



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

A PERCEPÇÃO DA COR – ABORDAGENS DIDÁTICAS PARA O ENSINO

Márcio Velloso da Silveira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador:
Ricardo Borges Barthem

Rio de Janeiro
Julho de 2016

A PERCEPÇÃO DA COR – ABORDAGENS DIDÁTICAS PARA O ENSINO

Márcio Velloso da Silveira

Orientador: Ricardo Borges Barthem

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada por:

Dr. Ricardo Borges Barthem (Presidente)

Dra. Lilian Pantoja Sosman

Dr. Helio Salim de Amorim

Rio de Janeiro
Julho de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

S587a Silveira, Márcio Velloso
A Percepção da Cor – Abordagens Didáticas para o Ensino /
Márcio Velloso da Silveira - Rio de Janeiro: UFRJ / IF, 2016.
xv, 185 f.: il.;30cm.
Orientador: Ricardo Borges Barthem
Dissertação (mestrado) – UFRJ / Instituto de Física /
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, 2016.
Referências Bibliográficas: f. 147-155.
1. Visão cromática. 2. Experimentos. 3. Interdisciplinaridade.
I. Barthem, Ricardo Borges.
II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Física,
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física.
III. A Percepção Da Cor – Abordagens Didáticas Para O Ensino.

Dedico este trabalho aos meus dois grandes amores, minha esposa Márcia e meu filho Matheus que aceitaram com relativa boa vontade os fins de semana em casa e as viagens não realizadas para que pudesse chegar até aqui. Dedico ao meu pai, Flávio, por toda ajuda e incentivo e também à minha mãe, Suely, que se despediu de mim prematuramente, ao longo deste curso. Aos meus irmãos e em especial ao caçula, Fábio, que este ano também partiu sem que pudesse me despedir. Dedico também a todos que, da mesma forma que eu, possuem alguma alteração na visão cromática, e aos colegas professores que buscam através do magistério muito mais que uma realização pessoal e profissional. Para os que buscam compartilhar seu conhecimento visando uma transformação em nossa sociedade para que, no futuro, a ignorância imobilizadora dê lugar ao conhecimento libertador.

Agradecimentos

Agradeço aos professores do curso de mestrado que conseguem transmitir uma paixão contagiante pelo que fazem, em especial ao professor Carlos Eduardo e a professora Marta. Aos professores e colaboradores que dispuseram de seu tempo oferecendo os seminários do curso, nos abrindo amplos horizontes do conhecimento. Agradeço a Dilma, secretária do curso, pelas palavras de incentivo que me ajudaram a não cogitar desistir. Agradeço aos colegas do curso de mestrado, que compartilharam suas experiências e conhecimentos, doando-se para que ninguém ficasse para trás. –Tive muita sorte de ter colegas como vocês! Em especial ao meu colega e amigo Alipson. Agradeço principalmente ao meu orientador, Ricardo Barthem, que com dedicação e boa vontade me guiou, orientando o rumo do meu trabalho, incentivando e ajudando em tudo que precisasse e que, sem medir esforços, ajudou-me a driblar todas as dificuldades que surgiram ao longo da construção deste trabalho. Bem, também agradeço a Deus diariamente, em minhas preces.

RESUMO

A PERCEPÇÃO DA COR – ABORDAGENS DIDÁTICAS PARA O ENSINO

Márcio Velloso da Silveira

Orientador: Ricardo Borges Barthem

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

A história da luz se confunde com o estudo sobre o mecanismo da visão. A compreensão das estruturas que permitem ao homem enxergar cores contribui para formação de indivíduos capazes de compreender as tecnologias de imagem e se posicionarem de forma atuante diante das transformações sociais advindas do progresso científico e cultural. A complexidade do mecanismo da visão permite uma abordagem interdisciplinar que engloba, além da Física, as disciplinas de química, biologia, história, artes e literatura. Através de experimentos de baixo custo, diversos aspectos da visão cromática são abordados, como por exemplo, a dispersão da luz branca, comparação entre o espectro luminoso visível e espectro sonoro audível, as sínteses aditiva e subtrativa de cores e a remanência visual. Aspectos didáticos são apresentados ao longo do texto como forma de propor a implementação dos experimentos em sala de aula. São ainda abordados alguns aspectos legais que permeiam a deficiência da visão em cores e a inclusão na sociedade dos portadores de algum tipo de discromatopsia.

Palavras-chave: visão cromática, experimentos, interdisciplinaridade.

Rio de Janeiro
Julho de 2016

ABSTRACT

PERCEPTION OF COLOR - APPROACHES TO TEACHING EDUCATION

Márcio Velloso da Silveira

Supervisor: Ricardo Borges Barthem

Abstract of master's thesis submitted to Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, in partial fulfillment of the requirements for the degree Mestre em Ensino de Física.

The history of light mingles with the study of vision mechanism. Comprehension of the structures responsible for distinguishing between colors contributes to the formation of individuals capable of understanding the imaging technologies and positioning themselves in an active way towards the social changes originating from scientific and cultural progress. The complexity of the vision mechanism allows an interdisciplinary approach encompassing physics, chemistry, biology, history, arts and literature. Using low cost experiments various aspects of color vision are addressed, such as white light dispersion, comparison of visible light and audible spectrums, additive and subtractive color syntheses and visual remanence. Didactic aspects are presented throughout the text in order to propose the implementation of in-class experiments. Legal aspects concerning visually impaired people are also addressed, aiming for their social inclusion in spite of dyschromatopsia or similar disabilities.

Keywords: color vision, experiments, interdisciplinarity.

Rio de Janeiro
July 2016

Sumário

Capítulo 1	Introdução.....	1
Capítulo 2	Fundamentos da Percepção da Luz.....	9
2.1	Aspectos Históricos.....	9
2.2	A Fisiologia do Olho Humano.....	16
2.3	Do Semicondutor ao LED.....	27
Capítulo 3	Aspectos Didáticos.....	35
Capítulo 4	A Percepção do Espectro Eletromagnético.....	44
4.1	Analisando o Espectro Luminoso.....	44
4.1.1	O Arco-Íris em Uma Gota D'água.....	44
4.1.2	Analogias Entre o Som e a Luz Usando Arduino.....	57
4.2	O Olho Cibernético.....	74
Capítulo 5	Composição de Cores.....	89
5.1	Síntese Aditiva.....	89
5.1.1	Ensino da visão cromática através de aparato com LED's coloridos.....	89
5.1.2	Disco de Newton Com LEDs.....	96
5.1.3	Pontilhismo na Arte e na Tecnologia.....	106
5.2	Síntese Subtrativa.....	114
5.2.1	Pêndulos Ressonantes.....	114
5.2.2	Sombras Coloridas de Luzes.....	121
5.2.3	Separação de Cores Através da Cromatografia em Papel.....	135
	Considerações Finais.....	143
	Referências Bibliográficas.....	147
	Anexo - Equipamentos e Procedimentos Utilizados no Laboratório de Óptica.....	156
	Material Instrucional 1- Ensino da visão cromática através de aparato com LED's coloridos.....	159
	Material Instrucional 2- Disco de Newton com LED's.....	171

Índice de Figuras

Figura 2.1.1 – Diagrama de cromaticidade ou de espaço de cores elaborado por Hermann Von Helmholtz [Feitosa 2006].....	12
Figura 2.1.2 – Diagrama de cromaticidade x, y do CIE 1931 [Feitosa 2006].....	13
Figura 2.1.3 – A propagação de uma onda eletromagnética ao longo do eixo x. A componente magnética em azul e a elétrica em vermelho.....	15
Figura 2.3.1 – Espectro eletromagnético dos raios cósmicos às frequências extremamente baixas. Em destaque, o espectro visível que compreende uma faixa que vai de 400 nm a 700 nm [Wiki-Espectro].....	17
Figura 2.3.2 – Estruturas do olho humano [Cerpo 2016].....	17
Figura 2.3.3 – Ilustração indicando a inversão da imagem na retina [Visão 2016].....	18
Figura 2.3.4 – (a) A visão escotópica ocorre na periferia do campo visual central quando o ambiente está pouco iluminado, sem definição de cores. (b) A visão fotópica está presente no centro do campo visual e permite distinguir cores. Extraído de [Nishida 2007].....	19
Figura 2.3.5 – Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura de uma região da retina. As estruturas em bege são os bastonetes e as estruturas verdes os cones. Em roxo a estrutura nuclear de ambas. As setas em amarelo indicam o sentido de penetração da luz. Imagem ampliada 1800 vezes [Science 2016].....	20
Figura 2.3.6 – Esquema do interior do olho humano. (a) Indicação da localização da fóvea na retina. (b) Observação da fóvea em um corte do tecido da retina. (c) Ampliação do tecido da retina na região da fóvea onde podem ser observados os bastonetes e cones. Retirado da referência [PlanBio 2011].....	21
Figura 2.3.7 – Mudança física da molécula cis → trans. (a) molécula 11-cis-retinal. (b) Após a luz penetrar o fotorreceptor a molécula se transforma em trans-retinal.....	22
Figura 2.3.8 – Este Vestido motivou uma série de debates sobre a interpretação das cores. Algumas pessoas o viam nas cores branco e dourado, outras nas cores azul e preto [Junior 2015].....	23
Figura 2.3.9 – Na parte superior a figura apresentada aos integrantes da tribo Himba, na qual um dos quadrados apresenta um tom de verde levemente mais claro. Na parte inferior o integrante da tribo de frente ao monitor observando uma figura na qual um dos quadrados é azul [Vidi-Himba 2013].....	25
Figura 2.3.1 – a) Diagrama de bandas de um material isolante. Observa-se que a banda de condução, o retângulo preto, está muito distante da banda de valência, retângulo cinza. b) No metal, o nível mais alto ocupado, fica no meio da banda. c) No semicondutor, a banda de valência fica muito próxima à banda de condução.....	30

Figura 2.3.2 – a) Modelo bidimensional da estrutura cristalina de um semicondutor de silício. b) Semicondutor tipo **n**. Um átomo de silício foi substituído por um de fósforo, com cinco elétrons na banda de valência, logo um dos elétrons não participada das ligações covalentes. c) Semicondutor tipo **p**. Um átomo de silício foi substituído por um de alumínio que possui apenas três elétrons na banda de valência. O buraco deixado na ligação covalente pode ser ocupado por um elétron de outra ligação silício-silício.....31

Figura 2.3.3 – Na dopagem com fósforo (P), o elétron “extra” está fracamente ligado ao átomo, o que significa que sua energia está próxima da banda de condução. Com a energia térmica esse elétron é transferido para a banda de condução e torna-se um portador de carga negativa (n). Na dopagem com alumínio (Al) ocorre o inverso. O seu nível desocupado está apenas um pouco acima do limite superior da banda de valência. Com isso um elétron pode ser capturado e no seu lugar cria-se uma vacância na banda de valência. Essa vacância, pela ausência da carga do elétron, atua como se existisse uma carga positiva no local e pode se deslocar na estrutura como um portador de carga positiva (p).....32

Figura 2.3.4 – Estrutura do LED. Junção **p-n** com polarização direta, ou seja, elétrons sendo injetados do lado **n** e buracos sendo injetados do lado **p**. A luz está sendo emitida próximo à zona de depleção, durante o processo de recombinação de elétrons e buracos.....34

Figura 2.3.5 – Estrutura interna de um LED seccionado transversalmente ao seu eixo de simetria. O lado dopado positivamente, que aparece em vermelho, é suficientemente fino para que a luz possa atravessá-lo. Podemos observar as ligações elétricas nos lados **p** e **n**.....34

Figura 2.3.6 – a) Ao se iluminar o LED, fótons atingem elétrons da banda de condução que é muito fina e semitransparente. b) Se a energia do fóton for igual ou maior que a energia E_g , o elétron que absorvê-la será capaz de saltar para a banda de condução logo acima. Ao passar para a banda de condução esse elétron será conduzido para o lado **n**, deixando em seu lugar um buraco. Os buracos são conduzidos para o lado **p**.....35

Figura 4.1.1.1 – (a) Foto da montagem experimental onde podem ser observados a lâmpada halógena, o anteparo que visa reduzir a luz no ambiente, a fenda ajustável e o prisma. (b) o espectro gerado pelo sistema experimental observado sobre um anteparo branco colocado na lateral. (c) Diagrama da montagem vista de cima.....47

Figura 4.1.1.2 – Luz incidindo em um prisma de vidro e provocando a dispersão das cores componentes da luz solar [Britannica 2016].....49

Figura 4.1.1.3 – Um feixe de luz branca incide em uma bola de vidro produzindo dispersão em várias frequências eletromagnéticas [Wikime-Rainb 2016].....49

Figura 4.1.1.4 – Um arco-íris circular pode ser formado quando o observador está a uma grande altitude, por exemplo, num avião.....50

Figura 4.1.1.5 – Simulação de raios de luz paralelos incidindo sobre uma gota d’água em diferentes pontos a partir da região central, e o respectivo desvio observado. Percebe-se na parte inferior da figura que há uma maior concentração de raios deixando a superfície circular. As cores dos raios nessa figura em nada tem a haver com as frequências espectrais. Os raios foram coloridos apenas com o intuito de facilitar a visualização [Diniz 2016].....	52
Figura 4.1.1.6 – Gotas d’água sobrepostas verticalmente ilustram a porção de luz dispersa em cada uma delas relativa ao ponto de vista do observador. Este só consegue observar um feixe aproximadamente monocromático sendo emitido por cada uma delas [Marques 2016].....	53
Figura 4.1.1.7 – Preparação da lâmpada. (a) A linha tracejada mostra a região que será seccionada. Pode-se observar, pela lâmpada de cima sem a rosca metálica, que na região do corte não há vidro. (b) A lâmpada pronta, após a secagem da massa.....	55
Figura 4.1.1.8 – Esquema de montagem da experiência do arco-íris numa gota d’água.....	56
Figura 4.1.1.9 – Montagem do experimento. (a) Posicionamento da lâmpada halógena com a proteção metálica e da lente. (b) Com a iluminação da sala apagada observa-se a dispersão da luz projetada na folha de papel.....	57
Figura 4.1.1.10 – Raios paralelos de luz incidindo na região inferior de uma gora d’água. Observa-se que há, neste caso, uma reflexão interna a mais o que torna o segundo arco-íris mais tênue que o primeiro [Marques 2016].....	59
Figura 4.1.2.1 – O sensor emite um ruído que ao refletir sobre um obstáculo, retorna ao sensor, sendo captado por ele [Ard-Sensor 2016].....	64
Figura 4.1.2.2 – (a) Montagem dos componentes no protoboard e na placa Arduino. (b) Esquema elétrico detalhado.....	65
Figura 4.1.2.3 – (a) Com a palma da mão a uma distância inferior a 6 cm observa-se a luz vermelha se acender. (b) A uma distância um pouco maior que 6 cm e inferior a 30 cm, podemos observar a luz verde acesa. (c) Sem pôr a mão na frente do sensor e deixando-o distante mais de 30 cm de qualquer objeto a sua frente, observa-se a luz azul acesa.....	67
Figura 4.1.2.4 – (a) LED emissor infravermelho com corpo azulado. (b) LED emissor com corpo transparente. (c) Fototransistor. Seu corpo escurecido permite uma filtragem da luz, deixando passar apenas radiação infravermelha.....	69
Figura 4.1.2.5 – Buzzer encapsulado.....	70
Figura 4.1.2.6 – (a) Esquema de montagem do experimento A Luz que o Cego Pode Ouvir. (b) Esquema elétrico detalhado.....	71
Figura 4.1.2.7 – Esquema de circuito com o fototransistor.....	72

Figura 4.1.2.8 – (a) Nesta fotografia podem ser observados todos os componentes conectados ao protoboard, além das conexões à placa Arduino. (b) Um detalhamento na disposição do LED infravermelho, apontado diretamente para o fototransistor. Estudantes com deficiência visual podem tatear os dois para perceber que um aponta diretamente para o outro. (c) Utilizando uma câmera de celular, e apontando o LED infravermelho para cima, é possível verificar que ele permanece aceso quando o circuito está em operação. (d) Interpondo os dedos entre o LED e o fototransistor, este passa a não receber sua luz, acionando, desta forma, o buzzer.....	74
Figura 4.2.1 – (a) Foto ampliada do interior de um LED RGB. Podem ser observadas, em destaque, as regiões de emissão das três cores. Imagem obtida com uma câmera fotográfica Canon PowerShot SX150, f/8, 1/1600s, ISO-800, dist.focal 60 mm, abertura 4.97, associada a uma lente extra de distância focal de 2 cm. (b) As especificações técnicas do LED RGB utilizado. Dimensões em milímetros.....	77
Figura 4.2.2 – Um LED sendo iluminado por uma lanterna diretamente através de sua lente. Os terminais do LED estão conectados a um voltímetro digital que indica uma leitura de 491mA.....	78
Figura 4.2.3 – Curvas espectrais de emissão para as três cores do LED RGB. As intensidades encontram-se normalizadas.....	79
Figura 4.2.4 – Respostas espectrais da absorção para as três cores do LED RGB. As intensidades foram normalizadas.....	79
Figura 4.2.5 – Comparação relativa das curvas, tanto de emissão (linhas contínuas), quanto de absorção (pontilhado).....	80
Figura 4.2.7 – Alguns exemplos de figuras contidas no livro de teste do Dr. Ishihara e os resultados esperados pelos portadores de discromatopsia.....	84
Figura 4.2.8 – Sinalização para pedestres. Em vermelho o pedestre não deve atravessar, um boneco parado pode ser visto. Em verde um boneco simulando movimento indica que o pedestre já pode atravessar.....	85
Figura 5.1.3.1 – Obra de Georges-Pierre Seurat, intitulada Un dimanche après-midi à l'Île de la Grande Jatte (1884-1886), inaugura o Pontilhismo . Ele faz parte da coleção do Art Institute Chicago [Articedu 2016].....	109
Figura 5.1.3.2 – Detalhe de um personagem na obra de Seurat intitulada La Parade de Cirque (1886-1888) em várias reduções [Alice 2010]. Esta obra faz parte da coleção do Metropolitan Museum of Art, Nova Iorque [Metmuseum 2016].....	110
Figura 5.1.3.3 – Digitalização da Revista The National Geographic Magazine de 1947. (a) Capa da revista. (b) Publicidade à cores no interior da revista. (c) Ampliação de um pequeno recorte da figura (b) em que se observam os pontos coloridos que compõem a imagem.....	111
Figura 5.1.3.4 – Síntese aditiva de cores.....	112
Figura 5.1.3.5 – Foto da tela de uma televisão de LED reproduzindo a cor branca, capturada por um celular na resolução de 9,6 MP.....	113

Figura 5.1.3.6 – Foto dos pixels de uma televisão de LED. (a) A cor amarela se forma quando as cores vermelha e verde estão acesas. (b) A cor magenta é obtida pelo acendimento das cores vermelha e azul. (c) A cor ciano é composta pelo acendimento das cores verde e azul. Fotos obtidas por um celular com resolução de 9,6 MP.....	114
Figura 5.2.1.1 – Pêndulo simples. Estrutura montada.....	119
Figura 5.2.1.2 – À esquerda os dois pêndulos acopladas por um arame encapado. À direita a mesma figura vista com ampliação.....	120
Figura 5.2.2.1 – Reprodução dos manuscritos de Galileu representando as fases da Lua, onde se pode perceber seu relevo acidentado [Ottino 2003].....	123
Figura 5.2.2.2 – Relógio de sol. A ponta metálica triangular é o gnômon. A hipotenusa do triângulo deve estar apontada para um dos polos celestes, ou seja, o ângulo entre a hipotenusa e o cateto da base é determinado pela latitude local [Wiki-Gnômon 2016].....	124
Figura 5.2.2.3 – (a) Podemos perceber que a fonte de luz pontual produz uma sombra bem marcada e maior que o objeto, já a fonte de luz extensa produz uma sombra central circular e coerente com o objeto e uma região de penumbra que a circunda. (b) Quando se posicionam duas fontes pontuais afastadas (duas lanternas) criam-se duas regiões de penumbra e uma sombra central que difere muito do objeto. A sombra central forma a figura de uma elipse [Pedroso 2016].....	126
Figura 5.2.2.4 – (a) A caixa utilizada. (b) Os LEDs já fixados na mídia e com seus respectivos terminais soldados aos fios. (c) Visão do lado oposto da mídia onde foram soldados os fios aos terminais e colados com cola quente sobre a superfície desta mídia.....	128
Figura 5.2.2.5 – (a) Caixa de sombras já pronta para ser ajustada. (b) Ajuste dos LEDs para produzir o branco central. (c) Caixa aberta para inspeção e ajustes, mostrando as sombras coloridas das luzes que atravessam o cartão perfurado. O tracejado indica a região posterior da caixa que deve ser perfurada, abaixo do papel vegetal, para a introdução dos cartões.....	130
Figura 5.2.2.6 – Esquema do circuito elétrico dos três LEDs.....	131
Figura 5.2.2.7 – Usando o cartão com o furo. (a) Distanciando um pouco o cartão do papel vegetal, consegue-se a projeção das três cores. (b) Ao aproximar o cartão do papel vegetal é possível compor mais outras três cores, além do branco.....	132
Figura 5.2.2.8 – Esquema de montagem do experimento, fazendo uso do cartão perfurado. As setas coloridas indicam os feixes de luzes que conseguem atravessar o orifício, formando projeções circulares e coloridas no papel vegetal.....	133

- Figura 5.2.2.9** – Utilizando os alfinetes. (a) Usando o alfinete com a rodinha do carrinho de cortina, um tanto próximo ao papel vegetal, observam-se as regiões de sombras coloridas e, no centro, a região negra que não recebe nenhuma das três cores de luzes. (b) O mesmo efeito pode ser observado usando apenas a projeção da cabeça de vidro do alfinete.....134
- Figura 5.2.2.10** – Esquema de montagem do experimento fazendo uso dos cartões com os alfinetes. As setas coloridas menores indicam os feixes de luz que serão interceptados pelo alfinete, produzindo uma região de sombra no papel vegetal na qual essa cor não está presente. As setas maiores indicam os feixes de luz responsáveis pelas composições de cores por síntese aditiva, projetadas no papel vegetal.....135
- Figura 5.2.3.1** – Síntese subtrativa de cores.....137
- Figura 5.2.3.2** – Material necessário para a experiência. (a) O coador de papel para café. (b) O coador já cortado em tiras. (c) Estojo de canetas hidrográficas. (d) As tiras de papel pintadas em suas extremidades com cada uma das cores das canetinhas.....140
- Figura 5.2.3.3** – Fotos do processo. (a → f) Evolução cronológica do processo de cromatografia para a cor de canetinha preta. Os tempos são contados a partir do contato da fita com a água (a) 2 s. (b) 34 s. (c) 40 s. (d) 54 s. (e) 1 min. (f) 1 min. e 20 s.....142
- Figura 5.2.3.4** – A cromatografia das cores de canetinha. (a) Preta. (b) Cinza. (c) Marrom. (d) Rosa. (e) Azul marinho. (f) Azul escuro.....143
- Figura 5.2.3.5** – A cromatografia das cores de canetinha. (a) Azul claro. (b) Verde escuro. (c) Verde claro. (d) Amarelo. (e) Laranja. (f) Vermelho.....144
- Figura A1** – Espectrômetro McPherson 2061. (a) Visão externa do espectrômetro em cima da bancada. (b), (c), (d), (e) As quatro fotos mostram o interior do espectrômetro. Em (b) vemos os dois espelhos côncavos e, em (c), temos uma visão superior do equipamento. Em (d) e (e) observamos a rede de difração de diferentes ângulos. (f) Observamos uma luz saindo do espectrômetro. Essa é a luz que é detectada e analisada..... 149

Lista de Siglas e Abreviaturas

CCD - Charge-Coupled Device (Dispositivo de Carga Acoplada)

CD - Compact Disk (Disco Compacto)

CENTRAN- Conselho Estadual de Trânsito

CIE- Commission Internationale de l'Eclairage (Comissão Internacional de Iluminação)

CMYK - Cyan (Ciano), Magenta (Magenta), Yellow (Amarelo) e Key (Black/Preto)

CONTRAN - Conselho Nacional de Trânsito

CTS- Ciência Tecnologia e Sociedade

DETRAN - Departamento Estadual de Trânsito

DVD - Digital Versatile Disc (Disco Digital Versátil)

GLP - Gás Liquefeito de Petróleo

HP - Hewlett-Packard

IF - Instituto de Física

LDR - Light Dependence Resistor (Resistor Dependente de Luz)

LED - Light Emission Diode (Diodo Emissor de Luz)

PC - Personal Computer (Computador Pessoal)

PCN+ - Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (Reformulado)

PCNEM - Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio

PSSC- Physical Science Study Committee (Comissão de Estudo de Ciência Física)

RGB - Red (vermelho), Green (verde), Blue (azul)

RS - Rio Grande do Sul

SNEF- Simpósio Nacional de Ensino de Física

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

USB - Universal Serial Bus (Porta Universal)

Capítulo 1

Introdução

O conhecimento que a humanidade adquiriu ao longo de toda sua existência se deve não somente às interações sociais, mas também à sua interação com a natureza. Conhecer e compreender o mundo em que vive é uma das razões do sucesso da espécie homo sapiens. Essa interação com a natureza, que vem muito antes da linguagem, se dá através dos sentidos que foram desenvolvidos ao longo da evolução e que permitiram muito mais do que apenas a sua adaptação ao meio. Levaram também ao desenvolvimento de tecnologias para facilitar sua vida, aumentar sua produtividade e proteger sua saúde, além de buscar, de forma apaixonada, compreender os mistérios do cosmo, muito além do seu alcance [Salveti 2008].

O cérebro mais desenvolvido [Darwin no Brasil 2009] tornou o homem um ser capaz de produzir uma transformação inigualável no mundo em que vive – muitas vezes catastrófica – mas que dependeu fundamentalmente de seus cinco sentidos, sendo que um destes teve – e ainda tem – uma participação fundamental. Uma porta que se abre para o mundo desde a mais tenra idade e que vai maturando e construindo elos com os outros sentidos. O sentido que exige cerca de 40% do processamento cerebral e que permite contemplar não só as obras da natureza como suas próprias obras [Werner 2007]. De fato, nossos olhos são considerados uma extensão do nosso cérebro, e a visão, um poderoso órgão do sentido, que pode ser estudado por diferentes ramos da ciência, como analisa Feynman:

“ Na verdade, pessoas que estudam a anatomia e o desenvolvimento do olho mostraram que a retina é, de fato, o cérebro: no desenvolvimento do embrião, uma parte do cérebro se desenvolve na frente, e fibras longas crescem para trás, conectando os olhos ao cérebro. A retina é organizada do mesmo modo que o cérebro é organizado e, como alguém belamente expressiu, “o cérebro desenvolveu um modo de olhar para fora sobre o mundo”. O olho é uma parte do cérebro que está tocando a luz, por assim dizer, no exterior. Portanto não é de modo nenhum improvável que alguma análise de cor já tenha sido feita na retina” [Feynman 2008 - p.36-2].

Capítulo 1

Óptica é originalmente o campo da Física responsável pelo estudo da luz. Como falar em luz só faz sentido para nós graças ao órgão sensível à sua presença, o olho, podemos atribuir à nossa visão a responsabilidade pelo surgimento e desenvolvimento deste campo da Física. Aos poucos o estudo da óptica se estendeu para além do espectro visível, mas, ainda assim, o estudo de outras faixas espectrais bem como o desenvolvimento de toda ciência se deve em grande parte ao nosso sistema visual.

A disciplina de Física no Ensino Médio, no estudo sobre o olho humano, dentro da óptica, geralmente se limita em estudar seu conjunto de lentes (córnea, humor aquoso e cristalino), e tipos de correção visual. Quando muito, se comenta um pouco sobre as células responsáveis por captar a informação luminosa, os cones e bastonetes. Ainda mais raro, são apresentados alguns defeitos na visão cromática, o chamado daltonismo.

Entre outros aspectos, o reconhecimento da importância da visão deve levar em conta o fato de que, em apenas uma fração de segundos, nossos olhos trazem para nós uma quantidade gigantesca de informações [Mueller 1968]. Essas informações se complementam às dos demais sentidos, embora a informação que chega pela luz conte com curto tempo de propagação, pela proximidade do olho ao cérebro, permitindo uma resposta muito mais ágil. “O nosso principal mecanismo de comunicação com o Universo próximo ou distante é a luz, então nada melhor do que conhecer suas características e principais propriedades” [Salveti 2008 - p.46].

Se pensarmos na evolução da ciência, onde estaríamos se vivêssemos na escuridão? O que seria da Teoria da Relatividade? Como Einstein teria seu *gedanken* se imaginando a viajar na velocidade da luz? O que seria a luz? – Ainda que tenhamos a capacidade de enxergá-la, essa última pergunta ainda é muito complicada de ser respondida, pois envolve conceitos da mecânica quântica, que tradicionalmente, devido ao alto grau de abstração, não são introduzidos no Ensino Médio. O alto grau de complexidade da mecânica quântica pode ser traduzido em uma frase citada do célebre físico Richard Feynman: “Se você acha que entendeu alguma coisa sobre mecânica quântica, então é porque você não entendeu nada” [Willis 2005 - p.337]. Dizer que a luz é uma onda eletromagnética capaz de produzir uma sensação que permite ao ser humano a capacidade de se localizar espacialmente pode ser uma resposta muito incompleta por sinal. Assim como o que se faz com qualquer conceito, a resposta deve depender do nível de cognição do aprendiz.

De fato, o estudo da Óptica não faria sentido se não pudéssemos enxergar. Ainda assim o Sol continuaria a banhar nossa pele, e o sentiríamos aquecê-la. Entretanto, nos

dias claros e chuvosos, não poderíamos contemplar um magnífico espetáculo da natureza, o arco-íris. E sem a visão cromática, teríamos que desenvolver muito mais nosso olfato para saber quando colher um fruto, já que não o perceberíamos madurar pela cor, entre outras dificuldades.

A percepção da cor é um atributo de uma minoria dos mamíferos, grande parte dos insetos, pássaros e peixes [Salveti 2008 - p.41]. A evolução permitiu essa capacidade de se adaptar ao meio, apoiada na visão colorida, para extrair da natureza o necessário à sua sobrevivência e, ao mesmo tempo, evitar tudo aquilo que poderia pôr em risco sua vida, como frutas e animais venenosos, por exemplo.

A importância da visão cromática na vida contemporânea vai muito além de uma questão de sobrevivência. Ela é responsável por vários simbolismos sociais e religiosos, bandeiras, sinais e símbolos de trânsito.

De acordo com o PCN+, no tema estruturador 3 (Som, Imagem e Informação):

“Para situar-se no mundo contemporâneo é necessário compreender os atuais meios de comunicação e informação, que têm em sua base a produção de imagens e sons, seus processos de captação, suas codificações e formas de registro e o reestabelecimento dos sinais nos aparelhos receptores. Estudar esses mecanismos significa propiciar competências para compreender, interpretar e lidar de forma apropriada com aparatos tecnológicos, como televisão, os aparelhos de CDs e DVDs, o computador, o cinema ou mesmo a fotografia”[PCN+ 1999 - p.74].

A compreensão sobre o funcionamento dos modernos equipamentos existentes atualmente pode ser trazida para sala de aula a partir de sua construção histórica. O desenvolvimento da ciência permeia a evolução da sociedade e as expressões artísticas. As contribuições biunívocas entre a ciência e a arte podem ser observadas através das mais diversas expressões artísticas e refletem no desenvolvimento da sociedade e sua bagagem cultural. A tecnologia empregada hoje nos modernos televisores, com imagem de resolução altamente realística, utiliza o mesmo princípio das pinturas desenvolvidas no século XIX quando surgiu o estilo de pintura que deu origem ao Neoimpressionismo, o denominado Pontilhismo. Indo bem mais a frente, observamos que o emprego das tecnologias de imagem aliadas ao desenvolvimento da informática e da internet possibilitou-nos acesso ao mundo do conhecimento, quase que instantaneamente. Isso tem permitido à uma grande parte da população, além da viagem ao conhecimento, o

Capítulo 1

turismo virtual aos lugares mais remotos da Terra, e talvez mais além. É inegável o papel dessas evoluções para nossa sociedade, bem como a necessidade da implementação dessa abordagem histórico-cultural para construção de uma sociedade que reconheça o processo de construção do conhecimento, deixando o estudante e o cidadão, de serem apenas, meros consumidores de tecnologia. Essa abordagem apoia-se no PCN+, onde se lê:

“O estudo do som e da imagem pode propiciar, ainda, meios para dimensionar o papel da informação para a vida social, acompanhando as transformações sociais que resultaram do domínio tecnológico, do registro, reprodução e velocidade de transmissão de informações ao longo da história” [PCN+ 1999 - p.75].

Nesse trabalho o fenômeno cor é abordado através de diversos experimentos que procuram explorar de que forma nosso sistema visual opera para reconhecimento das cores. São apresentados equipamentos para construir sensibilizações de cores em consonância com os modelos explicativos vigentes, como por exemplo, o modelo tricromático de Young-Hemholtz, além de análises quanto à velocidade de construção da imagem no cérebro, que leva à remanência visual, estudos experimentais sobre a interação da luz com a matéria, análise da mistura de cores para síntese subtrativa e analogias entre os estudos da luz e do som. As abordagens permitem a integração da Física com outras áreas da ciência e o desenvolvimento de ações que busquem a implementação de diversas ações didáticas, que incluem, por exemplo, as atividades investigativas. No âmbito do PCN+, encontramos o seguinte texto:

“Para permitir um trabalho mais integrado entre todas as áreas de Ciências da Natureza, e destas com Linguagens e Códigos e Ciências Humanas, as competências em Física foram já organizadas nos PCNEM de forma a explicitar os vínculos com essas outras áreas. Assim, há competências relacionadas principalmente com a investigação e compreensão dos fenômenos físicos, enquanto há outras que dizem respeito à utilização da linguagem física e de sua comunicação, ou, finalmente, que tenham a ver com sua contextualização histórico e social”. Grifo dos autores [PCN+ 1999 - p.62].

O Capítulo 2 é dedicado a abordar os fundamentos da percepção da luz, partindo de uma abordagem histórica que explora o desenvolvimento conceitual de algumas de

suas propriedades, entre elas, a cor. Além disso, paralelamente, observaremos a construção de teorias que procuram explicar como se processa a visão cromática, mostrando também o desenvolvimento da teoria eletromagnética para a luz. Abordamos também, neste capítulo, a estrutura fisiológica do olho humano, examinando suas principais estruturas responsáveis por captar e processar a luz, levando a informação ao cérebro. Como fazemos uso de LEDs em diversos experimentos, terminamos o Capítulo 2 abordando o desenvolvimento dos semicondutores até a produção do LED, analisando ainda, uma característica um tanto peculiar destes dispositivos, que é a geração de diferença de potencial nos seus terminais ao ter seu bulbo iluminado.

Os aspectos didáticos são discutidos no Capítulo 3 relacionando-os com os experimentos desenvolvidos, como forma de orientar a implementação de tais atividades em sala de aula. Essas abordagens são vistas neste capítulo de forma mais genérica e, ao longo dos experimentos, serão pontuadas suas correspondentes implementações.

O Capítulo 4 é dedicado à percepção do espectro visível. Inicialmente propomos uma prática onde analisamos o espectro visível pela dispersão em um prisma de vidro através de um experimento denominado **Arco-íris em uma gota d'água**. Nele é usado o bulbo de uma lâmpada incandescente, preenchido com água, para dispersar a luz de uma lâmpada halógena. O objetivo do experimento é relacionar o fenômeno da dispersão da luz na atmosfera, o arco-íris, com a dispersão no bulbo com água. Entendendo como a luz penetra na lâmpada e como a dispersão na lâmpada é produzida, o estudante pode entender o fenômeno do arco-íris e observar o espectro luminoso.

Ainda no Capítulo 4 é utilizado um microprocessador (Arduino) para a construção de duas experiências. A primeira, denominada **O Som que o surdo pode ver**, consiste no uso de um sensor ultrassônico, que emite e capta frequências sonoras além da capacidade audível humana e, através do processamento com o Arduino, consegue medir a distância de um obstáculo. Essa experiência pode ser feita com alunos deficientes auditivos, de forma inclusiva, mostrando que todos temos limitações, não só os portadores de deficiências. Desse modo, havendo um portador de surdez na sala de aula, ou mesmo que não haja, o assunto pode ser debatido com a classe com vias a melhorar a compreensão das deficiências, objetivando a formação de um cidadão solidário e que saiba respeitar as diferenças e limitações do seu semelhante.

Capítulo 1

A segunda experiência, **A Luz que o cego pode ouvir**, consiste em usar um conjunto emissor/receptor infravermelho para construção, com o Arduino, de um sensor de barreiras. Da mesma forma que ocorre com a audição, nossa visão também opera em uma determinada faixa de frequências, a luz visível, não sendo capaz de captar frequências luminosas fora desta faixa. Como o LED emite uma frequência do espectro que não conseguimos ver, o infravermelho, a comunicação formada entre o emissor e o receptor, é invisível para nós. Entretanto, ao se colocar um obstáculo entre o emissor e o receptor infravermelho, o sistema emite um ruído audível (*beep*) indicando que a comunicação foi rompida. O ruído sonoro indica a presença desta barreira interrompendo um sinal que não pode ser visto por uma pessoa com visão normal ou mesmo o deficiente, criando um momento oportuno para outra discussão sobre deficiências.

Fechando o capítulo sobre a **Percepção do Espectro Eletromagnético**, é apresentado o **Olho cibernético**, um olho que pode reconhecer cores de luzes. O olho é constituído de um LED RGB que, ao ser iluminado por uma luz de determinada cor, produz uma ddp em seus terminais, indicando qual a cor de luz que foi utilizada. O experimento propõe uma discussão com os estudantes de um outro tipo de deficiência, a discromatopsia, ou seja, a dificuldade ou incapacidade de discernir cores. Como se trata de uma deficiência predominantemente genética, o assunto pode ser abordado de forma interdisciplinar com o professor de biologia, fazendo inclusive, o cruzamento genético para descoberta das probabilidades de nascer um portador dessa deficiência a partir do cruzamento genético de seus pais.

No capítulo 5 são confeccionados experimentos para que os estudantes possam compreender melhor como se processa a visão das cores, abordando a síntese aditiva e a síntese subtrativa. Inicialmente o experimento proposto permite a composição de várias cores de luzes, utilizando-se um LED RGB. Através de potenciômetros é possível aumentar ou diminuir o brilho de cada uma das três cores componentes deste LED RGB (vermelha, verde e azul). A discussão deste experimento envolve a compreensão sobre as células responsáveis pela visão cromática, os cones, e pode ser tratada de forma interdisciplinar com os professores de biologia.

Em seguida é construído um disco de Newton usando, ao invés de um cartão colorido, LEDs das três cores: vermelha, verde e azul. Como os LEDs estão perfeitamente alinhados, a mesma distância do centro de um disco, ao girar os três ao mesmo tempo, observa-se a formação da cor branca. As três cores podem ser acesas individualmente

permitindo também a composição do amarelo, ciano e magenta. Para compreender a formação de imagens cinematográficas é necessário compreender como se processa o tempo de resposta da visão, ou seja, a remanência visual. Além do processo físico de chegada de luz à retina, o estudante precisará compreender o processo bioquímico que se segue e, torna-se oportuno compartilhar o tema com os professores de biologia e química.

A arte se une à ciência, na seção seguinte, para compreensão do papel de ambas no desenvolvimento tecnológico e cultural de nossa sociedade. **O pontilhismo na arte e na tecnologia** traça um paralelo entre o desenvolvimento científico e de que modo ocorre esta relação biunívoca em que ora a arte faz uso da ciência, ora é usada para o desenvolvimento de novas tecnologias. Além de apresentar de que forma a mesma técnica desenvolvida no Pontilhismo está presente nos modernos televisores atuais, são relacionadas também outras expressões artísticas como a poesia e sua relação com a ciência.

A síntese subtrativa é abordada iniciando-se com o conceito de absorção em **Pêndulos ressonantes**, que trata de uma analogia entre um fenômeno mecânico e a interação da luz com a matéria. Para que o estudante possa compreender como observamos cores nos objetos é necessário que compreenda de que forma as superfícies dos materiais podem absorver ou espalhar determinadas faixas de comprimentos de onda. O fenômeno da ressonância é usado como analogia à interação da luz com a matéria através da absorção do espectro, permitindo compreender como ocorrem as sínteses subtrativas de cores.

Em **Sombras coloridas** estamos, mais uma vez, abordando um tema que sempre interessou muito à arte. As sombras são apresentadas como importante fenômeno para aferição do tempo e para o desenvolvimento da ciência, permitindo, por exemplo, através de sombras, que Galileu percebesse que a lua não era perfeitamente lisa e desprovida de imperfeições. Na história da pintura, a evolução das técnicas de composição das sombras, permitiram conferir aspectos que tornavam as obras mais realísticas, como se os artistas buscassem eternizar as imagens que eram interpretadas em seus cérebros. Surgem também os efeitos provocados por variações em exposições de luzes de cores diferentes. Abre-se a possibilidade de se construir sombras em diferentes cores. O experimento desenvolvido para composição de sombras coloridas consiste em três LEDs das cores vermelha, verde e azul que, presos a uma superfície rígida, apontam para um mesmo local. Estes LEDs são colocados em uma caixa e, no ponto onde os feixes de luzes se encontram,

Capítulo 1

é colocado um papel vegetal. O brilho e acionamento de cada cor de LED é feito individualmente. Por um orifício lateral, pouco abaixo do papel vegetal, podem ser inseridos três tipos de cartões, proporcionando diferentes abordagens. Esse experimento também pode ser usado em uma atividade investigativa e exige que se apresente os princípios de propagação dos raios de luz.

Por fim, em **Cromatografia em papel** pode-se compreender o processo inverso ao de se misturar cores de pigmentos. Na verdade, neste experimento pode-se analisar a composição de pigmentos usados para confecção de cores de tintas. Usando apenas canetas hidrográficas coloridas, um papel absorvente e um copo com água observa-se os pigmentos que compõem determinada cor de caneta. Com isso, o estudante poderá perceber que a cor apresentada por uma caneta preta, por exemplo, é devida ao conjunto de cores-pigmento que estão absorvendo um amplo espectro de comprimentos de onda. Quase nada está sendo espalhado nesta síntese subtrativa, por isso a cor preta.

