

Relatório

Final

F-609



José Márcio de Lima Oliveira
E-mail: josemarcio.lo@gmail.com
Elisabeth Barolli
E-mail: ebarolli@unicamp.br

Conclusão: 16/06/09

“...as cores raramente têm a mesma aparência para um cão ou para qualquer animal como têm para um ser humano; também não têm a mesma aparência para diferentes seres humanos ou mesmo para o mesmo ser humano em ocasiões distintas” Platão

“Estou seguro de que o violeta provoca melancolia e o amarelo é uma cor estimulante, fomentadora de ânimo sociável, atividade cerebral acentuada e sensação de bem-estar (...) Um pêssego que se come no escuro teria menos aroma do que um pêssego cuja cor fosse visível. Uma campainha de telefone soaria mais estridente em uma cabina branca do que em uma vermelho-carmim.” Gropius

VIOLETA: Em excesso, torna o ambiente melancólico, depressivo, inóspito e desestimulante. Sugere muita proximidade, contato com sentimentos profundos e elevados, com a espiritualidade. Provoca introjeção.

AZUL: Na cultura ocidental, está associado à confiança, integridade, paz, delicadeza, fé e pureza. Tons mais escuros sugerem formalismo, frieza e impessoalidade.

VERDE: Tonalidades claras transmitem sensação de calma e bem-estar. Sugere tranquilidade e dá a impressão de frescor. Tons mais escuros tendem a causar depressão.

AMARELO: Cor quente, estimulante, de vivacidade e luminosidade. Sugere proximidade. Boa para ambientes em que se exija concentração. Terapeuticamente, é usada para evitar depressão e angústia.

LARANJA: Relacionada a ação, entusiasmo e vitalidade. Estimula a vitalidade. Possui grande visibilidade, chamando a atenção para pontos que devem ser destacados.

VERMELHO: Cor vibrante, desperta entusiasmo, dinamismo, ação. Proporciona sensações de calor e de força. Estimula os instintos naturais, tais como fome e libido. Usada em excesso pode irritar, gerar intranquilidade.

Índice

1) Resumo	5
2) Objetivo	6
3) Resultados atingidos e dificuldades encontradas	6
4) Introdução Histórica	6
5) Luz e cor	9
6) Visão	10
7) Teoria de Young-Helmholtz	13
8) Materiais	14
9) Montagem	15
9.1) Fonte	15
9.2) Sensor	15
9.3) Filtros	16
9.4) Olho	16
9.5) Conexões elétricas entre LDR e multímetro	17
10) Simulação	18
11) Procedimento e resultados	19
12) Análise e conclusão	22
13) Declaração da orientadora	23
14) Revisão Bibliográfica	24
15) Referências	24
16) Apêndice	25

F 609 – Tópicos de Ensino de Física I
Universidade Estadual de Campinas

Aluno: José Márcio de Lima Oliveira

Coordenador: Professor Doutor José Joaquín Lunazzi

Orientadora: Professora Doutora Elisabeth Barolli

**SIMULAÇÃO DA VISÃO DE CORES:
DECODIFICANDO A TRANSDUÇÃO QUÂNTICA-ELÉTRICA**

1) Resumo

O experimento a ser realizado simula o mecanismo pelo qual enxergamos colorido baseando-se na teoria tricromática de Young-Helmholtz. Tem o propósito de recriar um experimento para que seja aplicado, preferencialmente, em escolas de nível médio, mostrando uma maneira de ensinar e aprender Física, diferente do modo convencional. Tem ainda o propósito de inserir Física Moderna e Contemporânea – FMC – no Ensino Médio, assunto muito analisado atualmente por pesquisadores em ensino de ciências, realizando uma simulação cujo princípio baseia-se na decodificação da transdução quântica-elétrica.

Nos Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio (PCNEMs), nota-se a relevância de aproximar o aluno da interação com a ciência e a tecnologia em todas as dimensões da sociedade, oportunizando a ele uma concepção ampla e social do contexto científico-tecnológico.

Pesquisas têm sido realizadas e os resultados mostram uma acentuada receptividade dos alunos em relação às atividades desenvolvidas e mudanças significativas em certas concepções de ciência vigentes. PINHEIRO, SILVEIRA E BAZZO (2007) ressaltam a importância do enfoque Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS) perante os questionamentos críticos e reflexivos acerca do contexto científico-tecnológico e social e, em especial, sua relevância para o Ensino Médio. Os pressupostos do movimento CTS têm se ampliado em toda sociedade brasileira, principalmente na área educacional.

2) Objetivo

O 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.

3) Resultados atingidos e dificuldades encontradas

Nesse estágio o simulador encontra-se finalizado, bem como a coleta de dados e sua análise. As maiores dificuldades encontradas foram durante a coleta de dados, haja vista a alteração dos valores percebidos ante a pequena variação de movimento entre a fonte de luz e o sensor. No que se refere à montagem do aparato simulador, esta se deu durante os três meses que antecederam a apresentação e, à medida que surgiam dúvidas, eram sanadas com auxílio de profissionais capacitados.

4) Introdução Histórica

Sem a luz, seria impossível a existência da vida na Terra, pelo menos a ocorrência das manifestações de vida conhecidas pela espécie humana. A luz é responsável pelo sustento e pela perpetuação dos vegetais, que compõem a base de todas as cadeias alimentares do planeta; graças à luz, os vegetais conseguem realizar a fotossíntese, por meio da qual fornecem oxigênio e alimento para os ecossistemas.

Para os animais, além da habilitação do processo sensorial da visão, a luz permite que sejam perpetradas diversas reações orgânicas essenciais, tais como a síntese das vitaminas do Complexo D, que nascem quando seus precursores sofrem a ação dos raios ultravioletas presentes na luz solar. A luz interfere diretamente em fenômenos tais como depressão, qualidade do sono, sensações de alerta e de sonolência, assim como nas condições gerais da saúde.

Historicamente, a luz constituiu uma das peças-chaves no processo de apropriação e controle do ambiente circundante pelo homem. O fogo foi a primeira força que, uma vez dominada, permitiu que o homem fosse menos tributário do meio natural: calor, luz e proteção foram fundamentais para que, desde a era geológica do Plioceno, há cerca de 250.000 anos, os primeiros seres humanos pudessem formar suas primeiras comunidades. A importância da iluminação remete, igualmente,

desde tempos imemoriais à dimensão metafísica: o homem adorava a luz do sol ou da lua como forma de buscar uma aproximação com os deuses e espíritos ou mesmo com sua própria luz interior, com sua alma.

O estudo da iluminação sempre esteve relacionado à invenção dos diversos instrumentos por meio dos quais os agrupamentos humanos valeram-se da energia propiciada pela luz. No tempo das cavernas, o fogo iluminou e protegeu o homem das agruras do ambiente; as primeiras comunidades passaram a cozinhar carne para alimentos e barro para moradias e utensílios; com o advento da metalurgia, ferramentas surgiram para permitir novas ondas de progresso técnico. Na Mesopotâmia, por volta de 2.500 a.C., foram fabricados os primeiros objetos de vidro registrados pela História. Os egípcios utilizavam espelhos metálicos, os romanos fabricavam espelhos côncavos e convexos. No século XIII, foram inventados os óculos e, no século XVI, a câmara escura, a lanterna mágica, o microscópio, a luneta de aproximação, o telescópio e a luneta astronômica.

O controle da luz artificial, finalmente, forneceu aos homens a possibilidade de criar um segundo mundo onde podem prolongar a própria existência e as possibilidades de conhecimento.

