja, que apresentou a maior discrepância, na verdade corresponde à cor âmbar, sendo bastante diferente da cor laranja típica. Os LEDs azul e verde apresentaram concordâncias muito boas, mostrando-se adequados para esta simulação. Já para os LEDs violeta e vermelho, as discordâncias ocorreram apenas nos filtros com percentuais diferentes de '00'.

A estratégia utilizada nas transformações dos dados, apesar de simples, produziu resultados correspondentes. Outras interpretações e critérios para ajustes dos dados podem e devem ser incentivados.

Obviamente, as divergências numéricas encontradas são justificáveis por inúmeros fatores. Fazer os alunos encontrarem e avaliarem em que medida esses fatores influenciam nos resultados é altamente recomendável e enriquecedor. Desde a seleção e adequação dos materiais, até a montagem e a execução da simulação, inúmeras habilidades são promovidas e desenvolvidas.

Cabe ressaltar, para fundamentar uma discussão mais profícua, que é possível encontrar na literatura científica gráficos de absorções bastante distintos daquele da Fig. 4, o qual serviu de referência para este trabalho. Portanto, dependen-

do da fonte adotada, haverá maior ou menor aproximação dos resultados. Outro ponto a salientar é que, se tomarmos como referência a faixa de cor, os valores obtidos terão maior concordância pois, afinal, não sabemos exatamente, dentro desta faixa, o comprimento de onda exato do LED, até porque ele também emite numa faixa (com um certo comprimento de onda de intensidade máxima) e não num comprimento de onda específico. Deve ser observado que os resultados numéricos obtidos refletem a peculiaridade dos ajustes feitos e materiais utilizados; diferentes valores dos resistores ou nuances de cor das "gelatinas" utilizadas, por exemplo, podem produzir resultados cujos valores absolutos são, relativamente, distintos dos que foram apresentados, mas acreditamos que, em termos percentuais, sejam próximos.

Apesar de todo o esforço de interpretação numérica para obter resultados mais coerentes e das flutuações decorrentes das inúmeras variáveis envolvidas, não devemos esquecer o principal objetivo desta simulação: verificar como funciona o mecanismo de codificação e decodificação das cores. Da mesma forma que tivemos que interpretar os resultados numéricos (estabelecendo, inclusive, critérios para tal), o cérebro o faz para os sinais elétricos codificados que chegam até ele. As cores que visualizamos são interpretações dos três códigos de sensibilização combinados.

Bibliografia

BARTHEM, R. **A Luz.** São Paulo: Livraria da Física, 2005. 114 p.

GOLDSMITH, T. H. Olhos de Águia. **Scientific American Brasil**, São Paulo, a. 5, n. 51, p. 70-77, ago. 2006.

GUYTON, A. C.; HALL, J. E. **Fisiologia Humana e Mecanismo das Doenças**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1988. 639 p.

HARGRAVE, P. A. Rhodopsin Structure, Function, and Topography. **Investigative Ophthalmology and Visual Science**, Rockville, v. 42, n. 1, p. 3-9, jan. 2001. Disponível em: <www.iovs.org/cgi/reprint/42/1/3.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2006.

KOLB, H. How the Retina Works. **American Scientist Online**, v. 91, n. 1, p. 28 jan./feb. 2003. Disponível em: <www.americanscientist.org/template/AssetDetail/assetid/16218>. Acesso em: 21 ago. 2006.

NASCIMENTO, S. **Visão das Cores**. Disponível em: <www.arauto.uminho.pt/pessoas/smcn/visão_cores/Cap%201%20História%20da %20visão%20das%20cores.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2007.

OKUNO, E.; CALDAS, L. I.; CHOW, C. **Física para Ciências Biológicas e Biomédicas.** São Paulo: Harbra, 1986. 490 p.

PESA, M. A.; BRAVO, S. V.; COLOMBO; E. M. **Investigando la luz y la visión.** Tucamán: Asoc. Coop. Faccultad de Ciencias Exactas y Tecnologia - Universidad Nacional de Tucamán, 2003. 101 p.

ROBINSON, K. UV light reveals mating secrets of jumping spiders. **Biophotonics International**, Pittsfield, v. 14, n. 3, p. 22-23, mar. 2007.

TERSTEGEN, F.; KOLSTER, K.; FALZEWSKI, S.; BUSS, V. Rhodopsin - Structure, Spectroscopy and Dynamics of a Chromophore in a Truly Heterogeneous Environment. **World Scientific**, oct. 2001. Disponível em: <www.thp.uni-duisburg.de/Paper/GK_pub/buss.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2007.

WALD, G. Life and Light. (Chemical and Biological Effects of Light). In: **Lasers and Light Readings from Scientific American.** San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1969. cap. 10, p. 101-113.

WERNER, J. S.; PINNA, B.; SPILLMANN, L. Cores Ilusórias e o Cérebro. **Scientific American Brasil**, São Paulo, a. 5, n. 59, p. 84-89, abr. 2007.