Capítulo 2

Fundamentos da Percepção da Luz

2.1 Aspectos Históricos

Evolução das teorias sobre a luz e a cor

O conhecimento do que é a luz se confunde com o sentido da visão. Antigos filósofos gregos como Pitágoras, Empédocles e Platão, acreditavam que uma luz era emitida dos nossos olhos e, ao atingir um objeto, trazia de volta a eles a informação sobre sua forma, como se nossos olhos tatessem o objeto. Já Aristóteles (384-322 a.C.) acreditava que “a luz não era uma coisa material, mas a qualidade que caracterizava a condição ou estado de transparência”, logo, “achava que a cor move o meio transparente e este, por ser contínuo, atua sobre o sentido da visão”. Mesmo com esses conceitos errôneos a óptica já se desenvolvia. Euclides (320-275 a.C.), que escreveu um livro sobre a óptica com doze postulados, creditando à luz uma enorme velocidade, afirmava que os raios emitidos pelo olho viajavam em linha reta [Salveti 2008].

Alhazem (1000 d.C.) produziu grandes avanços no estudo da óptica, aperfeiçoando as leis da reflexão, além de estudar os espelhos esféricos e parabólicos. Fez também uma descrição detalhada do olho humano. [Hecht 1991]. A ideia Aristotélica sobre a luz é posta à prova por Galileu Galilei (1564-1642) ao mostrar que o sulfeto de bário, conhecido como esponja solar, produzia luz sem aquecimento, mostrando que a luz, ao contrário das ideias de Aristóteles, “era uma coisa, uma substância com existência separada de um meio iluminado”.

Com relação ao estudo das cores, Pitágoras (c570-500 a.C.) já havia criado, em sua época, um diagrama de cores — denominado atualmente de espaço de cores — de formato semicircular. Nele as cores se relacionam com as notas da escala musical de tons e meio tons, e aos planetas que, por sua vez, eram separadas de determinadas cores [Santos 2000].

Quase duzentos anos depois, Aristóteles também desenvolveu seu espaço de cores. Teria sido, provavelmente, “o primeiro a investigar a mistura de luzes quando observou a formação do verde em uma parede de mármore branco, após a passagem de um feixe de luz branco por dois fragmentos de vidro nas cores azul e amarelo, respectivamente” [Feitosa 2006].

Capítulo 2- Fundamentos da Percepção da Luz

Pulando a Antiguidade e a Idade Média chegamos a Leon Battista Alberti (1404-1472) que apresentou em 1435 seu livro *Della Pintura* [OpenLibrary Alberti 2010] um espaço de cores baseado em oponências cromáticas: verde-vermelho e azul-amarelo. Este estudo representou o fundamento da teoria de oponência de cores de Ewald Hering, muitos séculos mais tarde. Além disso, Alberti foi quem apresentou a forma tridimensional para a representação do espaço de cores. A mesma base tricromática aparece na teoria de espaço de cores desenvolvida por Franciscus Aguilonius (1567-1617) utilizando três cores-pigmentos primárias: “*flavus, rubeus e caeruleus*” (amarelo, vermelho e azul) [Feitosa 2006].

Isaac Newton (1642-1727) inicialmente tinha dúvidas sobre a natureza da luz. Após seus estudos com o prisma, ”concluiu que a luz branca seria composta de uma mistura de toda gama de cores independentes”. Ao dispersar a luz branca com uso de um prisma, encontrou sete cores, a saber, vermelho, alaranjado, amarelo, verde, azul, índigo e violeta. Com o chamado *Experimentum Crucis* comprovou que a luz branca do sol é composta de raios diferentemente refrangíveis. Entretanto, acabou defendendo que “os corpúsculos de luz associados às várias cores geravam no éter vibrações características”, distanciando-se da teoria ondulatória. Seu diagrama de cores circular, com as cores definidas como fatias de pizza, foi publicado no livro *Opticks* [Feitosa 2006].

Christiaan Huygens (1629-1695) se opunha as ideias de Newton, propondo de forma correta que a luz abrandava ao penetrar meios mais densos. Conseguiu explicar com base na teoria ondulatória as leis de reflexão e refração [Hecht 1991]. Após estudos do fenômeno da difração, a luz ganha outra interpretação. Robert Hooke (1635-1703) ao estudar os padrões de interferência coloridas gerados por películas delgadas, conclui que se deviam à interação da luz refletida nas superfícies frontal e posterior do filme. Ele propôs que a luz estaria associada a um rápido movimento oscilatório do meio, propagando-se em alta velocidade. Estes seriam os primórdios da teoria ondulatória da luz que, até então, considerava-se ter um aspecto mais parecido com um corpo físico, corpúsculo [Hecht 1991].

Com relação às pesquisas sobre a visão em cores, vale destacar alguns acontecimentos. Em 1756, Mikhail Vasilevich Lomonosov sugeriu, como complemento à tricromacia física da luz, a tricromacia fisiológica: três tipos de partículas presentes na membrana escura no fundo do olho. Tobias Mayer (1723-1762) apresentou em uma aula as três cores-luzes primárias que o olho humano seria capaz de perceber: vermelho, amarelo e azul [Feitosa 2006].

Para a teoria ondulatória, o século XVIII não trouxe grandes evoluções. Isso se deu, em boa parte, ao prestígio de Sir. Isaac Newton que a refutava veementemente. A teoria ondulatória despertou apenas no século XIX com Thomas Young (1773-1829). Entre os anos de 1801 a 1803, “Young apresentou comunicações à *Royal Society* defendendo a teoria ondulatória e incorporando-lhe um novo conceito fundamental, o chamado princípio de interferências. Os conhecimentos adquiridos por Young permitiram que se pudesse sintetizar a teoria tricromática do sistema visual humano. Em “1817, em um artigo de sua autoria, *Chromatics*, elaborado para a Encyclopédia Britannica, Young concluiu que diferentes comprimentos de onda correspondiam a diferentes matizes; os mais curtos se apresentavam em violeta e os mais longos em vermelho” [Hecht 1991].

Leonardo Da Vinci (1452-1615) se debruçou de forma incansável sobre os fenômenos das sombras tendo suas anotações sido reunidas [Open Library Da Vinci 2012], após a sua morte, em um livro sobre pintura. As sombras coloridas também despertavam o interesse de Gaspar Monge (1746-1818), que fez o seguinte relato sobre o fenômeno:

“Se um ambiente for iluminado pela luz do sol que passa através de uma cortina vermelha que tem um buraco, o feixe de luz que passar pelo buraco e cair sobre um pedaço de papel não irá parecer vermelho e sim ‘bastante verde’” [Feitosa 2006].

No ano de 1839, Michel Eugène Chevreul (1786-1889) publicou *De La loi du Contraste Simultané des Couleurs* [Open Libray Chevreul 2010] estabelecendo “definitivamente a lei do contraste simultâneo que havia sido mencionada por Da Vinci e, posteriormente, por Johann Wolfgang Goethe (1749-1832)”. O sistema desenvolvido por Chevreul teve fundamental influência na pintura neo-impressionista de diversos artistas como Camille Pissarro, Geoges Seurat, Paul Signac, Claude Monet, entre outros [Feitosa 2006].

No campo da física ondulatória, Augustin Jean Fresnel (1788-1827), sem conhecer os trabalhos de Young, “unificou os conceitos inerentes à descrição ondulatória de Huygens e ao princípio de interferências”. Segundo Fresnel:

“As vibrações de uma onda luminosa em qualquer ponto, podem ser consideradas como soma dos movimentos elementares que lhe são transmitidos no mesmo instante, em virtude da ação independente de todas as partes da onda não obstruída, em qualquer uma das posições anteriores”[Hecht 1991].

Fresnel acreditava que a luz se propagava de forma longitudinal. Mais tarde, Young sugeriu que “a vibração do éter podia ser transversa, como uma onda em uma corda”, concluindo que “a dupla lateralidade da luz seria então simplesmente uma manifestação das duas vibrações ortogonais do éter, perpendiculares à direção de propagação do raio luminoso” [Hecht 1991].

Em meados do século XIX o estudo sobre a visão cromática evoluiu com a hipótese formulada por Hermann Von Helmholtz (1821-1894) e James Clerk Maxwell (1831-1879) de que havia três fotorreceptores cones responsáveis pela visão das cores. Com contribuições na oftalmologia, otologia, neurologia e físico-química, introduziu o conceito fundamental para o espaço de cores do século XX. Estudou a mistura de cores de luzes e de cores de pigmentos que deu origem aos termos misturas aditiva e subtrativa de cores. Seu diagrama de cromaticidade, Figura 2.1.1, influenciou profundamente o diagrama de cromaticidade estabelecido pela CIE 1931 [Feitosa 2006].

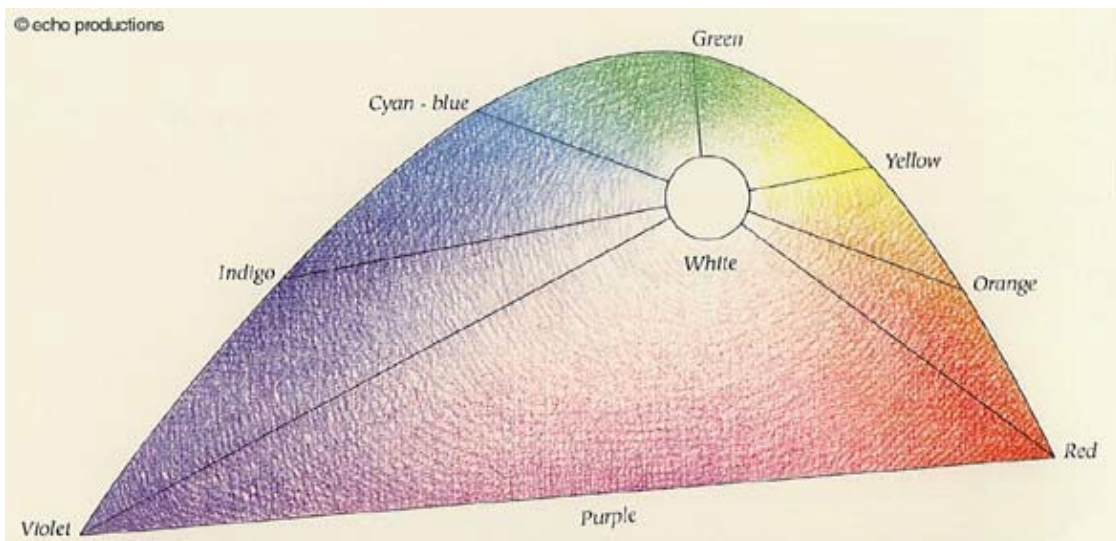


Figura 2.1.1 – Diagrama de cromaticidade ou de espaço de cores elaborado por Hermann Von Helmholtz [Feitosa 2006].

Arthur König (1856 - 1901) e Helmholtz desenvolveram métodos para aferir a sensibilidade espectral dos fotorreceptores da retina. König em colaboração com Conrad Dieterici (1858 – 1929) planejaram um experimento no qual puderam avaliar indivíduos tricromatas, protanopos, deuteranopos e, a partir dessas informações, apresentaram as curvas de sensibilidade espectral dos fotorreceptores para um indivíduo tricromata normal. Produziram três curvas de absorção das opsinas dos cones em 1886 [König 1886] e a curva de absorção da rodopsina dos bastonetes, em 1894 [König 1894].

Somente a partir de 1931, quando foram apresentadas as *Recommendations Officielles de la Commission Internationale de l'Eclairage*, a colorimetria tornou-se tecnicamente viável. Seu fundamento baseia-se na sistematização de funções de misturas de cores necessárias a um observador padrão, dentro de um campo visual e em condições específicas de iluminação. Seu sistema de cores (X, Y, Z) baseia-se em um diagrama tridimensional, no qual os eixos (x,y) indicam os dois eixos da cromaticidade somados ao eixo z, responsável pela luminância. O diagrama pode ser visto na Figura 2.1.2 [Feitosa 2006].

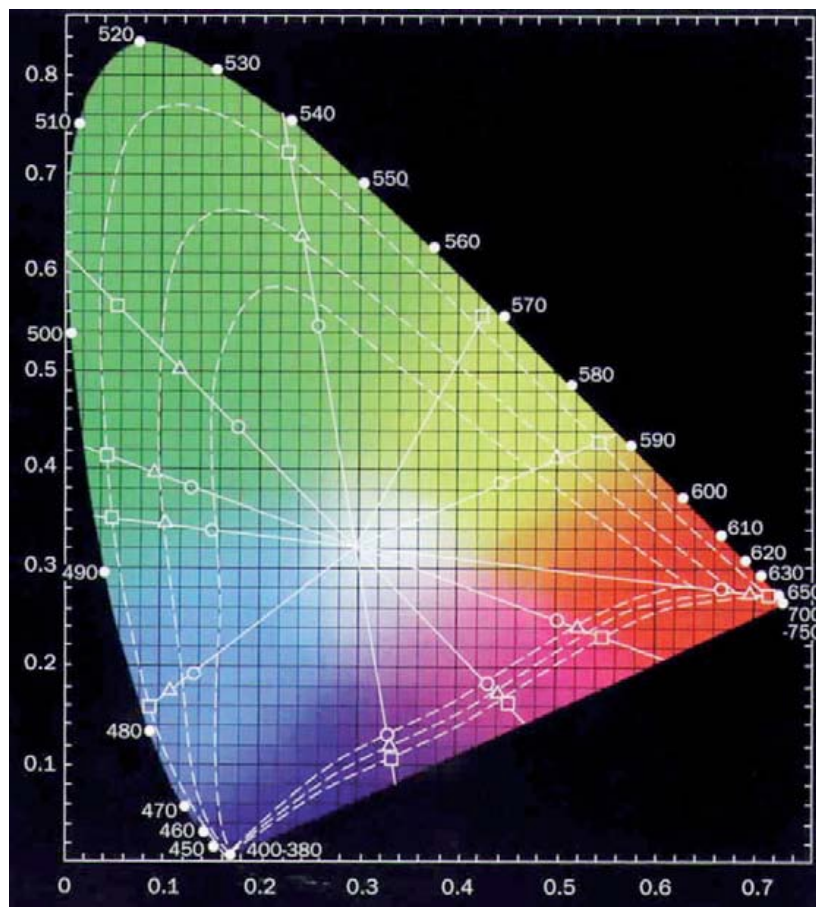


Figura 2.1.2 – Diagrama de cromaticidade x, y do CIE 1931 [Feitosa 2006].

Nesse diagrama é possível notar o uso das cores primárias relativas às cores dos pigmentos dos cones responsáveis por nossa visão cromática, são eles o vermelho, verde e azul. Nesse sistema, X, Y e Z correspondem ao valor absoluto da mistura de cada uma destas cores primárias necessárias para a comparação com uma das cores espectrais. As coordenadas de cromaticidade são representadas pelos valores de x, y e z, obtidos pelas equações $x = X/(X+Y+Z)$, $y = Y/(X+Y+Z)$ e $z = Z/(X+Y+Z)$. Para a representação gráfica do diagrama em duas dimensões, já que este é fundamentalmente tridimensional, as informações são apresentadas em função de x, y e Y. Como foi dito, x e y representam os

Capítulo 2- Fundamentos da Percepção da Luz

eixos responsáveis pelas quantidades relativas dos três pigmentos, logo, a terceira, o eixo z, é obtido pela diferença, uma vez que $x + y + z = 1$, ou seja, $z = 1 - x - y$. As coordenadas x, y e z correspondem às proporções de cada uma das três cores primárias (vermelho, verde e azul), necessárias para construir cada cor espectral. Sendo assim, as cores têm informações em três dimensões. Já o preto e o branco estão apenas no eixo Y, que representa o nível de luminância expresso em cd/m^2 .

Os fundamentos do CIE 1931 vêm sendo usados até os dias atuais, com algumas alterações, mas que mantêm seu fundamento, no entanto, com outras denominações. Isso mostra que o espaço de cores continua evoluindo com avanço em pesquisas que investigam a capacidade de absorção da luz pelos cones, através de métodos fisiológicos e psicofísicos.

Modelo Eletromagnético para a Luz

Permeando a construção do modelo adequado para a luz e todos os esforços em compreender o mecanismo da visão, estavam os avanços relativos ao início do eletromagnetismo.

Uma descoberta dá início à relação entre os conhecidos comportamentos elétricos e magnéticos. Hans Christian Oersted (1777-1851) verificou a alteração no apontamento da agulha de uma bússola posta ao lado de um fio metálico condutor, quando, através deste fio, era percorrida uma corrente elétrica. Este experimento une a eletricidade e o magnetismo como fenômenos de mesma origem, surgindo assim, o termo eletromagnetismo [Barthem 2005].

No caminho do desenvolvimento do eletromagnetismo, Michael Faraday (1791-1867) produziu enormes contribuições. Uma delas foi a verificação de que a reação da carga elétrica ao movimento de um ímã gera uma força perpendicular à velocidade de deslocamento deste ímã. E mais, aumentando-se a velocidade do ímã, sua interação com a carga também aumenta [Salveti 2008]. Ele também introduziu o conceito das linhas de força que foi muito importante e incorporado por diversos físicos da época. Essas linhas de força deram origem a outro conceito muito importante, o conceito de campo. Observou ainda que o campo magnético era capaz de girar a polarização de ondas luminosas ao atravessarem uma região magnetizada, o que levou Faraday a associar a luz com a radiação eletromagnética. Formulando matematicamente suas descobertas, criou o que ficou conhecido como a Lei de Indução de Faraday [Kítór 2009].

André Marie Ampère (1775-1836) também oferece sua contribuição, através da denominada Lei de Ampère [Kítor 2010], que relaciona a integral do campo magnético ao longo de uma curva fechada, com a corrente total que flui através de qualquer superfície dessa curva.

Coube a James Clerk Maxwell (1831-1879) reunir as leis já conhecidas na época para sua formulação matemática publicada em 1865 [Maxwell 1865]. Maxwell conclui que “a luz é uma perturbação eletromagnética na forma de ondas, que propaga-se por meio do campo eletromagnético, de acordo com as leis do eletromagnetismo”. Desta forma, através das equações de Maxwell estavam enunciadas as chamadas leis do eletromagnetismo, permitindo, inclusive, a dedução da velocidade da luz pelas constantes do eletromagnetismo.

Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) atestou as equações de Maxwell para outros tipos de ondas eletromagnéticas, que não a luz [Open Library Hertz 2010]. Seu experimento era composto de uma fonte e um receptor de ondas eletromagnéticas que mais tarde permitiu ao Marquês Guglielmo Marconi (1874-1937) a patente, em 1896, do uso das ondas eletromagnéticas na comunicação sem fio, que passaram a ser denominadas ondas de rádio [Barthem 2005].

A Figura 2.1.3 representa, graficamente, uma onda eletromagnética se propagando. O campo magnético oscila no eixo z e o campo elétrico no eixo y. A onda se propaga ao longo do eixo x.

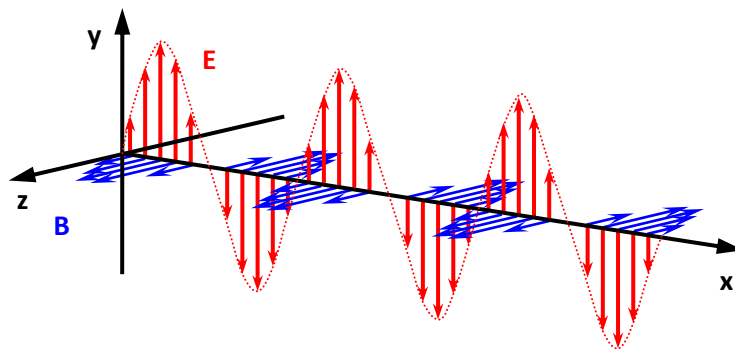


Figura 2.1.3 – A propagação de uma onda eletromagnética ao longo do eixo x. A componente magnética em azul e a elétrica em vermelho.

Os anos que se seguem são dedicados, em grande parte, ao estudo da teoria quântica da luz.

2.2 A Fisiologia do Olho Humano

O olho humano é capaz de detectar informações pela absorção de uma parte do espectro das ondas eletromagnéticas, isto é, a luz, cujas frequências são bem delimitadas. As ondas eletromagnéticas compreendem perturbações de ordem, ao mesmo tempo elétrica e magnética, e se propagam no espaço, com ou sem matéria. Isto a difere das ondas mecânicas que são perturbações na estrutura da matéria que se propagam no próprio meio material. A Figura 2.3.1 mostra a classificação de diversas faixas de frequências eletromagnéticas. Na extremidade da esquerda estão os raios cósmicos (que possuem maior frequência) e na extremidade da direita estão as frequências extremamente baixas, menores que as ondas de rádio. A tabela também mostra as mesmas faixas em termos de comprimento de onda, que é uma outra característica que a onda possui. Como as ondas eletromagnéticas, quaisquer que sejam as frequências, se propagam no vácuo à mesma velocidade de aproximadamente $c = 300.000 \text{ km/s}$, sabendo-se a frequência pode-se determinar seu comprimento de onda através da relação:

$$\lambda = \frac{c}{nf}$$

Onde f é a frequência, λ o comprimento de onda e n o índice de refração do meio. Portanto, para um mesmo meio, conhecendo-se a frequência pode-se determinar o comprimento de onda pela relação acima. Observa-se que frequência e comprimento de onda tratam-se de grandezas inversamente proporcionais.

Ainda, observando-se a Figura 2.3.1, pode-se ver em destaque a faixa do espectro visível ao homem. Uma pequena faixa entre o ultravioleta e o infravermelho, com comprimentos de onda situados entre 400 nm a 700 nm. Portanto, nossos olhos têm a capacidade de detectar apenas essa estreita faixa cuja interpretação fisiológica produz uma sensação de cores diferentes, que variam de acordo com a alteração do comprimento de onda. Para discriminá-las nomeamos cada pequena faixa destes comprimentos de onda com o nome de uma cor diferente. Para cada uma destas pequenas faixas há variações em intensidades e, para discernir essas cores, usamos uma outra nomenclatura ou uma nomenclatura complementar. Por exemplo: azul, azul céu, azul royal, azul marinho, assim por diante.

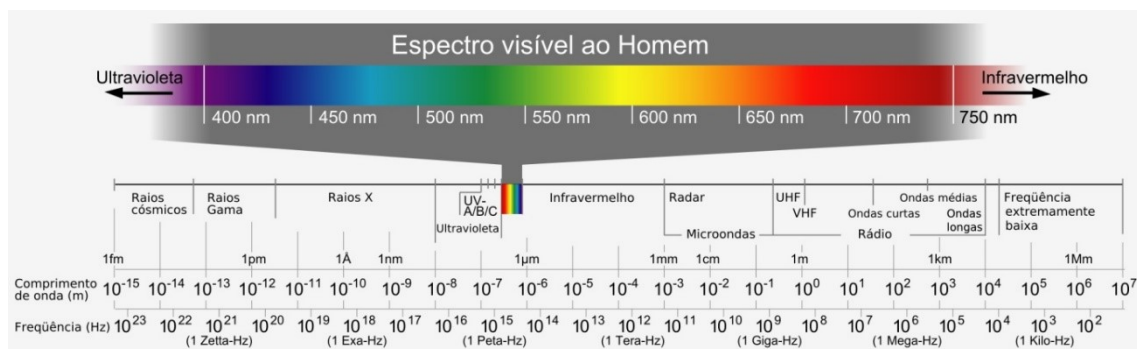


Figura 2.3.1 – Espectro eletromagnético dos raios cósmicos às frequências extremamente baixas. Em destaque, o espectro visível que compreende uma faixa que vai de 400 nm a 700 nm [Wiki-Espectro].

Para entendermos melhor como somos capazes de perceber essa parte do espectro, é necessário compreendermos a estrutura do nosso sistema visual. A física explica o que acontece até que a luz atinja a retina, no fundo dos nossos olhos. Após isso, a visão envolve processos neurais fotoquímicos e psicológicos, englobando, portanto, diversos campos da ciência. A Figura 2.3.2 ilustra algumas estruturas do olho humano.

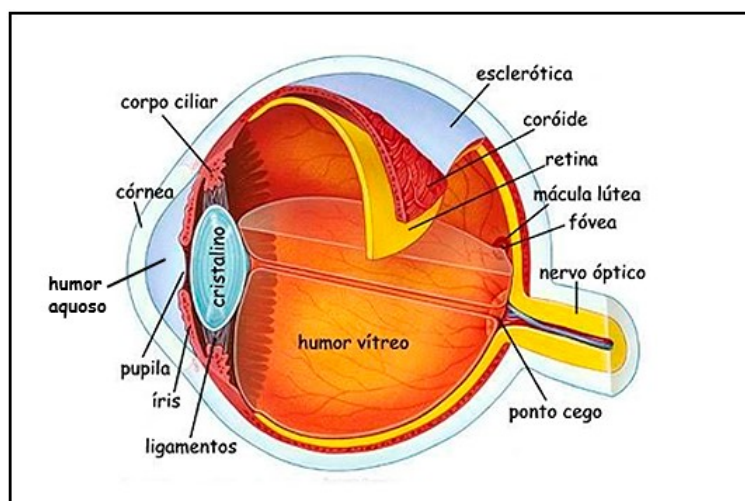


Figura 2.3.2 – Estruturas do olho humano [Cerpo 2016].

A luz penetra o olho através da córnea e atravessa o humor aquoso, chegando ao cristalino. O cristalino tem seu grau de vergência alterado através de ligamentos musculares que conseguem dilatá-lo ou comprimi-lo de acordo com a necessidade. Essa estrutura formada pela córnea, com dioptria fixa, e o cristalino, com dioptria variável, converge a luz, projetando-a na retina. A imagem formada na retina se apresenta invertida, como visto na Figura 2.3.3, e é o último fenômeno estudado pela física durante o processo. A partir daqui inicia-se o campo de estudo dos fenômenos bioquímicos e psicológicos, vistos aqui superficialmente.

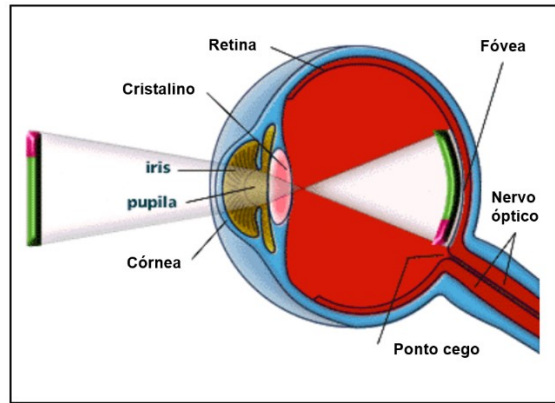


Figura 2.3.3 – Ilustração indicando a inversão da imagem na retina [Visão 2016].

Na retina encontramos dois tipos de células fotorreceptoras, denominadas cones e bastonetes. Há um local na retina, denominado fóvea ou mácula, que usamos para enxergar com mais acuidade, ou seja, para enxergar detalhadamente os objetos. O centro do campo visual projeta a imagem na fóvea onde há uma maior concentração de cones. Já na periferia da fóvea é projetada a imagem de nossa visão periférica. Nessa região há um maior número de bastonetes, que são responsáveis por nossa visão escotópica, permitindo-nos ver em condições de baixa luminosidade, mas com pouca acuidade, na periferia do campo visual como visto na Figura 2.3.4a.

Os bastonetes são células fotorreceptoras muito sensíveis a luminosidade e ficam mais ativas em ambientes com pouca iluminação. A ativação dos bastonetes, após exposição a luz muito intensa, não é imediata. Por isso, ao passarmos de um ambiente muito claro para um ambiente escuro ficamos quase que completamente cegos por algum tempo. Isso motivou o uso de tapa olho por comandantes de embarcações. Com um olho coberto, se o comandante precisasse sair do convés, exposto ao sol, e ir para o porão, local muito escuro no interior do navio, bastava inverter o tapa olho, cobrindo o que estava descoberto e destapando o outro. Os bastonetes do olho coberto, por estarem muito tempo sem exposição à luz, permitiam uma adaptação rápida a esse ambiente pouco iluminado, ao contrário do olho que estava exposto à luz.

Já as células fotorreceptoras denominadas cones, são responsáveis por nossa visão fotópica e se concentram em grande número na fóvea. Nessa região central do campo de visão os numerosos cones necessitam de uma intensidade de luz muito maior que os bastonetes para se ativarem. Sendo responsáveis por nossa visão em cores, essas células somente entram em operação em ambientes bem iluminados, logo, quando a intensidade da luz do ambiente sofre uma grande redução, perdemos a capacidade de distinguir cores.

A Figura 2.3.4b representa a visão fotópica que além permitir distinguir as cores, permite uma maior acuidade no centro do campo visual.

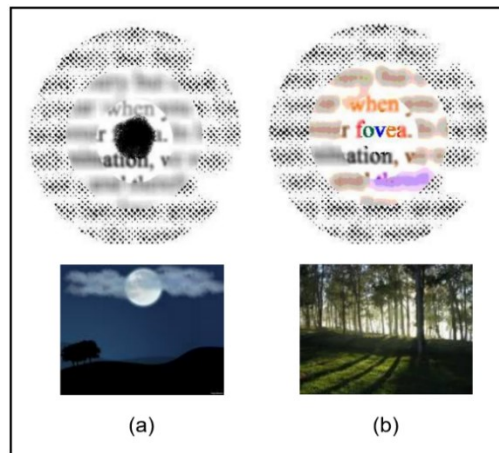


Figura 2.3.4 – (a) A visão escotópica ocorre na periferia do campo visual central quando o ambiente está pouco iluminado, sem definição de cores. (b) A visão fotópica está presente no centro do campo visual e permite distinguir cores. Extraído de [Nishida 2007].

A região da retina que se liga ao nervo óptico não possui células fotorreceptoras e, por isso, essa região é denominada de ponto cego. Essa região está indicada na Figura 2.3.2.

A Figura 2.3.5, é uma fotografia obtida através de microscopia eletrônica de varredura, apresentando as células fotorreceptoras contidas na retina de forma ampliada. Os cones são apresentados na cor verde e os bastonetes na cor bege. Va ressaltar que estas cores apresentadas na foto são artificiais, apenas para fins didáticos, não correspondendo à realidade.

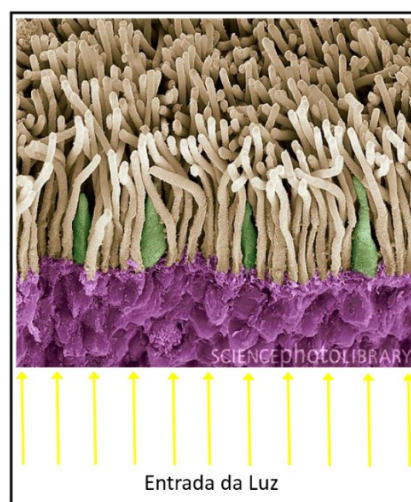


Figura 2.3.5 – Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura de uma região da retina. As estruturas em bege são os bastonetes e as estruturas verdes os cones. Em roxo a estrutura nuclear de ambas. As setas em amarelo indicam o sentido de penetração da luz. Imagem ampliada 1800 vezes [Science 2016].

Adentrando um pouco mais na estrutura do olho humano, observamos o esquema apresentado na Figura 2.3.6. A pequena região mostrada na Figura 2.3.6a é a fóvea, essa região aparece ampliada na Figura 2.3.6b, permitindo observar algumas camadas de células contidas na retina. Já na Figura 2.3.6c, um corte ampliado do tecido celular permite identificar com mais detalhes as camadas de células da retina e, na parte inferior desta figura, observam-se os bastonetes e cones. As cores das figuras têm fins didáticos não correspondendo à realidade.

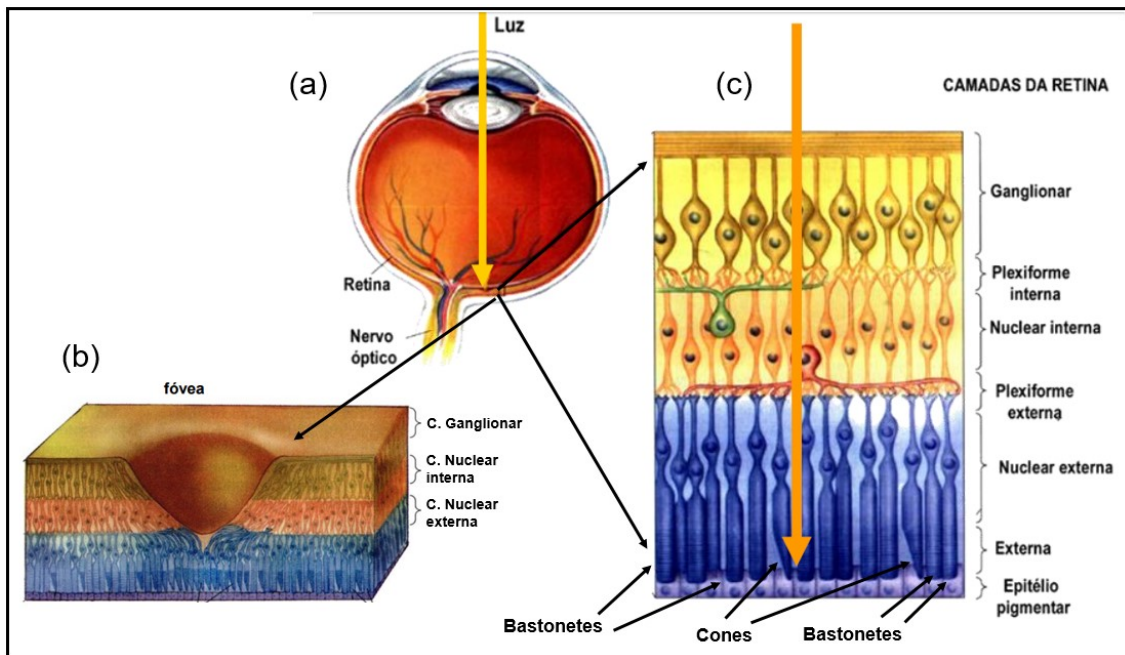


Figura 2.3.6 – Esquema do interior do olho humano. (a) Indicação da localização da fóvea na retina. (b) Observação da fóvea em um corte do tecido da retina. (c) Ampliação do tecido da retina na região da fóvea onde podem ser observados os bastonetes e cones. Retirado da referência [PlanBio 2011].

Os pigmentos sensíveis usados pelos cones e bastonetes são feitos de uma proteína denominada opsina e um cromóforo, o retinal, que é uma variante da vitamina A. Os fotopigmentos dos cones são denominados iodopsina. Já os fotopigmentos dos bastonetes, formados pela união da opsina escotopsina com o retineno, recebem o nome de rodopsina.

O máximo da intensidade da sensibilidade luminosa dos bastonetes situa-se em torno de 510 nm, enquanto que para os cones, na faixa de 560 nm.

A retina da maioria das pessoas possui três tipos de cones (pesquisas recentes encontraram mulheres com um quarto cone, amarelo [Jameson 2001]) com diferentes graus de sensibilização: vermelho, verde e azul. A proporção do número de cones varia de uma cor para outra, sendo que 64% destes são da cor vermelha, possuindo o

fotopigmento eritrolabe, conseguindo captar luz de comprimentos de onda na faixa entre 480 nm a 700 nm. Os cones verdes usam o fotopigmento clorolabe e representam 34% do total de cones em nossa retina, com faixa de captação luminosa entre 435 nm a 635 nm. Em menor número, com apenas 2% do total, estão os cones azuis, com fotopigmento cianolabe e sensíveis a comprimentos de onda luminosos na faixa entre 400 nm a 550 nm [Barthem 2005].

A transdução sensorial se inicia quando a luz incide na molécula 11-cis-retinal (Figura 2.3.7a), presente na opsina, através de um processo químico. Quando a luz atinge os fotorreceptores, esta molécula isomeriza-se, transformando-se em trans-retinal (Figura 2.3.7b). Essa transformação produz um impulso elétrico no fotorreceptor que é enviado ao cérebro para que este interprete esses sinais e componha a imagem que estamos presenciando. Após o envio do sinal ao cérebro, a molécula volta à configuração inicial, transformando-se novamente em cis-retinal através de um processo que utiliza a enzima retinal-isomerase, ficando assim de prontidão para reiniciar o processo. A primeira mudança cis → trans ocorre em alguns picossegundos (10^{-12} s), mas o processo que se segue, da geração do impulso elétrico, leva cerca de décimos de segundo (10^{-1} s) [Barthem 2005].

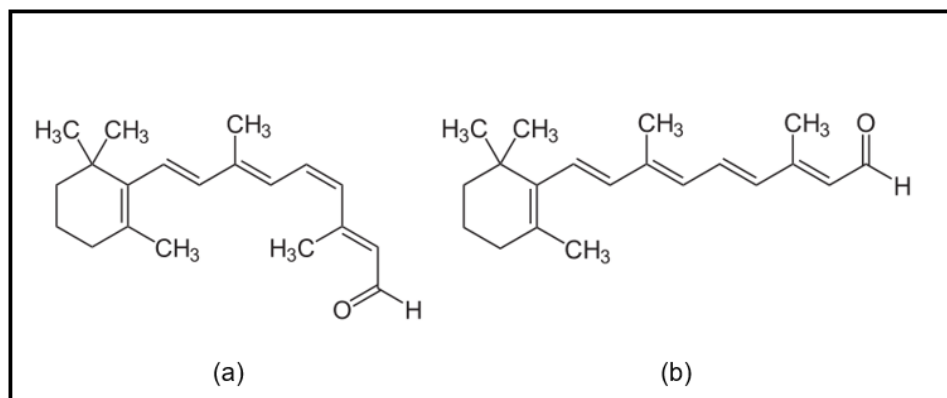


Figura 2.3.7 – Mudança física da molécula cis → trans. (a) molécula 11-cis-retinal. (b) Após a luz penetrar o fotorreceptor a molécula se transforma em trans-retinal.

Além dos aspectos físicos, químicos e biológicos, que vimos até aqui, enxergar envolve também fatores psicológicos e sociológicos. Além das cores terem efeito sobre nosso estado emocional, o contrário também pode acontecer. Por isso, empresas de marketing investem em desenvolver produtos e propagandas que despertem nossa atenção e atraia-nos ao consumo. Cada cor produz uma sensação através de uma associação que envolve toda a história do indivíduo. Essa história, construída ao longo da evolução

humana, reflete hábitos, costumes e interesses de uma determinada sociedade. A própria história da construção do nome de uma cor envolve esses aspectos que refletem características evolutivas de uma sociedade.

Então temos, por exemplo, a cor vermelha que está ligada à paixão. A cor laranja provoca uma sensação de alegria e euforia. Já o amarelo representa ciúme, doença, traição, indecência e desprezo, tendo sido utilizada, séculos atrás, para pintar a casa de ladrões, criminosos e traidores. Na China, a cor amarela é sagrada, significando a direção norte onde se encontram as fontes que levam ao reino dos mortos. Para os Cristãos, o amarelo significa a eternidade da fé. O verde é a cor que equilibra as emoções, despertando tranquilidade. Assim por diante, cada cor com seu significado e com variações para determinadas culturas [Santana 2016].

O contrário também é verdadeiro, ou seja, nossa percepção do mundo e conhecimento adquirido podem influenciar a leitura do que enxergamos, influenciando nossa discriminação das cores. Recentemente, em fevereiro de 2015, ocorreu um episódio, que correu as redes sociais, em que um vestido (Figura 2.3.8) era visto ora branco e dourado, ora azul e preto, tanto por pessoas diferentes, quanto pela mesma pessoa, em momentos diferentes.



Figura 2.3.8 – Este Vestido motivou uma série de debates sobre a interpretação das cores. Algumas pessoas o viam nas cores branco e dourado, outras nas cores azul e preto [Junior 2015].

O episódio mostra que nosso cérebro pode fazer leituras diferentes para uma mesma imagem, e isso pode depender de diversos fatores. No caso da foto, que foi tirada com uma máquina digital, nosso cérebro interpreta que a foto pode ter sido tirada em

Capítulo 2- Fundamentos da Percepção da Luz

ambiente pouco iluminado. Desta forma, a interpretação cerebral considera que, se o vestido estivesse sendo visto diretamente pelos olhos, em ambiente com boa iluminação, e não através da foto, deveria possuir vários tons mais claros. Sendo assim, a cor mais clara seria branco, e não azul. Para os que enxergam azul e preto, ocorre exatamente o contrário [Junior 2015].

Em se tratando da cor azul, em 1858, o estudioso e político britânico Willian Eward Gladstone (1809-1898), analisando publicações muito antigas, da civilização grega, como “A Odisseia”, percebeu que havia discrepâncias sobre as descrições das cores citadas. O preto, por exemplo, é citado 200 vezes, o branco 100 vezes e o vermelho 15. O amarelo e o verde, juntas, são citadas menos de 10 vezes e o azul não é citado. Dois anos mais tarde, Gladstone e o filósofo alemão Lazarus Geige analisaram textos antigos de outras culturas. Perceberam que a cor azul não era citada no Alcorão, nos livros de sagas irlandesas e nem mesmo na antiga versão hebraica da Bíblia [Pincelli 2011].

Em um artigo apresentado em uma conferência organizada pela Universidade de Goldsmiths em Londres, Reino Unido, no ano de 2005, o pesquisador Jules Davidoff apresentou resultados de sua pesquisa intitulada “Categorias de Cores como Construções Culturais” [Davidoff 2005]. Davidoff viajou para a Namíbia para realizar um teste com a tribo Himba. Esta tribo não possui um nome para a cor azul, apesar de ter inúmeras descrições para diferentes tons de verde. Em um dos testes o pesquisador apresentou um círculo formado por 12 quadrados verdes (parte superior da Figura 2.3.9), sendo um dos quadrados com um tom um pouco diferente, o que seria muito difícil para qualquer um de nós identificar. Entretanto, os habitantes da tribo não tiveram dificuldades em identificar o quadrado de tonalidade diferente de verde. Em uma segunda experiência, o pesquisador apresentou figura semelhante, com onze quadrados igualmente verdes, mas um dos quadrados na cor azul. Nenhum dos pesquisados conseguiu encontrar facilmente o quadrado azul, o que para nós seria facilmente identificado (parte inferior da Figura 2.3.9).