As primeiras teorias ópticas aparecem no século XVII, mas as discussões sobre luz e óptica remontam à antiga Grécia, quando Ptolomeu redigiu, por volta do século II, um tratado de óptica que descrevia a refração da luz por bolas de vidros repletas de água. No século XI, um sábio islâmico denominado Ibn Al Haithan escreveu uma obra sobre os efeitos da luz nos espelhos e nos vidros. Em 1801, as experiências de Thomas Young demonstraram a natureza ondulatória da luz, inicialmente proposta por Huygens e Fresnel. O valor obtido por Young para o comprimento de onda na parte central do espectro luminoso está, de fato, bem próximo ao valor do comprimento de onda ao qual o olho humano é mais sensível. Em 1650, os adeptos da teoria corpuscular da luz – dentre os quais destacava-se Isaac Newton – propõem as chamadas teorias da emissão. Novos fenômenos foram observados no século XVII, tais como a difração, a coloração nas lâminas delgadas, a dupla refração e a polarização. No século XVIII são lançadas as bases da fotometria e no início do século XIX descobrem-se as interferências. Em 1879, Thomas Edison cria a lâmpada incandescente e tem início uma nova era para o conhecimento da luz e para a prática da iluminação, principalmente por conta das possibilidades de controlar melhor os experimentos acerca da natureza da luz. O conceito físico de luz encontrou um marco divisório com do surgimento das teorias quânticas propostas por Albert Einstein e Max Planck, nos primeiros anos do século XX. Antes disso, porém, ainda no século XIX, Michael Faraday e James Clerk Maxwell desenvolveram uma teoria abrangente do eletromagnetismo, por meio da qual se propôs que “a luz consiste em campos elétricos e magnéticos que se alternam rapidamente e viajam através do espaço sob a forma de ondas”. Os preceitos teóricos criados por Maxwell deram origem à teoria clássica, que definia a luz como uma onda eletromagnética, que se propaga no vácuo à velocidade de 300.000 quilômetros por segundo, sempre em linha reta, ou como

energia eletromagnética ondulatória visível ao olho humano. A perspectiva clássica da luz apresentava uma limitação teórica. Graças à teoria do movimento ondulatório, sabe-se que cada onda necessita de um meio físico para se propagar: uma onda sonora, por exemplo, necessita das partículas de ar, que vibram quando a onda passa através delas. No entanto, a luz se propaga no vácuo, onde não há nenhum meio físico para transmitir suas vibrações.

Em 1900, Planck sugere que a luz é um fenômeno físico por sua própria conta, que não precisa de um meio físico para se propagar, pois a luz não se manifestaria apenas sob a forma de onda, mas também – e simultaneamente – sob a forma de partículas, que podem viajar através do espaço vazio. A partícula foi chamada de quantum e emprestou seu nome à teoria quântica, a teoria dos fenômenos atômicos. A partir de 1905, ao lançar as bases para o desenvolvimento da moderna Física Quântica, Einstein propõe que a luz poderia ser percebida como energia concentrada em pacotes microscópicos denominados fótons. Em acordo com Planck e Einstein, no nível quântico ou subatômico, os objetos físicos obedecem a leis que desafiam os princípios da mecânica clássica de Isaac Newton. A característica fundamental do fóton – ou quantum de luz – reside na dualidade onda-partícula, o que significa dizer que um fóton não pode ser classificado puramente como um corpúsculo, ou como uma partícula; de acordo com Einstein, os aspectos ondulatórios e corpusculares da matéria são complementares, porém matematicamente incompatíveis. Dito de outra forma, é possível afirmar que a luz é composta por fótons, os quais, por sua vez, são partículas quânticas de comportamento dual, isto é, ao mesmo tempo, partículas e ondas. A existência do nível quântico para a luz foi comprovada em 1923, quando foram publicados os resultados dos experimentos de Louis de Broglie, os quais ficaram conhecidos pela explicação do Efeito Compton, evidência física da ação dos fótons. Em 1911, Arthur Compton havia verificado que quando um fóton colide com um elétron, ambos comportam-se como corpos materiais. Admite-se, por outro lado, que a teoria subquântica envolve também “variáveis escondidas”, as quais representam forças que não se prestam à experimentação nos níveis passíveis de observação, uma vez que a dualidade onda-partícula exigiria medidas estatísticas que fossem, simultaneamente, discretas e contínuas.

Finalmente, com a enunciação do Princípio da Incerteza proposto por Heisenberg, aceitou-se a idéia de que as ondas de luz são, na verdade, “ondas de probabilidade”, ou seja, padrões matemáticos abstratos que dão a probabilidade de se encontrar uma partícula de luz – ou fóton – num determinado lugar do espaço, quando se procura por ela. Esses padrões de probabilidade seriam, por sua vez, padrões ondulatórios que viajam através do vácuo. As reflexões da Física Quântica acerca da luz geraram questionamentos de ordem ontológica e epistemológica não somente na Física, como também nas demais ciências naturais, assim como nos âmbitos da Filosofia e da Religião.

5) Luz e cor

Os corpos físicos capazes de emitir luz são chamados fontes de luz. Corpos luminosos ou fontes primárias são os corpos que emitem a luz que eles próprios produzem, assim como o sol, uma lâmpada elétrica, a chama de uma vela. As fontes secundárias ou corpos iluminados são aqueles que emitem a luz que recebem de outros corpos, como é o caso da lua (que emite a luz recebida do sol), das paredes de uma casa, das roupas usadas pelas pessoas. Outros exemplos de fontes primárias são as lâmpadas comumente usadas para iluminar os ambientes construídos pela mão humana. Lâmpadas incandescentes geram luz própria por meio do aquecimento de um filamento fazendo com que a luminosidade seja criada como consequência da descarga de um gás.

Em 1672, Isaac Newton descobriu que um feixe de luz branca – proveniente do sol ou de uma outra fonte primária – poderia ser decomposto em várias cores por um prisma, e usou esse experimento para analisar a luz. As cores assim produzidas arrumam-se em um espectro definido, que vai do vermelho ao violeta, passando por laranja, amarelo, verde, anil e azul.

A ordem das cores é constante, e cada cor tem uma assinatura que identifica sua localização no espectro; essa assinatura é o comprimento de onda atribuído àquela cor. A luz, como se viu, tem características de onda eletromagnética e, como tal, pode assumir frequências e comprimentos variados; cada comprimento de onda gera uma pulsação diferente, que o sistema visual experimenta como uma cor diferente.

Aproximadamente um século depois das descobertas de Newton, James Maxwell mostrou que a luz é uma forma de radiação eletromagnética, a qual contém ondas de rádio, luz visível e raios X. A luz visível para o sistema nervoso humano não passa de uma fatia mínima de todo o espectro de radiação eletromagnética. A luz emitida pelo sol situa-se, portanto, dentro da região visível e estende-se além do vermelho (depois da radiação infravermelha) e abaixo do violeta (antes da radiação ultravioleta), com máxima intensidade no amarelo. O comprimento da onda determina sua tonalidade visível ao olho humano. Cabe observar que um fóton correspondente a uma cor difere de um fóton de outra cor por sua energia, que define um padrão vibratório específico. A combinação dessas vibrações em novas possibilidades é capaz de gerar mais cores.

A cor de um objeto iluminado por luz branca ou natural é produzida pela absorção seletiva de comprimentos de onda; os objetos absorvem todas as cores do espectro, exceto aquelas que compõem a cor de sua aparência.

6) Visão

A percepção que temos das cores é resultado em parte das propriedades da luz que atinge os nossos olhos e em parte de complexos processos fisiológicos, neurológicos e psicológicos que levam à identificação da cor.