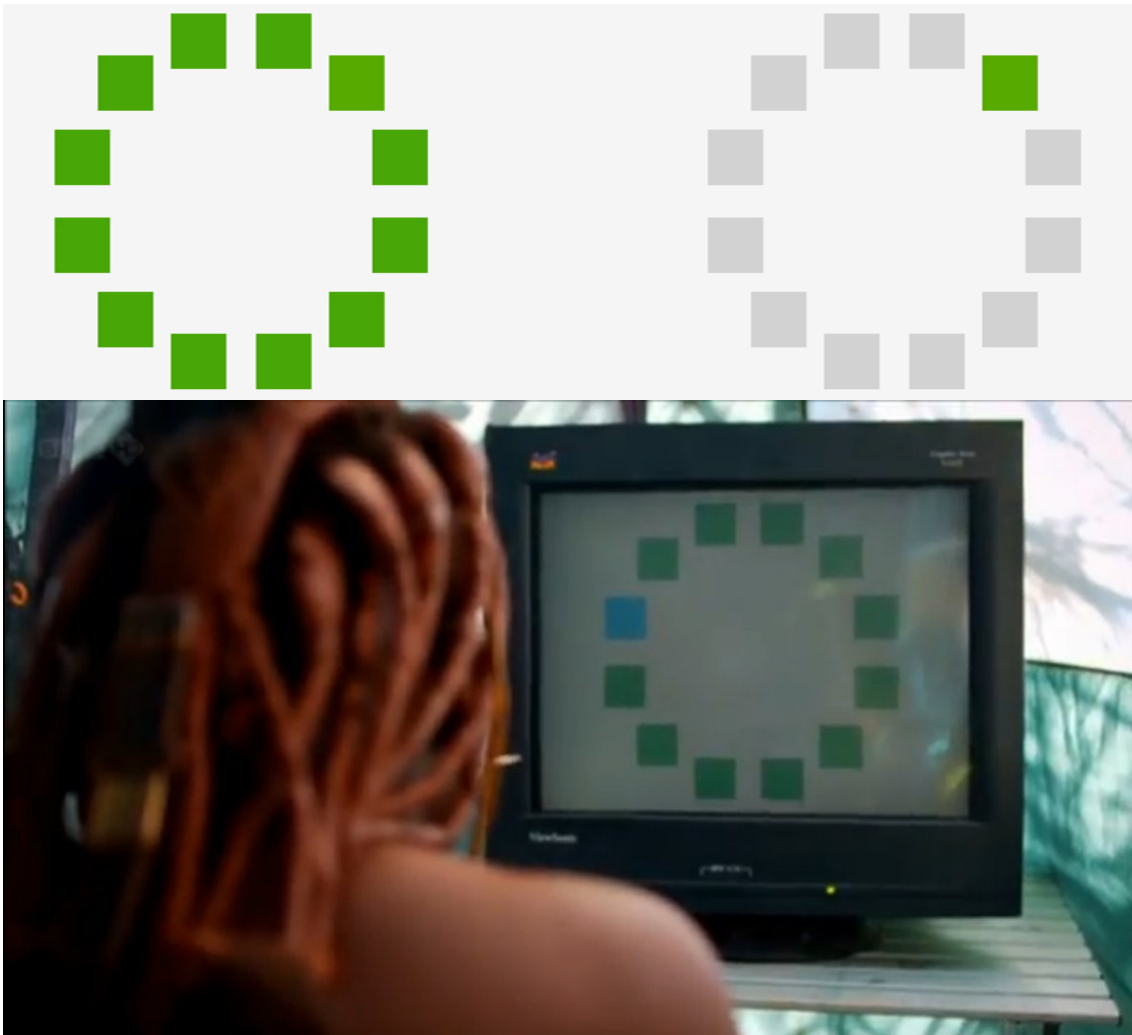


Figura 2.3.9 – Na parte superior a figura apresentada aos integrantes da tribo Himba, na qual um dos quadrados apresenta um tom de verde levemente mais claro. Na parte inferior o integrante da tribo de frente ao monitor observando uma figura na qual um dos quadrados é azul [Vidi-Himba 2013].

Analisando os resultados, Davidoff conclui que, apesar dos integrantes da tribo conseguirem enxergar a cor azul, essa cor, para sua cultura, não é importante, não pertencendo ao seu registro pictórico. Sendo assim, os nomes de cores significam coisas diferentes em diferentes culturas. Nós construímos o registro pictórico da cor azul e, por isso, os azuis parecem mais familiares a nós que para a tribo Himba [Davidoff 2005].

Para suas experiências, Davidoff recorreu a sua filha, Alma, que estava aprendendo a falar na época. Enquanto brincava com sua filha e lhe ensinava as diferentes cores, teve a ideia de tentar verificar o quanto é natural o azul na linguagem, para tentar entender as civilizações antigas, principalmente as que viviam no mar Mediterrâneo e que não deram um nome para a cor do céu. Ele ensinou a Alma todas as cores, inclusive o azul, tendo o cuidado de que nunca lhe dissessem qual era a cor do céu. Quando teve

certeza que Alma sabia identificar os objetos de cor azul, levou-a para fora de casa e perguntou-lhe qual era a cor do céu. Alma, que rapidamente respondia a tudo, levou muito tempo para responder, parecia não entender do que seu pai estava falando. Após algum tempo, com segurança, afirmou que era branco. Só muito tempo mais tarde, após ver cartões postais, em que o céu parecia azul é que passou a descrevê-lo com essa cor. Davidoff conclui afirmando que estamos constantemente construindo o mundo de cores e, de alguma forma, nossa estrutura de memória afeta o que estamos vendo [Davidoff 2005].

O neurologista Oliver Sacks descreve, em seu livro intitulado “Um Antropólogo em Marte” [Sacks 1995] o relato de um pintor de 65 anos de idade que sofreu uma lesão cerebral e perdeu a visão cromática, após um acidente de carro, o que na medicina se denomina acromatopsia cerebral. O denominado sr. I descreve sua vida após o trauma: “Meu cachorro marrom é cinza-escuro. Suco de tomate é preto. TV em cores é uma mixórdia...”. Após conhecer as cores, aquele mundo preto e branco lhe parecia repugnante. As pessoas pareciam ter virado “estátuas cinzentas” e os alimentos repulsivos devido a seu aspecto cinzento e morto. Ele relata ter de fechar os olhos para se alimentar e, ao se olhar no espelho, ficou avesso à própria imagem, tendo ainda perdido também a lembrança das cores que conhecia.

De um modo mais geral, a doença que provoca alteração na percepção das cores é denominada discromatopsia, tendo, na maioria das vezes, origem genética e pode ocorrer de várias maneiras. Em alguns casos, e muito raramente, pode ser adquirida ao longo da vida após uma lesão neurológica, como vimos, ou nos órgãos responsáveis pela visão. Os portadores desta anomalia estão divididos em três grandes grupos: os monocromatas, cuja visão se baseia na luminosidade, ou seja, são formadas imagens em tons de cinza; os dicromatas, que não possuem um dos três tipos de cone; os tricromatas anômalos, cujo pigmento dos fotorreceptores do cone sofreu mutação.

Há dois tipos de monocromatas, o monocromata típico, que nasceu com ausência de cones e enxerga fazendo uso de seus bastonetes e o monocromata atípico, que é o monocromata que possui apenas um dos três cones, sendo muito rara em humanos e mais comuns em alguns tipos de animais.

Os dicromatas podem ser de três tipos, dependendo do pigmento ausente, ou seja, se ele não possui os cones de comprimento próximo ao vermelho, é considerado um protanopo. Se não possui cones de comprimento de onda próximo ao verde, recebe o nome de deuteranopo. Tanto o protanopo quanto o deuteranopo terão dificuldades em

enxergar cores do seguimento verde-amarelo-vermelho do espectro. Há indivíduos que não possuem cones de comprimento de onda na faixa do azul, são os tritanopos.

A mutação relativa dos tricromatas anômalos podem ser também de três tipos. Os protanômalos, cujos cones sensíveis ao vermelho sofreram uma mutação em seu pigmento, resultando em deficiência na percepção do vermelho e escurecimento das cores em frequências mais longas. Os deuteranômalos que apresentam mutação nos cones sensíveis ao verde, dificultando a visualização desta cor. Por fim, há os tritanômalos cuja mutação ocorre nos cones sensíveis ao azul, resultando numa maior dificuldade em enxergar cores de baixo comprimento de onda, e nas cores da faixa entre azul-amarelo [Wiki-Dalto 2016].

Portanto, podemos perceber o quão complexo é nosso sentido da visão, envolvendo muito mais do que os elementos de aquisição de imagem. A vivência em sociedade influi diretamente para a valorização que damos para todas as coisas. O que também se faz presente quando produzimos tecnologias que despertem mais nossos sentidos. Isso pode ser verificado através dos inúmeros nomes que conseguimos atribuir a diferentes tonalidades de uma determinada cor, como o azul, por exemplo. No mundo natural, percebemos que há muito pouco de azul em frutas, minérios e animais, além do céu, é claro. Talvez por isso não tenha sido tão importante assim nomeá-la. Hoje, no entanto, segundo uma pesquisa mundial, a cor azul é tida como a favorita da maioria das pessoas [Jordan 2015], possuindo cerca de 111 tons diferentes nomeados, é também a cor mais usada em logo de empresas, segundo pesquisa da empresa Colour Lovers sobre as cem marcas mais importantes na web [Monsef 2010].

2.3 Do Semicondutor ao LED

A descoberta dos materiais semicondutores ocorreu devido ao desenvolvimento de um dos ramos da ciência denominado física do estado sólido. Entre os anos de 1930 a 1960 houve um salto no conhecimento técnico e científico a cerca dos semicondutores. Vale ressaltar que materiais semicondutores já eram conhecidos muito antes disso [Jenkins 2005]. Atribui-se a Alessandro Volta (1745-1827) o uso da palavra semicondutor, em um artigo lido diante da Royal Society em Londres, em 14 de março de 1782 [Volta 1782].

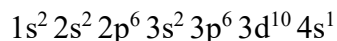
A partir dos semicondutores foi possível a produção de aparelhos eletrônicos cada vez mais funcionais e menores. Hoje os semicondutores podem ser encontrados em quase todos os equipamentos eletro-eletrônicos. Sua produção possibilitou a invenção dos computadores modernos que, cada vez mais, tornam-se menores e com maior poder de processamento. Basta ver que um celular hoje tem um poder de processamento comparável a um computador de dez anos atrás, com a diferença de poder ser levado no bolso, por ser pequeno e leve. Concomitantemente à evolução dos computadores, houve uma evolução nos sistemas de programação, evolução essa que continua acontecendo [Halliday 2012].

Um material pode ser considerado isolante, condutor ou semicondutor, de acordo com a distribuição dos elétrons na rede cristalina. Há também os supercondutores, que não serão tratados aqui. Nos sólidos cristalinos, devido à proximidade dos átomos, a estrutura atômica dá lugar a uma forma de rede cristalina em uma estrutura periódica e tridimensional. Na estrutura, os elétrons dos últimos orbitais ficam mais sujeitos à interação com os átomos vizinhos. Nessa interação os elétrons podem compartilhar os seus níveis de energia e deslocam-se ao longo do material.

Os sólidos possuem três características que os classificam sob o ponto de vista elétrico; a resistividade, o coeficiente de temperatura da resistividade e a concentração dos portadores de carga. Estas características distinguem os materiais condutores de eletricidade, que oferecem baixa resistividade e permitem facilmente a condução de eletricidade, dos materiais isolantes, ou seja, materiais que não permitem, sobre certas condições, a condução de corrente elétrica. Os materiais não isolantes podem ser divididos em metais e semicondutores, em função das três características citadas acima [Feynman 2008].

Níveis ou Bandas de Energia

Um átomo isolado, ou seja, a uma distância muito maior que suas próprias dimensões do átomo vizinho, possui seus elétrons distribuídos em subcamadas bem definidas. O cobre, por exemplo, possui a seguinte distribuição de seus elétrons:



A última subcamada 4s, que comporta até dois elétrons, no Cu apresenta apenas um. Considerando a interação com vários elétrons, como a que ocorre numa rede cristalina, as funções de onda dos átomos constituintes se superpõem fazendo com que os níveis energéticos dos átomos isolados formem bandas de energia. Essas bandas de energia são denominadas de bandas permitidas e são separadas, entre si, por bandas de energia denominadas de bandas proibidas por não conter níveis eletrônicos.

Portanto, em uma rede cristalina isolante, como pode ser visto na Figura 2.3.1a, há bandas permitidas (as representadas por retângulos) e bandas proibidas (região entre duas bandas permitidas). A energia das bandas aumenta de baixo para cima, conforme é indicado pela seta na figura. Ainda nessa figura, os retângulos pretos representam os níveis na banda ocupados por elétrons e o retângulo cinza, os níveis permitidos, mas desocupados. A distância entre a última banda ocupada e a banda desocupada é muito grande, o que significa que para os elétrons da última banda ocupada passarem para a banda superior desocupada, é necessária uma energia muito grande. A energia entre essas duas bandas permitidas é conhecida como *gap* de energia.

Nos metais, como pode ser observado na Figura 2.3.1b, os elétrons mais energéticos, ou seja, os da última camada, não ocupam completamente a última banda. Nessa última banda é representada na cor preta a porção ocupada por elétrons e em cinza a porção desocupada. Atribuímos uma energia $E = 0$ para a extremidade inferior da banda ocupada e a extremidade superior denomina-se energia de Fermi (E_F). Como a última banda não é completamente populada, há a possibilidade dos elétrons ganharem energia e atingirem níveis energéticos maiores que E_F , conseguindo assim um maior grau de liberdade para se deslocarem sobre a estrutura cristalina do metal. Dessa forma, quando um metal é submetido a uma diferença de potencial, os elétrons desta última banda conseguem ser acelerados, ultrapassando a energia de Fermi, e se deslocam pelo metal, característica necessária para um bom condutor de eletricidade. A última banda ocupada por elétrons é denominada banda de valência e a banda desocupada logo acima é chamada de banda de condução.

A estrutura do semicondutor é mostrada na Figura 2.3.1c, onde observamos que a distância entre a última banda ocupada, ou seja, a banda de condução, e a banda de valência é significativamente menor que no material isolante. Isto significa que a energia necessária para um elétron passar para a banda de condução E_g , é muito pequena, diferente do que ocorre com o isolante. Desta forma, ganhando energia térmica, os elétrons dos subníveis de maior energia têm uma probabilidade não desprezível de saltarem para a banda de condução. Os elétrons que conseguem passar para a banda de condução, deixam em seu lugar, na banda de valência, buracos. Os materiais semicondutores mais empregados são constituídos de átomos de silício e germânio [Feynman 2008].

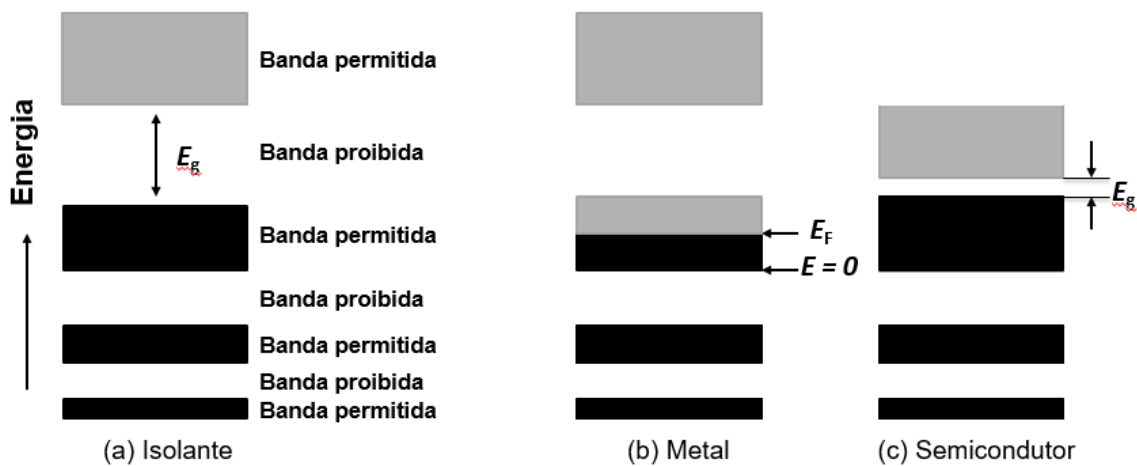


Figura 2.3.1– a) Diagrama de bandas de um material isolante. Observa-se que a banda de condução, o retângulo preto, está muito distante da banda de valência, retângulo cinza. b) No metal, o nível mais alto ocupado, fica no meio da banda. c) No semicondutor, a banda de valência fica muito próxima à banda de condução.

Dopagem de Semicondutores

Na Figura 2.3.2a podemos observar uma representação bidimensional da rede cristalina formada por átomos de silício. Estes átomos possuem, na banda de valência, quatro elétrons. São esses elétrons que participam das ligações entre os átomos, formando a estrutura cristalina da figura.

Dopar um semicondutor significa introduzir certo número de átomos, denominados como impurezas, em sua estrutura cristalina. A dopagem pode ser do **tipo n** ou do **tipo p**, dependendo do átomo que for adicionado ao semicondutor.

Na Figura 2.3.2b substituímos um átomo de silício por um de fósforo. Como o átomo de fósforo possui cinco elétrons na banda de valência, ou seja, um a mais que o átomo de silício, este elétron que “sobra” fica fracamente ligado ao átomo de fósforo,

podendo passar para a banda de condução, ao receber energia bem inferior a E_g . Dizemos que o átomo de fósforo é um doador, pois ele pode doar elétrons à banda de condução. Os semicondutores dopados com átomos doadores são denominados de semicondutores do tipo n, ou do tipo negativo, indicando que os elétrons formam a maioria dos portadores.

Na Figura 2.3.2c, um átomo de silício foi substituído por um de alumínio. O átomo de alumínio possui três elétrons na banda de valência, logo, fica faltando um elétron para completar a ligação com os átomos de silício vizinhos. Um elétron do átomo de silício, vizinho ao de alumínio, pode migrar ocupando a lacuna que havia no átomo de alumínio, deixando de onde saiu, outra lacuna. Essa lacuna pode “mover-se”, já que outro elétron de uma ligação covalente próxima pode passar a ocupá-lo. Dizemos, portanto, que o átomo de alumínio é um aceitador de elétron. Como neste caso o resultado prático é o deslocamento dos buracos, ao invés de elétrons, estes buracos é que são os portadores de carga. O buraco ou a falta de um elétron torna o portador de carga positivo, por isso dizemos que se trata de um semicondutor do tipo p, ou seja, positivo. A Figura 2.3.3 ilustra, esquematicamente, ambos processos de dopagem, tanto com o fósforo quanto alumínio.

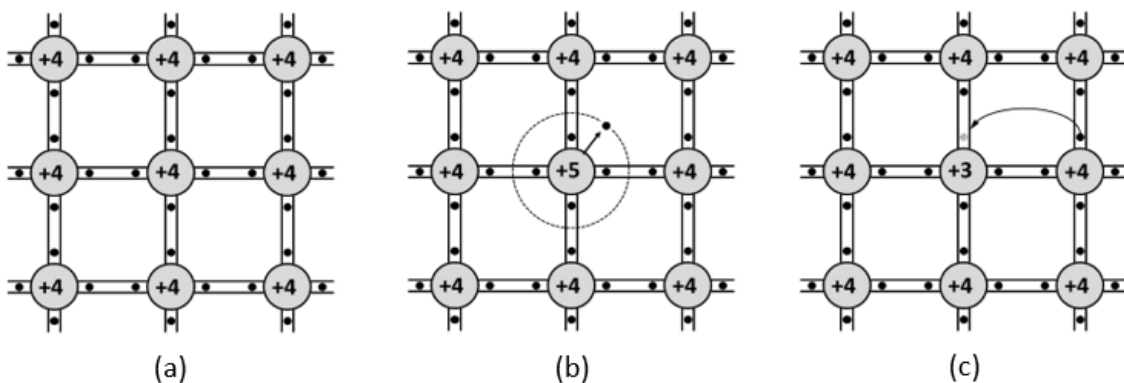


Figura 2.3.2 – a) Modelo bidimensional da estrutura cristalina de um semicondutor de silício. b) Semicondutor tipo n. Um átomo de silício foi substituído por um de fósforo, com cinco elétrons na banda de valência, logo um dos elétrons não participada das ligações covalentes. c) Semicondutor tipo p. Um átomo de silício foi substituído por um de alumínio que possui apenas três elétrons na banda de valência. O buraco deixado na ligação covalente pode ser ocupado por um elétron de outra ligação silício-silício.

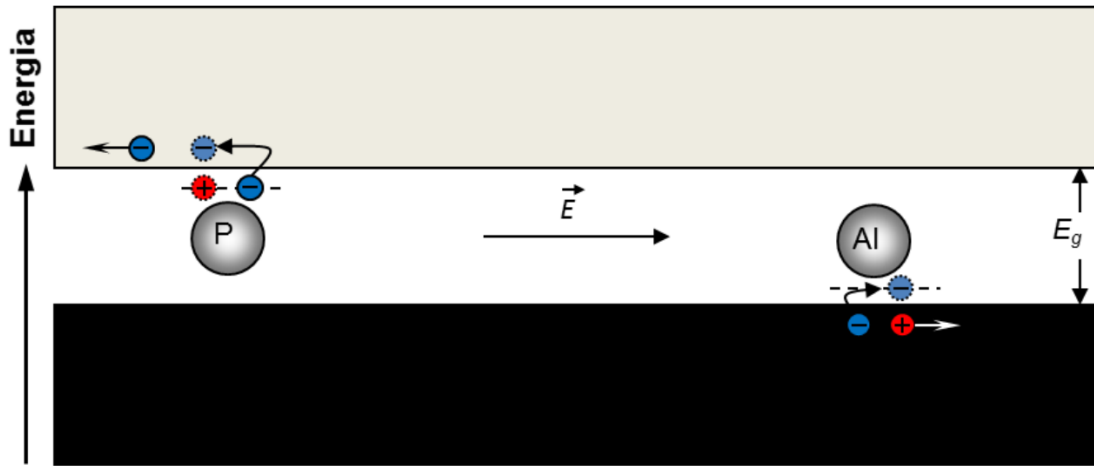


Figura 2.3.3 – Na dopagem com fósforo (P), o elétron “extra” está fracamente ligado ao átomo, o que significa que sua energia está próxima da banda de condução. Com a energia térmica esse elétron é transferido para a banda de condução e torna-se um portador de carga negativa (n). Na dopagem com alumínio (Al) ocorre o inverso. O seu nível desocupado está apenas um pouco acima do limite superior da banda de valência. Com isso um elétron pode ser capturado e no seu lugar cria-se uma vacância na banda de valência. Essa vacância, pela ausência da carga do elétron, atua como se existisse uma carga positiva no local e pode se deslocar na estrutura como um portador de carga positiva (p).

A utilidade em se dopar os materiais semicondutores está na possibilidade de se construir junções com os dois tipos de dopagem, as chamadas junções p-n. Em uma junção p-n, considerando plana a região delimitada pelos dois tipos de dopagem, no primeiro momento surge uma corrente de difusão, onde os elétrons migram para as regiões onde há lacunas e as lacunas migram para as regiões onde há excesso de elétrons. Portanto, na região de junção, ocorre a formação de uma área denominada de **zona de depleção**, pois, nessa região, quase não há cargas móveis. Nas extremidades dessa região, forma-se uma diferença de potencial de contato V_0 que interrompe a contínua passagem de elétrons e buracos pela junção [Halliday 2012].

O Diodo

Os diodos são construídos fazendo-se uso dessas junções p-n. Ao aplicar uma diferença de potencial em um diodo, com maior potencial no lado p e menor potencial do lado n, a chamada polarização direta, o diodo passa a se comportar como um condutor. Ao se fazer chegar uma diferença de potencial menor no lado p que no lado n, polarização inversa, há uma queda brusca na corrente que atravessa o diodo, ou seja, o valor da corrente tende a zero. Assim é produzido o dispositivo denominado diodo retificador.

Isso é possível, pois, apesar de no lado p haver uma maioria de portadores positivos, ou seja, buracos, há também uma pequena quantidade de elétrons, denominada portadores em minoria, e com cargas negativas. No lado n há também uma minoria de lacunas, que são de portadores positivos. A diferença de potencial de contato V_0 impede que os portadores maioria possam rompê-la deixando passar apenas os portadores em minoria, ou seja, elétrons do lado p e buracos do lado n [Feynman 2008].

O Diodo Emissor de Luz (LED)

Num semicondutor de silício ou germânio, quando um elétron da região inferior da banda de condução passa à região superior da banda de valência, preenchendo um buraco, uma energia E que cobre a do gap E_g é liberada com a emissão de um fóton na faixa do infravermelho. Nos semicondutores de arsenieto de gálio, entretanto, essa energia é liberada pela emissão de um fóton com comprimento de onda λ na faixa do visível. O comprimento de onda da radiação é obtido a partir da relação

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{c}{E/h} = \frac{hc}{E}$$

onde c é a velocidade da luz, f a frequência e h a constante de Planck.

A fim de se ter uma quantidade luz emitida suficiente para ser usada de forma útil, é necessário polarizar diretamente uma junção p-n fortemente dopada, como pode ser observado na Figura 2.3.4. A corrente I que atravessa o semicondutor serve para injetar elétrons do lado n e buracos do lado p. Com uma dopagem extremamente alta e uma corrente intensa, a zona de depleção fica muito estreita, permitindo inúmeras recombinações e produzindo uma boa intensidade luminosa. Na Figura 2.3.5 observamos a estrutura interna de um LED real padrão [Feynman 2008].

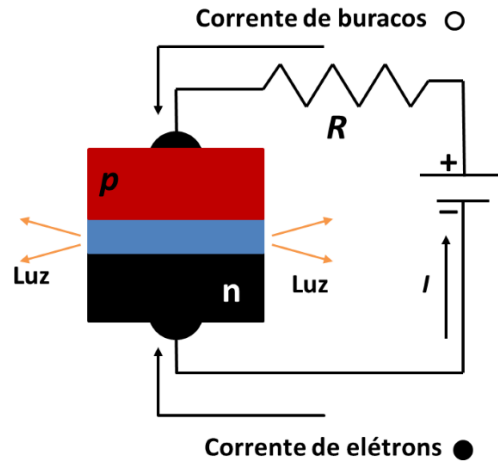


Figura 2.3.4 – Estrutura do LED. Junção p-n com polarização direta, ou seja, elétrons sendo injetados do lado n e buracos sendo injetados do lado p. A luz está sendo emitida próximo à zona de depleção, durante o processo de recombinação de elétrons e buracos.

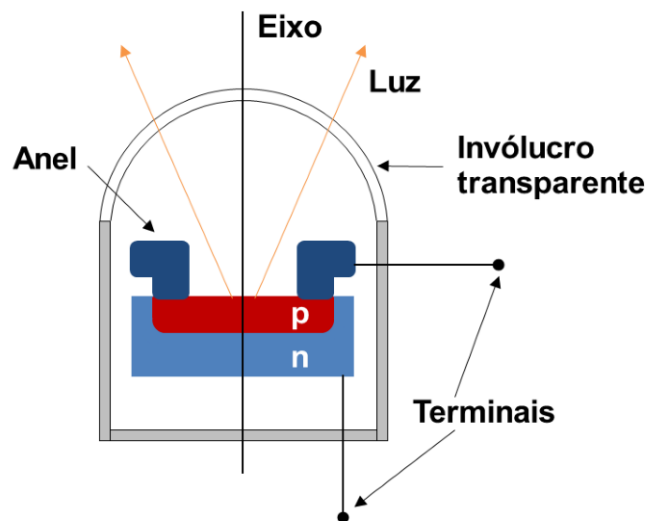


Figura 2.3.5 – Estrutura interna de um LED seccionado transversalmente ao seu eixo de simetria. O lado dopado positivamente, que aparece em vermelho, é suficientemente fino para que a luz possa atravessá-lo. Podemos observar as ligações elétricas nos lados p e n.

Uso do LED Como Célula Fotovoltaica

Para compreender como a o LED pode se comportar como célula fotovoltaica é necessário observar novamente a Figura 2.3.5. O que ocorre se iluminarmos a junção p-n com luz seguindo a direção inversa à da figura, ou seja, iluminando a junção semitransparente p?

Como a luz é composta por fótons de diferentes frequências e, considerando o fato de sua energia ser quantizada de acordo com a relação $E = hf$, ocorre que a energia do fóton será tanto maior quanto maior for sua frequência (já que é proporcional ao produto

de sua frequência com a constante h , a constante de Planck). Quando esse fóton atinge a junção (Figura 2.3.6a) ele pode ser absorvido por um elétron da banda de valência. Para isso ocorrer é necessário que a energia do fóton seja maior que a diferença de energia entre as bandas de valência e condução, ou seja, E_g . Recebendo essa energia (Figura 2.3.6b), o elétron salta para a banda de condução, estando, portanto, “livre”. Esse elétron deixa em seu lugar um buraco.

Aumentando a incidência de fótons com a energia necessária para formar pares elétron-buraco, e devido à presença de átomos dopantes, ocorrerá o deslocamento de elétrons da banda de condução em direção à junção n. Os buracos da banda de valência se deslocarão para a região p. Se fecharmos o circuito com um fio, juntando o anodo e o catodo do LED, surgirá uma corrente elétrica se movendo da região com maior concentração de elétrons para a região com maior escassez destes, da mesma forma que ocorre em uma pilha [Alves 2008]. Portanto, é natural supor que o LED azul seja capaz de produzir maior ddp em seus terminais quando iluminados por uma luz de mesma cor. Esse princípio, que verificamos não ser totalmente correto, será usado em uma de nossas experiências, na tentativa de produzir um experimento que simule a visão cromática do olho humano.

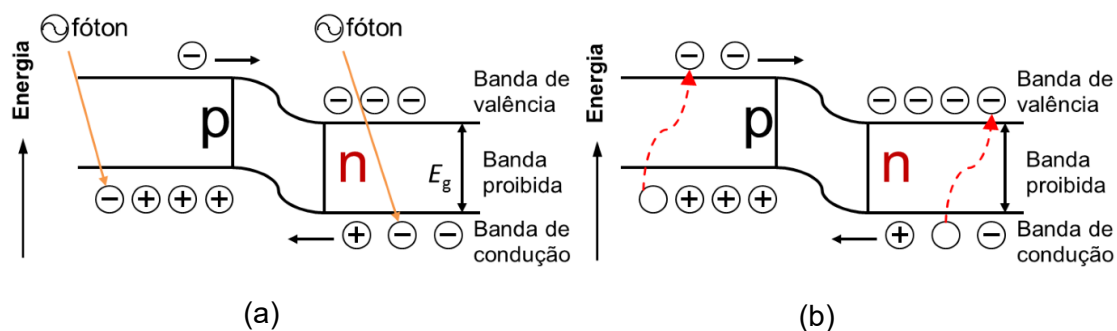


Figura 2.3.6 – a) Ao se iluminar o LED, fótons atingem elétrons da banda de condução que é muito fina e semitransparente. b) Se a energia do fóton for igual ou maior que a energia E_g , o elétron que absorvê-la será capaz de saltar para a banda de condução logo acima. Ao passar para a banda de condução esse elétron será conduzido para o lado n, deixando em seu lugar um buraco. Os buracos são conduzidos para o lado p.

Capítulo 3

Aspectos Didáticos

Os diferentes estudos e experimentos desenvolvidos neste trabalho devem se alinhar às abordagens didáticas necessárias à sua implementação. Não que haja apenas uma forma de abordar um conceito ou experimento, mas, tendo conhecimento de diversos tipos de referenciais teóricos, o professor pode escolher, de acordo com vários fatores, como a estrutura da escola, tempo disponível, entre outras, a que melhor se adapte à sua realidade.

3.1 Práticas Experimentais no Ensino de Física

A rotina das aulas tradicionais, em que o professor se utiliza apenas da lousa e de sua voz para “transmitir ao aluno seus conhecimentos” pode ser muito desgastante, tanto para o estudante quanto para o professor. Entretanto, hoje há muita pesquisa em ensino e torna-se cada vez mais necessário que o professor busque sua atualização e tenha uma postura reflexiva diante de sua atividade docente.

Uma alternativa a ser implementada em sala de aula, ou no laboratório, quando houver estrutura disponível, é a prática experimental. Este tipo de atividade surgiu nos currículos escolares no século XIX, entretanto, nem todos os professores têm familiaridade em trabalhar com ela. Alguns tipos de atividades experimentais são muito estruturadas e com guias que o estudante deve seguir à risca, desenvolvendo muito pouco a troca de ideias significativas sobre o fenômeno estudado.

Impactantes avanços ocorreram nas décadas de 1960 e 1970 com vários projetos desenvolvidos para o ensino de Física. Podemos citar o *Physical Science Study Committee* (PSSC), que foi traduzido e implementado no Brasil e continha diversas aulas experimentais [Carvalho 2011].

Dentre as pesquisas desenvolvidas na época, destaca-se o trabalho de Pella [Pella 1969], que atribuiu vários graus de liberdade intelectual que eram proporcionados aos estudantes de acordo com o manual usado na atividade de laboratório. Essa graduação ia de Grau I a Grau V, de acordo com a divisão de tarefas atribuídas aos estudantes e ao professor. Comparando uma atividade experimental com a Tabela 3.1.1, podemos verificar em que nível esta atividade se encontra [Pella 1969].

	GRAU I	GRAU II	GRAU III	GRAU IV	GRAU V
Problema	P	P	P	P	A
Hipóteses	P	P	P	A	A
Plano de trabalho	P	P	A	A	A
Obtenção de dados	A	A	A	A	A
Conclusões	P	A	A	A	A

Tabela 3.1.1 – Graus de liberdade do professor/aluno em aulas de laboratório.

O Grau I de liberdade refere-se à atividade experimental em que o estudante tem apenas a liberdade intelectual para obter os dados, todo o restante é trabalho atribuído ao professor. Desta forma, o problema, as hipóteses, o plano de trabalho e, inclusive as conclusões sobre os dados obtidos já são fixados. Serve apenas para demonstrar se a teoria estava certa o que acaba provocando sua manipulação por parte dos estudantes, para se adequarem ao embasamento teórico. Significa o menor grau de liberdade possível, pouco contribuindo para o desenvolvimento intelectual do aluno.

No Grau II de liberdade, além da obtenção dos dados, os alunos devem chegar às suas próprias conclusões a partir deles. Esse tipo de atividade requer que o professor cobre do aluno uma postura um pouco mais reflexiva, já que deve basear sua conclusão no conceito físico envolvido, comparando seu resultado experimental com a previsão teórica.

A partir do Grau III, o plano de trabalho passa a ser responsabilidade do estudante, ou um grupo de estudantes. A partir do plano de trabalho eles irão colher os dados e elaborar uma conclusão. Esse tipo de atividade foi muito explorada nos PSSCs.

No Grau IV o professor entrega aos alunos o problema em que eles devem desenvolver todo trabalho intelectual e operacional.

Já o Grau V de liberdade se caracteriza quando o problema inclusive é proposto pelos estudantes, que serão responsáveis também por todos os demais procedimentos, chegando, no final, a uma conclusão [Carvalho 2011].

A construção de atividades experimentais deve levar em conta diversos fatores acerca das estruturas da escola e do nível intelectual e de comprometimento dos alunos. A implementação destas atividades deve ser gradual, partindo das atividades de Grau I e progredindo para os Graus superiores de acordo com a evolução da turma.

3.2 *Ensino por Investigação*

O Ensino por Investigação retrata o próprio desenvolvimento científico, fazendo com que o estudante participe do conhecimento como protagonista, da mesma forma como trabalha um cientista. Apresentando aos alunos os problemas que devem ser resolvidos, seguindo a mesma sequência utilizada no método científico. As investigações podem se basear em práticas de laboratório ou problemas de lápis e papel. Hodson esclarece o que é uma atividade investigativa:

“São atividades nas quais os estudantes utilizam os processos e métodos da Ciência para investigar fenômenos e resolver problemas como meios de aumentar e desenvolver seus conhecimentos, e fornecem um elemento integrador poderoso para o currículo. Ao mesmo tempo, os estudantes adquirem uma compreensão mais profunda da atividade científica, e as investigações tornam-se um método tanto para aprender Ciência como aprender sobre a Ciência” [Hodson 1992].

Separar atividades de resoluções de problemas, teoria e aulas práticas, pode fazer com que os alunos acabem com uma visão deformada do que é ciência, já que todas estas atividades se relacionam de forma coerente e interdependente na realidade de um cientista [Azevedo 2004].

Para contornar as dificuldades iniciais dos estudantes durante a implementação das atividades investigativas, é necessário grande esforço por parte do professor em compreender o raciocínio dos estudantes ao longo da atividade, “para que sejam estabelecidas metas curriculares e formas viáveis visando promover seu pensamento científico” [Gomes 2008].

O ensino de Física através de atividades experimentais, em laboratório ou mesmo em sala de aula, criam a oportunidade para que o estudante atue como agente da construção do seu conhecimento, tendo o professor um papel de guia e não transmissor do saber. “O objetivo é levar os alunos a pensar, debater, justificar suas ideias e aplicar seus conhecimentos em situações novas, usando os conhecimentos teóricos e matemáticos” [Azevedo 2004].

Nas atividades investigativas o processo é tão importante quanto o produto, já que por meio destas atividades os estudantes participam da integração entre o pensar, o sentir e o fazer. Durante o processo de pensar sobre sua prática, o aluno constrói sua autonomia, reconhecendo o problema e criando estratégias para seu enfrentamento.

Capítulo 3

Outro aspecto que torna a prática da atividade investigativa uma alternativa importante para o ensino de ciências é o envolvimento emocional do aluno, “pois ele passa a usar suas estruturas mentais de forma crítica, suas habilidades e também suas emoções” [Azevedo 2004].

As qualidades do professor que pretende fazer uso da atividade investigativa, além do seu conhecimento sobre a matéria que está ensinando, são: uma postura questionadora que deve exibir diante dos alunos, a prática em argumentar e saber conduzir perguntas, estimulando e criando desafios.

As atividades investigativas podem ser introduzidas através de diferentes práticas, nas quais os experimentos propostos neste trabalho podem se basear:

Demonstrações Investigativas

Essas demonstrações podem partir da apresentação de um problema ou fenômeno a ser estudado, levando à investigação a respeito desse fenômeno. Sendo o problema proposto à classe pelo professor, este procura verificar qual o conhecimento prévio que possuem, seja intuitivo ou do senso comum. A partir daí o professor vai construindo a elaboração do conceito, partindo do saber cotidiano ao saber científico, por meio da investigação do fenômeno.

Tendo sido feita a formulação do problema, o próximo passo é a discussão geral em sala de aula para que, em seguida seja feita a demonstração. Segue-se uma nova discussão sobre o que foi observado e os conceitos científicos envolvidos.

As demonstrações investigativas permitem uma percepção das concepções espontâneas do aluno ao longo do processo, valoriza a interação do aluno com o objeto de estudo e com toda a classe, possibilita a criação de conflitos cognitivos, aproximando a aula de uma atividade de investigação científica [Azevedo 2004].

Laboratório Aberto

Esta atividade também busca a resposta a um problema que, neste caso, será respondida através de uma questão. Os seis passos a serem seguidos são: A proposta do problema, levantamento de hipóteses, elaboração do plano do trabalho, montagem do arranjo experimental e coleta de dados, análise dos dados e conclusão.

Questões Abertas

São questões do dia a dia do aluno cujas explicações estejam ligadas a conceitos discutidos em aulas anteriores. Através destas atividades será desenvolvida a

argumentação do aluno através de uma redação. O aluno deverá mostrar o domínio da norma culta da língua portuguesa, utilizando-se da linguagem científica para aplicação dos conceitos. Deverá organizar esses conceitos para enfrentar as situações-problema através de conhecimentos de situações concretas, construindo assim, argumentações consistentes [Azevedo 2004].

Problemas Abertos

Nos problemas abertos as situações apresentadas são discutidas com a classe, desde as condições de contorno a possíveis soluções, levando à formulação matemática do resultado, diferentemente das questões abertas.

Sendo uma atividade bastante demorada, os problemas abertos devem envolver uma problematização interessante ao aluno, abordando preferencialmente a relação CTS (Ciência, Tecnologia e Sociedade). Os estudantes deverão elaborar hipóteses discutindo o que, de fato, influi no resultado e testando assim suas hipóteses [Azevedo 2004].

O papel do professor é de coordenar as discussões, sem apresentar respostas. Assim que os estudantes alcancem os conceitos envolvidos, a próxima etapa é a proposição de exemplos mais concretos, talvez numéricos, para que, os estudantes possam resolver as questões, inclusive algébricas, se for o caso.

3.3 Uso de Analogias no Ensino

As analogias são frequentemente usadas no ensino de Física, sem que haja, na maioria das vezes, um estudo sistemático por parte do professor para que possa haver mais segurança em sua implementação. “Apesar de recorrerem às analogias em suas explicações várias vezes, muitos professores não têm uma ideia clara sobre analogias e muito menos sabem utilizá-la de forma correta na sala de aula” [Rigolon 2011].

De fato, a utilização de analogias deve ser implementada seguindo muitos cuidados, o que geralmente não acontece. A consequência desse mau uso é tão preocupante que Bachelard [1996] afirma:

“Uma ciência que aceita as imagens é, mais que qualquer outra, vítima das metáforas. Por isso, o espírito científico deve lutar sempre contra as imagens, contra as analogias, contra as metáforas.”

Portanto, é preciso cuidado para que as analogias não reforcem falsas associações, levando os estudantes a desenvolverem erros conceituais.

As metáforas diferem das analogias por serem analogias condensadas que não permitem apresentar um mapeamento entre os domínios estudados de forma clara e explícita [Rigolon 2011]. As analogias configuram-se em comparações que os professores fazem entre domínios diferentes, usadas para comunicar conceitos abstratos novos, permitindo a transferência de conhecimento de uma área para outra.

Seis passos podem ser seguidos ao se ensinar analogias: 1) Introduzir o assunto alvo; 2) Sugerir o análogo; 3) Identificar as características relevantes do análogo; 4) Mapear similaridades entre análogo e alvo; 5) Estabelecer as diferenças entre os dois domínios; 6) Esboçar conclusões [Glynn 1994].

Logo, é muito importante ser feita uma seleção cuidadosa do análogo, levando-se em conta sua acessibilidade cognitiva, de acordo com o perfil dos estudantes em que será empregada. Dentro de um ambiente interativo, o professor pode propor a discussão da própria analogia, mostrando ao estudante outros caminhos para se chegar a correspondência análoga, inclusive construindo com o próprio aluno uma nova analogia [Duarte 2005].

3.4 Física e Arte

Com o objetivo central de atingir os alunos, grande parte do Ensino Médio, que não se sentem motivados ao estudo da física, surge a proposta de usar a arte como aliada. A literatura, música, poesia, pintura, cinema, enfim... as expressões artísticas de um modo geral, influenciam e são influenciados pelo desenvolvimento científico.

A literatura, por exemplo, é muito rica e pode ser explorada em aulas de ciências. Grandes escritores da literatura universal fazem uso de conceitos físicos em sua obra. Temos também, as obras originais científicas como, por exemplo, trechos dos Diálogos e Discursos, de Galileu, A Máquina do Tempo, de H. G. Wells, Evolução da Física, de Einstein e Infeld e trabalhos de divulgação de Landau, Bohr, Feynman e também de Einstein [Zanetic 2002].

Durante o IX SNEF (1991), Zanetic já discutia a possibilidade de integrar a física com a literatura, música, cinema e com as artes plásticas. Muito antes disso, o físico e escritor inglês Charles P. Snow (1905-1980) já defendia que uma aproximação entre os dois universos intelectuais era essencial para possibilitar um eficaz diálogo inteligente com o mundo. Snow afirma que a capacidade de reflexão e entendimento do mundo exige que o cidadão domine o discurso da modernidade, sendo a ciência um dos seus pilares mais importantes [Zanetic 2002].

Muitos poetas incluíram em suas obras pensamentos científicos de sua época, entre eles, Dante, Camões e John Milton. No caso de Milton, em sua obra *O Paraíso Perdido* [Milton 1667], chega a citar nominalmente Galileu 3 vezes ao longo do poema. Outros poetas criticam a ciência pois, segundo eles, ela estaria destruindo a poesia, como John Keats (1795-1821) que reclamou que Newton destruía a poesia do arco-íris explicando-o. O título do poema, em inglês, é *Lamia*, do ano de 1819, visto a seguir [Keats 1884]:

Lamia – Parte II

War on his temples. Do not all charms fly
 At the mere touch of cold philosophy? 230
 There was an awful rainbow once in heaven:
 We know her woof, her texture; she is given
 In the dull catalogue of common things.
 Philosophy will clip an Angel's wings,
 Conquer all mysteries by rule and line, 235
 Empty the haunted air, and gnomed mine—
 Unweave a rainbow, as it erewhile made
 The tender-person'd Lamia melt into a shade.

Tradução Livre

Guerra nos seus templos. Nem todos os encantos se vão
 Ao mero toque da fria filosofia? 230
 Existia um maravilhoso arco-íris no firmamento:
 Conhecemos sua trama, a sua textura, aparece
 No frio catálogo das coisas comuns.
 A filosofia podará as asas de um Anjo,
 Decifrará os mistérios por instrumentos, 235
 Esvaziará o encanto do ar e o tesouro escondido –
 Desvendará o arco-íris, como se ele fosse construído
 A pessoa gentil iria Lamia derreter em uma sombra.

Observamos que Keats estava errado, pois, de fato, a ciência não conseguiu destruir a magia por trás deste fenômeno e outros mais. Isso pode ser constatado pois até hoje vemos filmes, desenhos e publicidades usando o encanto deste fenômeno para despertar emoções. Ainda se busca o pote de ouro imaginário atrás do arco-íris.

Apesar de muitos autores criticarem o uso de obras de ficção científica em suas aulas, há muitas obras que, tomando os devidos cuidados, podem trazer uma experiência positiva. Por exemplo, “A viagem ao redor da Lua” [Verne 2005] de Júlio Verne pode ser implementada para discutir com os alunos a velocidade de escape e mostrar a forma que o projétil é lançado no livro. Com as condições de atrito e o calor gerado o mesmo não poderia chegar à Lua. Em um primeiro momento seria introduzida a teoria e feitos os cálculos. Em um segundo momento, o professor apresentaria o livro para, em seguida,

fazer as devidas considerações sobre tais impedimentos físicos à obra de ficção. Desta forma, o professor estaria lidando com a ficção científica de modo inteligente [Zanetic 2002].

3.5 Ciência Tecnologia e Sociedade

A ciência, o progresso científico-tecnológico, tem hoje o poder de modelar e modificar nossas vidas, por isso devemos refletir criticamente sobre as relações entre tecnociência, poder e democracia. Para responder o que seria uma abordagem CTS, no ensino, recorreremos a Garcia Palacios et al [Palacios 2003]:

“A expressão “ciência, tecnologia e sociedade” (CTS) procura definir um campo de trabalho acadêmico cujo objeto está construído pelos aspectos sociais da ciência e da tecnologia, tanto no que concerne aos fatores sociais que influenciam na mudança científico-tecnológica, como no que diz respeito às consequências sociais e ambientais”.

Há uma necessidade de se reformular o estudo da tecnociência reconciliando os valores e a cultura democrática de forma mais humanista, ou seja, a democracia deve mediar a tecnociência e o poder, já que esta pode ser considerada um tipo de estrutura social que nem sempre converge com valores éticos numa cultura democrática e humanista. Essa falta de convergência tem seu início com o surgimento da ciência industrial, a dependência de decisões políticas em relação ao conhecimento científico bem como o crescente distanciamento entre o governo e os cidadãos [Santos 2011].

Ao longo da história, as relações entre tecnociência e poder, nos últimos 25 séculos, mudaram de foco. Desde a antiguidade grega, onde a ciência reformava a teologia; o renascimento, onde predominaram as visões cosmológicas e humanizadas do homem; passando pela revolução industrial, onde a ciência e a tecnologia despontam como nova face do poder social e político; chegando a segunda guerra mundial, momento no qual se estima que 45% dos cientistas estavam envolvidos com pesquisas militares, onde também a ciência internacionaliza-se e passa a ser um reator reproduzidor do poder; e quando começa a trabalhar com a matéria viva, fazendo crescer os aspectos ligados a ética.

Com o avanço da tecnociência, cada vez mais, torna-se necessária a participação da sociedade nas decisões sobre como tais avanços podem influenciar nossas vidas, portanto, urge a necessidade de capacitar o cidadão formando uma cultura científica a serviço da democracia. O que costuma ocorrer, ao contrário, é uma exclusão dos cidadãos

das verdadeiras decisões, relegando-lhes a participação de discussões apenas quando as decisões mais importantes já foram tomadas.

Algumas sugestões podem apontar um caminho em direção a uma maior participação da sociedade, entre elas:

(1) A necessidade de uma maior transparência no discurso político, cabendo a sociedade o trabalho de tentar expô-lo.

(2) A necessidade de ética no serviço público, onde as decisões devem ser tomadas levando em conta prazos que extrapolam seu mandato.

(3) Estabelecer limites de poder para os políticos e para os cientistas; criar órgãos de cooperação internacional a fim de favorecer países menos desenvolvidos.

(4) Melhorar a difusão da ciência pelos meios de comunicação em massa, melhorando inclusive a formação dos jornalistas e o formato de difusão.

(5) Oferecer uma educação em ciência de qualidade que permita uma visão de mundo que vá além do senso comum, incluindo uma abordagem CTS na organização do ensino e a necessidade de contribuir para a formação de cidadãos capazes de compreender e questionar a ciência dentro do contexto histórico-social em que vivemos [Santos 2011].

Capítulo 4

A percepção do Espectro Eletromagnético

4.1 Analisando o Espectro Luminoso

4.1.1 Um Arco-Íris em Uma Gota d'Água

Para o desenvolvimento dos experimentos descritos nos próximos capítulos, foram utilizados os equipamentos do Laboratório de Óptica dos Sólidos do IF-UFRJ. Foram remontados os experimentos com prismas de vidro, como fez Newton, só que utilizando a luz de uma lâmpada halógena no lugar da luz solar para maior praticidade. Pudemos observar a decomposição da luz branca em várias faixas que representam as cores do espectro emitido por essa lâmpada halógena e que correspondem, com boa aproximação, às cores observadas por Newton usando o Sol como fonte luminosa. A montagem experimental e o resultado podem ser vistos na Figura 4.1.1.1.

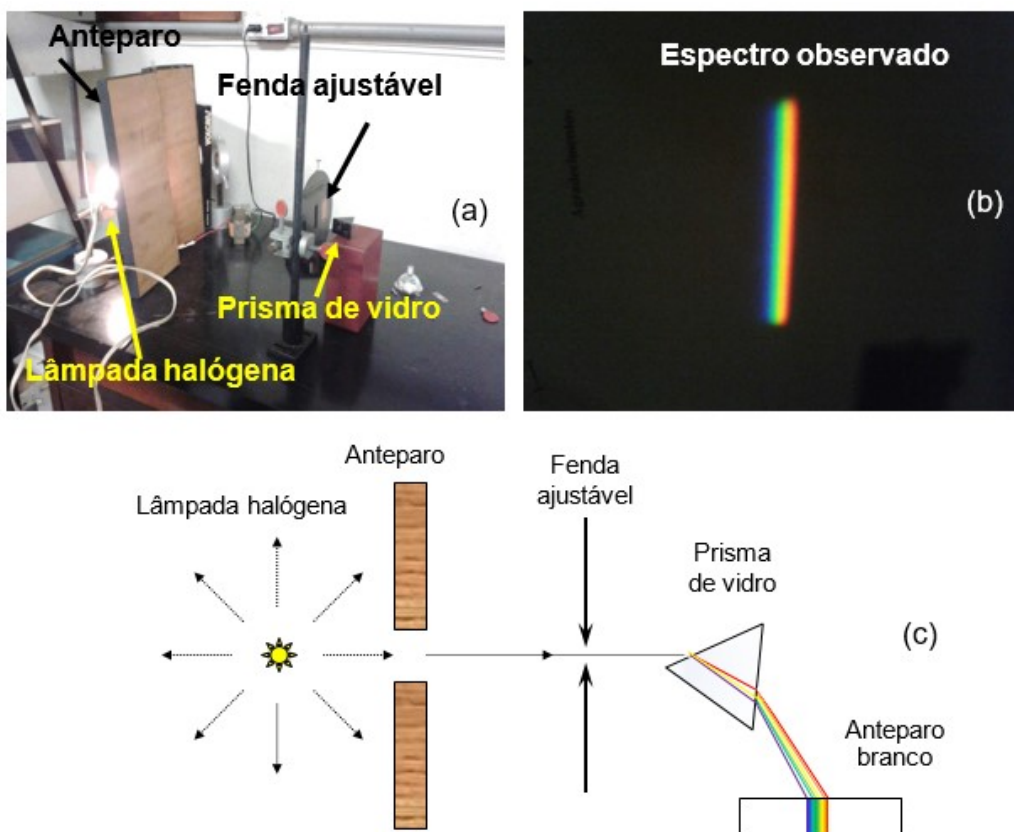


Figura 4.1.1.1: (a) Foto da montagem experimental onde podem ser observados a lâmpada halógena, o anteparo que visa reduzir a luz no ambiente, a fenda ajustável e o prisma. (b) o espectro gerado pelo sistema experimental observado sobre um anteparo branco colocado na lateral. (c) Diagrama da montagem vista de cima.

Capítulo 4- A Percepção do Espectro Eletromagnético

No estudo de óptica é importante reproduzir esta experiência em sala de aula para que os estudantes percebam, através das experiências atribuídas a Newton, que a luz branca, na verdade, é uma soma de radiações do espectro eletromagnético de comprimentos de onda diferentes. No entanto, o custo de um bom prisma pode inviabilizar a reprodução desta experiência em salas de aula.

Para contornar o problema do custo e produzir de forma menos onerosa um efeito similar, descrevemos a seguir, como usar o bulbo de uma lâmpada para produzir a dispersão da luz. Uma das vantagens em usar prismas, se possuir dois deles, é poder mostrar que se isolando uma faixa do espectro e fazendo-a atravessar um segundo prisma, não se consegue dispersar as outras cores anteriormente bloqueadas. E, outra vantagem, é poder mostrar que, novamente com uso de um segundo prisma ou uma lente convergente, a luz branca pode ser recomposta a partir das raias espectrais anteriormente dispersas.

Como vimos anteriormente, podemos usar um prisma para dispersar a luz branca e observar as diferentes frequências eletromagnéticas que a compõe. Isso pode ser conseguido pois a passagem de um feixe de luz branca, como a do sol, ao atravessar um prisma de vidro, é refratado duas vezes antes de deixá-lo. Na primeira refração, interface ar/vidro, ocorre uma pequena dispersão já que as radiações de multifrequências do feixe de luz emitido pelo sol possuem diferentes índices de refração. A radiação de cor violeta é a que sofre a interação mais forte no vidro e, portanto, a mais refringente. Por outro lado, a radiação de cor vermelha é a menos refringente. Na segunda interface vidro/ar ocorre uma nova refração que tende a aumentar a dispersão espectral, separando ainda mais cores. Isso ocorre devido à inclinação desta última interface, que amplifica a dispersão do espectro emitido pelo sol. Parte da luz incidida sobre o prisma é refletida em sua superfície externa, na primeira interface, e parte é refletida internamente na segunda interface.

O espectro formado não contém sete cores. Na verdade, há uma graduação de um contínuo de infinitas frequências de luz que, por convenção, dizemos que são apenas sete, assim como fez Newton. Isso ocorre, pois o olho humano possui certa limitação em discernir todos os tons de cores que se encontram muito próximos. Muitas vezes, na maioria delas por sinal, não conseguimos discernir nem mesmo as sete. Na Figura 4.1.1.2

podemos observar uma simulação do feixe luminoso incidindo no prisma e a dispersão gerada na última interface.

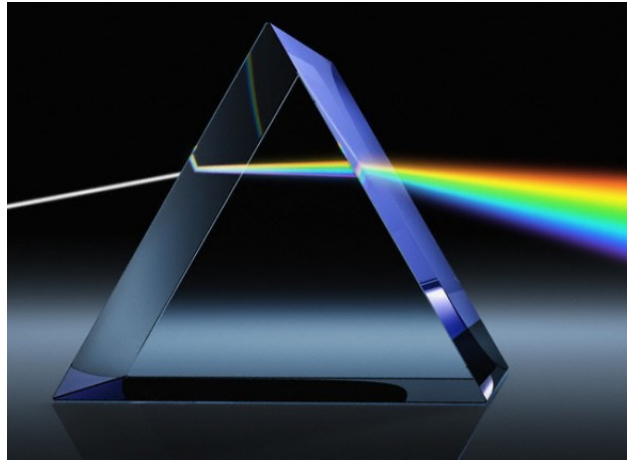


Figura 4.1.1.2- Luz incidindo em um prisma de vidro e provocando a dispersão das cores componentes da luz solar [Britannica 2016].

Se a superfície do material dispersivo for esférica, como uma bola de vidro, fenômeno semelhante ocorrerá. Na Figura 4.1.1.3 podemos observar como uma bola esférica suspensa, constituída de material dispersivo, neste caso água, seria atravessada por um feixe colimado de luz.

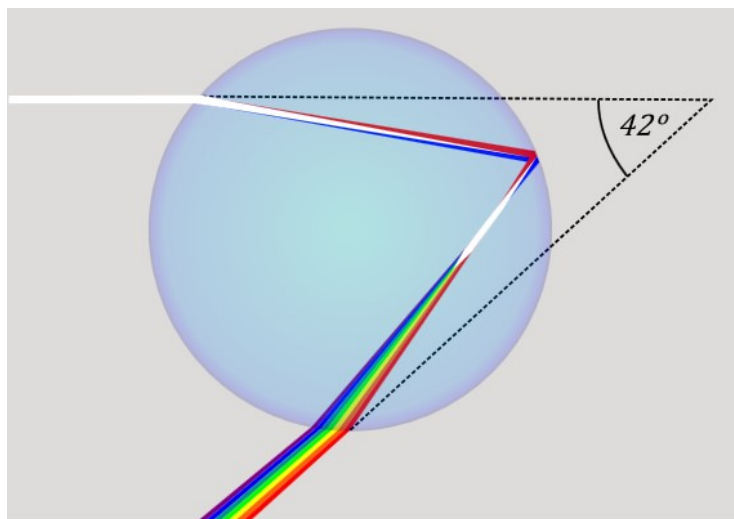


Figura 4.1.1.3 – Um feixe de luz branca incide em uma bola de vidro produzindo dispersão em várias frequências eletromagnéticas [Wikime-Rainb 2016].

Podemos observar que na esfera ocorrem perdas mais significativas da luz antes de chegar ao observador em comparação ao prisma. De forma simplificada podemos considerar que ocorrem ao todo três refrações e três reflexões no processo. Na primeira interface ar/material dispersivo, além da refração, parte da luz é refletida pela esfera.

Quando a luz que consegue penetrar a esfera atinge a superfície interna à direita, parte é refletida, permanecendo no seu interior, e a outra parte é refratada para fora da mesma. Quando o feixe, já um pouco disperso, atinge pela terceira vez a interface material dispersivo/ar, boa parte da luz é refratada ao atravessar esta superfície. Parte da luz remanescente ainda permanece no interior da esfera por ser refletida nessa interface.

É importante perceber que a luz que incide na esfera e a luz dispersa emergente encontram-se do mesmo lado da esfera, ou seja, no caso, do lado esquerdo. O material do qual essa esfera é constituída poderia ser tanto o vidro quanto a água. Na natureza podemos encontrar a perfeita circunstância em que milhares de gotas d'água se encontram "suspensas" no ar em um dia ensolarado. Para o diâmetro de poucos milímetros destas gotas, a tensão superficial é a força preponderante de modo que sua forma é perfeitamente esférica. Ao efeito criado damos o nome de arco-íris.

Podemos observar a dispersão da luz solar num dia chuvoso, quando a relação entre a posição do sol e observador são favoráveis. Nesse caso, um arco-íris será formado em um arco de com abertura de cerca de 42° do eixo horizontal que passa pelos olhos do observador até o onde estaria a sua sombra, como pode ser observado na Figura 4.1.1.4.

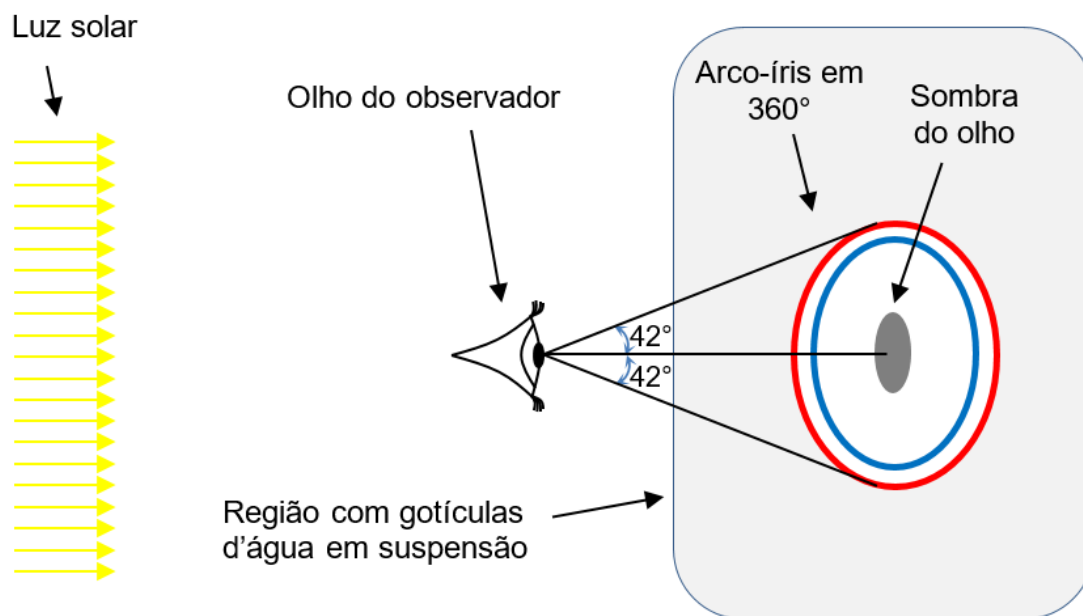


Figura 4.1.1.4 – Um arco-íris circular pode ser formado quando o observador está a uma grande altitude, por exemplo, num avião.

Durante um voo de avião, por exemplo, é possível ocorrer uma situação na qual o observador consiga ver o arco-íris em sua totalidade, ou seja, uma circunferência completa. Um eixo imaginário liga o centro da circunferência formada pelo arco-íris e o olho do observador. Um ângulo de aproximadamente 42° é formado entre esse eixo e a geratriz do cone, ficando na extremidade externa da base desse cone as cores de frequências mais baixas e, na região mais interna as cores de frequências mais altas.

Pela Figura 4.1.1.5 podemos observar que os raios incidentes na gota são difratados de diferentes formas. Partindo do raio 00, que é refletido de volta na mesma direção, os demais raios tendem a sofrer um desvio cada vez maior. O raio 17 é o que sofre maior desvio, a partir do raio 18, este desvio começa a diminuir. Percebe-se, pela figura, que há uma região onde a concentração de raios é máxima. É nessa região que observamos o arco brilhante a um ângulo de aproximadamente 42° diretamente oposto ao sol.

A região central do arco-íris, a partir do violeta, é mais iluminada pois há mais luz espalhada em seu interior. Isso ocorre devido ao retorno das radiações de todas as frequências em direção aos nossos olhos. Já a região acima do vermelho se apresenta escura pois, retornam para nós, apenas radiações de comprimentos de onda da faixa do infravermelho, que é uma radiação de comprimento de onda acima do espectro visível.

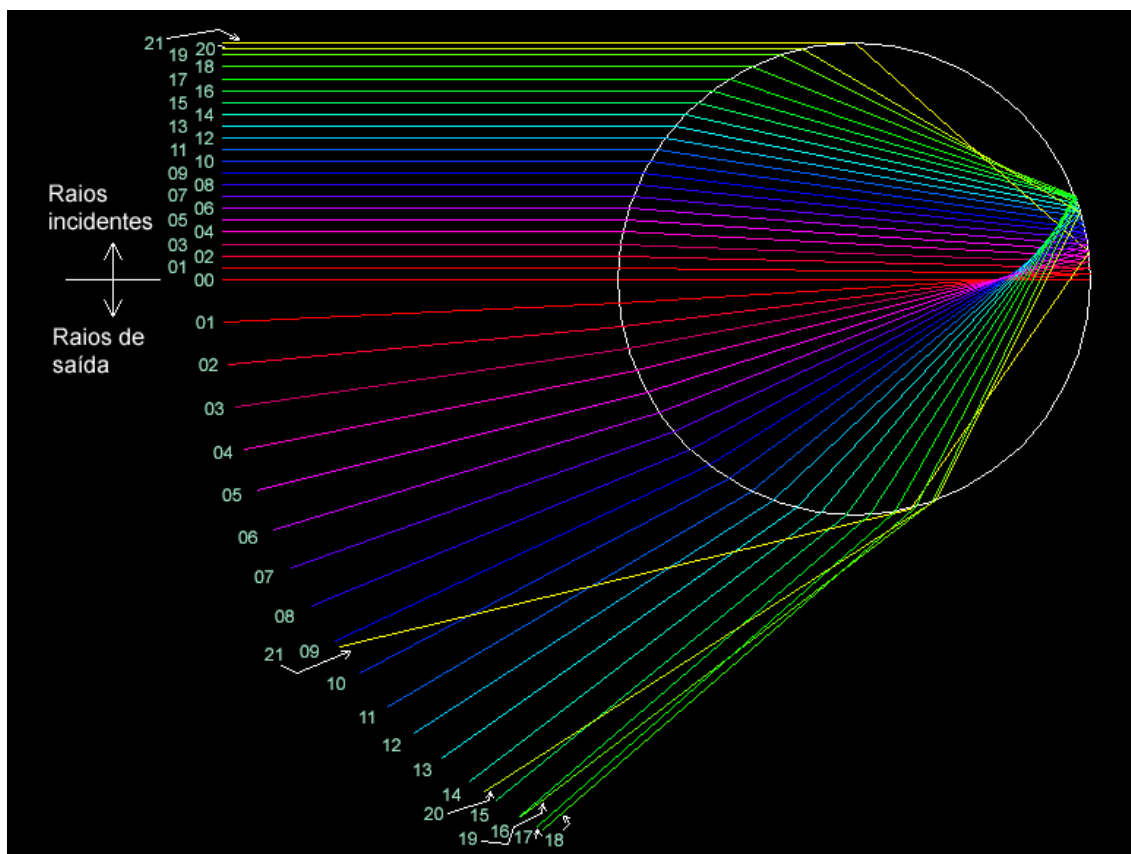


Figura 4.1.1.5 – Simulação de raios de luz paralelos incidindo sobre uma gota d’água em diferentes pontos a partir da região central, e o respectivo desvio observado. Percebe-se na parte inferior da figura que há uma maior concentração de raios deixando a superfície circular. As cores dos raios nessa figura em nada tem a haver com as frequências espectrais. Os raios foram coloridos apenas com o intuito de facilitar a visualização [Diniz 2016].

Retornando à Figura 4.1.1.4, observamos que ela ilustra de forma esquemática de que maneira o arco-íris pode ser observado em sua totalidade, ou seja, em 360° . O olho representa o observador de forma simplificada. Em seu lugar poderíamos considerar uma câmera fotográfica, por exemplo. Essas simplificações ajudam à compreensão do fenômeno pelos estudantes já que para cada olho vemos na verdade um arco-íris diferente. Observamos à esquerda os raios solares aproximadamente paralelos incidindo em uma região coberta por mini gotículas d’água. Na região interna do arco-íris há um espalhamento da luz do sol que torna essa região mais bem iluminada que a região externa do arco-íris, já que nesta última só há dispersão de luz infravermelha que não pode ser detectada pelo olho humano. No centro do arco-íris o observador, no caso o olho, produz uma região de sombra, já que se interpõe entre os raios solares e as gotículas em suspensão.

Como cada gota se apresenta ao observador ocupando uma região diferente do espaço, sob o ponto de vista do observador cada gota irá desviar em direção aos seus olhos apenas uma faixa reduzida desta dispersão, que pode ser interpretada como um feixe aproximadamente monocromático, ou seja, de uma faixa de frequência relativamente estreita. Considerando todas as gotículas contidas em um imenso paredão vertical, o observador poderá perceber uma mudança gradual nos tons de cores que chegam aos seus olhos de acordo com a posição do espaço que está visualizando. A Figura 4.1.1.6 ilustra o que acontece verticalmente com as dispersões de gotas sobrepostas. Devemos considerar, no entanto, que esse efeito ocorre com um número incomensurável de gotas e sua visualização depende do posicionamento do observador em relação ao sol e em relação à porção do céu que se abre sob seu campo visual. Portanto, árvores, o solo, casas e demais construções que obstruam seu campo de visão, irão permitir que se observe apenas parte deste arco-íris. Vale ressaltar que do chão o observador só poderá observar um arco completo se estiver em uma região alta como uma montanha, ou observando uma cachoeira. Neste caso é necessário que o sol se posicione numa região mais alta do céu, por trás do observador. Tal efeito pode ser simulado com uma mangueira de jardim pulverizando água na direção contrária a do sol.

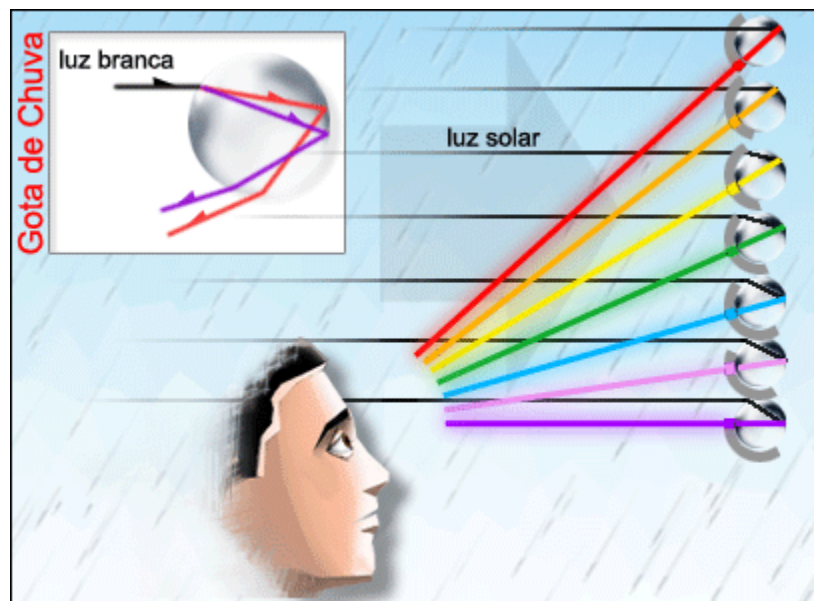


Figura 4.1.1.6 – Gotas d’água sobrepostas verticalmente ilustram a porção de luz dispersa em cada uma delas relativa ao ponto de vista do observador. Este só consegue observar um feixe aproximadamente monocromático sendo emitido por cada uma delas [Marques 2016].

O Experimento

Uma experiência pode ser produzida em sala de aula para ilustrar de que forma ocorre o fenômeno do arco-íris. A ideia básica é reproduzir o efeito criado por uma gota de água em uma escala macroscópica.

Para tanto é necessário dispor de uma lâmpada incandescente de bulbo transparente, que pode estar queimada, uma lupa e uma segunda lâmpada incandescente preferencialmente halógena. A lâmpada de bulbo transparente deve ser aberta, retirando-se o suporte interno do filamento e, em seguida, enchida com água, como pode ser visto na Figura 4.1.1.7. Deve-se serrar a extremidade da lâmpada, próximo ao início de sua rosca metálica. Nessa região ainda não há vidro. Após conseguir cortar o metal suficientemente para dobrá-lo nessa região, de forma a que se possa ter acesso ao interior da lâmpada, deve-se encaixar um objeto metálico, como a ponta de uma chave de fenda bem fina, e fazer movimentos cuidadosos tentando partir o suporte interno do filamento sem quebrar o exterior da lâmpada. É fundamental segurar a lâmpada com um pano grosso para evitar que se fira, caso a lâmpada se quebre.

Conseguindo quebrar o suporte interno, deve-se retirá-lo completamente. Em seguida, com a lâmpada na vertical com o bulbo para baixo, enchê-la com água até 2 cm abaixo do corte. Para que a água não vaze é necessário fazer um cordão com massa tipo epóxi e fixar as duas regiões seccionadas. Um arame deve envolver a rosca da lâmpada e um pouco mais de massa epóxi deve envolver o arame para que fique firme. Esse arame será usado para pendurar a lâmpada em algum suporte. A lâmpada deve ficar na posição vertical até que a massa esteja completamente seca, evitando assim que a água fique turva ao entrar em contato com a massa.

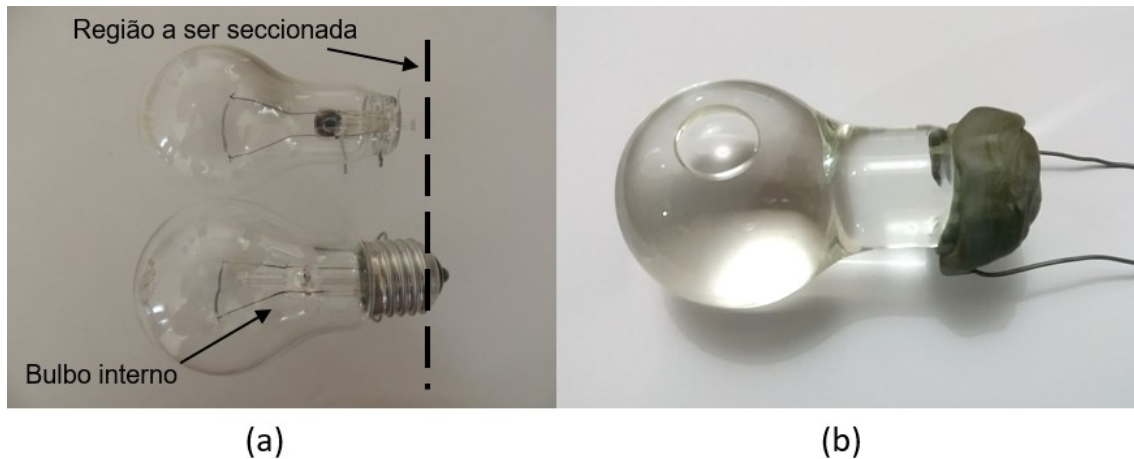


Figura 4.1.1.7 – Preparação da lâmpada. (a) A linha tracejada mostra a região que será seccionada. Pode-se observar, pela lâmpada de cima sem a rosca metálica, que na região do corte não há vidro. (b) A lâmpada pronta, após a secagem da massa.

O esquema de montagem pode ser visto na Figura 4.1.1.8. A lâmpada halógena ou incandescente fará o papel da luz solar. O filamento da lâmpada, estando na vertical, funciona como uma fonte estreita de luz. Para que não haja muita luz no ambiente, inclusive ofuscando a visão, a lâmpada pode ser montada dentro de um objeto metálico como uma lata com furos para saída da luz e proporcionar ventilação.

A luz do filamento vai se espalhar. Para se obter um feixe de luz vertical, relativamente estreito, com raios paralelos como a da luz do sol, uma lente convergente deve ser utilizada. A lente deve ser posicionada a uma distância do filamento um pouco maior que a da sua distância focal. Uma lente de cerca de 10 cm de distância focal é razoável, levando-se em conta as dimensões das duas lâmpadas. Essa distância deverá ser ajustada no momento de se observar o espalhamento de forma a se ter uma imagem bem definida.

A luz, ao atravessar a lente, produzirá um feixe aproximadamente paralelo que será direcionado para a região lateral da lâmpada, como pode ser visto no esquema da Figura 8. A luz dispersada, que representa os raios provenientes de uma única gota do “arco-íris”, poderá ser projetada sobre uma superfície de papel fosco, papel vegetal ou mesmo papel ofício. As cores dispersas também poderão ser visualizadas na mesma região onde foi colada a folha de papel, posicionando-se o olho nesse local. Neste caso, observar-se-á a variação gradual do espectro disperso pela lâmpada.

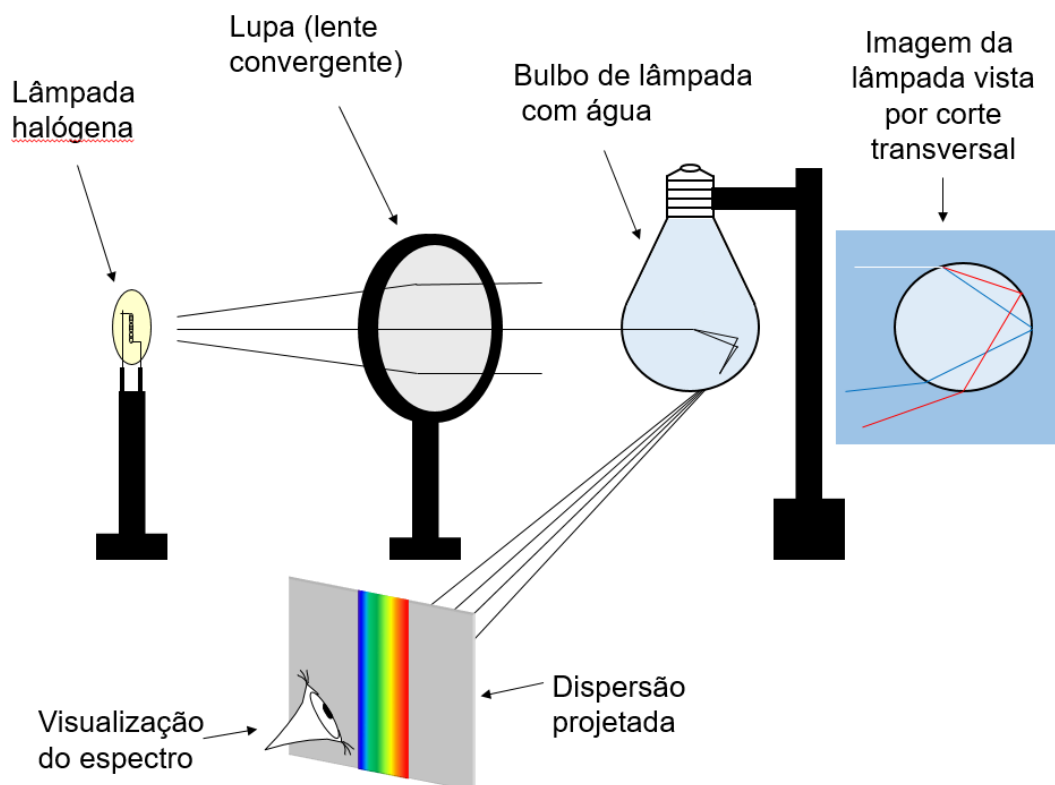


Figura 4.1.1.8 – Esquema de montagem da experiência do arco-íris numa gota d'água.

Um aprofundamento para a explicação do fenômeno pode ser adicionado, já que as cores dispersas irão depender fundamentalmente de vários fatores. A intensidade da dispersão será variável em relação ao ângulo de incidência do raio de luz na gota e sua posição relativa ao observador.

As fotos na Figura 4.1.1.9 mostram o experimento montado no laboratório. Na Figura 4.1.1.9a observa-se a lâmpada dentro de uma campânula de metal emitindo uma faixa de luz por um orifício. Essa luz atinge uma lente convergente no intuito de tornar essa faixa dispersa emitida pela lâmpada em um faixa de raios aproximadamente paralelos, como a luz do sol que atinge nosso planeta. Para se reduzir a faixa de luz a um estreito feixe podem ser utilizados dois pedaços de madeira ou dois livros, ajustando-se em forma de fenda para deixar passar apenas um feixe estreito. Na figura 4.1.1.9b, com a luz ambiente reduzida, observa-se o arco colorido projetado sobre a folha de papel branco. Retirando-se a folha de papel pode-se posicionar um olho na mesma região onde foi projetado o arco e observar, diretamente, as cores dispersas pela lâmpada.

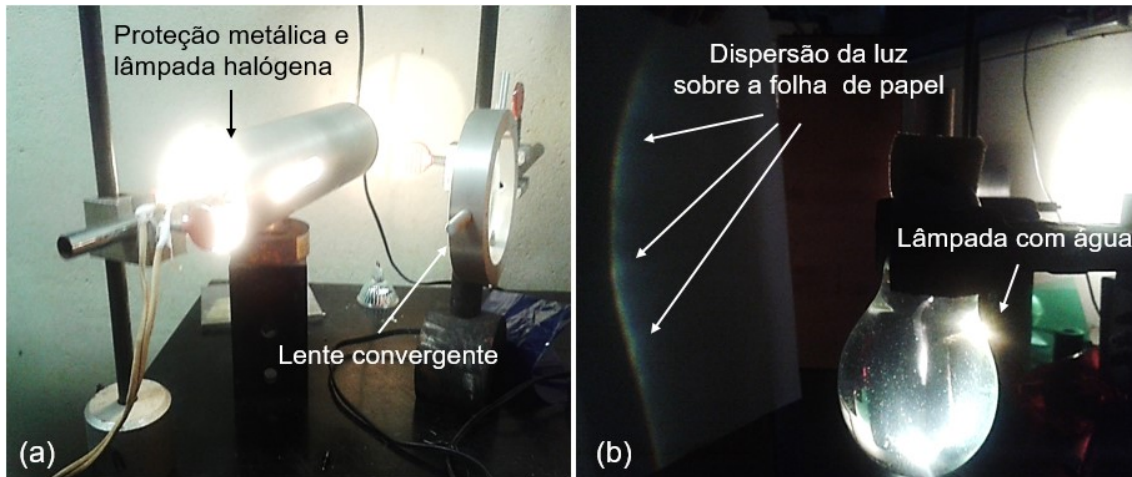


Figura 4.1.1.9 – Montagem do experimento. (a) Posicionamento da lâmpada halógena com a proteção metálica e da lente. (b) Com a iluminação da sala apagada observa-se a dispersão da luz projetada na folha de papel.

A proposta de expor o experimento com a lâmpada é justamente poder visualizar de forma macroscópica efeito similar, ou análogo, ao que ocorre em uma única e milimétrica gota d’água pulverizada na atmosfera. Compreendendo o que ocorre em uma gota, o estudante deve olhar para a Figura 4.1.1.6 e inferir o que estaria ocorrendo com uma “parede” repleta destas minigotículas.

Discussão Complementar

Em sala de aula, com o propósito de uma atividade investigativa, o professor pode induzir os estudantes a chegarem ao fenômeno do arco-íris, utilizando a Figura 4.1.1.6. Pode ser entregue a eles, ou desenhado no quadro, esta figura com gotas sobrepostas, umas sobre as outras, e os raios incidentes, para eles tracem os raios dispersos que atinjam o observador posicionado, de acordo com a mesma figura. Dessa forma o professor pode receber um retorno, verificando se o experimento foi de fato compreendido pelos estudantes. É importante que eles tenham acesso ao esquema de montagem da Figura 4.1.1.8, antes que o experimento seja posto em prática, para que compreendam a finalidade do uso de cada elemento da montagem. Este estudo pode ser posterior ao estudo do prisma, no qual os estudantes terão início à compreensão do efeito da dispersão em um meio cujo cálculo dos desvios das cores dispersas se apresenta através de uma álgebra simples. Desta forma será mais fácil observar o que acontece no interior da lâmpada, devido às reflexões e refrações.

Outra questão que pode ser de difícil compreensão, por parte dos estudantes, é com relação à forma circular ou arqueada do arco-íris. É difícil representar graficamente o está ocorrendo com as gotas adjacentes às que estão desenhadas na Figura 4.1.1.6. As fileiras de gotas, paralelas às da Figura 4.1.1.6, não se comportarão da mesma forma que a desenhada, ou seja, o raio de luz disperso produzido por um raio incidente, paralelo aos demais, não poderá ser visto pelo observador, ao menos na mesma frequência de cor. Isso significa que ao se afastar angularmente do centro do campo de visão, pode-se deparar com uma das três situações, quer sejam, (1) enxergando outra cor ao longo do arco-íris; (2) estarmos observando uma região externa do arco-íris em que só há infravermelho e, por nossos olhos não poderem detectar esta frequência, essa região parecer mais escura; (3) estarmos observando a região interna do arco-íris abaixo da cor azul, no qual há uma dispersão muito grande da luz branca do sol tornando esta região consideravelmente mais bem iluminada. A noção de se estar observando de forma cônica deve ser enfatizada.