Este estudo se restringirá a alguns aspectos básicos da percepção em termos dos estímulos sobre os receptores presentes nos olhos. A identificação das cores no mundo real é bastante mais complexa, incluindo processos de análise de contexto e de compensação que não se pode investigar de maneira simples.

Do ponto de vista físico a luz pode ser caracterizada por uma intensidade e por um comprimento de onda. A luz visível é a parte do espectro eletromagnético com comprimentos de onda compreendidos entre 400 nm e 700 nm. Mas a luz que atinge nossos olhos não tem necessariamente um comprimento de onda bem definido. As fontes de luz, como as lâmpadas e as estrelas, emitem luz com muitos comprimentos de onda simultaneamente. Quando esta luz incide sobre os corpos pode ocorrer absorção e transmissão de uma parte enquanto outra parte é refletida. Novamente, a parte refletida, em geral, é composta por um grande número de comprimentos de onda. A sensação de cor é a maneira como interpretamos este conjunto de comprimentos de onda que atinge nossos olhos.

Por meio dos sentidos, principalmente o da visão, o ser humano é informado sobre o meio externo. Graças à luz, a visão possibilita que o homem perceba a configuração espacial do meio, permite o equilíbrio postural, proporciona o reconhecimento de objetos quanto a seu tamanho, sua forma, sua cor, sua mobilidade, sua luminosidade.

A visão é considerada o sentido humano dominante. Estudos de laboratório sugerem que se as informações sensoriais conflitam entre si, os indivíduos geralmente acreditam em seus olhos. Os órgãos responsáveis pelo sentido da visão são os globos oculares, os quais, na espécie humana, pesam cerca de sete gramas e têm o formato de uma esfera com aproximadamente dois centímetros e meio de diâmetro. O olho humano – mostrado na Figura 1 – tem como função primordial a captação das impressões luminosas oriundas do meio ambiente e, para tanto, é dotado de morfologia e fisiologia de natureza bastante complexa. Os olhos funcionam como lentes imóveis, que são sustentadas por um entrelaçado de músculos sensíveis à luz, os quais modificam a curvatura das lentes, de modo que se possa distinguir claramente objetos situados em distâncias diversas.

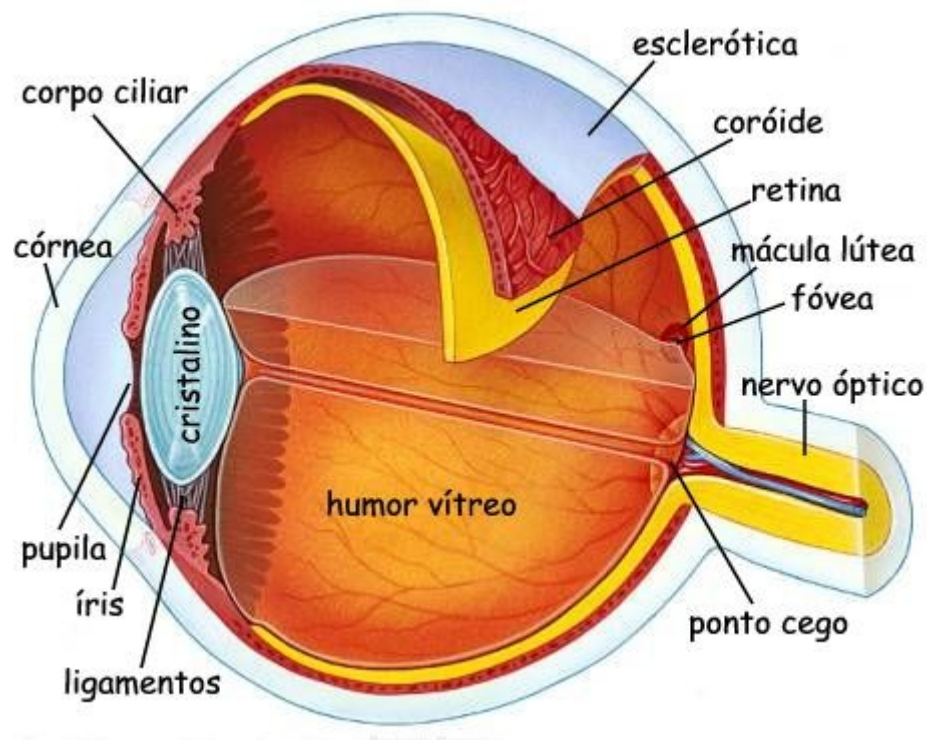


Figura 1: Olho Humano

Os olhos são envolvidos por uma membrana protetora branca e bastante resistente, a esclerótica, que em sua parte anterior se torna transparente, ajudando a constituir a córnea. Logo atrás dessa película, existe um espaço preenchido pelo humor aquoso, um líquido límpido que antecede um tecido redondo, a íris, que tem um orifício central, a pupila. A pupila funciona como o diafragma de uma máquina fotográfica: quando há muita luz, ela se reduz; quando a luz é pouca, ela aumenta seu diâmetro. A íris se alarga e se retrai com a ajuda dos músculos das órbitas, regulando assim a quantidade de luz que chega ao cristalino, que serve como uma lente minúscula. Depois de atravessar o cristalino, a luz captada pelo olho passa por uma câmara repleta de material viscoso, o humor vítreo, que constitui a maior parte do globo ocular. Em seguida, a luz incide sobre a retina, uma membrana nervosa que funciona como uma tela situada na extremidade posterior do globo ocular. Na retina está localizada a mácula lútea, área em que a visão é mais nítida.

A retina é composta por, aproximadamente, 100 milhões de sensores, cada um deles responsável pela conversão de uma parcela do estímulo luminoso em impulso nervoso. Estes sensores – células fotossensíveis ou fotorreceptoras – são divididos em dois grupos: os cones, sensíveis a altos níveis de iluminação e responsáveis pela percepção das cores; e os bastonetes, sensíveis a baixos níveis de iluminação e responsáveis pela percepção das tonalidades de cinza. A excitação dos cones e dos bastonetes pela luz dá origem a impulsos nervosos, os quais caminham em direção oposta àquela seguida pelo raio luminoso, ou seja, em direção das células ganglionares que compõem o nervo óptico.

A luz que incide na parte central da retina, onde existe a maior concentração de cones, excita cada tipo de cone dependendo dos comprimentos de onda que a compõem. Os cones enviam sinais para o cérebro que comparara as intensidades dos três sinais e determina a cor. A cor não é uma propriedade da luz, mas sim uma manifestação eletroquímica do sistema sensorial, resultado da maneira como os três tipos de cones são estimulados pela luz. Rigorosamente deve-se dizer, por exemplo, "a luz que é vista como verde" e não "a luz verde".

De modo resumido, a luz refletida por um objeto, ao penetrar no olho, é concentrada pelo cristalino, que projeta uma imagem na retina. Após receber as imagens e convertê-las em impulso nervoso, a retina retransmite-as ao cérebro, por meio do nervo óptico. Os influxos nervosos que a retina envia ao cérebro são reajustados e interpretados como uma imagem daquele objeto. Vale registrar que, a despeito de se poder contar com uma compreensão objetiva da fisiologia do olho humano, assim como dos processos neurofisiológicos envolvidos no sentido da visão, o controle da transmissão das informações sensoriais captadas pelo olho e conduzidas ao cérebro sofre um processo de modulação que depende de fatores subjetivos. Dito de outra forma, o cérebro é capaz de efetuar uma regulação da sensibilidade da visão com relação a diferentes estímulos. Isto ocorre por meio de fenômenos tais como a atenção seletiva e a habituação a estímulos apresentados continuamente.