As formações em que ocorre a geração de um segundo arco-íris podem ser discutidas à luz das várias possibilidades em que os raios solares atingem as gotículas d'água. Para o segundo arco-íris é necessário levar em conta a reflexão do feixe após atingir pela segunda vez a parede de gotas. Nesse caso, a luz só será observada quando no lugar de iluminar as gotas na extremidade superior, como mostra a Figura 4.1.1.6, elas as atingem pela região inferior, gerando um segundo arco mais fraco. Isso ocorre pois há uma dissipação da intensidade da luz devido há um número maior de reflexões e refrações anteriores à saída do raio de luz em direção ao observador.

A Figura 4.1.1.10 mostra o que ocorre com os raios de luz ao atingirem a gota em sua região inferior, a partir de sua região central. Observa-se que antes de deixar a gota, para atingir o observador, ocorre uma reflexão a mais no seu interior. No ponto onde ocorre essa última reflexão, boa parte da luz é refratada para fora da gota, o que irá diminuir sua intensidade. Os raios que atingem a gota na região inferior, mais distante do centro, produzem uma maior concentração de raios dispersos na saída (raios de 18 a 20).

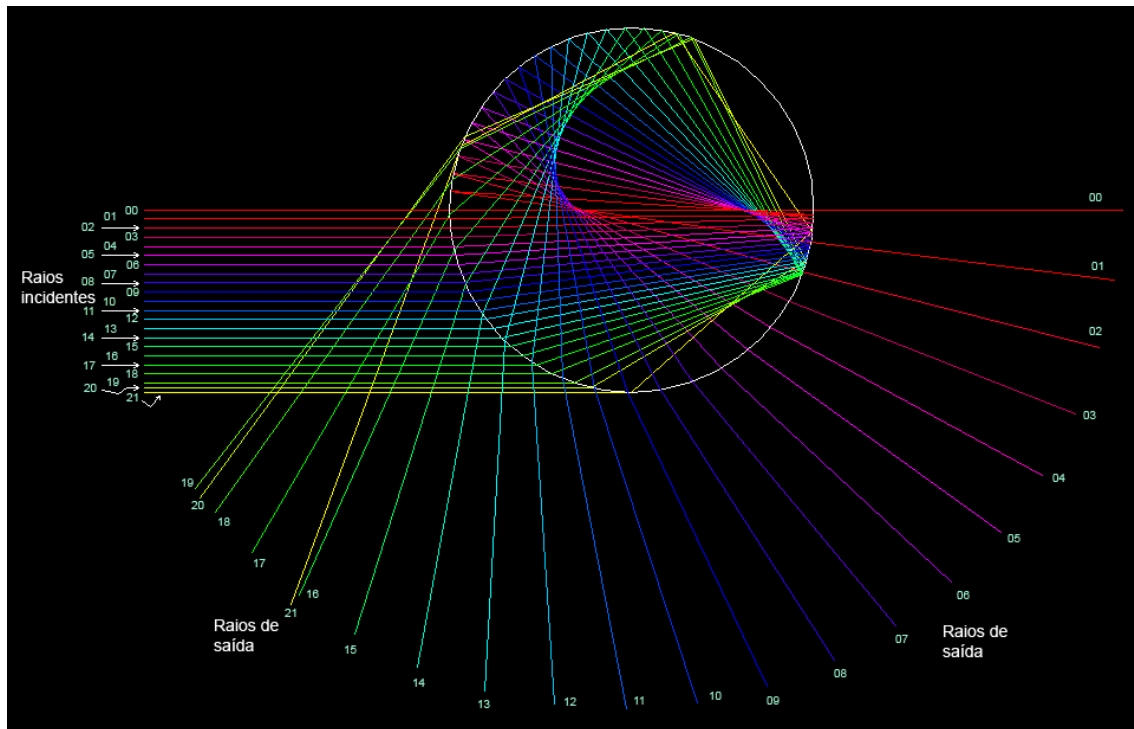


Figura 4.1.1.10 – Raios paralelos de luz incidindo na região inferior de uma gota d’água. Observa-se que há, neste caso, uma reflexão interna a mais o que torna o segundo arco-íris mais tênue que o primeiro [Marques 2016].

4.1.2 Analogias entre o Som e a Luz Usando Arduino

Uma dificuldade percebida ao longo dos anos lecionando Física é conseguir explicar ao aluno que, apesar de não conseguirmos captar uma informação através dos nossos sentidos, isto não significa, entretanto, que a informação não esteja sendo enviada. As radiações eletromagnéticas nas regiões de frequências iguais ou superiores ao ultravioleta, e iguais ou inferiores ao infravermelho, não podem, via de regra, serem captadas por nossos olhos. Seus efeitos e aplicabilidades, no entanto, são amplamente divulgados. A questão da proteção à exposição ao sol, as ondas de rádio, de televisão, usos de raios X na medicina e engenharia, micro-ondas, etc. Todas estas frequências fazem parte de nosso cotidiano, não sendo, no entanto, captadas pelo olho humano. Todos os nossos sentidos operam dentro uma faixa de sensibilidade. É assim para o tato já que não conseguimos sentir, por exemplo, um ácaro passeando sobre a nossa pele [Thoemmes 2014]. No caso do olfato, não conseguimos sentir o cheiro de vários tipos de gases, como o GLP. O cheiro dito de “gás” é devido à adição de mercaptano, adicionado por segurança, evitando assim sua inalação em excesso.

Com relação à audição não podemos ouvir, por exemplo, todas as faixas de frequências que determinados animais, como os cães e morcegos, conseguem. De modo geral somos surdos para sons com frequências abaixo de 20 Hz e acima de 20.000 Hz. Na visão ocorre o mesmo, só conseguimos enxergar em uma faixa de frequências eletromagnéticas bem definidas. Somos cegos para as demais.

Ao longo da história, as radiações nas faixas de frequências acima e abaixo da visível foram sendo descobertas. A luz abaixo do vermelho foi descoberta por William Herschel em 1800, que procurava estudar, com um termômetro, o efeito de aquecimento produzido pelas diferentes cores do espectro dispersas a partir da luz do sol em um prisma de vidro. Ele percebeu que havia aquecimento além do vermelho, numa região onde não se poderia enxergar cor alguma. Essa parte do espectro levou o nome de infravermelho [Micha 2011]. Joahann Ritter, em 1810, descobriu o ultravioleta e, os raios X, foram descobertos em 1895, por Wihelm Roentgen, pela colisão de elétrons em um alvo metálico. Descoberta fundamental para medicina, pois desta forma pôde-se “enxergar” o interior do corpo humano sem a necessidade de intervenção cirúrgica.

Então, voltando à sala de aula, como adquirir conhecimento sobre o que não se pode enxergar, ou ouvir? Talvez a resposta pareça trivial para os já iniciados nas ciências

físicas, mas não é para a maioria dos estudantes. Atualmente a vanguarda científica infere o que possa ser a energia escura [Saraiva 2012] cujo efeito de sua presença pode ser observado, mas não ela própria. Restam dúvidas que só o tempo e muita pesquisa poderão revelar, através do desenvolvimento de um novo modelo necessário para dar conta desse novo mundo invisível. Outros fenômenos invisíveis, como as forças de interação elétrica, magnética e gravitacional, revelam também um mundo invisível cuja maturidade cognitiva do alunado precisa ser capaz de lidar.

Então, ao lecionar para estudantes, sobretudo de Ensino Médio, deve-se levar em conta sua capacidade de abstração. Devemos ter a sensibilidade necessária para compreender que os modelos físicos que tratam de algo que está além das nossas sensações podem ser muito abstratos para sua compreensão, configurando-se em um enorme obstáculo epistemológico. Portanto, devemos nos munir de métodos didáticos diversos para que, com a sua aplicação, possamos fazer com que o estudante os encare com mais naturalidade.

A proposta dos experimentos aqui desenvolvidos é fornecer meios para que o estudante possa vivenciar faixas de frequências que nossos sensores não detectam, tanto audíveis quanto visíveis. Dessa forma poderá aceitar com mais naturalidade que existe um mundo invisível aos nossos olhos e ouvidos. Para que este seja percebido torna-se necessário a elaboração de modelos físicos que relacionem, com uso de analogias, fenômenos físicos do nosso cotidiano, como as ondas na água com as ondas eletromagnéticas.

Nas duas seções seguintes, trabalharemos com o microcontrolador Arduino. Uma plataforma de computação física que permite uma conexão entre diversos tipos de sensores que captam diversas informações do ambiente, através de suas portas de entrada. Essas informações são processadas através de um processador Atmel AVR. Após o processamento, suas saídas podem ser usadas para transmitir o resultado do processamento.

Conectado ao computador por uma entrada USB, o microcontrolador pode ser programado pela linguagem C, onde são digitados os programas ou, na linguagem do Arduino, os “sketches”. O computador se comunica com a placa Arduino produzindo tanto entradas como saídas de dados. Trata-se de um microcontrolador de operação

Capítulo 4- A Percepção do Espectro Eletromagnético

simples, mas muito funcional, que pode auxiliar em várias tarefas de laboratório, servindo ao estudo de diversos campos da ciência, inclusive a robótica.

Para a Física, o Arduino permite a implementação de diversos tipos de experimentos com um custo razoavelmente baixo, visto que pode ser reutilizado e reprogramado, conforme a necessidade.

Em nosso projeto, foram desenvolvidas duas aplicações pertinentes ao estudo da visão. A primeira pretende descortinar um mundo sonoro invisível aos nossos ouvidos, onde usaremos um sensor ultrassônico para ilustrar a limitação da percepção auditiva humana. No segundo teremos um sensor de barreira usando luz infravermelha, portanto invisível ao olho humano, que produzirá, quando acionado, um ruído que nos sensibilizará a audição, indicando a interrupção deste feixe.

O Som que o Surdo Pode Ver

O som e a luz compartilham algumas características oscilatórias, como frequência, período e comprimento. Entretanto, quando as similaridades acabam, devemos reforçar aos estudantes as diferenças que levam em consideração a forma e o meio de propagação para que possamos usar a analogia dentro do seu campo de limitação, com uma perfeita delimitação de suas fronteiras. Para a luz, enquanto onda eletromagnética, não há necessidade de um meio físico para sua propagação e a perturbação ondulatória ocorre de forma transversal. No caso da onda sonora, além de se propagar longitudinalmente, há de haver um meio para suportar sua propagação, sem o qual, o som deixa de se propagar. Nesse ponto, a experiência primeira, aquela que os jovens experimentam ao ver filmes de ficção em que as explosões no espaço geram enormes estrondos, pode se configurar num enorme obstáculo epistemológico. O professor, com sua experiência, deve ser enfático ao afirmar que as características do som não permitem sua propagação onde não há um meio material que o suporte, diferentemente da luz, haja vista estarmos nos banhando por raios de luz que atravessam a imensidão do espaço antes de nos atingir.

Nossa audição permite que consigamos captar, ouvir, sons da faixa de frequência dos 20 Hz aos 20 kHz. Denomina-se infrassons, frequências inferiores aos 20 Hz e ultrassons as acima dos 20 kHz. Quanto mais próximo dos 20 Hz, mais grave o som nos é percebido, no sentido oposto, quanto mais próximo dos 20 kHz, mais agudo o som se torna. Outros animais conseguem captar sons em diferentes faixas de frequência, como elefantes e morcegos. Frequências infrassônicas, abaixo dos 20 Hz, têm pouco

espalhamento, o que facilita sua propagação permitindo que alguns animais consigam se comunicar através de longas distâncias. Já as frequências ultrassônicas são fortemente espalhadas por pequenos objetos e, por isso, muito utilizada na medicina, para gerar imagens do interior do nosso corpo. Com elas é possível aferir dimensões e formatos de diversos órgãos sem a necessidade de intervenções cirúrgicas e sem a possibilidade de dano celular, como ocorre com os raios X.

Voltando ao mundo animal, os morcegos conseguem captar sons de 10 kHz a 120 kHz logo, produzindo sons da ordem de 50 kHz conseguem captar seu eco e, desta forma, ter uma percepção da localização espacial dos objetos a sua frente, como um sonar em um submarino. É como se conseguissem ver com os ouvidos em um ambiente desprovido de luz, como na escuridão de uma caverna [Rodrigues 2008].

O Experimento

O experimento que segue tem o objetivo de levar à sala de aula um aparato no qual o estudante possa estar diante de um sensor que produz um som inaudível ao ser humano e que consegue captar seu eco gerando uma informação. Esta informação é gerada através de luzes coloridas que identificam a distância de um obstáculo pela simples alternância no acendimento de LEDs de cores diferentes. Dessa forma estaremos mostrando ao estudante que precisamos de sensores corretos para captar uma informação e, da mesma forma, para conseguirmos interpretá-la. Poderíamos usar um “buzzer” para gerar um som audível de tons diferentes para cada distância, mas a proposta aqui é, realmente, fazer um paralelo entre a visão e a audição. Mostrar ao estudante as diferenças e semelhanças entre os modelos ondulatórios da luz e do som. De certo modo, esse experimento poderia, de forma inclusiva, deixar alunos com surdez e os demais em igualdade de condições para compreender o fenômeno, já que as frequências sonoras são inaudíveis para os dois. O estímulo visual favoreceria também esse aluno portador de surdez.

O sensor ultrassônico utilizado, HC-SR04, emite um ruído na faixa dos 40 kHz e opera com uma tensão de 5 VDC, conseguindo detectar barreiras a uma distância que varia de 2 a 400 cm com uma resolução de 0,3 cm. Ele opera sobre um ângulo efetivo menor que 15°. Maiores detalhes podem ser encontrados na referência [Diosdado 2014].

O dispositivo possui dois tambores cilíndricos, sendo um o emissor e o outro o receptor, que correspondem a um alto falante e a um microfone, respectivamente. Ao ser programado e alimentado, o componente emissor envia pulsos sonoros para o ambiente.

Quando esse pulso encontra um obstáculo, dentro dos limites de funcionamento, é refletido de volta para o sensor. O componente receptor consegue captá-lo e o sistema calcula o tempo decorrido entre a emissão e recepção deste sinal. Sabendo o tempo entre a emissão e reflexão e a velocidade de propagação do som no meio, no caso o ar, pode ser determinada a distância em que o obstáculo se encontra do sensor. Uma ilustração do seu funcionamento pode ser vista na Figura 4.1.2.1.

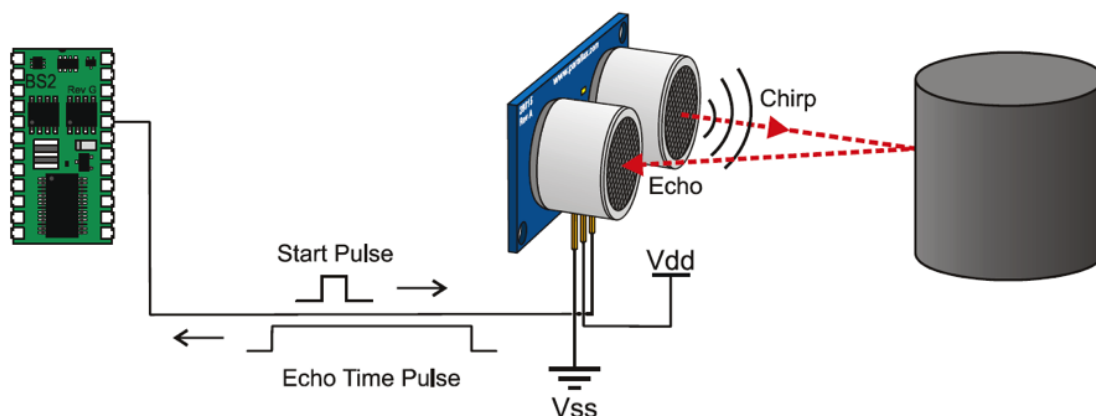


Figura 4.1.2.1 – O sensor emite um ruído que ao refletir sobre um obstáculo, retorna ao sensor, sendo captado por ele [Ard-Sensor 2016].

Além do sensor ultrassônico são necessários três LEDs coloridos. Foram usados LEDs nas cores verde, vermelha e azul, três resistores de $330\ \Omega$ e diversos fios adaptados para conexão no *protoboard* e na placa Arduino. A montagem com as conexões dos componentes no *protoboard* e na placa Arduino podem ser vistas na Figura 4.1.2.2.

O sketch, ou seja, o programa que será rodado no Arduino pode ser visto a seguir. Não são feitos maiores comentários sobre seus comandos já que a ideia aqui não é ensinar essa linguagem de programação. Entretanto, seguindo o esquema de montagem e digitando os comandos do sketch, exatamente como aparece abaixo, o experimento irá funcionar perfeitamente.

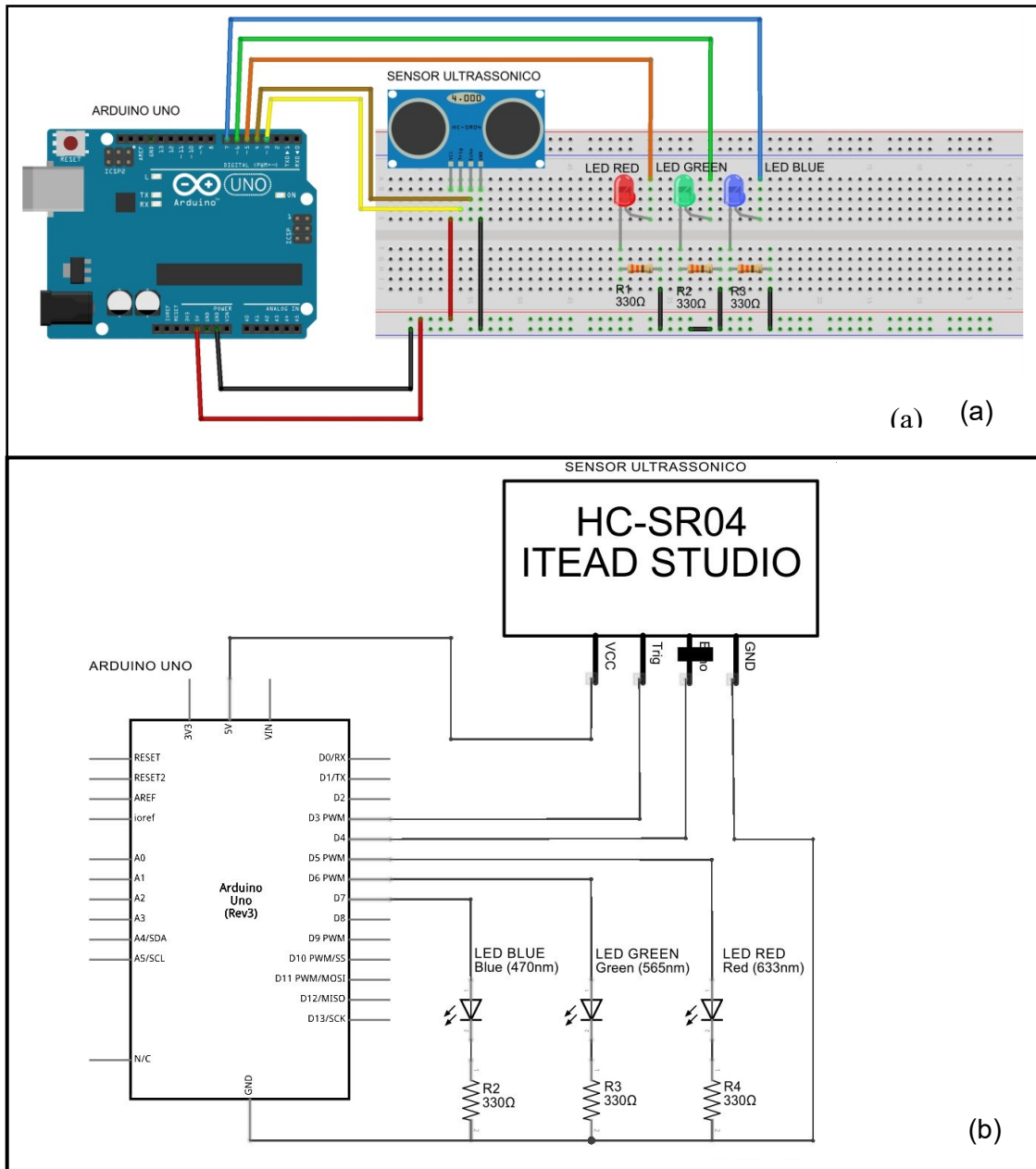


Figura 4.1.2.2 – (a) Montagem dos componentes no *protoboard* e na placa Arduino. (b) Esquema elétrico detalhado.

Sketch Arduino o Som que o Surdo Pode Ver

```
#define trigPin 3 // Define trig como 3
#define echoPin 4 // Define scho como 4
#define red 5 // Define LED vermelho como 5
#define green 6 // Define LED verde como 6
#define blue 7 // Define LED azul como 7
```

Capítulo 4- A Percepção do Espectro Eletromagnético

```
void setup() { // Configuração dos pinos
  Serial.begin (9600); // Iniciando a porta serial
  pinMode(trigPin, OUTPUT); // Configura o pino 3 como saída
  pinMode(echoPin, INPUT); // Configura o pino 4 como entrada
  pinMode(red, OUTPUT); // Configura o pino 5 como saída
  pinMode(green, OUTPUT); // Configura o pino 6 como saída
  pinMode(blue, OUTPUT); // Configura o pino 7 como saída

}

void loop() {

  long duration, distance; // Definição dos parâmetros para o sensor
  ultrassônico

  digitalWrite(trigPin, LOW);
  delayMicroseconds(2);
  digitalWrite(trigPin, HIGH);
  // delayMicroseconds(1000);
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(trigPin, LOW);
  duration = pulseIn(echoPin, HIGH);
  distance = (duration/2) / 29.1;
  if (distance < 6){ // Condições de acendimento do LED vermelho
    digitalWrite(red, HIGH);
    digitalWrite(green, LOW);
    digitalWrite(blue, LOW);
  }
  else if (distance > 6 && distance < 30){ // Condições de acend. do LED
  verde
    digitalWrite(red, LOW);
    digitalWrite(green, HIGH);
    digitalWrite(blue, LOW);
  }
}
```

```

else { // Condições de acendimento do LED azul
digitalWrite(red, LOW);
digitalWrite(green, LOW);
digitalWrite(blue, HIGH);
}

delay(500); // Tempo de espera
}

```

O programa aciona o sensor ultrassônico para que este envie de tempos em tempos o sinal sonoro. Quando o sensor capta o eco, o sistema automaticamente calcula a distância e, se essa distância for maior que 30 cm, aciona o LED azul. Quando a distância fica entre 6 a 30 cm aciona o LED verde e para distâncias menores que 6 cm aciona o LED vermelho.

Deve ser passado ao estudante o princípio de funcionamento do experimento e, com suas próprias mãos, poderão acionar os LEDs. A intenção é que percebam que um som de frequência acima da que conseguimos captar, está de fato sendo emitido. E, apesar de não conseguirmos ouvi-lo, o experimento comprova que este som está realmente sendo emitido. O fato é confirmado pelo acendimento dos LEDs. Estes sim podem ser percebidos através de nossa visão. O experimento oferece também um argumento para trabalhar com os estudantes os cálculos referentes à propagação e reflexão do som, contribuindo para a prática reflexiva sobre os conceitos abordados.

Na Figura 4.1.2.3 vemos o experimento montado. Na Figura 4.1.2.3a, com a mão a uma distância menor que 6 cm observamos a luz vermelha acender e as demais estão apagadas. Na Figura 4.1.2.3b, a uma distância maior que 6 cm e menor que 30 cm, observamos que só a luz verde acende. Já na Figura 4.1.2.3c, não há nada mais perto que 30 cm do sensor, isso pode ser verificado pois apenas a luz azul está acesa.

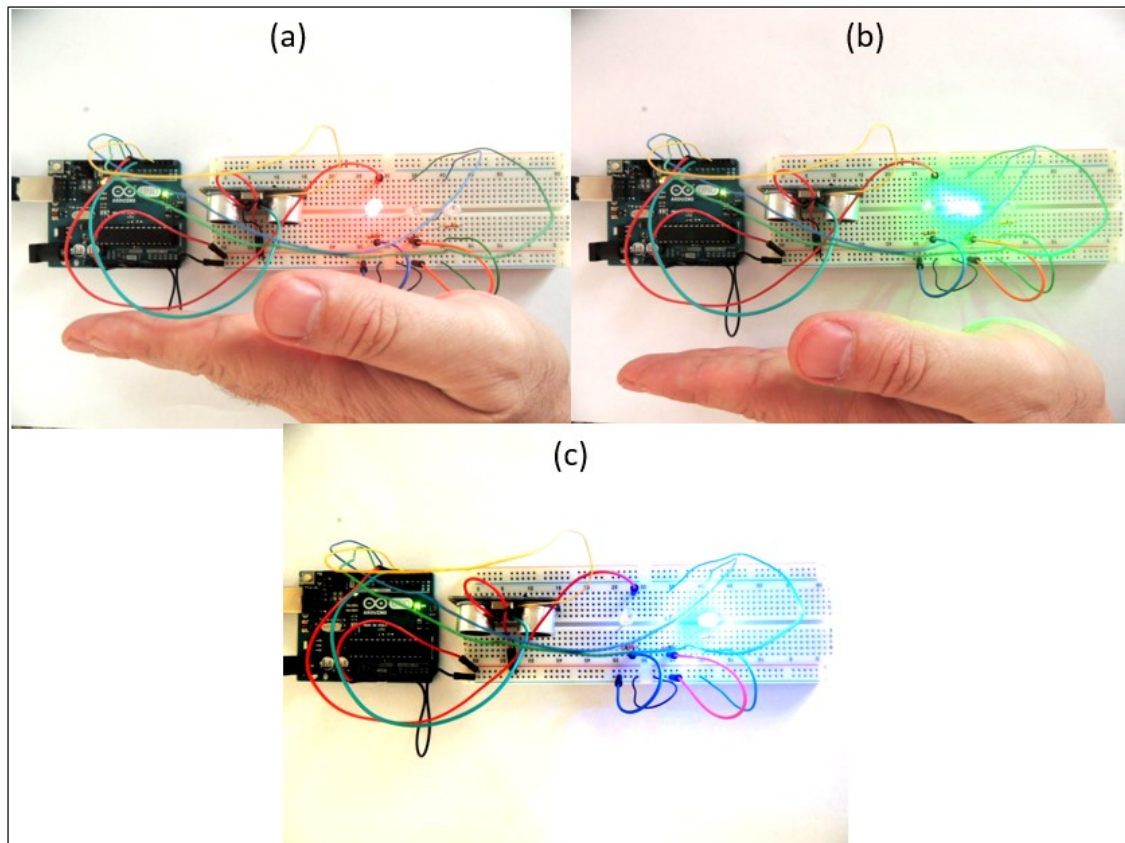


Figura 4.1.2.3 – (a) Com a palma da mão a uma distância inferior a 6 cm observa-se a luz vermelha se acender. (b) A uma distância um pouco maior que 6 cm e inferior a 30 cm, podemos observar a luz verde acesa. (c) Sem pôr a mão na frente do sensor e deixando-o distante mais de 30 cm de qualquer objeto a sua frente, observa-se a luz azul acesa.

A Luz que o Cego Pode Ouvir

Da mesma forma com que nossa audição é eficaz para uma faixa de frequência bem delimitada, o mesmo ocorre com a visão. A visão do homem está associada a radiações eletromagnéticas nos comprimentos de onda que vão de 400 nm a 700 nm, compondo o que denominamos luz visível [Jacobs 2008]. No reino animal as respostas aos estímulos eletromagnéticos podem ser bem diferentes. As abelhas, por exemplo, conseguem enxergar na faixa que vai do ultravioleta ao amarelo, sendo, portanto, cegas a partir do vermelho [Hempel 2014].

Há espécies de beija-flores que conseguem discernir diferentes tons alaranjados, imperceptivelmente diferentes ao olho humano, em flores de bromélias que indicam maior concentração de néctar. Na outra extremidade temos os animais que conseguem ver na região do infravermelho, como alguns tipos de peixes. Alguns animais

desenvolveram uma capacidade para captar radiações infravermelhas, a exemplo de algumas espécies de cobras. A detecção, neste caso, ocorre através de um órgão denominado fosseta loreal localizada no focinho da cobra, entre o nariz e os olhos. Esse órgão consegue captar a radiação emitida por animais de sangue quente, como roedores. O sinal gerado nesse órgão é enviado ao teto óptico onde é formada uma imagem combinada à visão do animal. No cérebro as imagens visual e termal (infravermelha) são fundidas dando a localização e tamanho da presa [Goris 2011].

Nós, humanos, que possuímos três tipos cones (ou quatro para algumas mulheres [Jameson 2001]), conseguimos enxergar apenas na região visível, salvo em cirurgias para retirada do cristalino que aumentam a sensibilidade para uma pequena faixa do ultravioleta. Foi o caso do célebre pintor francês Oscar-Claude Monet, que tendo passado por uma cirurgia para remoção de catarata, passou a perceber essa parte do espectro [Zimmer 2012].

O espectro infravermelho é muito utilizado em equipamentos de visão noturna. Câmeras fotográficas digitais e filmadoras possuem um CCD capaz de detectar parte dessa radiação. Em câmeras deste tipo, à noite, luzes infravermelhas dispostas da parte frontal desses equipamentos iluminam o ambiente com essa frequência luminosa, que não podemos perceber, e geram uma imagem que pode ser captada pela filmadora. No monitor, uma imagem em preto e branco é produzida com uma resolução que dependerá das características do CCD e da potência de luz emitida pelas luzes infravermelhas. Essas luzes infravermelhas são na verdade LEDs infravermelhos que podem ser encontrados em lojas de eletrônica.

O Experimento

Nas Figuras 4.1.2.4a e 4.1.2.4b, podemos observar dois tipos de diodos emissores de luz infravermelha. O primeiro tem seu encapsulamento levemente azulado e o segundo é transparente. Estes diodos são muito utilizados também em controles remotos de televisores e outros equipamentos eletrônicos. Na Figura 4.1.2.4c podemos observar um fototransistor infravermelho, que possui seu corpo escurecido para evitar que haja interferências de outras frequências, que não a faixa do infravermelho. Isto é possível pois o infravermelho é capaz de atravessar o encapsulamento escurecido, tal como ocorre em águas turvas.

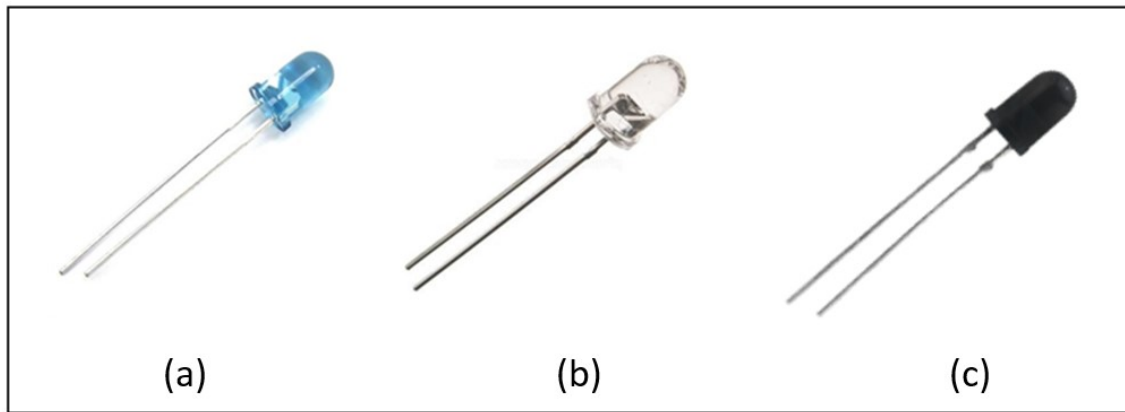


Figura 4.1.2.4 – (a) LED emissor infravermelho com corpo azulado. (b) LED emissor com corpo transparente. (c) Fototransistor. Seu corpo escurecido permite uma filtragem da luz, deixando passar apenas radiação infravermelha.

O fototransistor é um dispositivo eletrônico que possui dois terminais; um é o coletor e o outro, o emissor. A base é a parte do fototransistor que fica exposta à luz. Quando a base recebe uma quantidade suficiente de luz infravermelha, se torna ativa, permitindo a passagem de corrente elétrica do coletor para o emissor. Sem luz suficiente não ocorre condução de corrente, ficando, portanto, o emissor e o coletor, eletricamente isolados.

Outro componente que faremos uso é o *buzzer* ou cigarra, que é um dispositivo eletrônico capaz de produzir som quando submetido a uma diferença de potencial (ddp), ou seja, um transdutor que consegue converter eletricidade em movimentos mecânicos capazes de gerar som. É muito utilizado em equipamentos eletrônicos e sua finalidade é produzir um ruído sonoro que pode ser usado como alerta, como uma sirene, ou algum tipo de indicação. Podem ser de diversos tipos, como piezelétricos ou eletromecânicos.

Os *buzzers* piezelétricos são fáceis de serem encontrados a um custo relativamente baixo. Por isso, foi adotado no circuito do experimento. Na Figura 4.1.2.5 observa-se o *buzzer* encapsulado utilizado.



Figura 4.1.2.5 – *Buzzer* encapsulado.

A Figura 4.1.2.6 apresenta o esquema de montagem dos componentes no *proto-board* e na placa Arduino. O circuito é basicamente um sensor de barreira infravermelha que, quando acionado, produz um ruído sonoro. O LED emissor infravermelho recebe alimentação direta da placa Arduino (5 VDC). Para limitar a corrente sobre o LED emissor, foi utilizado um resistor de 330 Ω . O *Buzzer* tem seu terminal negativo ligado ao terra da placa Arduino e o positivo no pino 13 que enviará +5 VDC ao *buzzer* quando a barreira for interrompida.

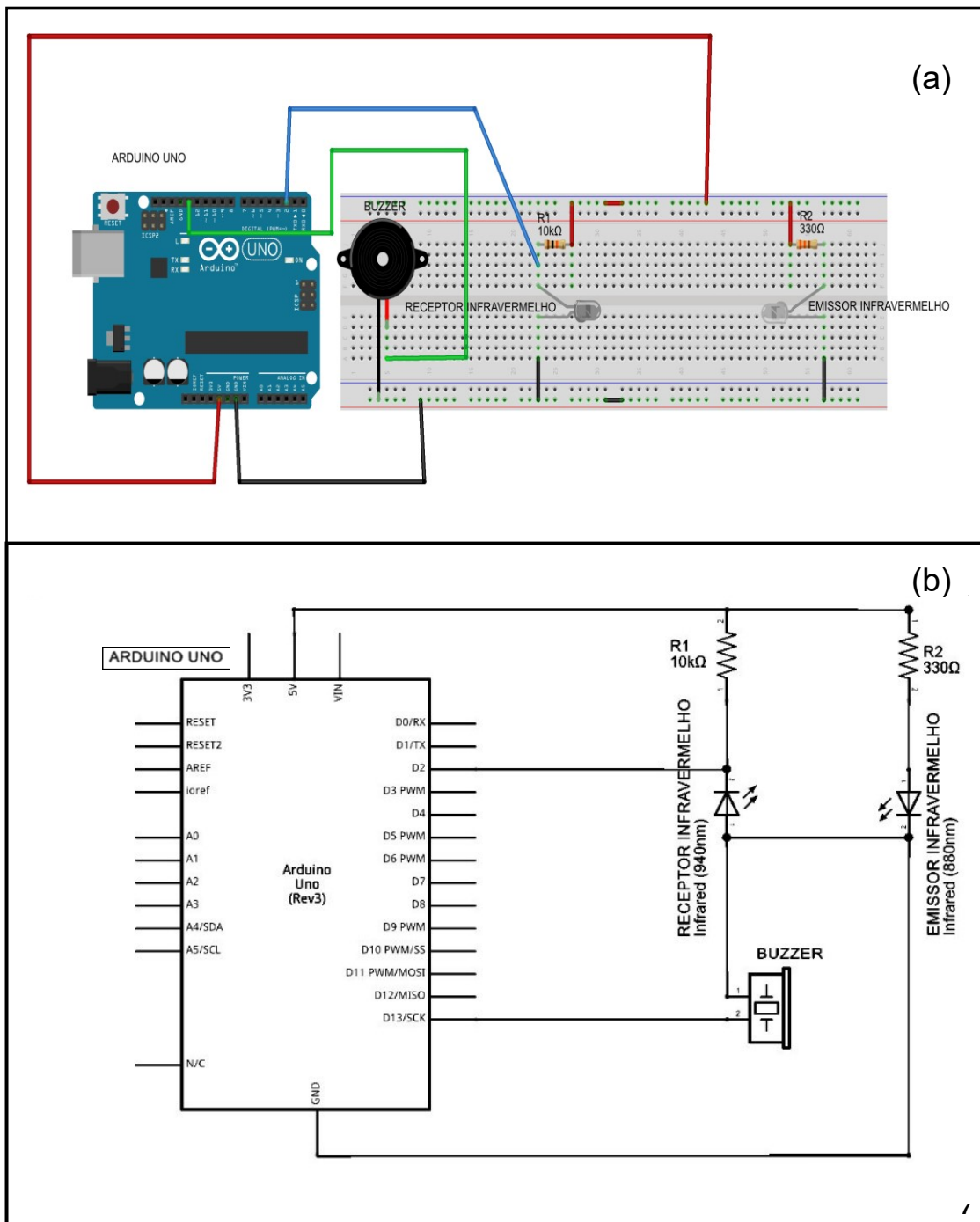


Figura 4.1.2.6 – (a) Esquema de montagem do experimento A Luz que o Cego Pode Ouvir. (b) Esquema elétrico detalhado.

Para formar um sensor de barreira é necessário que a luz do LED infravermelho seja apontada para o fototransistor a fim de que este receba quantidade suficiente de radiação infravermelha em sua base, permitindo assim a passagem de corrente do coletor ao emissor. O fototransistor é montado conforme o esquema da Figura 4.1.2.7. Podemos observar que há um resistor de $1k\Omega$ ligado no coletor do fototransistor, já o emissor está

ligado ao terra. Entre o resistor e o coletor é feita uma ligação até o pino 2 da placa Arduino. Ao receber luz, o fototransistor permite a passagem de corrente elétrica, não chegando nenhuma tensão significativa ao pino 2, já que o coletor e emissor, nesta circunstância, estão em curto alimentando o resistor de $1k\Omega$. A função do resistor de $1k\Omega$ é justamente a de não permitir que a placa Arduino seja curto-circuitada. Sem receber luz infravermelha suficiente, o fototransistor não conduz, levando ao pino 2 os 5 VDC da alimentação. Quando isso ocorre, ou seja, quando chega tensão no pino 2, a Arduino interpreta essa informação e direciona + 5 VDC ao pino 13, acionando o buzzer. Deve ser observado que no LED infravermelho emissor, assim como nos demais LEDs, a perna mais comprida, que é o anodo, deve ser ligado ao polo positivo da alimentação. Entretanto, no caso do fototransistor, a perna mais comprida é o emissor, que deve ser direcionado ao terra [Quadros 2013].

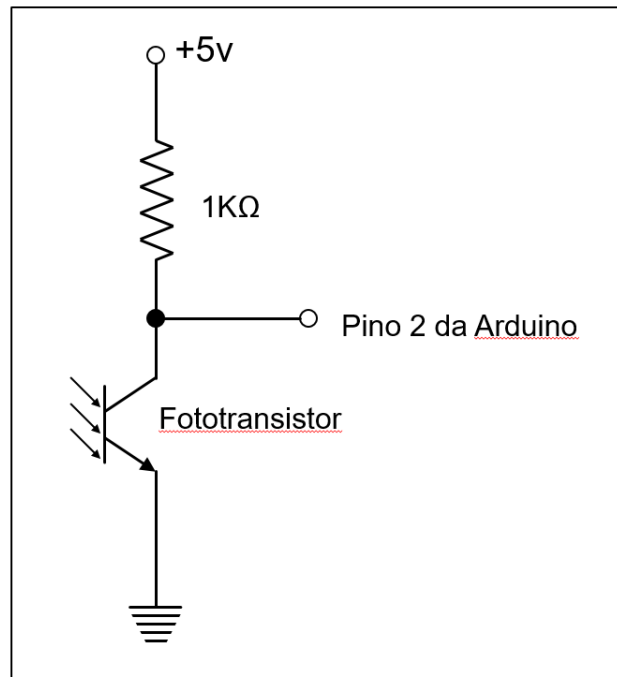


Figura 4.1.2.7 – Esquema de circuito com o fototransistor.

O *sketch* deste experimento é bem simples. Com poucos comandos é possível programar a Arduino para executar a função. O *sketch* a seguir pode ser copiado exatamente como é reproduzido abaixo para ser compilada para a placa Arduino.

Sketch Arduino a Luz que o Surdo Pode Ouvir

```
#define sensor 2 // Define sensor como 2
#define LED 13 // Define LED como 13

void setup()
{

pinMode(sensor, INPUT); // Configura o pino 2 como entrada
pinMode(LED, OUTPUT); // Configura o pino 2 como saída
}

void loop()
{

if(digitalRead(sensor)) digitalWrite(LED, HIGH); //Lê o sensor, e se o
estado for igual a 1, liga o LED da placa
else digitalWrite(LED, LOW); //Senão desliga o LED da placa

}
```

Com o experimento montado, como visto nas Figuras 4.1.2.8a e 4.1.2.8b, o LED infravermelho à direita ilumina a base do fototransistor. Desta forma o circuito está em prontidão e permanecerá assim até que o feixe de luz seja interrompido. O *protoboard* com o circuito pode ser colocado dentro de uma caixa para que os estudantes possam observar que nenhuma luz visível sai do LED emissor infravermelho.

Para confirmar que há uma luz sendo emitida pelo LED infravermelho, os estudantes podem acionar as câmeras dos seus celulares, resultado visto na Figura 4.1.2.8c, visualizando assim, algo que nossos olhos não podem ver.

O aviso sonoro que é acionado toda vez que o feixe de luz é interrompido deve servir para que os estudantes, mais uma vez, reflitam sobre as características da luz e do som. Desta forma é possível também que um estudante com deficiência visual possa

perceber pelo tato a forma com que o LED está enviando um feixe de luz para o fototransistor e, pela audição, perceber quando algo impede a passagem da luz de um lado para o outro, pelo acionamento do *buzzer*.