Algumas pessoas apresentam uma perturbação da percepção visual caracterizada pela incapacidade de diferenciar algumas cores. Esta deficiência é chamada de daltonismo. O daltonismo não é tido como uma deficiência física de grande significado (dado que a maior parte dos daltônicos tem visão normal, no que se refere às demais características), apesar de dificultar, e muitas vezes impossibilitar, uma série de atividades profissionais e do dia-a-dia. Apesar de não existir nenhum tratamento, têm se desenvolvido alguns recursos ópticos para facilitar a identificação das cores.

•**Protanopia:** ausência de cones "vermelhos" ou de "comprimento de onda longo", resultando na impossibilidade de discriminar cores no segmento verde-amarelo-vermelho do espectro.

•**Deuteranopia:** ausência de cones "verdes" ou de comprimento de onda intermédio, resultando, igualmente, na impossibilidade de discriminar cores no segmento verde-amarelo-vermelho do espectro.

•**Tritanopia:** ausência de cones "azuis" ou de comprimento de onda curta, resultando na impossibilidade de ver cores na faixa azul-amarelo.

7) Teoria de Young-Helmholtz

O cientista alemão **Hermann von Helmholtz** prosseguiu nos estudos da teoria de Young e propôs que o olho continha apenas três tipos de receptores de cor, que respondiam mais fortemente aos comprimentos de onda vermelho (R), verde (G) e azul-violeta (B). Ele deduziu, ainda, que cada tipo de receptor deveria possuir grande sensibilidade à incidência luminosa, porém, com diferentes pontos máximos.

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 1 apresenta um conjunto de características desse tipo de fotocélula.

Tabela 1: Distribuição qualitativa e quantitativa dos tipos de cones

Cones	Fotopigmento	Faixa espectral de sensibilidade	Quantidade aproximada	
			Valores Absolutos	Percentual do Total
Azuis	Cianoble	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%

A partir do gráfico 1, 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, deve-se observar, no gráfico 1, 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 azul corta a curva do cone vermelho em 00%, do cone azul em 97% e do cone verde em 00%, ou seja, a combinação desses três percentuais de estimulação perfaz o código: 00 00 97 o qual será interpretado pelo cérebro como (uma das muitas gamas da) cor azul.

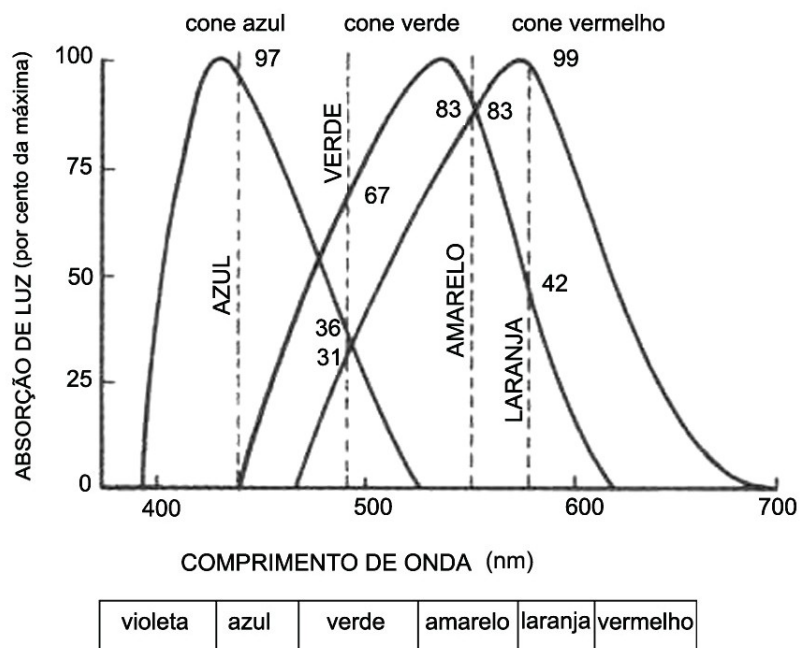


Gráfico 1: Absorção relativa de luz para cada tipo de cone em função do comprimento de onda incidente

A partir do gráfico acima, é possível construir a seguinte tabela – que servirá de referência para análise dos dados coletados no experimento.

Tabela 2: Interpretação codificada de algumas cores pelas diferentes sensibilizações dos três tipos de cones

Propriedade	Tipo de fotocélula			Cor interpretada (combinação dos três)
	Cone Azul	Cone Verde	Cone Vermelho	
Absorção de luz (% da máxima)	40	00	00	Violeta
	97	00	00	Azul
	36	67	31	Verde
	00	83	83	Amarelo
	00	42	97	Laranja
	00	00	50	Vermelho

8) Materiais

- Uma bola oca de isopor com cerca de 20 cm de diâmetro;
- Uma tampa de plástico com 7,0 cm de diâmetro e 2,0 cm de altura;
- Três caixas de fósforos;

- Filtros coloridos nas cores vermelho, verde e azul;
- LDR (Light Dependence Resistor ou resistor dependente de luz) de 1,0 cm de diâmetro;
- Resistor de 1/8 W e resistência elétrica de 220 Ω ;
- Fios para conexões elétricas;
- LEDs de alto brilho de 5 mm nas cores violeta, azul, verde, laranja, amarelo e vermelho;
- Fonte de alimentação de 6,0 V corrente contínua;
- Conector para LED ou porta-LED;
- Tinta guache preta;
- Multímetro.

9) Montagem

9.1) Fonte: A fonte utilizada foi um carregador de celular da qual foi retirado o conector que é encaixado no celular. No terminal positivo, coloquei um resistor de 220 Ω . Para finalizar a fonte, coloquei um conector para LED nos terminais.

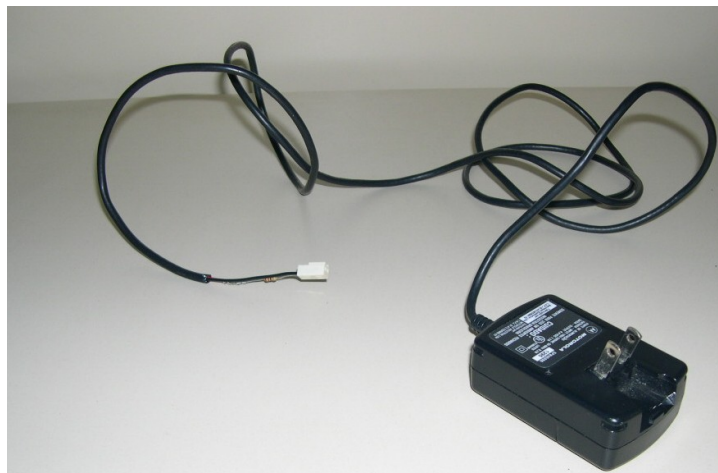
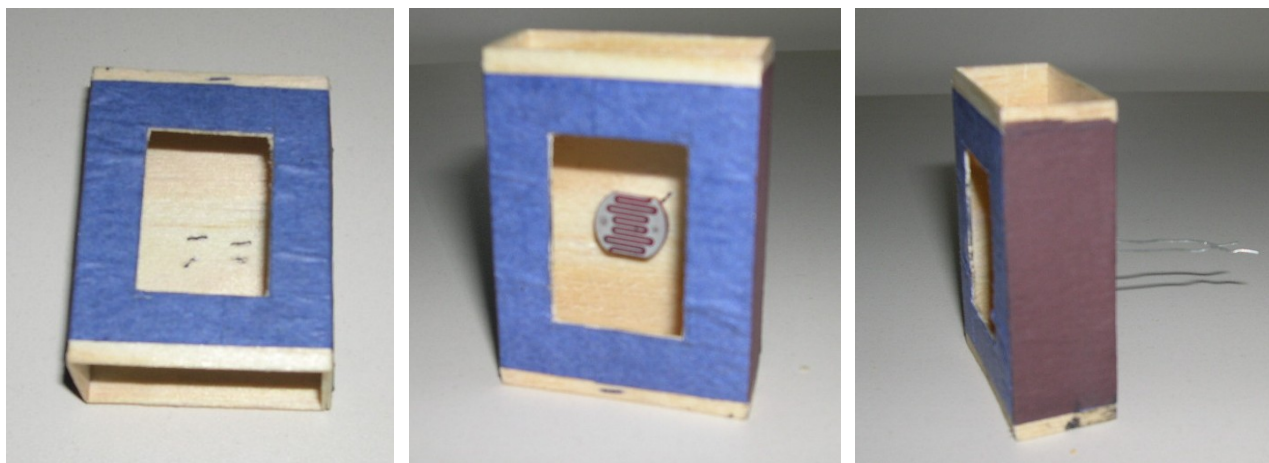


Figura 2: Fonte de alimentação

9.2) Sensor: Fiz uma janela (aproximadamente, 2,5 cm x 2,0 cm) no centro de uma das laterais maiores de uma caixa de fósforos. Na lateral oposta, fiz pequenos furos para passar os terminais do LDR. Este ficou preso na caixa. A configuração é mostrada nas figuras abaixo.



Figuras 3, 4 e 5: Sensor

9.3) Filtros: Recortei as gavetas das caixas de fósforos, fazendo-se janelas do mesmo tamanho da janela do sensor. Recortei as gelatinas, colocando-as, uma a uma, na gaveta. Na borda de cada gaveta, fiz 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 figura abaixo mostra como ficaram.



Figura 6: Filtros

9.4) Olho: Recortei, em pontos diametralmente opostos da metade da bola de isopor, um encaixe para o conector para LED e outro para o sensor (do tamanho da caixa de fósforos). As abas de encaixe da bola serviram para este fim. A fim de minimizar, durante o procedimento, os efeitos da luz espalhada

pela superfície interna da semi-esfera de isopor, pintei-a com tinta guache preta. Tal configuração é vista nas figuras abaixo.



Figura 7: Metades da bola de isopor com recortes



Figura 8: Metade da bola de isopor com sensor e “olho” recortado

9.5) Conexões elétricas entre LDR e multímetro: Um dos terminais do LDR é ligado na saída + e o outro na saída COM (-) do multímetro (não há preocupação com a ordem). Coloquei fios com uma das extremidades sendo de garra tipo “jacaré” para facilitar o experimento. Vide figuras abaixo.



Figuras 9 e 10: LDR na bola de isopor e conexões com multímetro

10) 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 3.

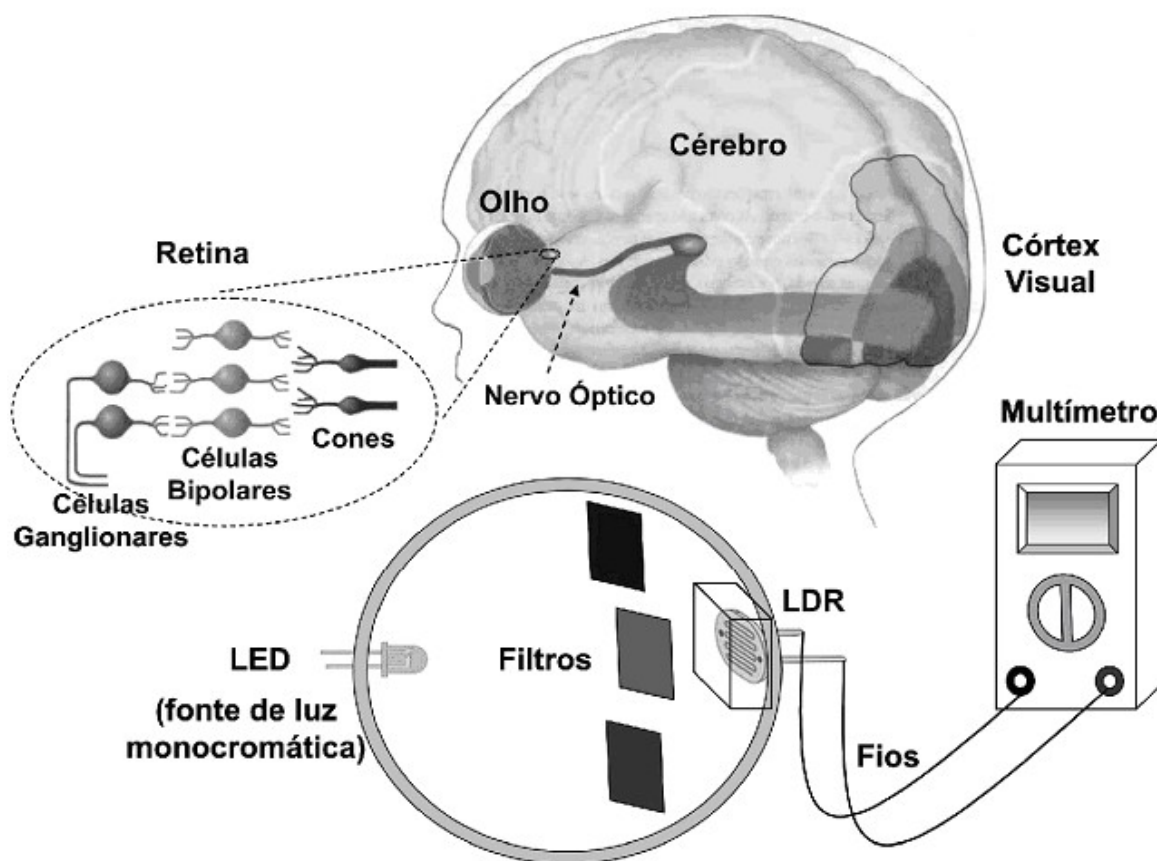


Figura 11: Comparação entre o sistema visual e o simulador

Tabela 3: Quadro comparativo entre o sistema visual e o simulador

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.

11) Procedimento e resultados

Segundo Loreto e Sartori (2008) 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.

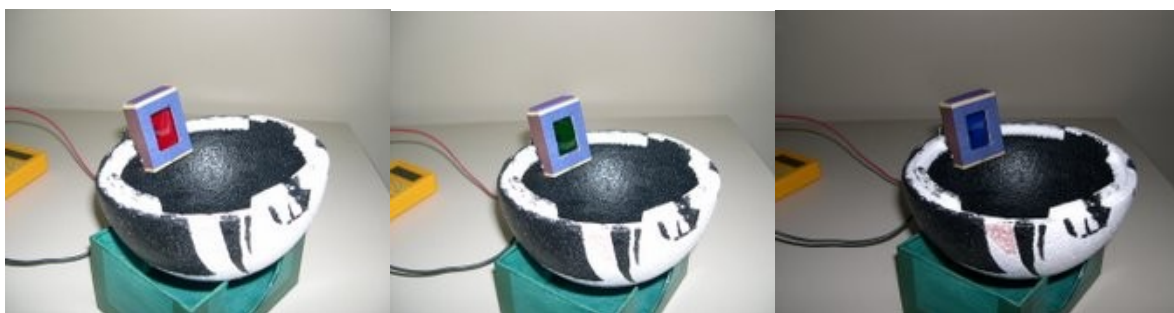
A lógica de funcionamento do LDR segue o seguinte princípio: quanto mais luz incidir sobre sua superfície, menor o valor da resistência elétrica. Como esse valor será registrado pelo multímetro, espera-se que os menores valores correspondam às medidas sem o uso dos filtros. Como os filtros absorverão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

Primeiramente, ajustei a mira do LED, manipulando o conector ou porta-LED de tal maneira que a luz deste incidia diretamente sobre o LDR. A medida da resistência auxiliou esta tarefa: feitas as conexões elétricas necessárias e ligando-se o multímetro (com o seletor na faixa 20 k) quando este indicou o menor valor, tive o ponto ótimo de ajuste. Para simplificar o sistema, optei por tomar 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, efetuei as medidas de cada LED sem nenhum filtro e com cada um dos três filtros. As figuras abaixo mostram tal esquema.