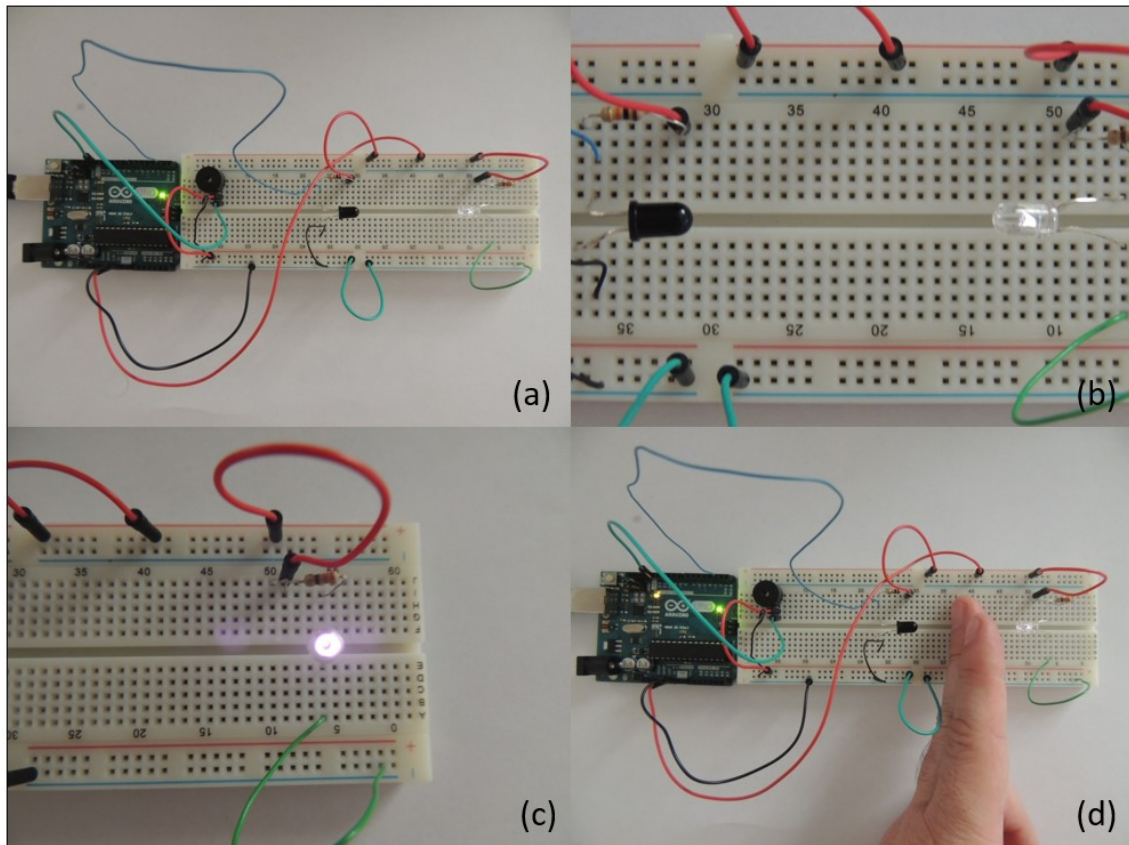


Figura 4.1.2.8 – (a) Nesta fotografia podem ser observados todos os componentes conectados ao *protoboard*, além das conexões à placa Arduino. (b) Um detalhamento na disposição do LED infravermelho, apontado diretamente para o fototransistor. Estudantes com deficiência visual podem tatear os dois para perceber que um aponta diretamente para o outro. (c) Utilizando uma câmera de celular, e apontando o LED infravermelho para cima, é possível verificar que ele permanece aceso quando o circuito está em operação. (d) Interpondo os dedos entre o LED e o fototransistor, este passa a não receber sua luz, acionando, desta forma, o *buzzer*.

4.1.3– Conclusões

Os experimentos permitem ilustrar os limites de nossas percepções e as propriedades do som e da luz, mostrando a existência de um universo além dos nossos sentidos. O sensor ultrassônico usado para detectar distâncias ilustra de que forma, por exemplo, os morcegos conseguem se deslocar usando o sentido da audição como forma de “enxergar” o mundo desprovido de luz. Esse tipo de analogia pode ser usado em sala de aula e, como complemento, pode ser explicado o funcionamento do sonar. Da mesma

Capítulo 4- A Percepção do Espectro Eletromagnético

forma que não se pode enxergar, com os olhos, na ausência de luz, há uma grande dificuldade de se enxergar em águas turvas e de grandes profundidades. Então, as embarcações utilizam o sonar, que é um equipamento que funciona seguindo o mesmo princípio, ou seja, envia um sinal sonoro de alta frequência para a direção que quer mensurar e calcula a distância através do tempo que o eco leva para ser captado. Pode ser trabalhada com o estudante uma atividade complementar, em que se use o fato de que na água o som se desloca com velocidade muito maior (cerca de 1480 m/s) que no ar (cerca de 343 m/s) [Francisco 2014], o que permite um cálculo da distância de um obstáculo, de forma mais rápida. Por outro lado, comparando-se com a visão, já que a luz se propaga, no ar, a uma velocidade aproximada de 300.000.000 m/s, a audição produz uma percepção de forma muito lenta. Por esse motivo enxergamos o relâmpago (luz) antes de ouvir o trovão (som).

O sensor de barreira, da segunda experiência, é uma tecnologia muito utilizada em portões automáticos e elevadores. Em ambos os casos, impedem o fechamento da porta enquanto houver uma pessoa ou veículo cruzando seu caminho. Na nossa experiência, basta passar a mão entre os sensores para que um som seja emitido, a mesma interceptação que fazemos para que a porta de um elevador não se feche. Ao bloquear o feixe de luz invisível, o estudante irá constatar que realmente há uma luz sendo emitida e captada, mas que nossos olhos não conseguem detectá-la. Somente com uso de uma câmera se torna possível a visualização da presença dessa luz invisível. De fato, a câmera funciona como um transdutor, ou seja, ela capta uma luz invisível para nós, transformando e emitindo um sinal de luz visível.

Essas discussões, posteriores aos experimentos, visam aproximar a física do mundo natural e tecnológico em que vivemos.

4.2 O Olho Cibernético - Uma analogia para a visão cromática

Vimos na seção 2.3, do capítulo 2, que os LEDs produzem uma diferença de potencial ao serem expostos à luz. Ainda no capítulo 2, seção 2.2, verificamos que para a visão cromática nossos olhos, mais especificamente nossas retinas, possuem células denominadas cones capazes de se sensibilizarem com luzes nas cores vermelha, verde e azul. Percebemos assim que o LED RGB (sigla em inglês para *Red, Green, Blue*) poderia ser um candidato ideal para servir de analogia com a visão colorida humana.

A ideia do experimento consiste em construir uma unidade fundamental da visão cromática, ou seja, um conjunto de três cones capazes de enxergar e discernir cores, usando apenas um componente eletrônico, o LED RGB. O LED RGB é, na verdade, um encapsulamento de três LEDs coloridos, montados muito próximos um do outro, Figura 4.2.1.

A etapa seguinte seria verificar se cada cor produziria uma ddp correspondente à frequência de sua cor de emissão, como o vermelho produzir uma maior ddp quando iluminado por luz vermelha e assim por diante nas demais cores. Se isto se confirmasse, tornaria, de fato, o LED RGB, candidato ideal para a analogia com a visão cromática.

Na Figura 4.2.1a pode-se observar a estrutura interna de um LED RGB, aceso com pouco brilho. As especificações técnicas deste LED estão presentes na Figura 4.2.1b. Como o diâmetro do encapsulamento do LED é de 5 mm, o que daria aproximadamente a dimensão do lado do quadrado que contém a Figura 4.2.1a, podemos estimar as dimensões de cada LED como um quadrado de 0,7 x 0,7 mm. Observamos também, na Figura 4.2.1b, que o terminal comum aos três LEDs é o catodo.

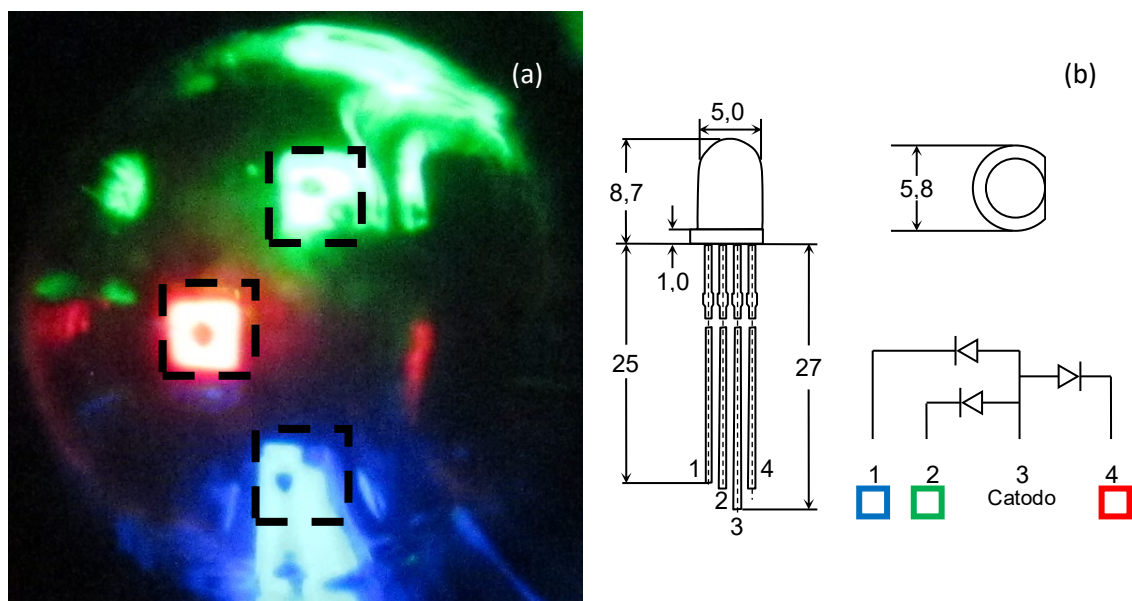


Figura 4.2.1 – (a) Foto ampliada do interior de um LED RGB. Podem ser observadas, em destaque, as regiões de emissão das três cores. Imagem obtida com uma câmera fotográfica Canon PowerShot SX150, f/8, 1/1600s, ISO-800, distância focal 60 mm, abertura 4.97, associada a uma lente extra de distância focal de 2 cm. (b) As especificações técnicas do LED RGB utilizado. Dimensões em milímetros.

Há trabalhos [Loreto 2008] cuja proposta é simular a visão humana fazendo uso de um componente eletrônico denominado LDR (*Light Dependence Resistor* ou Resistor dependente de luz). Este componente tem sua resistência variada de acordo com a incidência de luz que recebe. Na pesquisa em que é usado este sensor são necessários filtros de gelatina coloridos para que o LDR possa “enxergar” as cores. A proposta do experimento é direcionar ao LDR luzes de LEDs de cores diferentes e medir a resposta do LDR, sua resistência, interpondo entre o LED e o LDR, as três cores de filtros (vermelha, verde e azul). O experimento resulta em taxas muito próximas às estabelecidas para os três tipos de cones se mostrando ser um trabalho muito bem elaborado para o intuito a que se propõe. Contudo, uma montagem com três LDRs e seus filtros apresenta grandes dimensões, o que poderia fazer com que cada um dos elementos visualizasse regiões muito diferentes de uma imagem.

Como o LED pode gerar uma diferença de potencial entre seus terminais ao ser exposto à luz, e tem dimensões bastante reduzidas, pensamos na sua utilização no olho cibernético. Iluminando a sua região emissora de luz observa-se uma ddp (diferença de potencial), como pode ser visto na Figura 4.2.2. Os detalhes referentes ao processo no qual o diodo LED pode se comportar como uma célula fotovoltaica estão descritos no capítulo 2, seção 2.3.

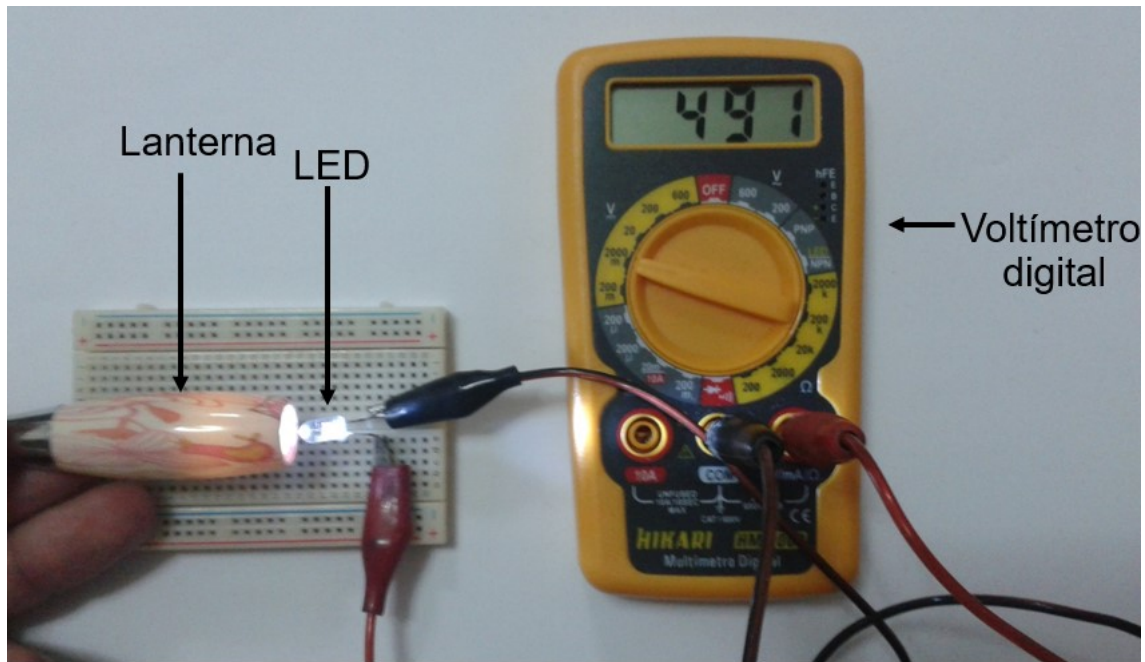


Figura 4.2.2 – Um LED sendo iluminado por uma lanterna diretamente através de sua lente. Os terminais do LED estão conectados a um voltímetro digital que indica uma leitura de 491mA.

No desenvolvimento do experimento que se segue, o LED RGB é usado para representar, de forma analítica, o processo que ocorre no interior do olho humano e que é responsável por nossa visão das cores. Outra vantagem de usar o LED RGB, ao invés do LDR, é a possibilidade de construir um experimento similar que dispensa o uso das gelatinas coloridas.

Levantamento das respostas espectrais dos LEDs

Antes da montagem experimental, foram feitas as leituras das respostas espectrais para o LED RGB, tanto como emissor, quanto como receptor. O procedimento e equipamentos utilizados para levantamento das curvas estão descritos no **Anexo**. Elas são apresentadas nas Figuras 4.2.3, 4.2.4 e 4.2.5. Verificamos que as emissões nas três cores do LED RGB apresentam valores muito bem definidos, ao passo que para recepção, a curva do azul se sobrepõe à do verde o que, a princípio, os fariam “enxergar” a mesma cor. Percebemos, nesse momento, que o uso do LED como receptor poderia ser comprometido, mas seria necessária a confirmação direta.

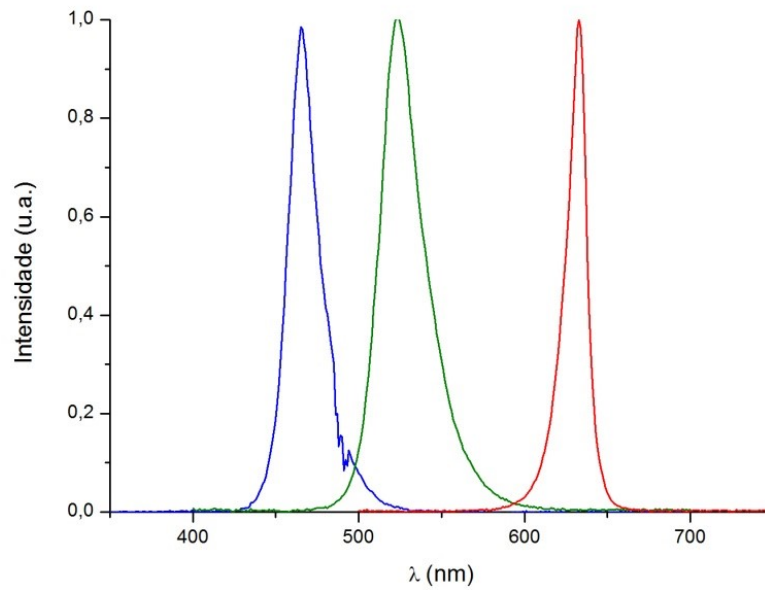


Figura 4.2.3 – Curvas espectrais de emissão para as três cores do LED RGB. As intensidades encontram-se normalizadas.

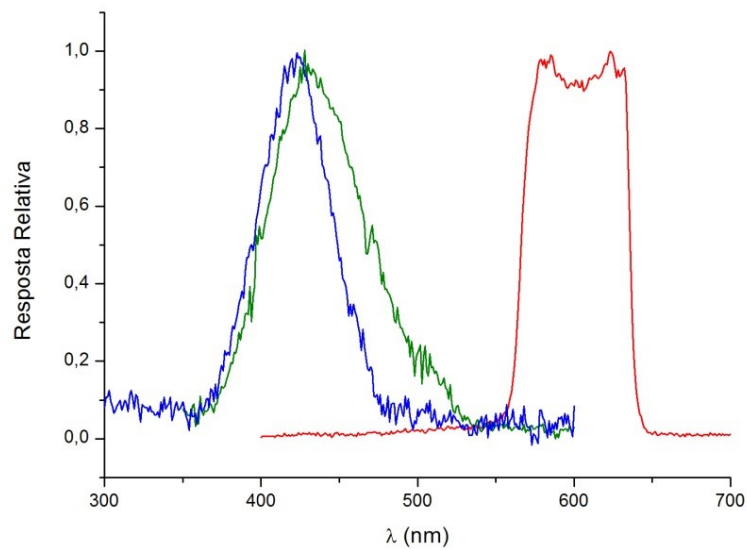


Figura 4.2.4 – Respostas espectrais da absorção para as três cores do LED RGB. As intensidades foram normalizadas.

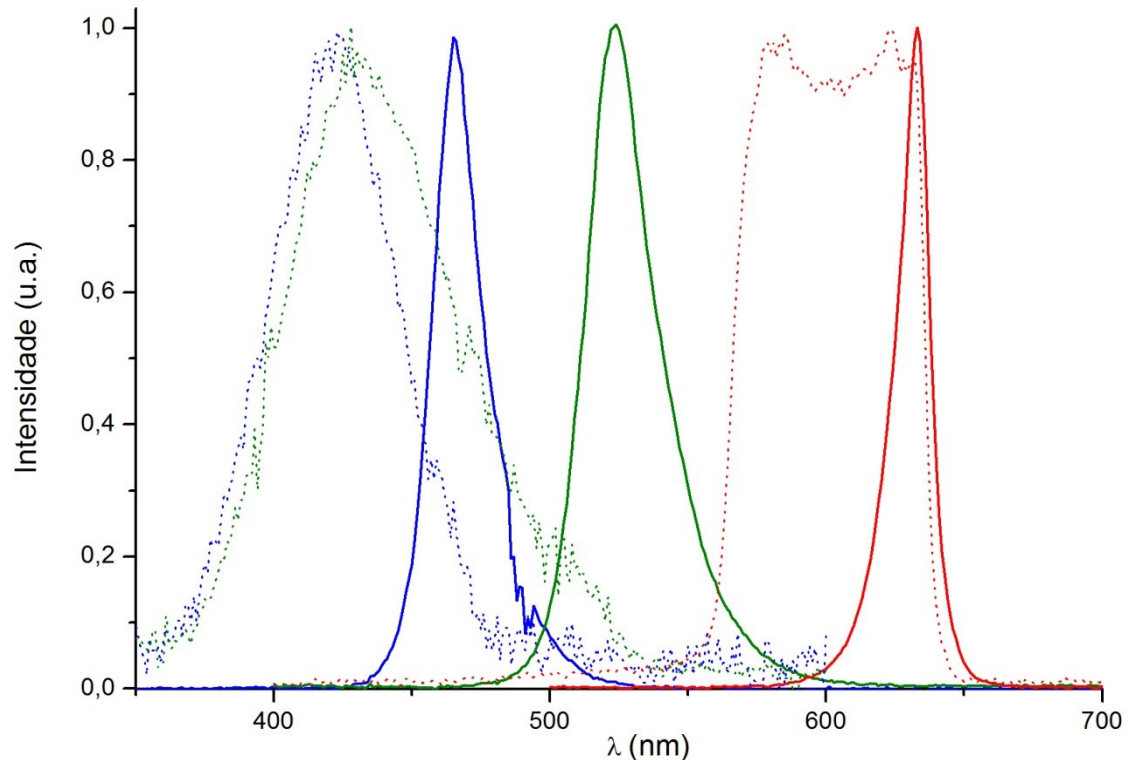


Figura 4.2.5 – Comparação relativa das curvas, tanto de emissão (linhas contínuas), quanto de absorção (pontilhado).

O Experimento

No experimento foram utilizados dois LEDs RGB, um como emissor e o outro como receptor. Na Figura 4.2.6 é apresentada a montagem do experimento. A ideia é apontar diretamente um LED sobre o outro, um como emissor e o outro como receptor. Para isso é necessário um tubo opaco, para que não penetre luz do ambiente e interfira no resultado. Pode ser usado um tubo de PVC 3/4” de aproximadamente 7 cm de comprimento. Os LEDs devem ser fixados no centro do tubo. Para isso pode ser usado um tampão de isopor ou qualquer material rígido o suficiente para não se soltar facilmente. Esse tampão deve ser escurecido para que não entre luminosidade do exterior, podendo ser usado papel glacê preto ou similar.

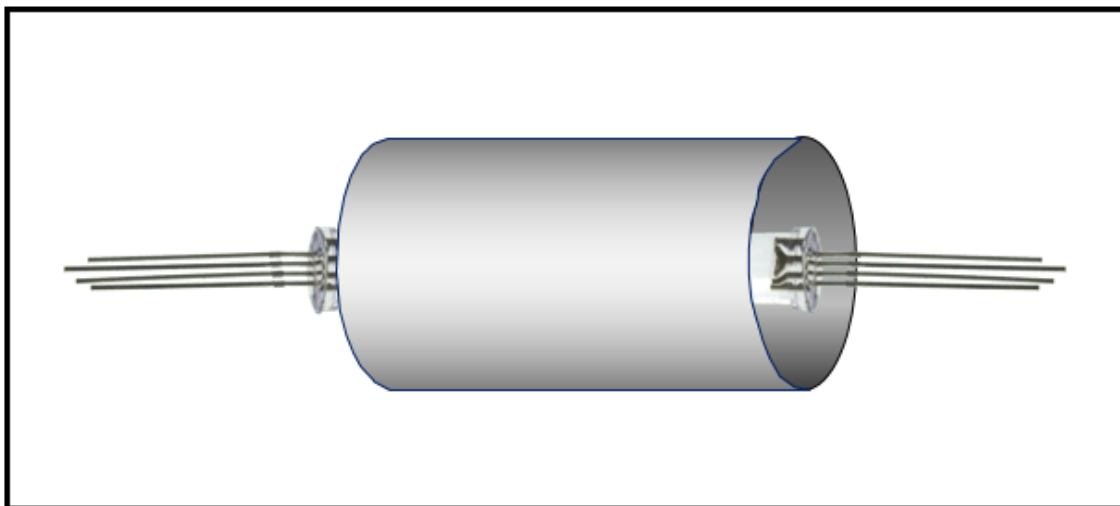


Figura 4.2.6 – Esquema da montagem dos LEDs RGB em uma estrutura tubular.

Para facilitar a operação foram utilizados três multímetros operando na escala de tensão VDC, cada um medindo a diferença de potencial de cada um dos três LEDs RGB. Do outro lado, uma fonte de alimentação de 3 VDC, associada a um resistor limitador de corrente de 100 Ω . Foram feitas as leituras para cada cor dos três LEDs emissores com cada um dos LEDs receptores. Os resultados são apresentados na Tabela 4.2.1.

Para calibrar o experimento, foram acesos os três LEDs ao mesmo tempo e o resultado é apresentado na Tabela 4.2.1 como tensões em mV. Consideramos, nessa calibragem, que o valor obtido seria o parâmetro para as demais leituras. Sendo assim, as demais medidas serão consideradas parcelas desse total, ou seja, uma porcentagem relativa dessa iluminação máxima. Exemplificando, na leitura em que somente o LED vermelho está aceso, a medida para o receptor LED vermelho foi 11 mV. Como na calibragem a leitura de vermelho foi de 33,8 mV, isto significa que apenas 33,8 % da total excitação do LED receptor vermelho fora atingida. Percebe-se que não houve leitura para os LEDs receptores verde e azul, o que significa que o LED receptor vermelho fez uma leitura correta, ou seja, ele “enxergou” a luz vermelha.

Resultados

Da Tabela 4.2.1 observa-se que receptor LED azul só gera sinal quando há incidência de luz azul sobre ele. No entanto a luz azul sensibiliza um pouco o LED receptor vermelho e sensibiliza o LED receptor verde, mais que a própria luz verde. O receptor LED verde, no entanto, não funciona muito bem. Percebe-se, ao olhar a tabela, que o LED receptor verde tem uma sensibilidade muito maior para a luz azul que para a própria luz que emite, na cor verde.

Receptor → LED RGB Emissor ↓	VERMELHO		VERDE		AZUL	
	V(mV)	I _R (%)	V(mV)	I _R (%)	V(mV)	I _R (%)
VERMELHO, VERDE E AZUL	33,8	100	30,0	100	4,3	100
VERMELHO	11,0	33,8	0	0	0	0
VERDE	21,8	64,5	1,8	6	0	0
AZUL	1,3	3,8	29,0	96,7	4,5	100
VERMELHO E VERDE	32,9	97,3	1,9	6,3	0	0
VERMELHO E AZUL	11,6	34,3	29,8	99,3	4,6	100
VERDE E AZUL	23,6	69,8	28	93,3	4,4	100

Tabela 4.2.1 – Diferenças de potencial medidas utilizando um LED RGB como fonte de luz e outro como receptor. As intensidades relativas foram obtidas pela razão entre o potencial medido para uma combinação de iluminação e o potencial obtido iluminando com todas as cores.

Análise

A observação dos resultados possibilita algumas interpretações. De fato, o experimento serviu para construirmos um transdutor que consegue converter ondas eletromagnéticas em diferenças de potencial. Observando as leituras e fazendo uso da tabela é possível saber qual LED ou qual combinação destes três LEDs está acesa. Deste modo, o experimento se mostrou ser eficiente, ou seja, ele “enxerga” essas cores. São óbvias as limitações deste olho cibernético aqui construído comparado ao humano. No entanto, para a finalidade didática a que se propõe, que é de demonstrar ao estudante como se processa a visão colorida, o modelo desenvolvido pode ser um auxiliar, junto com os demais métodos didáticos para ensino da visão cromática.

Por outro lado, como foi visto no gráfico de absorção das cores azul e verde do LED RGB, e depois confirmado pela tabela 4.2.1, os receptores dessas duas cores do LED

Capítulo 4- A Percepção do Espectro Eletromagnético

RGB têm uma sensibilidade muito parecida, com um pico próximo a frequência do azul. Esse desvio torna nosso olho cibernético deficiente. Podemos concluir que construímos um olho portador de algum tipo de discromatopsia. Um olho que não consegue discernir as cores como as pessoas com visão normal. Esse resultado, que torna nosso olho cibernético malsucedido para discriminar cores como um olho humano normal, torna-o o experimento ideal para iniciar um debate com a turma sobre o daltonismo, uma deficiência na visão cromática que foi discutida no capítulo 2, seção 2.2.

Como a maioria absoluta dos casos de discromatopsia se revela em deficiências genéticas, seria um momento oportuno trabalhar a interdisciplinaridade com o professor de biologia, quando este estiver tratando do estudo da genética. Aliás, a maior parte dos estudos deste trabalho pode ser enriquecida se trabalhada em conjunto com o professor de biologia. Isso pode ser combinado em reuniões pedagógicas para serem trabalhadas de forma síncrona ao longo do período letivo.

Pelos cruzamentos genéticos é possível fazer algumas previsões da probabilidade de uma pessoa nascer com este tipo de anomalia que acomete cerca de 10% da população masculina e apenas 1% das mulheres. Como os genes defeituosos são os recessivos, localizados no cromossoma X, a probabilidade da deficiência se manifestar no homem, que tem apenas um cromossoma X, é muito maior. Ainda no estudo genético o professor de biologia pode pedir aos estudantes que calcule a probabilidade de um filho ser portador desta anomalia caso os pais tenham todas as combinações possíveis de genes. Poderão verificar, por exemplo, que somente a mãe doa aos filhos a herança genética do daltonismo e os do sexo masculino nascerão daltônicos. Entretanto, sendo somente o pai daltônico os filhos não portarão o gene do daltonismo, mas todas as filhas sim.

Poderão ser apresentados aos estudantes os testes de visão cromática. Estes testes podem ser projetados para que os alunos identifiquem se são portadores de algum tipo de anomalia. Os testes de Ishihara podem ser utilizados para que os estudantes descubram uma possível dificuldade com cores, lembrando a eles que na maioria absoluta das vezes essa deficiência não representará grande dificuldade em suas vidas. Isso dependerá, é claro, da profissão que desejem seguir. De qualquer forma, o professor deve lembrar o estudante que somente o médico oftalmologista pode fechar algum tipo de diagnóstico relacionado à visão cromática. O teste apresentado pode servir para que o aluno perceba a necessidade de procurar orientação especializada para tratar de sua dificuldade.

Os testes de Ishihara foram desenvolvidos em 1917 pelo doutor Shinobu Ishihara (1879-1963), professor na Universidade de Tóquio. Consistem de cartões com pontos coloridos de cores com tons muito próximos e que formam em seu interior geralmente um número. A observação dos cartões pode gerar três tipos de visualizações pelo deficiente. Ele pode não enxergar nenhum número, identificar um número diferente do que a pessoa com visão normal, ou enxergar um número em um cartão em que a pessoa com visão normal não consegue discernir nenhum número. Algumas gravuras de Ishihara são apresentadas na Figura 4.2.7 com os respectivos resultados esperados para uma pessoa com visão deficiente [Wiki-TesIsh 2016].

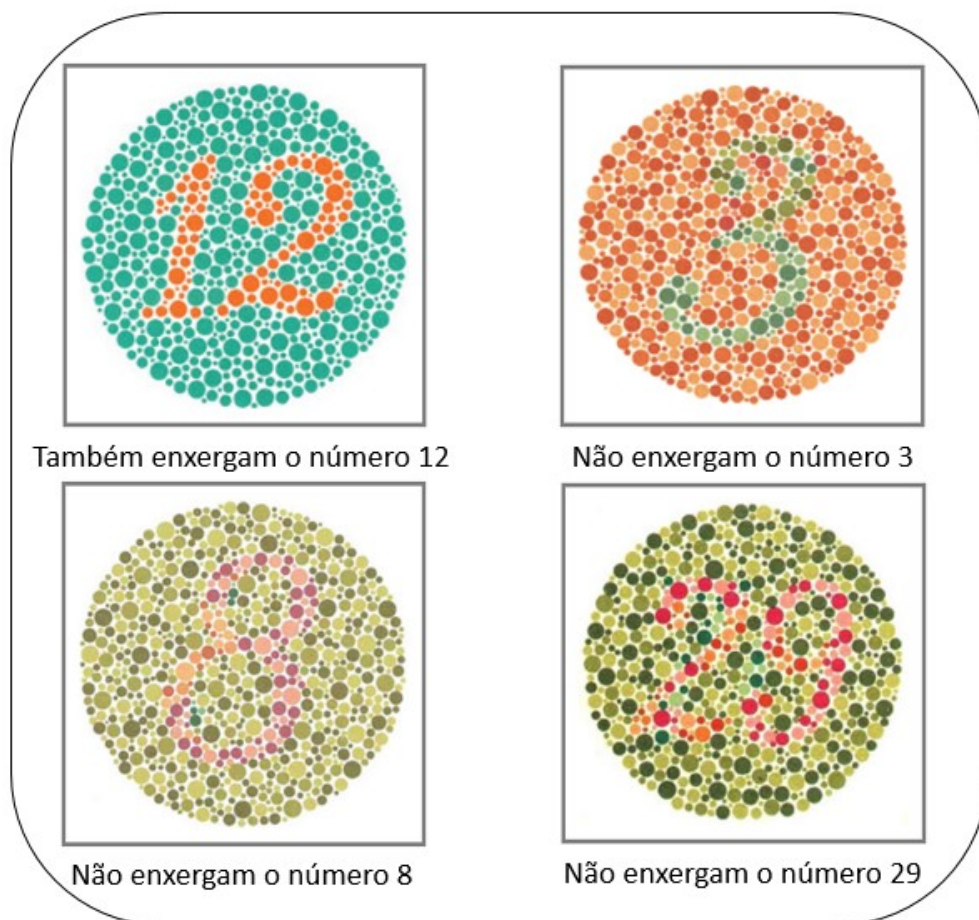


Figura 4.2.7 – Alguns exemplos de figuras contidas no livro de teste do Dr. Ishihara e os resultados esperados pelos portadores de discromatopsia.

A ignorância sobre essa anomalia é um mal que os professores devem combater. Muitos estudantes podem sofrer preconceito (o chamado *bullying*) por não saberem diferenciar cores, combinar roupas, pintar figuras com cores erradas etc. As aulas de geografia, onde se utilizam mapas com legendas coloridas, também podem se tornar um obstáculo muito sério na vida do estudante. Apesar de haver a necessidade de

Capítulo 4- A Percepção do Espectro Eletromagnético

apresentação de atestados de acuidade visual para estudantes até o primeiro ciclo do ensino fundamental, raros são os oftalmologistas que testam seus pueris pacientes, quanto à visão cromática, sem que os pais os peçam para fazer. A descoberta desta anomalia deve ser feita na mais tenra idade para que a criança cresça mais confiante e atenta as suas limitações.

Há softwares que podem converter as imagens do site da internet para que os daltônicos possam perceber com mais clareza as cores, tendo acesso a informações que normalmente não teriam ou passariam despercebidas [Visolve 2013]. Já foram desenvolvidos óculos que permitem ao daltônico conseguir discriminar melhor as cores, ajudando a acabar com a dúvida sobre certas cores que costumam se confundir [Enchroma 2016]. Há também pesquisas que prometem tratamento genético para essa anomalia [Mancuso 2009].

Em outros países, alguns médicos pesquisadores na área da medicina oftalmológica [Xie 2014] afirmam que as crianças devem ser testadas o quanto antes, a partir dos quatro anos de idade quando o teste já pode definir a deficiência. Com isso suas aulas precisam ser adaptadas para que possa progredir no desenvolvimento da vida acadêmica.

No dia a dia somos mergulhados em um mundo formado de cores. E não é só no mundo natural. As cores fornecem várias informações e apelos ao cidadão. Cores para destacar emoções, despertar o desejo, atrair consumidores e sinalizações. No trânsito as cores têm um papel fundamental e quem não as discerne pode enfrentar sérias dificuldades e riscos. Os pedestres precisam reconhecer, por exemplo, se o sinal está vermelho para os veículos, para que possa atravessar com segurança. Alguns semáforos possuem uma sinalização complementar para o pedestre com símbolos e cores, na qual o portador de deficiência pode a compreender, como visto na Figura 4.2.8.



Figura 4.2.8 – Sinalização para pedestres. Em vermelho o pedestre não deve atravessar, um boneco parado pode ser visto. Em verde um boneco simulando movimento indica que o pedestre já pode atravessar.

No Município do Rio de Janeiro a Lei Ordinária N°358, de 8 de outubro de 1982, autoriza o Poder Executivo a instituir o exame de acuidade visual obrigatório nos alunos das escolas municipais do Rio de Janeiro [Lei358 1982]. Pelo artigo 1°:

“Fica o Poder Executivo autorizado a instituir, após a matrícula nas unidades escolares do Município do Rio de Janeiro, a obrigatoriedade, no início do ano letivo, da medida da acuidade visual do Aluno, na escala padrão decimal, em cada olho, sem correção e com correção, quando necessário for. Este exame deverá ser procedido pelo Professor(a) ou pelo corpo auxiliar da unidade, orientado pelo Serviço Médico Escolar”.

Observa-se, de modo que é inequívoco, que a responsabilidade do professor durante suas atividades em aula, incluem a de apontar as dificuldades observadas nas tarefas escolares de seus alunos, para que sejam encaminhados ao médico da respectiva área. No Artigo 2°:

“Deverá constar do currículo do professor (a) uma aula administrada por médico oftalmologista referente à medição da acuidade visual e da detecção genérica de problemas oculares”.

Portanto, esse professor receberá instruções de um médico para que possa encaminhar os estudantes que apresentem dificuldades. Percebe-se que os problemas de

Capítulo 4- A Percepção do Espectro Eletromagnético

visão supracitados referem-se especificamente à acuidade visual, não tendo relação direta com os distúrbios cromáticos na visão. A menos no que não deixa claro quando cita a detecção genérica de problemas oculares, mas sem especificar quais seriam.

Já o Projeto de Lei Nº 245/2007 [ProjLei 245 2007] que tramita na assembleia legislativa do Estado do Rio de Janeiro, pretende instituir o programa de assistência médica oftalmológica e auditiva para os alunos matriculados nos estabelecimentos públicos estaduais de ensino fundamental e médio, em cumprimento ao disposto no inciso VII do art. 208 da Constituição Federal combinado com o disposto no inciso IX do art. 308 da Constituição Estadual.

Percebe-se novamente que há uma preocupação com a acuidade visual das crianças, entretanto, ela não se estende, ao menos explicitamente, a um exame para verificar sua visão cromática.

Na justificativa do projeto, em alguns trechos, lê-se:

“Estabelece a obrigatoriedade da realização de exames preventivos de acuidade visual e auditiva a ser feito nos primeiros trinta dias do ano letivo, nos estabelecimentos públicos de ensino médio e fundamental. Determina, ainda, que o Poder Público, na esfera estadual de governo, fica obrigado a doar óculos e aparelhos de correção auditiva ao aluno em que os exames detectarem a sua necessidade”.

Aqui fica bem definido que se trata de prevenção da acuidade visual, não havendo relação com a visão de cores.

*“A partir de 1988, a saúde dos escolares passou a ser obrigação do Estado, pois o art. 208, inciso VII, da Constituição Federal, dispõe que o dever do Estado com a educação será efetivado mediante a garantia de “atendimento ao educando, no ensino fundamental, através de programas suplementares de material didático-escolar, transporte, alimentação e assistência à saúde”. Assim, está garantido que os estudantes do ensino fundamental devem receber os **cuidados à saúde necessários para o bom desempenho escolar**”. Grifo nosso.*

Um bom desempenho, dependendo da disciplina, e do uso de cores para identificações importantes, poderá ser afetado caso o estudante tenha dificuldades em discriminar algumas cores, trazendo um enorme prejuízo para sua formação.

“De todo modo, cabe reiterar, é conveniente que o Poder Público, inclusive na esfera federal, amplie as iniciativas de atendimento médico e odontológico de caráter preventivo e de identificação, visando à correção precoce, de problemas que prejudiquem a vida escolar dos alunos do ensino fundamental, de forma a reforçar o compromisso constitucional da educação como direito de todos”. Grifo nosso.

São vários os problemas oftalmológicos que reduzem a acuidade do aluno, no entanto, para realmente garantir o compromisso da educação como direito de todos, a deficiência cromática precisaria ser considerada [Demarzo 2011].

“Apresenta-se abordagem preventiva de problemas visuais de escolares, considerando os níveis de prevenção em Saúde Pública (Leavell e Clark). É destacada a importância da atuação em educação para a saúde na escola, dirigida à promoção da saúde ocular e à prevenção de distúrbios oftalmológicos, buscando a adoção de condutas acertadas do indivíduo, em termos pessoais e coletivos. A linha geral da programação é descrita sucintamente, concluindo pela necessidade da manutenção dos seus propósitos e bom nível, embora já implantada como rotina de serviço”. Grifo nosso.

Não fica claro o que estaria incluído no que consideram distúrbios oftalmológicos. Sendo assim, para que a deficiência na visão cromática seja realmente diagnosticada, seria necessário que a lei fosse mais explícita em explorar todos os problemas a que ela se refere.

Recentemente, no ano de 2011, uma ação movida por um estudante de um curso preparatório para residência médica, que tinha enormes dificuldades em compreender as apostilas que estudava, pelo fato de ser daltônico e a apostila codificada em cores, resultou em um acórdão que pode abrir precedentes para que haja uma maior preocupação com a formulação de aulas e apostilas, de modo a facilitar o acesso os portadores de discromatopsia.

Capítulo 4- A Percepção do Espectro Eletromagnético

A juíza cita inclusive a Convenção Interamericana para a Eliminação de Todas as Formas de Discriminação contra as Pessoas Portadoras de Deficiência, ratificada pelo Congresso Nacional e promulgada no ordenamento jurídico brasileiro através do Decreto nº 3.958, de 08 de outubro de 2001 [Acórdão 2007] que estabelece que:

“...deficiência significa uma restrição física, mental ou sensorial, de natureza permanente ou transitória, que limita a capacidade de exercer uma ou mais atividades essenciais da vida diária, causada ou agravada pelo ambiente econômico e social”.

A juíza vai além:

“Sendo o daltonismo uma “perturbação na percepção visual caracterizada pela incapacidade de diferenciar todas ou algumas cores”, percebe-se que se trata de uma restrição sensorial, que limita a capacidade do portador de exercer uma ou mais atividades da vida diária...” Grifo na própria citação.

Esse julgamento é muito importante como instrumento jurídico que pode ser utilizado em processos posteriores e, mais ainda, para que sejam regulamentadas leis que protejam definitivamente os portadores dessa deficiência.

No Rio de Janeiro, a Portaria Nº1.737 de 26 de março de 1999 estabelece que as clínicas médicas credenciadas deverão, no anexo III, item I, subitem c, possuir equipamento para aferir: acuidade e campo visual, visão estereoscópica e **cromática** [DETRAN 1999]. Grifo nosso. E consta, no site do DETRAN, nas exigências para poder habilitar-se, que o candidato possua visão cromática [SiteDETRAN 2016].