Figuras 12 e 13: Montagem para coleta de dados com sensor sem filtro



Figuras 14, 15 e 16: Montagem para coleta de dados com filtros no sensor

A Tabela 4 mostra as medidas de resistência elétrica feitas com o multímetro. Considerei 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 4: Dados coletados durante o experimento

LED (Cor)	R_0	Filtro (Cone)								
		Azul			Verde			Vermelho		
		R	ΔR	p (%)	R	ΔR	p (%)	R	ΔR	p (%)
Violeta	2,6	3,5	0,9	36	19,7	17,1	658	15,0	12,4	477
Azul	1,2	1,4	0,2	14	19,6	18,4	1520	19,7	18,5	1528
Verde	2,3	3,8	1,5	65	3,0	0,7	32	19,7	17,4	757
Amarelo	2,6	19,4	16,8	646	3,0	0,4	15	3,0	0,4	15
Laranja	3,5	19,5	16,0	457	19,4	15,9	455	19,4	15,9	455
Vermelho	3,7	19,6	15,9	430	19,4	15,7	424	5,4	1,7	46

A Tabela 5 mostra os dados coletados durante o experimento já realizado e que é referência para esta simulação.

Tabela 5: Dados do experimento já realizado

LED (Cor)	Ro	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

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. Posso 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, interessa-me 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
Absorção = p% Transmissão = 100% - p%	Se $p \geq 100\%$ 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 cone (neste caso, o 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 4, obtive os códigos de sensibilização, para cada tipo de cone (filtros), apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Análise quantitativa dos dados

Led (Cor)	Filtro (Cone)					
	Azul		Verde		Vermelho	
	p (%)	Convenção	p (%)	Convenção	p (%)	Convenção
Violeta	36	$100 - 36 = 64$	658	$\geq 100 = 00$	477	$\geq 100 = 00$
Azul	14	$100 - 14 = 86$	1.520	$\geq 100 = 00$	1528	$\geq 100 = 00$
Verde	65	$100 - 65 = 35$	32	$100 - 32 = 68$	757	$\geq 100 = 00$
Amarelo	646	$\geq 100 = 00$	15	$100 - 15 = 85$	15	$100 - 15 = 85$
Laranja	457	$\geq 100 = 00$	455	$\geq 100 = 00$	455	$\geq 100 = 00$
Vermelho	430	$\geq 100 = 00$	424	$\geq 100 = 00$	46	$100 - 46 = 54$

Por fim, posso comparar os dados obtidos no simulador com os códigos do sistema visual humano.

Tabela 8: Comparação entre os dados obtidos e os códigos reais

Led (Cor)	Filtro (Cone)					
	Azul		Verde		Vermelho	
	Sistema Visual	Simulação	Sistema Visual	Simulação	Sistema Visual	Simulação
Violeta	40	64	00	00	00	00
Azul	97	86	00	00	00	00
Verde	36	35	67	68	31	00
Amarelo	00	00	83	85	83	85
Laranja	00	00	42	00	97	00
Vermelho	00	00	00	00	50	54

12) Análise e conclusão

Inicialmente, comparando os dados obtidos nesse experimento com os obtidos no experimento já realizado – o qual foi a base para este experimento - e apesar deste não fazer a análise com o LED amarelo, nota-se que quase todos os dados estão em concordância (tendo a tabela 6 como referência), à exceção de um, o que determina a porcentagem do LED verde.

Comparando os dados obtidos com os códigos reais, verifica-se uma correspondência de 13 dos 18 dados analisados. A cor que apresentou a maior discrepância foi o laranja, mas nesse ponto deve-se considerar que o LED utilizado era âmbar. Com este LED houve grandes dificuldades em

coletar algum dado. Para os LED violeta e azul, as discordâncias ocorreram no filtro azul; para o verde a discordância ocorreu no filtro vermelho.

Deve-se observar, ainda, que as maiores concordâncias ocorreram quando a transmissão era igual a zero – de acordo com a convenção – e interpretada como os cones não sendo sensibilizados, não havendo propagação do estímulo. Quando o multímetro marcava alguma medida, havia uma grande flutuação caso existisse um movimento do LED em relação ao LDR.

Outro fator importante a considerar é que existem varias tonalidades de uma mesma cor para as gelatinas, assim, dependendo da cor com que os dados são coletados, pode haver uma discrepância maior ou menor ao relacioná-lo com os códigos reais. Enfim, inúmeros fatores podem justificar as discordâncias numéricas que ocorreram.

Por fim, cabe ressaltar que a presente simulação além de fazer com que os alunos (de Nível Médio) adquiram algum conhecimento ou verifiquem como funciona o mecanismo de codificação e decodificação das cores, faz com que estes mesmos alunos tenham contato com uma Física Moderna e Contemporânea ao trabalharem com o LDR, LEDs, etc. Uma Física que já é do século passado e que poucos alunos do Ensino Médio têm oportunidade de estudá-la.

13) Declaração da orientadora

“Como já havia comentado, a comunicação do experimento está muito bem elaborada e organizada no que se refere à apresentação. Reafirmo mais uma vez a consistência, clareza e articulação da redação do trabalho. Bastante apropriada se encontra a introdução do trabalho que buscou fazer um apanhado histórico sobre a luz e as teorias propostas para interpretá-la ao longo do tempo. A descrição do experimento, em relação ao relatório parcial, ganhou outra dimensão com as fotos apresentadas, que oferecem ao leitor esclarecimentos detalhados sobre das diferentes etapas da montagem experimental, facilitando, assim, sua reprodução. Cabe destacar o cuidado, necessário sem dúvida, em estabelecer e explicitar as analogias entre as partes do olho humano que estão sendo consideradas e os elementos utilizados na simulação experimental. Da mesma forma, a obtenção e o tratamento dos dados exibem grande investimento e cuidados, sem os quais uma análise consistente dos resultados, como a que se apresenta, ficaria prejudicada. A escolha do experimento também merece destaque, pois é sem dúvida uma possibilidade de inserção da Física Moderna no Ensino Médio. Não é um experimento simples, mas se bem trabalhado pode criar condições para que o ensino de Física rompa as barreiras da Física Clássica e problematize junto aos alunos esse conteúdo que raramente se faz presente nesse nível de escolaridade. Finalmente, gostaria de enfatizar a dedicação e o empenho demonstrados pelo José Márcio no desenvolvimento do experimento, tanto do ponto de vista de sua contextualização experimental e teórica, como de sua apresentação.”

14) Revisão Bibliográfica

Para a busca de informações sobre a simulação experimental recorri à busca de artigos publicados sobre o assunto em revistas de publicação científica. Procurei, também, em livros e periódicos, bem como na internet. Como palavras-chave foram usados os termos: “visão de cores”, “visão colorida”, “visão”, “simulação da visão de cores”. O acesso às bases de dados também facilitou o processo de obtenção de informações.

Os livros “Da cor à cor inexistente” e “Fisiologia Humana e Mecanismos das Doenças”, trazem a teoria de como enxergamos. O segundo, bem mais específico, mostra o processo biológico da visão e da visão das cores. O artigo de PINHEIRO, SILVEIRA e BAZZO (2007) enfocam a importância de se ensinar Ciência, Tecnologia e Sociedade no Ensino Médio, aspectos que englobamos nesta simulação experimental. O livro do GREF e o artigo de WERNER, PINNA e SPILLMANN (2008) também trazem a teoria e ajudam a compreender o fenômeno. Por fim, o artigo publicado no Caderno Brasileiro/Catarinense de Ensino de Física foi toda a base para a realização deste experimento e, certamente, a referência mais importante dentre todas.

15) Referências

GREF. **Física 2: Física térmica, óptica**. São Paulo: EDUSP, 5.ed., 366p.(2000).

GUYTON, A.C.; HALL, J.E. **Fisiologia Humana e Mecanismos das Doenças**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 6.ed., 639p. (1998).

LORETO, Églion Lúcio da Silva; SARTORI, Paulo Henrique dos Santos. Simulação da Visão de Cores: Decodificando a Transdução Quântica-elétrica. **Caderno Brasileiro/Catarinense de Ensino de Física**, UFSC, v. 25, n. 2, p. 266-286 (2008). Disponível em: [<http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/viewFile/6067/5635>]. Acesso em 22 mar. 2009.

PEDROSA, I. **Da Cor à Cor Inexistente**. Brasília, DF: UnB; Rio de Janeiro: L. Christiano, 3.ed., 219p. (1982).

PINHEIRO, Nilcéia Aparecida Maciel; SILVEIRA, Rosemari Monteiro Castilho Foggiatto; BAZZO, Walter Antonio; **Ciência, tecnologia e sociedade: a relevância do enfoque CTS para o contexto do ensino médio**. *Ciência & Educação*, v. 13, n. 1, p. 71-84 (2007).

WERNER, John S.; PINNA, Baingio; SPILLMANN, Lottar; **Cores Ilusórias & o Cérebro**. *Scientific American Brasil*. Sao Paulo, a. 5, n. 59, p. 84-89 (2007). Disponível em: [http://www2.uol.com.br/sciam/reportagens/cores_ilusorias___e__o_cerebro_imprimir.html]. Acesso em 08 abr.2009.

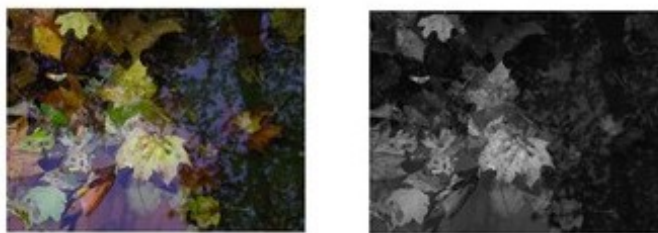
16) Apêndice

Cores ilusórias & o cérebro

Novas ilusões visuais sugerem que a percepção de cores está associada à de formas e profundidade.

por John S. Werner, Baingio Pinna e Lothar Spillmann

Importantes informações são perdidas quando se vê o mundo em preto-e-branco. As cores não apenas nos permitem enxergar o mundo com mais precisão, mas também criam qualidades emergentes que não existiriam sem elas. A fotografia abaixo, por exemplo, revela folhas de outono nas plácidas águas de uma fonte, juntamente com reflexos de árvores e um céu vespertino azul-escuro atrás delas. Na mesma cena vista em preto-e-branco, as folhas se destacam menos, os reflexos de luz são fracos, a água é quase invisível e a diferença aparente de profundidade entre o céu, as árvores e as folhas boiando não existe mais.



Folhas de outono e reflexos em uma fonte revelam a riqueza de informações transmitidas pelas cores. Muitos detalhes desaparecem na versão em preto-e-branco da foto

Ainda sim, esse papel que as cores exercem e mesmo sua verdadeira natureza não são bem reconhecidos. Muitas pessoas acreditam que a cor é uma propriedade definidora e essencial dos objetos, que depende inteiramente dos comprimentos de onda de luz específicos que são refletidos deles.

Mas essa crença é equivocada. A cor é uma sensação criada pelo cérebro. Se as cores que percebemos dependessem apenas do comprimento de onda da luz refletida, a cor de um objeto pareceria mudar drasticamente com variações de iluminação, com nevoa, fumaça e luz de fundo. Pelo contrário, os padrões de atividade no cérebro mantêm a cor de um objeto relativamente estável, apesar de variações no seu ambiente.

Muitos pesquisadores que estudam a visão sustentam que a cor meramente nos auxilia na discriminação de objetos quando diferenças no brilho são insuficientes para tal tarefa. Alguns vão ainda mais longe e dizem que a cor é um luxo, e não realmente uma necessidade: afinal de contas, pessoas completamente daltônicas e muitas espécies de animais parecem se dar bem sem o grau de percepção de cor que a maioria dos humanos tem. A via de reações cerebrais responsável pela navegação e movimento, por exemplo, é essencialmente insensível às cores.

Pessoas que deixam de enxergar cores após um acidente vascular cerebral parecem ter, fora esse problema, percepção visual normal. Tais observações têm sido usadas para defender a ideia de que o processamento das cores tem uma natureza insular e não auxilia na percepção de características visuais como profundidade e forma – ou seja, que as cores tem a ver apenas com matiz, saturação e brilho.

Mas o estudo das cores ilusórias – que o cérebro é induzido a enxergar – demonstra que o processamento de cores no cérebro está atrelado ao processamento de outras propriedades, tais como formas e bordas. Por dez anos, tentamos compreender como as cores influenciam a percepção de outras propriedades dos objetos. Para isso, testamos uma série de novas ilusões, muitas delas criadas por nós. Elas têm nos ajudado a entender como o processamento neural de cores resulta em propriedades emergentes envolvendo formas e bordas. Antes de começar nossa discussão sobre essas ilusões, entretanto, precisamos lembrar como o sistema visual humano processa as cores.

As Vias das Ilusões

A percepção visual começa com a absorção de luz – mais precisamente, a absorção de pacotes discretos de energia chamados fótons – pelos cones e bastonetes localizados na retina. Os cones são usados para a visão diurna; os bastonetes são responsáveis pela visão noturna. Um fotorreceptor do tipo cone responde de acordo com o número de fótons que captura, e sua resposta é transmitida a dois tipos diferentes de neurônios, as chamadas células bipolares on e off (palavras em inglês para ligado e desligado, respectivamente). Esses neurônios, por sua vez, fornecem input para células ganglionares on e off, que se encontram lado a lado na retina.

As células ganglionares possuem os chamados campos receptores centro-periferia (em inglês, center-surround). O campo receptor de qualquer neurônio relacionado à visão é a área de espaço no mundo físico que influencia a atividade desse neurônio. Um neurônio com um campo receptor centro-periferia responde de maneiras diferentes dependendo da quantidade relativa de luz no centro do campo e na região em volta do centro.

Uma célula ganglionar on dispara intensamente (com frequência mais alta) quando o centro é mais claro que a periferia e fracamente quando o campo receptor é uniformemente iluminado. Células off se comportam da maneira oposta: respondem quando o centro é mais escuro que a periferia e quase não disparam quando o centro e a periferia são uniformes. Esse antagonismo entre o centro e a periferia significa que as células ganglionares respondem ao contraste, e dessa maneira refinam a resposta do cérebro a margens e bordas.