Alguns estados brasileiros, como em países mais desenvolvidos, já procuram adequar suas leis e resoluções de forma que o portador de deficiência na visão cromática possa habilitar-se para direção de veículos. A exemplo do Rio Grande do Sul, que através da resolução Nº 30 de 2010, emitida pelo CENTRAN-RS [CENTRAN-RS 2010], resolve:

“Art. 1º No teste de visão cromática para identificação das cores prevista no item 3.1, Anexo II, da Resolução n. 267/08 do CONTRAN não será utilizado o Livro ou Tabela de Ishihara, tendo em vista que o mesmo não faz parte dos requisitos do art. 16, inciso II, da mesma resolução;

Art. 2º Os candidatos à direção de veículos automotores nas categorias C, D, e E deverão ser submetidos ao exame de identificação das cores verde, vermelha e amarela, de acordo com o art. 16, inciso II, alínea “o”, da Resolução n. 267/08 do CONTRAN”.

Ou seja, para candidatos à categoria B, a exigência da visão cromática não é mais cobrada. Mantendo-se uma exigência apenas para a visão das três cores mais utilizadas em sinalizações viárias, que são o verde, o vermelho e o amarelo. A intenção de flexibilizar a lei parte do princípio da inclusão de pessoas com essa deficiência, como pode ser visto na própria justificativa da resolução:

“Considerando o objetivo de garantir às pessoas portadoras de deficiência de qualquer natureza, inclusive os portadores de discromatopsia, a plenitude do direito de ir e vir, nos termos do art. 5º, inciso XV, da Constituição da República Federativa do Brasil, bem como o de conduzir veículos com segurança para si e para os demais usuários da via pública”.

Uma pequena iniciativa, mas que ainda deixa em desvantagem quem pretende dirigir veículos maiores das categorias, C, D e E. Os avanços realmente virão quando as sinalizações se adequarem à inclusão de pessoas com distúrbios na visão cromática, desta forma, todos estarão em igualdade para se sentirem seguros em conduzir seus veículos automotores. O mesmo esforço será necessário para que, no ambiente escolar, os materiais didáticos sejam pensados de forma que os portadores de discromatopsia possam neles estudar sem que nenhuma informação possa ser despercebida. Desta forma, todos ficariam em real igualdade de condições de acesso ao estudo e ao trabalho.

Capítulo 5

Composição de Cores

5.1 Síntese Aditiva

5.1.1 Ensino da visão cromática através de aparato com LED's coloridos

Este trabalho foi transformado em artigo e publicado na Revista Brasileira de Ensino de Física, no dia 11 de abril de 2016.

Ensino da visão cromática através de aparato com LED's coloridos

Teaching chromatic vision using a colored-LED apparatus

M.V. Silveira,* R.B. Barthem

Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Recebido em 26 de janeiro de 2016. Revisado em 12 de março de 2016. Aceito em 11 de abril de 2016

A compreensão do mecanismo da visão em cores, sobretudo no Ensino Médio, é importante para a formação de um indivíduo capaz de acompanhar as tecnologias de imagem, o que o ajuda também a compreender como percebe as cores do mundo natural. Com base na teoria tricromática de Young-Helmholtz e fazendo uso de um LED tricolor RGB, em uma montagem de custo relativamente baixo, foi desenvolvido um aparato que permite ao professor mostrar como as cores podem ser adicionadas para a composição de outras, ou seja, a síntese aditiva de cores.

Palavras-chave: visão cromática, LED, Young-Helmholtz.

Understanding the color vision mechanism, in high school in particular, is important in the formation of a person able to follow imaging technologies, which also helps to understand how he perceives the natural world colors. Based on Young-Helmholtz trichromatic theory and making use of a tri-color RGB LED, with relatively low cost assembly, it has been developed an apparatus that enables the teacher to show how colors can be added to compose other ones, i.e. additive synthesis.

Keywords: chromatic vision, LED, Young-Helmholtz.

1. Introdução

O processo de composição das cores em aparelhos televisores, seja nos antigos tubos de raios catódicos ou nos modernos televisores de LED (da sigla em inglês para Light Emission Device que significa Dispositivo Emissor de Luz), utiliza a síntese aditiva de luzes nas cores vermelha, verde e azul [1,2], de acordo com a teoria tricromática de Young-Helmholtz [3]. Para Thomas Young (1773-1829) nossa retina seria composta de células receptoras capazes de se sensibilizarem com luzes nas cores vermelha, verde e violeta. Muitos anos mais tarde, Helmholtz (1821-1894) sugeriu a substituição da cor violeta pela azul, definindo assim a forma com que, a partir dessas três cores (Red, Green e Blue, em inglês ou RGB), poderíamos compor qualquer outra nova cor do espectro visível pelo olho humano [4]. Apesar dos estudos de Young datarem do século XVIII, somente em 1964 sua tese

foi comprovada experimentalmente por duas equipes de pesquisadores independentes [5,6].

A relevância de se compreender as novas tecnologias, que já estão incorporadas em nosso dia a dia, deriva da necessidade de formação de um cidadão contemporâneo, atuante e solidário, com instrumentos para intervir e participar na realidade, como apontam as Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais [7]. É importante compreender também o desenvolvimento histórico antecessor a essas novas tecnologias, tanto quanto a influência que essas impõem a outros aspectos culturais como a arte fotográfica e cinematográfica, por exemplo. Outrossim, reafirmando a necessidade de se formar um cidadão crítico capaz de compreender a física a partir de sua contextualização histórica e social, o estudo da Óptica é rico em significado. A visão é um dos órgãos dos sentidos mais importantes para o ser humano, mas os fenômenos físicos aos quais ela remete tem perdido

*Endereço de correspondência: marcio.vs@oi.com.br.

espaço nos currículos atuais para outros campos da Física.

Além da Física, a Biologia pode complementar o tema, analisando os aspectos fisiológicos da visão. É, portanto, uma forma de se introduzir na Biologia o estudo da estrutura do olho humano, chegando aos cones, que são as células responsáveis pela visão cromática.

O desenvolvimento dos LED's de alta potência e do LED azul, no início dos anos 1990 [8, 9], permitiu o desenvolvimento da luz branca de estado sólido (SSL). Com uma altíssima eficiência de conversão eletro-óptica ganhou rapidamente os mercados, substituindo gradativamente as lâmpadas incandescentes e fluorescentes. Apresentando uma maior durabilidade e baixo aquecimento foi logo incorporado aos dispositivos de imagem eletrônicos. Os criadores do LED azul foram agraciados com o Prêmio Nobel de Física em 2014 [10, 11].

A luz branca emitida pelo Sol pode servir de base para compreender que, de fato, quando vemos o branco, estamos estimulando igualmente os cones sensíveis às luzes vermelha, verde e azul. Com a ajuda de um prisma, como observou Isaac Newton [12], podemos verificar que a cor branca do sol é na verdade a superposição de luzes (ondas eletromagnéticas) de várias cores de comprimentos de onda distintos. O mesmo pode ser percebido num fenômeno natural bem conhecido de todos nós, o arco-íris, ou quando a luz branca incide na superfície de um disco compacto (ou CD na sigla em inglês para Compact Disc) ou um DVD (sigla em inglês para Digital Versatile Disc).

A suposição de que a luz branca é uma cor pura, ou seja, de frequência eletromagnética bem definida, pode ser facilmente derrubada com a explicação do fenômeno que ocorre com o prisma ou o arco-íris. Desta forma, podemos fazer com que o estudante perceba que, na verdade, quando vemos a luz branca estamos diante de luzes coloridas que sensibilizam nossos receptores, os cones, de uma forma bem balanceada. Ao receber esse estímulo, o cérebro determina que estamos diante da cor branca [1].

Com base nesse princípio, o experimento desenvolvido permite a composição de diversas cores, inclusive o branco, a partir de três cores básicas contidas no LED RGB, através do manuseio de potenciômetros. Além disso, ao produzir uma determinada cor o estudante pode decompô-la, como ocorre com a luz do sol em um arco-íris, e observar sua

estrutura usando um DVD para difratar a luz proveniente do LED RGB, observando sua composição espectral [13,14]. Ao variar cada potenciômetro individualmente, o estudante pode perceber que está alterando a tonalidade daquela luz. A alteração da cor do LED RGB [15] pode ser acompanhada pela redução gradativa da intensidade da componente básica da luz dispersa pelo DVD.

A Figura 1 mostra a composição de cores pela síntese aditiva de algumas combinações simples. Ela pode ser utilizada em sala de aula, mostrando ao estudante de que forma podemos compor diversas outras cores através das luzes vermelha, verde e azul. O estudante poderá observar, ainda na figura 1, que na fronteira entre o azul e o verde há uma cor azul esverdeado, entre o azul e o vermelho há o rosa arroxeado e no encontro das cores verde e vermelha, o amarelo.

2. Arranjo Experimental

O aparato proposto pode ser montado com a participação de algum estudante mais motivado, ou com um interesse particular em eletrônica. Os componentes utilizados são descritos na Tabela 1.

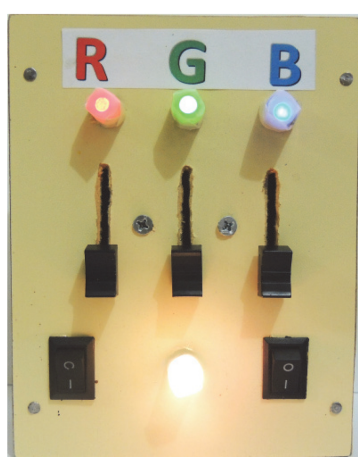
A montagem da caixa pode ser feita com sobras de madeira, eucatex, acrílico, compensado ou até mesmo um papelão bem resistente. As dimensões utilizadas na caixa foram, aproximadamente, 11,5 cm x 15,0 cm x 4,5 cm, como pode ser visto na Figura 2a. Na Figura 2b, temos a caixa aberta para a visualização do seu interior, com todas as conexões estabelecidas. Os potenciômetros que podem ser vistos nas Figuras 2a são os potenciômetros deslizante (P_1, P_2, P_3), enquanto que na Figura 2b são os potenciômetros de ajuste fino (P_4 e P_5). Após o



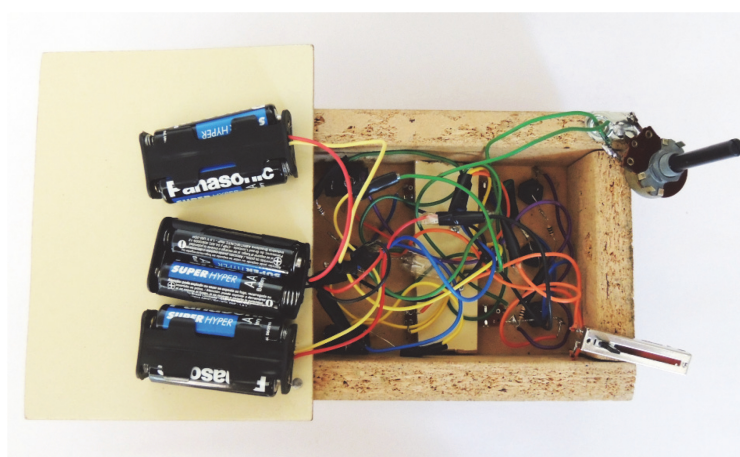
Figura 1: Composição aditiva de cores.

Tabela 1: Lista dos componentes necessários para a montagem.

Sigla	Quant	Descrição
<i>RGB</i>	1	LED RGB de 5 mm e alto brilho com o anodo comum
<i>R</i>	1	LED vermelho de 5 mm e alto brilho
<i>G</i>	1	LED verde de 5 mm e alto brilho
<i>B</i>	1	LED azul de 5 mm e alto brilho
$R_1 - R_6$	6	Resistores de 100Ω 1/8 W
$Ch_1 - Ch_2$	2	Chaves interruptoras (liga e desliga)
$P_1 - P_3$	3	Potenciômetros deslizantes de $10k\Omega$
$P_4 - P_5$	2	Potenciômetros de $10 k\Omega$ (de volta ou deslizante)
$V_1 - V_3$	3	Suportes com 2 pilhas pequenas cada (AA) de 1,5 V
	3m	Fio cabinho de cores variadas
	1	Folha de papel vegetal ou fosco (30x30 cm)
	1	Ferro de solda
	20 cm	Fio de solda
	1	Rolo de fita isolante.



(a)



(b)

Figura 2: (a) Vista superior da montagem com o LED RGB produzindo a cor branca e os demais com brilho atenuado. Os três potenciômetros estão deslocados em direção ao LED RGB. (b) Vista interna onde podem ser observados os potenciômetros de ajuste fino e as pilhas de alimentação.

ajuste, esses últimos são acondicionados no interior da caixa para que não tenham seus valores alterados por descuido.

O LED RGB é composto de três LED's encapsulados em um mesmo invólucro e com o terminal anodo como comum, ou seja, esse LED corresponde a três LED's e pode ser visto na figura 2b, entre as duas chaves (Ch_1 e Ch_2). Na outra extremidade são colocados os outros três LED's, na sequência (R,G,B). Temos então 3 pares de LED's nas cores vermelha, verde e azul.

O esquema do circuito eletrônico é apresentado na Figura 3. Os pares de LED's de mesma cor são alimentados por fontes individuais (3V) conectadas através do ponto central do respectivo potenciômetro (P_1 , P_2 ou P_3). Ao se alterar a posição de um dos potenciômetros modificamos as resistências

que alimentam os circuitos de cada um dos LED's do determinado par. Dessa forma, ao se alterar a posição de um potenciômetro a intensidade do brilho é comutada entre os LED's da mesma cor.

Os resistores R_1 a R_6 de 100Ω limitam a corrente nos LED's para não danificá-los. Os potenciômetros P_4 e P_5 , ambos de $10 k\Omega$, são usados para um ajuste no brilho dos LED's vermelhos. A sugestão de procedimento a ser adotado é começar pela produção da cor amarela no LED RGB, colocando os potenciômetros P_1 e P_2 nas posições em que a luz do LED RGB fique com maior brilho, e o P_3 com mínimo de azul no RGB. A cor a ser obtida deve ser a amarela. Para isso, ajusta-se o potenciômetro P_4 até obter essa cor. O ajuste do potenciômetro P_5 é para que os LED's individuais fiquem com brilhos equivalentes, quando todos acesos. Os valores

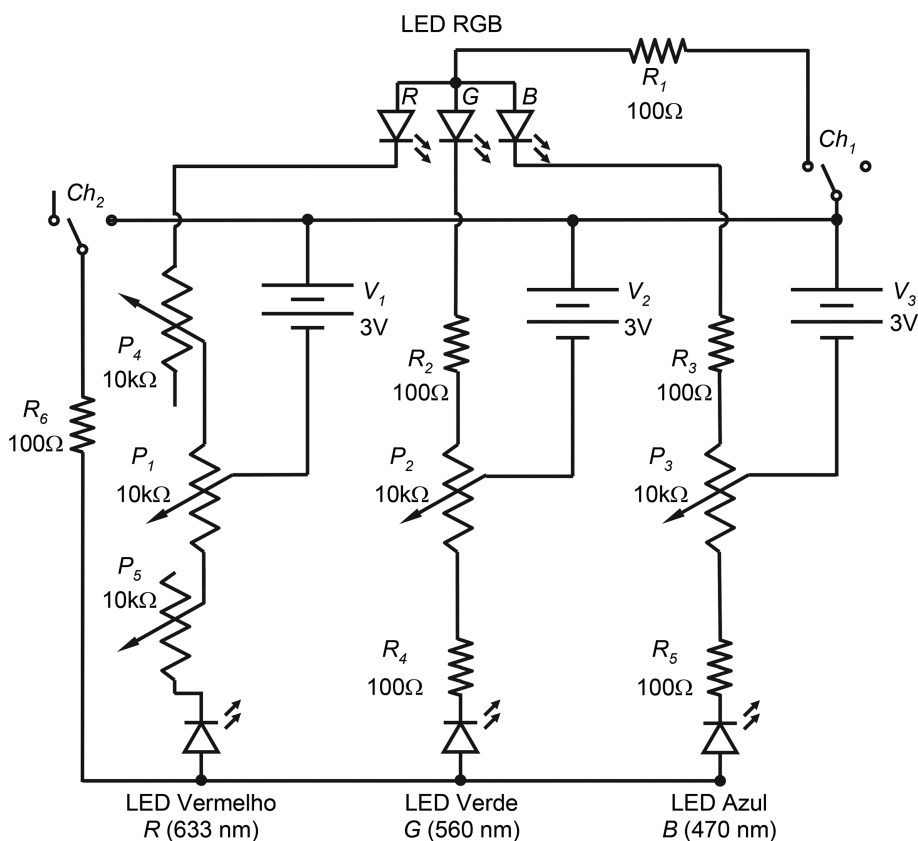


Figura 3: Circuito Eletrônico

que permitiram um funcionamento adequado para o experimento foram $P_4 \approx 150 \Omega$, e $P_5 \approx 1,2 \text{ k}\Omega$. Como esses valores de ajuste fino podem variar muito em função do estado de uso das pilhas, além das características técnicas de cada LED, é interessante manter os potenciômetros de ajuste de valor de $10 \text{ k}\Omega$. Sugerimos, ainda, fazer uma calibração antes de começar a usar o aparato em uma nova sessão de experiências.

A necessidade de se usar os dois potenciômetros de ajuste decorre do fato do LED vermelho operar com valores de tensão bem mais baixos que os das demais cores (em torno de 1,5 a 2,0V).

Como os LED's possuem uma lente em seu topo, a luz emitida é bem direcional e, no caso do LED RGB, é possível perceber as três fontes luminosas de cores de forma distinta, quando se olha bem de perto. O uso do papel fosco ou vegetal permite que a luz emitida pelos LED's fique mais difusa e possa ser observada em diferentes ângulos. No caso do LED RGB, permite ainda que as cores se misturem de forma a se observar um padrão de cor homogêneo.

A Figura 4 permite visualizar a comutação entre os LED's individuais (parte superior da figura) e os

LED's no RGB. A chave Ch_1 aciona o LED RGB (embaixo na figura) e a outra Ch_2 aciona os demais LED's (na parte superior da figura). Isso permite que inicialmente seja mostrado aos estudantes que variando os potenciômetros estamos variando o brilho de cada um dos três LED's individuais, quando apenas a chave Ch_2 está acionada. Ao ligarmos as duas chaves (Ch_1 e Ch_2), os estudantes podem perceber que enquanto o brilho que está sendo modificado no LED individual (aumentando ou diminuindo), o brilho da cor correspondente no LED RGB se altera de forma complementar.

Para analisar a distribuição espectral da luz composta no LED RGB, foi utilizado um DVD do qual a camada prateada foi removida. Como ele é composto de dois discos laminares, para retirar a camada prateada basta pressionar a junção dos dois discos pelo orifício central com uma haste pontiaguda. Pode ser uma chave de fenda bem fina ou a ponta de uma tesoura. Em seguida, ao girar a haste provoca-se o descolamento das duas superfícies. Aplicando uma fita adesiva no que restar de metal do disco inferior, retiram-se completamente os resíduos prateados, ou seja, a camada de gravação. O uso do

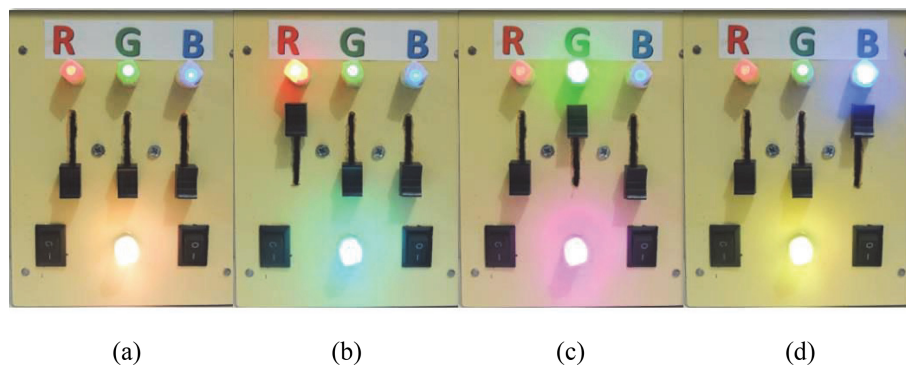


Figura 4: Quatro exemplos de composição. (a) Todos os potenciômetros estão direcionando a corrente elétrica em direção aos LED's RGB gerando a cor branca. (b) O LED vermelho está totalmente aceso enquanto que no RGB os LED's verde e azul produzem uma cor azul esverdeado. (c) O LED verde está com todo brilho enquanto que o vermelho e azul brilham no RGB compondo a cor violeta. (d) O LED azul brilha e no RGB apenas o vermelho e o verde produzem o amarelo.

DVD permite um resultado muito melhor que com um CD, que também pode ser utilizado. O DVD assim trabalhado deve ser posicionado sobre o LED RGB, centrado sobre este. Um suporte feito com arame, como os encontrados em garrafas de espuma, pode ser utilizado para apoiar o DVD sobre o LED RGB, como mostra a Figura 5.

3. Resultados

Os resultados obtidos com o experimento podem ser observados nas Figuras 4a, 4b, 4c e 4d. A Figura 4a mostra todos os três potenciômetros posicionados para baixo o que faz com que o brilho das três

cores do LED RGB atinja seu máximo. Ao mesmo tempo, os três LED's superiores têm seus brilhos reduzidos ao mínimo. O LED RGB produz uma cor que, visualmente, percebemos como branca.

Na Figura 4b o brilho da cor vermelha do LED RGB é reduzido restando, neste LED, apenas as cores verde e azul. A percepção visual sugere a cor azul esverdeado. Pode-se observar que o LED superior vermelho aumenta seu brilho ao máximo.

Na Figura 4c o potenciômetro do vermelho retorna para a posição inferior e o da cor verde vai para seu ponto superior máximo. Ao se fazer isso, diminui-se toda a intensidade da luz verde do LED RGB e aumenta-se o brilho do LED superior verde ao máximo. O LED RGB produz uma resposta visual de se estar diante de uma cor violeta.

Retornando o potenciômetro do verde a sua posição inferior e elevando o potenciômetro do azul ao seu topo, pode-se observar que o brilho do LED azul superior aumenta consideravelmente e a cor azul do LED RGB é reduzida. Nesse momento, o LED RGB está apenas com as cores vermelha e verde acesas, o que produz a sensação visual da cor amarela.

Ao manusear os potenciômetros de diferentes formas, o estudante pode compor inúmeras outras cores e compreender que cada cor que ele produz é a combinação das três cores básicas dos três LED's, nas proporções que ele define.

Utilizando o DVD devidamente preparado, como é descrito anteriormente, e posicionando-o de forma que o orifício coincida com o LED RGB (Figura 5), pode-se observar o quanto de vermelho, verde e azul aquela cor formada é composta.

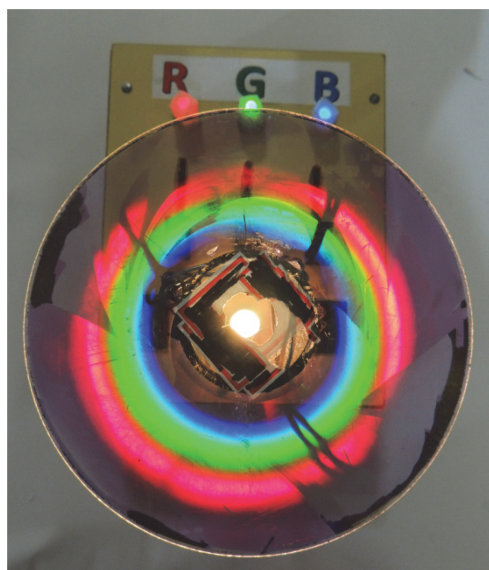


Figura 5: Montagem do DVD, sem a película refletora, sobre o LED RGB apresentando a cor branca.

Na figura 5 os potenciômetros estão posicionados na mesma posição da figura 4a, gerando a cor branca. Com uso do DVD observamos o quanto destas três cores estão contidas no LED RGB. O mesmo pode ser feito para qualquer outra cor, evidenciando ao estudante que a cor que enxergamos é o produto da sensibilização dos cones sensíveis ao vermelho, ao verde e ao azul, o que constitui uma característica puramente fisiológica.

4. Conclusão

O aparato desenvolvido, com custo relativamente baixo (inferior a R\$ 50,00) e de montagem simples, atendeu a proposta inicial de produzir cores através do processo da síntese aditiva. De forma lúdica, os estudantes têm acesso a um equipamento que pode ser facilmente manuseado.

Em oposição ao processo de síntese subtrativa usada, por exemplo, nas misturas de tintas, esse material instrumentaliza o processo de compreensão da síntese aditiva de cores. Através da transferência do brilho luminoso de um LED de determinada cor para a cor correspondente do LED RGB, o estudante controla e visualiza a composição da cor gerada aditivamente. Além disso, ele pode analisar o espectro de emissão da luz produzida pelo LED RGB em suas componentes básicas através do uso do DVD.

Referências

- [1] Ricardo Barthem, *A Luz, Temas Atuais de Física* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2005), 1^a ed.
- [2] Constantino Pérez Veja y José M^a Zamanillo Sainz de la Mazza, *Fundamentos de Televisio Analógica y Digital* (Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria, Santander, 2003).
- [3] Luís Miguel Bernardo, *História da Luz e das Cores* (Editora UP, Porto, 2009), v. I, 2^a ed.
- [4] P.K. Kaiser and R.M. Boynton, *Human Color Vision* (Optical Society of America, Washington, 1996), 2^a ed., p. 563-579,
- [5] W.B. Marks, W.H. Dobelle and E.F. MacNichol Jr., *Science* **143**, 1181 (1964).
- [6] Paul K. Brown and George Wald, *Nature* **200**, 37 (1963).
- [7] Brasil, *Parâmetros Curriculares Nacionais + (PCN+) - Ciências da Natureza e suas Tecnologias* (Ministério da Educação, Brasília, 2002), p. 26-27.
- [8] H.M. Kito Amano, K. Hiramatsu and I. Akasaki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **28**, L2112 (1989).
- [9] B. Brilliant Johnstone, *Shuji Nakamura and the Revolution in Lighting Technology* (Prometheus Books, Amherst, 2007).
- [10] The Nobel Prize in Physics 2014, disponível em http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/, acessado em 18/1/2016.
- [11] Felipe Rudge, *Por que Prmio Nobel para o LED azul*. Opinião, 23 de outubro de 2014, disponível em http://www.sbfisica.org.br/v1/index.php?option=com_content&view=article&id=604:por-que-premio-nobel-para-o-led-azul&catid=150:opinioao&Itemid=316, acessado em 19/1/2016.
- [12] Isaac Newton, *ptica*, trad. de André Koch Torres de Assis (Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002), 1^a ed.
- [13] Nilson Marcos Dias Garcia e Hypolito Jose Kalinowski, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **21**, 332 (2004).
- [14] L.J. Jonathas, *Uma Abordagem experimental para o Ensino da Quantização da Luz*. Dissertação de Mestrado em Ensino de Física, UFRJ, 2015. Disponível em <http://objdig.ufrj.br/12/teses/828142.pdf>, acessado em 9/3/2016.
- [15] *LED Color Mixing: Basics and Background* (Cree, Inc. Energy Star, Durham, 2015), disponível em http://www.cree.com/~/media/Files/Cree/LED-Components-and-Modules/XLamp/XLamp-Application-Notes/LED_color_mixing.pdf, acessado em 19/1/2016.

5.1.2 Disco de Newton com LEDs

Este trabalho foi transformado em artigo e publicado na Revista Brasileira de Ensino de Física em 24 de junho de 2016.

Disco de Newton com LEDs

Newton's disk with LEDs

M V Silveira*, R B Barthem

Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Recebido em 13 de abril de 2016. Revisado em 11 de maio de 2016. Aceito em 15 de maio de 2016

Há muitos anos que o chamado “disco de Newton” vem sendo usado no ensino de óptica na tentativa de ilustrar o mecanismo da percepção espectral da luz visível pelo olho humano. Sua proposta é de que, ao ser girado, aparente ter a cor branca, que é a soma de todas as cores do espectro nele estampadas. De fato, a cor resultante que se percebe é um tom de cinza, visto que neste caso ocorre uma síntese subtrativa. A proposta desse trabalho é construir um disco, como o de Newton, no qual podemos compor através de LEDs coloridos não apenas a cor branca, como também a amarela, a ciano e a magenta. Dessa vez, as cores são geradas através da síntese aditiva com base na teoria tricromática de Young-Helmholtz.
Palavras-chave: Disco de Newton, LED, Young-Helmholtz.

For many years, the so-called “Newton’s disc” has been used in optical teaching in an attempt to illustrate the human eye’s mechanism of spectral perception of visible light. His proposal is, when rotated, appears to be white, which is the sum of all colors of the spectrum printed on it. In fact, the resulting color we see is a shade of gray, as in that case there is a subtractive synthesis. The purpose of this work is to build a disc, such as Newton’s one, in which we can compose through colored LEDs not only white color, as also yellow, cyan and magenta. This time, colors are generated by additive synthesis based on the Young-Helmholtz trichromatic theory.

Keywords: Newton’s disk, LED, Young-Helmholtz.

1. Introdução

A simples ação de abrir os olhos e enxergar o mundo carrega consigo uma série de fenômenos que podem ser utilizados para auxiliar no ensino de vários campos da ciência. A luz, enquanto onda eletromagnética, propaga-se no vácuo a uma velocidade de cerca de 300.000 km/s. Para visualização dos objetos que estão ao nosso redor, isso implica em um tempo de propagação às nossas células fotorreceptoras de cerca de algumas dezenas de nanossegundos ($\Delta t \sim 10^{-8}$ s). Alguns dos processos bioquímicos que se sucedem, no entanto, não são tão velozes. O processo bioquímico se inicia quando a opsina (pigmento contido nos cones e bastonetes) ligada à vitamina **A** recebe um fóton e sofre uma mudança física (cis→trans). Essa mudança ocorre em apenas alguns picossegundos ($\Delta t \sim 10^{12}$ s). Os pro-

cessos seguintes, que vão da geração e propagação do impulso elétrico pelo sistema nervoso ao reconhecimento da imagem no cérebro, levam bem mais tempo, da ordem do décimo de segundo ($\Delta t \sim 10^{-1}$ s) [1]. O tempo necessário para que o estímulo criado na retina desapareça foi descrito pelo médico Peter Mark Roget em 1826, e medido pela primeira vez pelo físico Joseph-Antoine Plateau em 1829. É o que ficou conhecido como sendo a persistência retiniana [2].

Os efeitos decorrentes da duração temporal de cada etapa do processo da visão são irrelevantes para as situações do dia a dia, tornando nossa visão perfeitamente adaptável ao meio em que vivemos. No entanto, aproveitando-se de algumas de suas consequências, foi possível simular uma sequência contínua através da sobreposição de imagens ao longo do tempo, surgindo assim a cinematografia [3].

*Endereço de correspondência: marcio.vs@oi.com.br.

Para que a projeção de um filme se assemelhe a sensação visual que possuímos no mundo real, é fundamental o equilíbrio entre três aspectos da amostragem temporal, ou seja, entre três aspectos envolvidos na sobreposição de cada quadro de imagem. O primeiro deles é a remanência visual, que é o tempo em que as imagens são trocadas. Esse deve ser inferior ao da capacidade de nosso sistema visual em detectar o momento dessa troca de forma a nos levar a acreditar que se trata de um movimento contínuo (em torno de 24 quadros por segundo). Os outros aspectos são a cintilação e o batimento e/ou interferências com a rede de distribuição elétrica. Esse último é mais inerente aos sistemas eletrônicos [4]. Portanto, a velocidade em que os quadros são trocados ao longo do tempo permite sensibilizar nossa visão de forma a produzir sensações e efeitos que são utilizados em muitas aplicações do nosso cotidiano.

Isaac Newton (1643-1727) estudou profundamente a propriedade de dissociação da luz branca, ao atravessar um prisma de vidro, em feixes de luzes de diversas outras cores. Newton teria encontrado sete cores, coincidência ou não, o mesmo número das notas musicais. No segundo problema da 6^a proposição do seu livro *Optics*, na edição de 1730 [5], Newton utiliza um círculo com sete fatias, como uma pizza, propondo que cada uma das sete fatias represente uma das sete cores observadas, a saber: vermelha, laranja, amarela, verde, azul, anil e violeta. Usando uma forma de cálculo geométrico, Newton descreve as cores resultantes a partir da combinação das sete cores que ele considerou como sendo primárias. Em certo momento Newton, ao descrever a composição de duas cores, afirma:

“... todavia a cor composta dessas duas não será perfeitamente branca, mas alguma cor anônima esmaecida. Pois ainda não fui capaz de produzir o branco perfeito misturando apenas duas cores primárias. Se ele pode ser composto de uma mistura de três (cores) tomadas a distâncias iguais na circunferência, não sei; mas de quatro ou cinco, não duvido que pode...”

Havia muitas dúvidas pairando na cabeça de Newton e, para nós, não fica claro se ele fazia uso do que chamamos atualmente de “disco de Newton”. Esse disco é dividido tal qual o citado anteriormente, mas pintado com as sete cores básicas e posto a girar

pelo seu centro de gravidade. O efeito provocado pela rotação rápida deveria compor a cor branca, que seria como convergir em um único ponto as sete cores do prisma. Na verdade, nunca conseguimos o branco, mas uma tonalidade de cinza. Isso se deve ao fato de que cada um dos setores coloridos está absorvendo a parte espectral da luz complementar à que espalha, isto é, a da sua cor. No tradicional “disco de Newton” estamos trabalhando com a síntese subtrativa de cores e não a aditiva. A síntese aditiva de cores seria a convergência do espectro decomposto por um prisma em um único feixe, como fez Newton.

Com o propósito de compor o branco usando um disco em movimento, ao invés de se fazer uso da síntese subtrativa, foi desenvolvido um aparato usando LEDs de três cores; vermelha, verde, e azul, ou seja o padrão RGB (*Red, Green, Blue*). Este padrão de cores corresponde à teoria tricromática de Young-Helmholtz, na qual é proposto que nossa visão cromática é formada por células denominadas por cones. São três os tipos de cones e cada um deles é responsável por produzir uma resposta neurológica a partir da estimulação por luzes nas regiões espectrais de cada uma dessas três cores [6]. As demais cores podem ser percebidas por luzes monocromáticas, em determinadas posições do espectro, ou por sensibilizações combinadas em intensidades diferentes dessas três cores fundamentais. A Figura 1 apresenta uma descrição padrão para as respostas espectrais de cada um dos cones (S, M, L) e as funções ($\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$) que representam as percepções fisiológicas padrão da visão humana em cores estabelecidas pela *Commission Internationale de l'Éclairage* em 1931, através do *CIE 1931 2° Standard Observer* [7]. Para uma discussão detalhada desses espaços de cores, sugerimos o trabalho de Mark Q. Shaw feito em sua tese de M.Sc. no Center of Imaging Science Rochester Institute of Technology [8]. Além disso, foram incluídas nessa figura, para efeito de comparação, as curvas espectrais das emissões dos LEDs vermelho (**R**), verde (**G**) e azul (**B**) [9].

Usando dois pares de LEDs de cada uma dessas três cores e fazendo-os girar sobre um eixo central, estando todos os seis LEDs à mesma distância do centro, mostra-se que é possível compor não só o branco como também as demais cores que podem ser obtidas pela síntese aditiva de luzes nas três cores básicas. A síntese aditiva é mais comumente entendida através de um diagrama, como o apre-

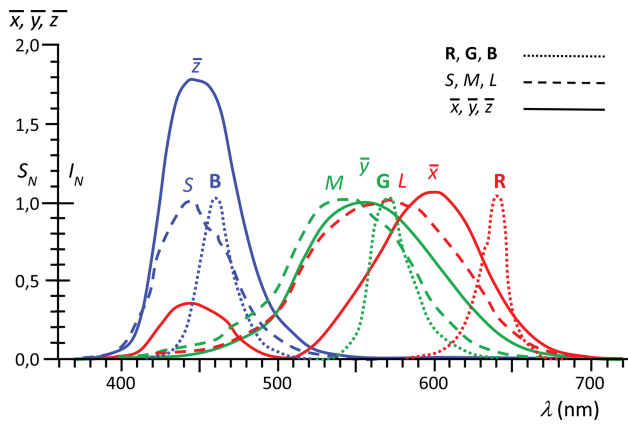


Figura 1: Gráfico das respostas espectrais dos cones e de emissão dos LEDs RGB. As intensidades normalizadas I_N das emissões dos LEDs azul (**B**), verde (**G**) e vermelho (**R**) estão representadas em linhas pontilhadas [9]. Em tracejado estão representadas as respostas espectrais para as sensibilidades normalizadas S_N dos três cones ($S \leftrightarrow$ azul, $M \leftrightarrow$ verde e $L \leftrightarrow$ vermelho) [6]. Em contínuo estão as funções $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ e $\bar{z}(\lambda)$ que representam as percepções fisiológicas padrão da visão humana em cores estabelecida pela *Commission Internationale de l'Éclairage* em 1931 através do *CIE 1931 2° Standard Observer* [7].

sentado na Figura 2. Nele podemos observar que na sobreposição de duas cores de luzes ocorre a formação de uma terceira. A convergência das três cores, vermelho, verde e azul, produz a luz branca.

2. Arranjo Experimental

O aparato proposto pode ser construído por uma pessoa com conhecimentos básicos de eletrônica e alguma habilidade manual, podendo ser o professor ou um estudante mais interessado sob sua supervisão. O material e as ferramentas utilizadas são descritos na Tabela 1.



Figura 2: Composição aditiva de cores.

A montagem é baseada no uso de dois CD's unidos, para aumentar a rigidez do sistema, o qual pode ficar fragilizado pelas perfurações. A marcação dos furos e o posicionamento dos componentes são feitos com a ajuda do mecanismo da unidade óptica que proporciona o movimento de rotação do CD. Começaremos, portanto, com a descrição o sistema de rotação.

Podemos obter o motor indicado para a montagem em uma unidade óptica de um aparelho de som de CD ou um reproduzidor de vídeos em DVD. Os leitores de CD/DVD utilizados em computadores não servem, pois não operam com corrente contínua. O motor da unidade óptica que foi usado, código RF-310T-11400, opera, segundo especificação técnica, a 5,9VDC. Outro motor, mais comum em aparelhos de DVD é o RF-300F A-12350, também operando a 5,9 V, e que pode ser encontrado no mercado por menos de R\$20,00. A unidade óptica utilizada foi produto de sucata, já que sua cabeça de leitura óptica estava com defeito, dano que costuma ser mais frequente. Como o motor estava íntegro, a unidade foi desmontada para retirada somente deste motor e a estrutura metálica que lhe suporta.

Essa estrutura, com o motor, deve ser presa a uma placa de madeira de aproximadamente 16 cm de altura por 8 cm largura e 1 cm de espessura. No caso de se utilizar a estrutura metálica que suporta o motor, basta fixá-la por meio de dois parafusos próprios para madeira, como pode ser visto na Figura 3a. Como fonte de alimentação pode ser utilizado um carregador de celular que forneça entre 6 e 9 V DC e pelo menos 200 mA. Em nosso projeto, utilizamos um carregador de celular de 6,4 V e 200 mA.

Adicionamos uma chave interruptora (Ch_0) e um potenciômetro (P_0) de 5 k Ω 4W para variar a tensão sobre o motor, controlando assim, sua velocidade de giro. Desse modo, evitam-se rotações muito altas do disco, que poderiam comprometer a segurança. Em funcionamento, a tensão máxima aplicada ao motor cai para 5,24 V, sendo percorrido por uma corrente de 32 mA. O sistema de rotação pode ser visto nas Figuras 3a e 3b e o esquema elétrico na Figura 3c.

A montagem do circuito é feita sobre um CD, ou seja, todos os componentes são bem fixados e colados neste CD para que, quando em movimento, não se soltem e não sejam arremessados, o que poderia provocar acidentes. Outra opção seria fixar no CD apenas os LEDs. Nessa segunda opção de monta-

Tabela 1: Lista do material e equipamentos necessários para a montagem.

Sigla	Quant	Descrição
R	2	LED vermelho de 5 mm e alto brilho
G	2	LED verde de 5 mm e alto brilho
B	2	LED azul de 5 mm e alto brilho
R ₁ – R ₂ – R ₃	3	Resistores de 100Ω 1/8 W
Ch	1	Chave interruptora (liga e desliga)
Ch ₁ – Ch ₂ – Ch ₃	3	Mini chaves interruptoras (liga e desliga)
P	1	Potenciômetro de fio 4W, 5kΩ
P ₁ – P ₂ – P ₃	3	Trimpot multivolta 3006 de 2 kΩ
V ₁ – V ₂ – V ₃	3	Suportes com baterias CR 2032 (3,0V)
	1,5m	Fios cabinhos de cores variadas
	1	Bastão de cola quente
	1	Ferro de solda
	20cm	Fio de solda
	1	Rolo de fita isolante.
M	1	Motor de CD ou DVD (motor e polia)
V	1	Fonte de tensão contínua 6V, 200mA
	1	Transferidor
	1	Caneta marca CD
	1	Lixa de madeira fina 100
	1	Cola instantânea (acrílica)
	2	Brocas de metal de 2 e 5 mm
	2	CD ou DVD
	1	Mini furadeira
	2	Parafusos de madeira 3,5 x 12 mm

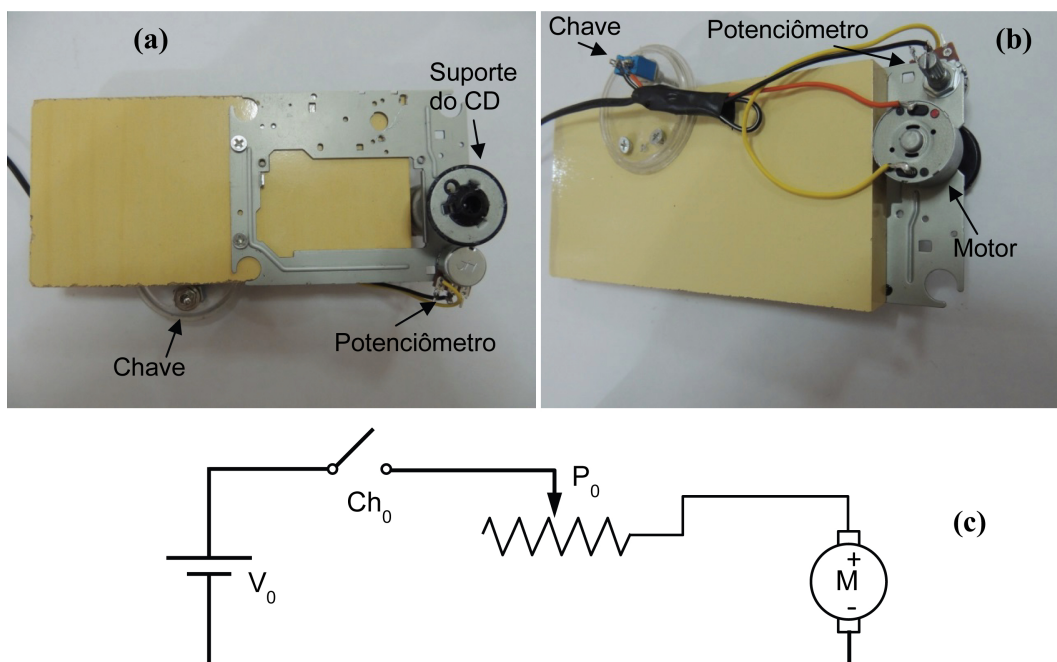


Figura 3: Sistema de rotação. (a) O mecanismo da unidade óptica preso a uma placa de madeira e o interruptor abaixo à esquerda. (b) Parte posterior do mecanismo mostrando o potenciômetro, o interruptor e as ligações elétricas. (c) Diagrama da montagem elétrica da alimentação do motor.

gem, todo o restante do circuito, incluindo resistores, chaves, potenciômetros e fonte de alimentação, localizar-se-iam fora do CD. A ddp fornecida por cada um dos três circuitos teria de ser transmitida

para o CD em movimento de forma independente. A razão para não optarmos por este tipo de montagem é que a possibilidade de haver pontos de mau contato cresceria de forma considerável, tornando o

projeto sujeito a ajustes frequentes e aumentando muito o nível de complexidade em sua construção.