Os axônios das células ganglionares (fibras) transmitem seus sinais para o cérebro, especificamente para o núcleo geniculado lateral do tálamo (próximo ao centro do cérebro), e daí para o córtex visual (na parte de trás do cérebro). Diferentes populações de células ganglionares são sensíveis a atributos distintos dos estímulos visuais, tais como movimento e forma, e suas fibras conduzem os sinais com velocidades diferentes. Os sinais de cor, por exemplo, são levados pelas fibras mais lentas.

Acredita-se que cerca de 40% ou mais do cérebro humano esteja envolvido no processamento de estímulos visuais. Nas áreas estimuladas no princípio do processamento visual (partes do córtex visual chamadas V1, V2 e V3), os neurônios são organizados em mapas que fornecem uma representação ponto a ponto do campo visual. Daí, os sinais visuais se dispersam para mais de 30 áreas diferentes, interconectadas por mais de 300 circuitos. Cada uma dessas áreas tem funções especializadas, como o processamento de cor, movimento, profundidade e forma, embora nenhuma delas seja a mediadora exclusiva de uma qualidade perceptual. De alguma maneira, no final todas essas informações são combinadas numa percepção unitária de um objeto com cor e forma particulares. Os neurocientistas ainda não entendem com detalhes como isso acontece.

É interessante notar que danos bilaterais a determinadas áreas visuais levam a déficits na percepção de forma e cor, o que fornece ainda mais evidências de que a cor não é desincorporada das outras propriedades de um objeto. A mistura dos sinais de cores no cérebro com sinais contendo informações sobre a forma dos objetos pode resultar em percepções que uma análise dos comprimentos de onda refletidos desses objetos não prevê que ocorram. As ilusões que utilizamos demonstram isso claramente.

O Efeito Aquarela

Um dos nossos primeiros experimentos com cor ilusória ilustra a importância das cores para delinear a extensão e a forma de uma figura. Sob certas condições, a cor percebida muda em resposta à cor circundante; ela pode tornar-se mais distinta (o que é chamado contraste) ou mais semelhante (o que é chamado assimilação). O espalhamento de cores semelhantes (sensação de que uma cor se espalha por uma área maior do que a que ela realmente ocupa) já tinha sido notado em distâncias pequenas, em concordância com o achado de que a maior parte das conexões entre neurônios visuais no cérebro tem um alcance relativamente curto. Assim, ficamos surpresos ao descobrir que quando uma área sem cor é encerrada por duas linhas limitantes de cores diferentes – com a linha interna mais clara que a externa – a cor da linha interna parece se espalhar e preencher o espaço adjacente, mesmo através de distâncias bastante longas.

A ilusão da linha radial fornece mais evidências sobre o papel que a cor exerce na distinção entre figura e fundo. Em 1941, o psicólogo alemão Walter Ehrenstein demonstrou que uma figura circular brilhante preenche visivelmente o espaço central entre uma série de linhas radiais. A figura e a borda circular que a delimita não possuem nenhum correlato no estímulo físico; elas são ilusórias. A superfície ilusória brilhante parece encontrar-se levemente a frente das linhas radiais.

O comprimento, a largura, o número e o contraste entre as linhas radiais determinam a intensidade desse fenômeno. A configuração espacial das linhas necessária para que a ilusão tenha efeito implica a existência de neurônios que respondem a terminação de uma linha. Tais células, chamadas end-stopped, já foram identificadas no córtex visual, e talvez expliquem esse efeito. Esses sinais locais se combinam e viram inputs para um outro neurônio (de segunda ordem), que preenche a área central com brilho aumentado.

Em nossos estudos sobre a ilusão de Ehrenstein, avaliamos variações no número, comprimento e largura das linhas radiais, e os exemplos que apresentamos neste artigo representam os arranjos mais impressionantes que encontramos. Uma vez que determinamos as características das linhas radiais que produziam o círculo central mais brilhante, experimentamos com variações nas propriedades cromáticas do espaço central. Primeiro, adicionamos um anulo, ou anel, de cor preta a figura de Ehrenstein, e o brilho do espaço central desapareceu completamente – a ilusão foi destruída,

como Ehrenstein também já havia notado. Suspeitamos que esse efeito surge porque o anel silencia as células que sinalizam as terminações das linhas.

Contudo, se o anulo é colorido, outras células podem ser excitadas por essa mudança. Quando adicionamos cor ao anulo, o disco branco não apenas pareceu muito mais claro (autoluminoso) que na figura de Ehrenstein, mas também tinha uma aparência mais densa, como se uma pasta branca tivesse sido aplicada a superfície do papel. Esse fenômeno nos surpreendeu; qualidades de autoluminosidade e superfície normalmente não aparecem juntas, e são até mesmo considerados modos opostos, ou mutuamente excludentes, de aparência. Chamamos esse fenômeno de indução de brilho anômala. Como no efeito aquarela, acredita-se que células nas áreas corticais primárias causem essa ilusão.

Em seguida, inserimos um disco cinza no espaço central de uma figura de Ehrenstein. Surgiu outro fenômeno chamado lustro cintilante, no qual o brilho ilusório dá lugar à percepção de um brilho trêmulo que ocorre com cada movimento do padrão ou do olho. A cintilação pode surgir por causa da competição que ocorre entre os sistemas on e off: o brilho induzido pela linha (incremento ilusório) compete com o disco cinza escuro (decremento físico). Quando substituímos os discos brancos centrais dentro dos anéis coloridos por discos pretos e utilizamos um contorno preto, os discos ganharam aspecto ainda mais escuro que a área circundante fisicamente idêntica. O negrume parece gerar um vazio, ou um buraco negro, que absorve toda a luz.

Quando o disco central dentro do anel cromático era cinza em vez de preto ou branco, o disco parecia piscar e se tingir com a cor complementar do anulo quando os olhos eram movimentados ou padrão se movia – por exemplo, de verde quando o anel circundante era roxo.

O contraste anômalo de cor cintilante depende das linhas radiais e do anulo cromático da mesma maneira que os outros dependem, mas também possui qualidades únicas que não parecem ser uma simples combinação de outros efeitos conhecidos. Nessa ilusão, a cor induzida parece tanto autoluminosa quanto cintilante. Surpreendentemente, ela parece flutuar acima do resto da imagem. A cor da superfície e a cor autoluminosa não se misturam; pelo contrario, uma pertence ao disco na página, e a outra emerge de uma combinação das outras características dos estímulos.

No contraste anômalo de cor cintilante, é possível que as linhas radiais ativem neurônios end-stopped locais, como foi proposto para o preenchimento de espaços pelos contornos ilusórios, mas a atividade dessas células não explica completamente a combinação de cintilação e cor complementar. Não está claro se as linhas radiais exercem um efeito direto sobre o contraste de cor, ou se a vivacidade da cor é derivada indiretamente do lustro e da cintilação causados pela combinação entre as linhas radiais e o centro cinza.

Os conhecimentos atuais sobre o cérebro não permitem explicar tudo o que ocorre nesse processo ilusório. A complexidade da ilusão sugere que é improvável que ela resulte de um processo unitário, e sim que ela representa uma tentativa do cérebro de reconciliar sinais provenientes de

múltiplas vias especializadas que rivalizam entre si. Muito trabalho ainda é necessário para entender como o cérebro percebe o mundo físico. Felizmente, pesquisas em andamento sobre cores ilusórias continuarão a oferecer instigantes vislumbres das complexidades do sistema visual humano.

Há muito tempo pesquisadores sustentam que o processamento de cores no cérebro é separado do processamento de outros atributos, tais como profundidade e forma.

O estudo das cores ilusórias, no entanto, demonstra que a percepção de cores gera propriedades emergentes de forma e profundidade.

Os autores utilizaram a chamada ilusão de Ehrenstein para revelar como cor e forma estão relacionadas na percepção do mundo visual pelo cérebro.