No projeto desenvolvido, portanto, fixamos todos os componentes eletrônicos no próprio CD, reduzindo a possibilidade de mau contato. A preocupação, neste caso, é com a distribuição simétrica de todos os componentes eletrônicos. Uma distribuição simétrica e cuidadosa evita que o CD fique com um problema grave de balanceamento, o que pode inviabilizar o projeto.

No início da montagem do disco, é utilizado um transferidor e uma caneta própria para CD para fazer as marcações das posições dos LEDs. Eles precisam estar perfeitamente distribuídos para que o traço, por eles formado, seja homogêneo e com apenas uma faixa cromática. Como são seis LEDs ao todo, cada um fica a uma distância angular de 60° do seu vizinho (Figura 4a). Tomando o centro do CD como ponto médio, os pontos feitos nas bordas são ligados dois a dois, tomando-se o cuidado para que todos estes traços realmente passem pelo centro do

CD (Figuras 4b, 4c). Caso haja alguma imprecisão é preciso limpar os traços com álcool e reiniciar o processo. A precisão nesta etapa irá garantir que o produto final funcione corretamente.

Além dos seis pontos marcados nas extremidades do CD, marca-se também um ponto a uma distância de 1 cm de sua borda (Figura 4d). Na sequência, é usado o mecanismo da unidade óptica, que foi descrito anteriormente, para fixá-lo e fazê-lo girar (Figura 4e). Girando o disco manualmente, coloca-se a caneta sobre a posição indicada pelo ponto marcado anteriormente, na intenção de traçar um círculo o mais perfeito possível e simetricamente distante do centro. Com o traço marcado o CD deve ser desencaxado do suporte para a etapa seguinte.

Os suportes de baterias são distribuídos simetricamente ao redor do centro do CD e seus terminais marcados com a caneta. Um “x” deve ser feito para assinalar todas as 12 posições que devem ser perfuradas. Antes de iniciar a furação, no entanto, o

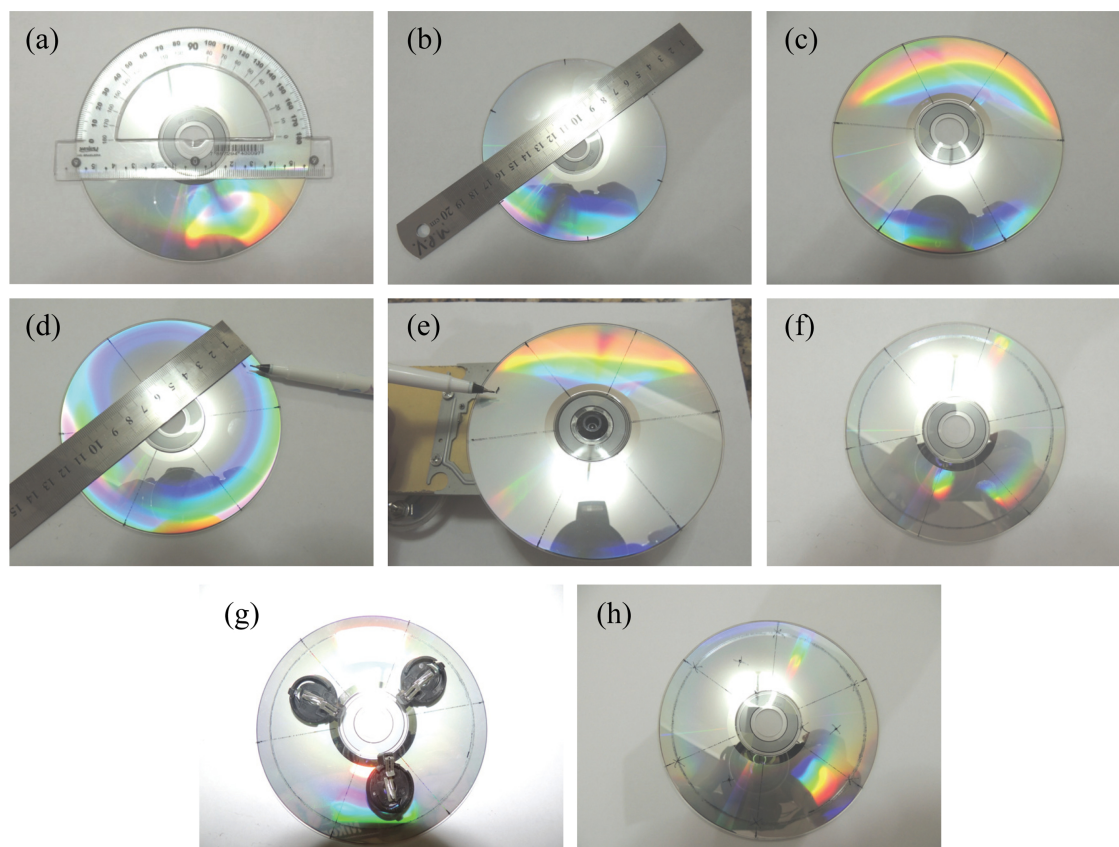


Figura 4: Preparação do CD. (a) Transferidor sobre o CD para marcação dos ângulos de 60° . (b) e (c) Ligação dos pontos complementares colineares. (d) Marcação do ponto distante a 1 cm da margem do CD. (e) Pondo o CD a girar com a caneta sobre o ponto marcado. (f) Círculo marcado no CD. (g) Marcação da furação dos suportes de bateria. (h) Marcação com “x” de todas as posições onde serão perfuradas.

segundo CD deve ser colado sobre o primeiro de forma centralizada utilizando a cola instantânea.

Estando as marcações definidas, é utilizada uma broca de metal de 2 mm para fazer o furo inicial e, em seguida, uma de 5 mm para alargar cada furo ao diâmetro do LED e, se necessário, dos suportes de baterias.

A etapa seguinte é a montagem e soldagem dos componentes eletrônicos no CD a partir de um circuito simples. O circuito, na verdade, é a composição de três circuitos independentes, com chaves interruptoras e alimentações próprias. Em cada circuito é colocado um potenciômetro para possibilitar um ajuste fino na intensidade do brilho de cada par de LEDs. Essa possibilidade de variar o brilho dos LEDs permite que se consiga produzir a cor branca com maior pureza, além do amarelo, magenta e ciano. A Figura 5 descreve um diagrama com os três circuitos separados.

Antes de iniciar a montagem é necessário conferir se todos os LEDs e suportes se encaixam perfeitamente nos furos correspondentes do CD. Os LEDs devem ter suas cabeças lixadas de forma que suas superfícies fiquem bem planas para que as luzes sejam emitidas de forma mais difusas, lineares e menos direcionais. A direcionalidade se deve ao fato

de cada LED possuir uma lente em seu topo, a qual deve ser removida pela lixa. Os LEDs devem ser fixados com cola quente, da mesma forma que os suportes.

De um lado do “sanduíche” de CD’s são colocados os suportes de bateria. No outro lado são encaixados os LEDs, ficando a parte elétrica nessa face onde são feitas as conexões e soldagens, inclusive com o posicionamento dos resistores, potenciômetros e interruptores, de acordo com o esquema apresentado na Figura 5. Todos os componentes devem ser presos com cola quente de forma bem distribuída para que não afete o balanceamento do CD. É necessário um cuidado adicional para não prender nenhum componente próximo ao furo central do disco, área não metalizada. Sem esse cuidado o CD não se encaixa no suporte da unidade óptica. Os três interruptores são colados na borda externa do disco a fim de facilitar seu manuseio. Eles são distribuídos simetricamente, como pode ser visto na Figura 6a. Esses interruptores estão indicados pelas letras R, G e B, iniciais de Red, Green e Blue, conforme a Figura 6b.

Após o término da montagem são colocadas as três baterias e todo o sistema deve ser testado de forma a se verificar se não há nenhum ponto de solda

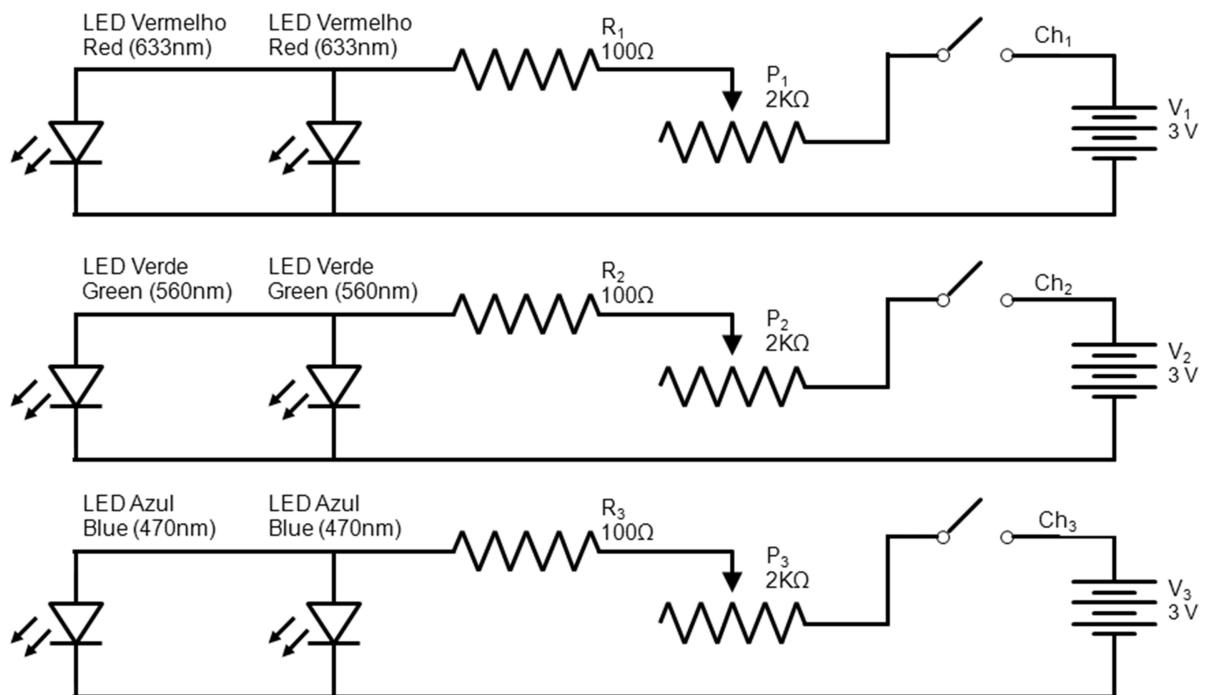


Figura 5: Circuitos eletrônicos para os três LEDs. R_1 , R_2 e R_3 são três resistores cuja função é limitar a corrente e impedir que os LEDs sejam danificados. Os potenciômetros P_1 , P_2 e P_3 têm a função de proporcionar um ajuste fino no brilho de cada par de LEDs.

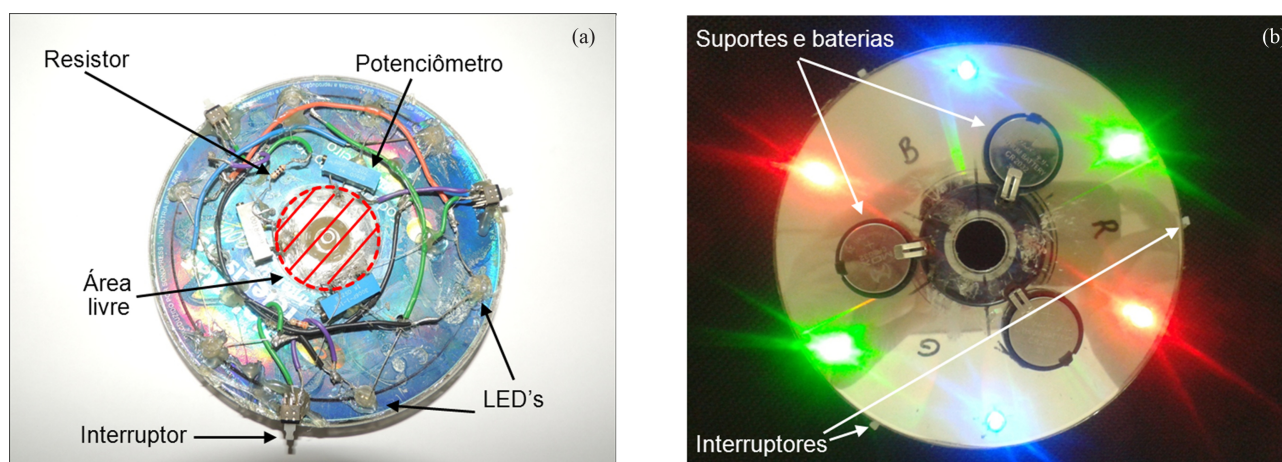


Figura 6: Montagem concluída. (a) Parte de trás do CD, onde se observam os componentes eletrônicos. (b) Parte de cima do CD com os seis LEDs acesos e as baterias acondicionadas devidamente em seus suportes. As posições dos conectores, que se encontram por trás do CD, estão assinaladas pelas letras R, G, B.

fria ou mau contato. O resultado da montagem pode ser visto nas Figuras 6a e 6b.

3. Ajustes e Resultados

Após a preparação do mecanismo da unidade óptica e do CD, tem início a fase de ajustes. Inicialmente o CD é fixado com cola quente no mecanismo da unidade óptica. Deve-se adicionar uma quantidade suficiente de cola quente para que ocorra uma boa fixação. Após a secagem da cola o CD pode ser posto a girar. Verifica-se, então, se todos os LEDs produzem um aro luminoso de espessura aproximadamente igual à espessura do LED e uma cor uniforme. Pode ocorrer de um ou mais LEDs precisarem ser redirecionados para corrigir sua distribuição ao longo do aro.

Após as correções iniciais, o próximo passo é tentar produzir a cor amarela com os LEDs vermelhos e verdes deixando, portanto, os LEDs azuis apagados (Figura 7a). Primeiro deve-se ajustar a posição do potenciômetro P_2 dos LEDs verdes de forma que estes fiquem com um brilho bem intenso, mas sem atingir o seu valor máximo. O potenciômetro P_1 deve ter seu valor ajustado para que os LEDs vermelhos fiquem com brilhos próximos, visualmente, aos dos verdes. Em seguida põe-se o conjunto a girar e observa-se a necessidade de aumentar ou reduzir o brilho dos LEDs vermelhos. Para isso para-se o disco, altera-se a posição do potenciômetro P_1 e o disco é posto a girar novamente. O processo é repetido até que se consiga produzir a cor amarela (Figuras 7b e 7c). Caso chegue-se ao máximo de brilho dos

LEDs vermelhos sem que a cor resultante perca o aspecto esverdeado, deve-se reduzir a intensidade dos LEDs verdes pelo potenciômetro P_2 e recomeçar o processo.

O passo seguinte é produzir o branco. Para tanto, todos os LEDs serão ligados (Figura 7d) e os LEDs azuis devem ter sua intensidade alterada através do potenciômetro P_3 correspondente, repetindo o processo de parar o disco, alterar o potenciômetro e voltar a girar mais uma vez o disco até que se produza o branco (Figuras 7d, 7e, 7f). Após o ajuste, os valores finais para os potenciômetros, em nosso aparato, ficaram em torno de 12Ω , para o potenciômetro P_1 (LEDs vermelhos), 235Ω para o potenciômetro P_2 (LEDs verdes) e 450Ω , para o potenciômetro P_3 (LEDs azuis). Esses valores podem variar muito em função das especificações técnicas dos LEDs e do estado de uso das baterias. Portanto, antes de iniciar a apresentação do experimento aos alunos, deve ser feita uma verificação prévia que indicará se o aparato ainda encontra-se calibrado. Caso contrário, os brilhos dos LEDs deverão se ajustados, seguindo os passos descritos anteriormente.

Com o sistema bem calibrado, o experimento permite compor a partir dos LEDs de cores vermelha, verde e azul, as cores amarela, magenta, ciano e branca. Como visto, na fase de ajustes, a cor amarela é produzida ao se ligar apenas os LEDs verdes e vermelhos (Figuras 7a, 7b, 7c). A cor branca é conseguida quando se ligam todos os LEDs, e pode ser observado nas Figuras 7d, 7e, 7f.

Para as demais cores, magenta e ciano, o procedimento é o mesmo, apenas alterando as posições dos

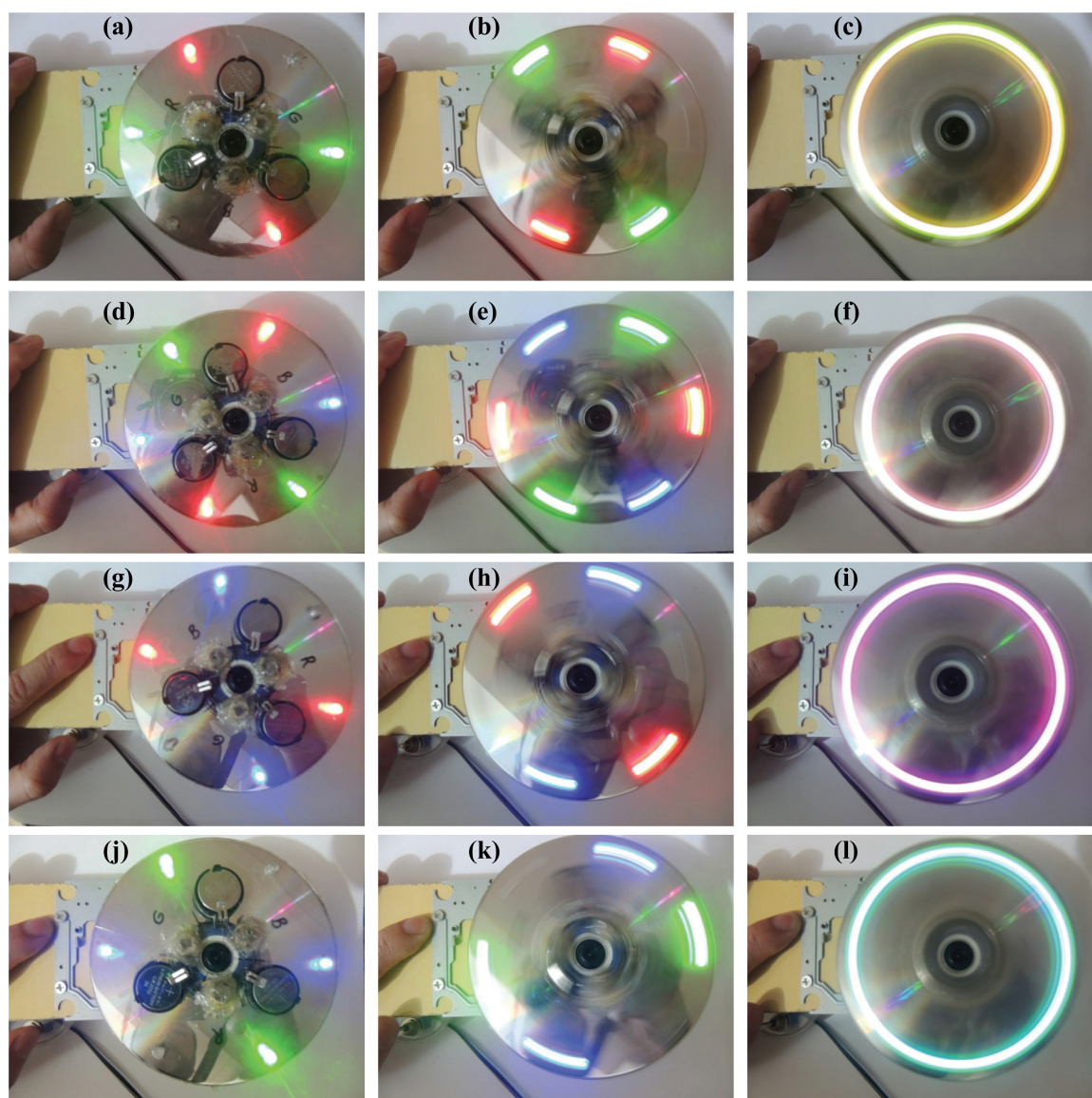


Figura 7: Ajuste fino para composição das cores. (a, b, c) Ajustes para produzir a cor amarela. (d, e, f) Ajuste para se produzir a cor branca. (g, h, i) Apenas os LEDs azuis e vermelhos são ligados, produzindo, quando em movimento giratório, a cor magenta. (j, k, l) São acesos apenas os LEDs verdes e azuis que, ao girarem, produzem a cor ciano.

interruptores. Para compor a cor magenta, apenas os LEDs azuis e vermelhos devem ser ligados (Figuras 7g, 7h, 7i). A cor ciano é obtida com apenas os LEDs azuis e verdes ligados. O resultado pode ser visto nas Figuras 7j, 7k, 7l.

4. Conclusão

O chamado “disco de Newton” é muito empregado para demonstrar a síntese de cores no ensino de óptica. Ele é construído sobre um disco dividido em sete fatias, como as de uma pizza, e pintadas com cada uma das sete cores primárias estabelecidas por Newton. Esse disco, ao ser girado, parece ter a cor

cinza, ao invés da branca. Isso traz um desconforto na relação entre a proposta do professor e o resultado observado pelos estudantes.

No experimento proposto neste trabalho, a composição da cor branca é obtida de fato. Apesar dos dois experimentos envolverem a rotação de discos para a composição de cores, tratam-se de sínteses diferentes; subtrativa para o disco de Newton e aditiva para o disco de LEDs. Além disso, é possível obter seis cores do espectro, além do branco, através do acionamento de LEDs de uma, duas ou três cores simultaneamente.

O aparato desenvolvido com LEDs permite a análise do funcionamento da visão humana, não

só de suas características cromáticas como a da velocidade de captação e percepção das imagens. Essa compreensão é indispensável para a formação de cidadãos contemporâneos, capazes de compreender as tecnologias de imagem e cinema.

As fotografias utilizadas nas figuras contidas neste material apenas dão uma ideia do efeito, o qual pode ser percebido mais intensamente ao olharmos com nossos próprios olhos. Isso ocorre devido às características operacionais de aquisição que a câmera fotográfica possui, distintas das que se encontram na visão humana.

Uma experiência adicional pode ser feita com o equipamento funcionando em quaisquer das combinações de cores. Colocando-se a mão espalmada na frente do experimento com os dedos entreabertos e a sacudindo-a como se estivesse se despedindo de alguém, reproduzindo o efeito de um estroboscópio, é possível observar as cores individuais dos LEDs que, ao girarem, compõem a cor sintetizada. A ideia é tentar atingir, com o movimento da mão, uma sincronização da passagem das aberturas entre os dedos com o movimento dos LEDs nessa mesma direção. Quando essa sincronização é atingida, o tempo de exposição da luz dos LEDs, que acompanham o movimento da mão, torna-se superior ao da remanência visual, permitindo assim que o olho perceba os LEDs individualmente.

Referências

- [1] R.B. Barthem, *A Luz, Temas Atuais de Física* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2005), 1^a ed.
- [2] “Plateau, Joseph Antoine Ferdinand - Complete Dictionary of Scientific Biography”, disponível em <http://www.encyclopedia.com/doc/1G2-2830903442.html>, acesso em 22/2/2016.
- [3] “Persistência Retiniana” disponível em <https://precinema.wordpress.com/2009/10/28/persistencia-retiniana/>, acesso em 9/3/2016.
- [4] G. Stolf, *Princípios de Televisão Digital*, disponível em <http://www.lcs.poli.usp.br/~gstolfi/PPT/APTV0315.pdf>, acesso em 15/3/2016.
- [5] I. Newton, *Óptica* (Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002), tradução, introdução e notas de André Koch Torres de Assis, 1a ed.
- [6] A. Stockman, D. Macleod and N. Johnson, *J. Opt. Soc. Am. A* **10**, 249 (1993).
- [7] W.D. Wright, *The Measurement of Colour* (Hilger & Watts, Londres, 1944).
- [8] B.M.Q. Shaw, *Evaluating the 1931 CIE Color Matching Functions*, disponível em

http://www.rit-mcsl.org/StudentResearch/mshaw/CMF_Thesis.pdf, acesso em 10/3/2016.

- [9] L.J. Jonathas, *Uma Abordagem Experimental para o Ensino da Quantização da Luz*. Dissertação de Mestrado em Ensino de Física, UFRJ, 2015. disponível em <http://objdig.ufrj.br/12/teses/828142.pdf>, acesso em 9/3/2016.

5.1.3 Pontilhismo, Física e Arte - Uma Discussão sobre as Sínteses Aditivas e Subtrativas e Aspectos Interdisciplinares no seu Ensino

A influência da física e de outras ciências nas artes, e vice-versa, pode ser evidenciada em vários momentos históricos [Reis 2006]. Não obstante, as tecnologias modernas se configuram a partir do resgate de uma evolução no desenvolvimento científico que é incorporado à vida cotidiana. Na maioria das vezes deixando para trás o quanto de trabalho se depreendeu para que alcançasse êxito. Estudar a história e conhecer seus atores pode se constituir numa viagem ao profundo mundo do desenvolvimento da bagagem científica e cultural da humanidade. Um patrimônio que devemos conhecer para celebrar e dar continuidade. Desta forma, a presente abordagem, as origens e desenvolvimento do Pontilhismo, podem unir num mesmo tema a física, a química, a história e as artes.

O estudo do processo histórico deste movimento, o Pontilhismo, cria um momento oportuno para se discutir, em sala de aula, sua relação com o desenvolvimento científico da época. Um movimento de interdisciplinaridade que deve ser introduzido, sempre que se pode ao currículo de ciências, pois, como relata Ildeu [Moreira 2002], “Existem relações profundas entre Ciência, cultura e arte no processo de criação humana. No entanto, a discussão integrada dessas dimensões raramente se realiza nas salas de aula”.

Ao assistir televisão ou desfrutar dos modernos aparelhos de celular com telas de altíssima resolução estamos utilizando, em parte, uma tecnologia que surgiu entre os séculos XVIII e XIX. A chamada Lei do Contraste Simultâneo de Cores, de autoria do químico francês Eugène Michel Chevreul (1786-1889), título de um livro de sua autoria publicado em 1839 [Chevreul 1889], trata do estudo sobre a percepção das cores em simultaneidade. Chevreul chega à conclusão que cores contíguas se exaltam mutuamente pela permuta de seus complementares. O químico também estudou ácidos gordurosos e desenvolveu uma substância denominada esterine, que poderia ser usada no lugar do sebo para produzir luz, com a vantagem de queimar por mais tempo e produzir maior brilho. Essa descoberta possibilitou o desenvolvimento de novos pavios que produziam, na vela, uma chama mais uniforme e ordenada, foi também responsável pela evolução na indústria do sabão.

Seu trabalho sobre as cores influenciou diversos artistas e estudiosos pintores como Georges-Pierre Seurat. Este, descontente com o ensino na *École des Beaux-Arts* de

Paris, decidiu por conta própria estudar os livros de Chevreul. As técnicas de produção de cores desenvolvidas nesse livro davam conta de que, por exemplo, se uma cor fria e uma cor quente fossem justapostas, elas se exaltariam mutuamente. Bem como a justaposição de duas cores quentes se esfriam e duas cores frias se aquecem. Ainda verificou que uma cor clara num fundo escuro ficava mais viva e o cinzento ganhava a cor complementar a que lhe estava justaposta.

A produção de uma terceira cor, ao se justapor duas, quando vistas a certa distância, baseava-se na teoria de cores de Newton. O livro *Modern Chromatics: With Applications to Art and Industry* de Ogden Nicholas Rood [Rood 1879] era considerado fundamental para o estudo da época. Rood, físico e aquarelista amador, aplicava à arte a teoria da visão tricromática de Young-Helmholtz. Usando todas essas técnicas, Seurat inaugura o Pontilhismo em 1884 com o quadro *Un dimanche après-midi à l'Île de la Grande Jatte*, exposto pela primeira vez em 1886. A Figura 5.1.3.1 reproduz esse quadro, sendo a primeira obra descontínua após o Renascimento.



Figura 5.1.3.1 – Obra de Georges-Pierre Seurat, intitulada *Un dimanche après-midi à l'Île de la Grande Jatte* (1884-1886), inaugura o Pontilhismo . Ele faz parte da coleção do *Art Institute Chicago* [Articedu 2016].

“Essa nova forma de pintar nos possibilita, novamente, analisar as relações entre arte e ciência e, mais ainda, perceber como o ambiente cultural e científico do final do século XIX estava efervescendo de

ideias que eram criadas tanto pela pintura como pela ciência. A física e a biologia trilharam os caminhos da descontinuidade – a primeira com a teoria quântica e a segunda com a redescoberta e o desenvolvimento da genética mendeliana” [Reis 2006].

Com um forte apelo científico, o Pontilhismo deixa de lado a produção de cores pela síntese subtrativa, onde as tintas eram misturadas na palheta para a composição de novas cores, e assume as descobertas científicas fazendo uso da síntese aditiva de cores. Desta vez, justapondo dois pontos ou mais de tinta de cores diferentes, mas perceptíveis a olho nu a pouca distância, era possível compor novas cores. O efeito da mistura, somente percebido à distância, aproveita-se da fisiologia de nossa visão que une essas cores para formação de uma nova. O que a pouca distância parece rústico e mal-acabado, a uma distância maior parece ter traços, contornos e cores muito mais precisos. Na Figura 5.1.3.2, um detalhe de mais uma obra de Seurat, *La Parade de Cirque* 1888. Para dar a noção de distância foram feitas reduções/ampliações na figura.

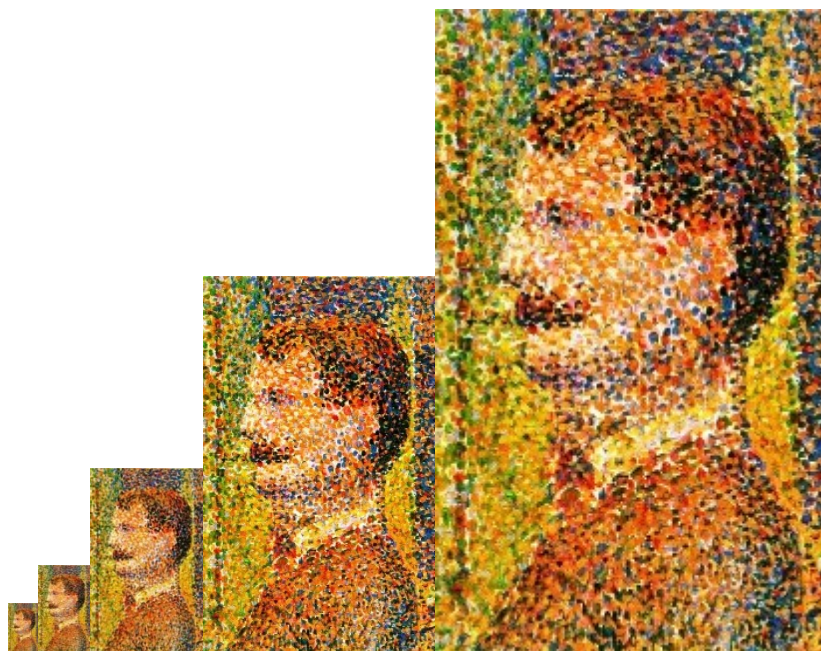


Figura 5.1.3.2 – Detalhe de um personagem na obra de Seurat intitulada *La Parade de Cirque* (1886-1888) em várias reduções [Alice 2010]. Esta obra faz parte da coleção do *Metropolitan Museum of Art, Nova Iorque* [Metmuseum 2016].

Tempos mais tarde o Pontilhismo atinge as artes gráficas, reproduzindo em larga escala figuras e fotografias coloridas. Na Figura 5.1.3.3 podemos ver a cópia da revista *The National Geographic Magazine* de 1947. Apenas algumas páginas eram coloridas, o que se deve ao seu alto custo e tempo de confecção, pois a mesma página precisava passar por várias impressões com tintas diferentes até assumir as cores com aspecto real. Essa

técnica ainda é usada hoje na indústria reprográfica. Ou seja, em nenhuma delas há de fato a mistura das tintas o que caracterizaria a síntese subtrativa de cores. A síntese é feita no nosso sistema visual.



Figura 5.1.3.3 – Digitalização da Revista *The National Geographic Magazine* de 1947. (a) Capa da revista. (b) Publicidade à cores no interior da revista. (c) Ampliação de um pequeno recorte da figura (b) em que se observam os pontos coloridos que compõem a imagem.

Da indústria gráfica, a tecnologia do pontilhismo passou a ser empregada nos aparelhos de televisão a cores que surgiram na década de 1950, nos Estados Unidos. Empregavam o padrão RGB pela incidência dos raios catódicos em uma superfície

pintada com pigmentos de fósforo coloridos com as três cores RGB. Vale lembrar que a descoberta do elétron, por J. J. Thomson, em 1897, pela qual o cientista foi agraciado com prêmio Nobel de Física em 1906, se deve a um tubo de raios catódicos que, embora mais rudimentar, baseava-se no mesmo princípio.

Os modernos televisores de LED também se baseiam no Pontilhismo. Nela, a síntese aditiva de cores ocorre em pontos minúsculos denominados *pixels*. Cada pixel é um conjunto de três barras coloridas, nas cores vermelha, verde e azul, pelo padrão RGB. A intensidade do brilho de cada cor, dentro de um pixel, pode ser ajustada para a composição de milhares de outras cores. A Figura 5.1.3.4 exhibe a síntese aditiva das três cores e o resultado do estímulo conjugado de pares delas e, no centro, das três, onde forma-se o branco.

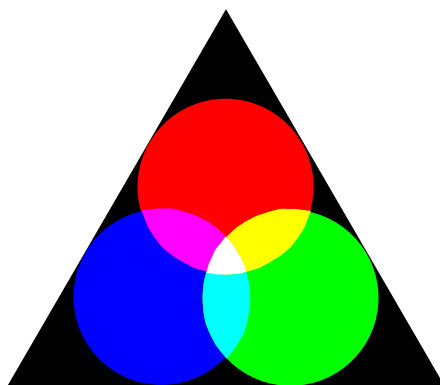


Figura 5.1.3.4 – Síntese aditiva de cores.

Na televisão, o branco significa que todas as cores dos pixels que a compõem estão acesas e com um brilho bem ajustado. Na Figura 5.1.3.5, uma foto de uma tevê de LED, capturada com um celular na resolução de 9,6 Mp, reproduzindo uma cor branca aos nossos olhos que, quando ampliada, apresenta essas três cores em um ajuste de brilho apropriado para que nossos olhos interpretem estar diante da cor branca.

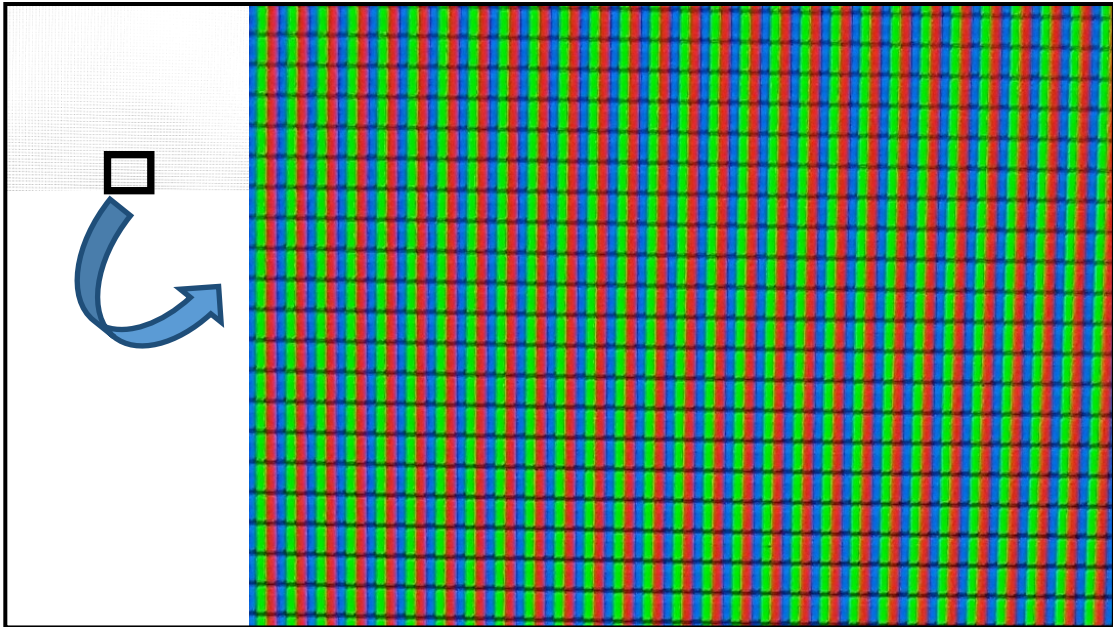


Figura 5.1.3.5 – Foto da tela de uma televisão de LED reproduzindo a cor branca, capturada por um celular na resolução de 9,6 MP.

Já na Figura 5.1.3.6 observa-se a composição das cores secundárias, formadas pela junção de outras duas, como na Figura 5.1.3.4, projetada na TV de LED e fotografada com um celular na resolução 9,6 MP. Observando as cores básicas do padrão RGB, como a cor vermelha, percebemos que ela é exibida na tela no momento em que as cores verde e azul se apagam. Da mesma forma ocorre com as cores verde e azul. Para reproduzir as cores compostas, como o ciano, o magenta e o amarelo, as cores dos pixels são ativadas aos pares. Portanto, para compor o amarelo as cores verde e vermelha dos pixels são acesas ao mesmo tempo, e isso pode ser visto na Figura 5.1.3.6a. Para compor o magenta, as cores vermelha e azul se iluminam, como visto na Figura 5.1.3.6b. E, finalmente, para compor o ciano, apenas as cores verde e azul estão presentes, como é visto na Figura 5.1.3.6c.

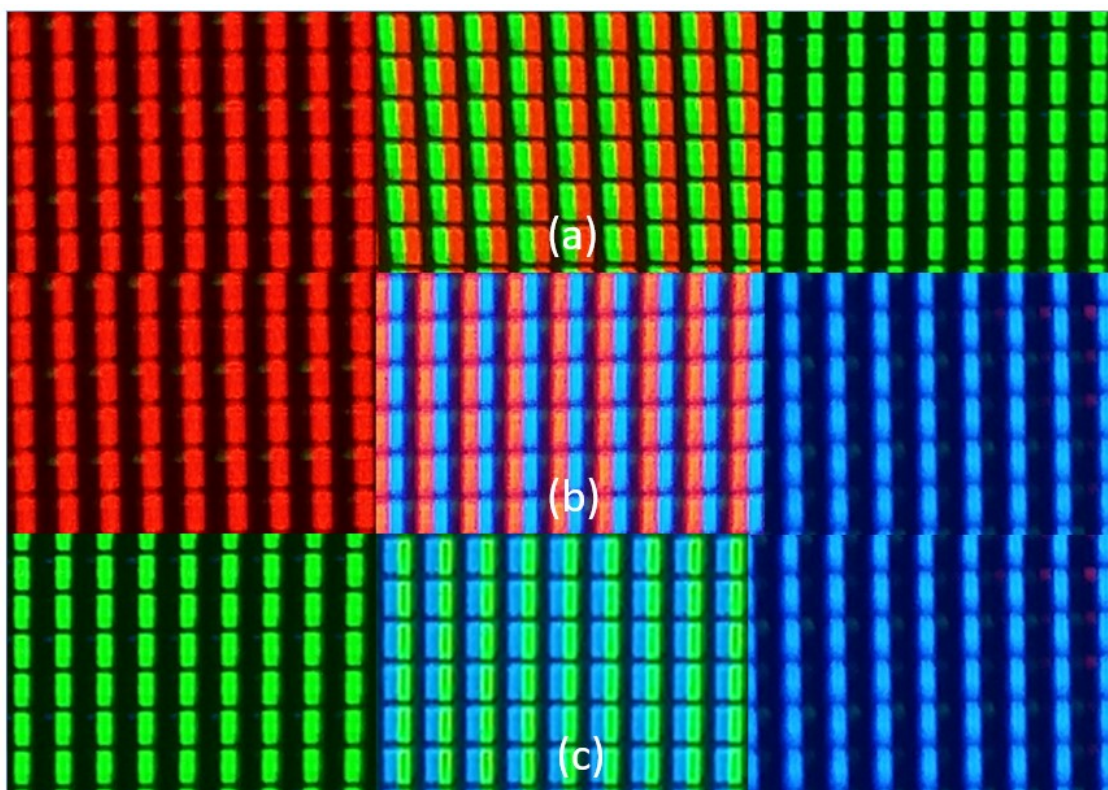


Figura 5.1.3.6 – Foto dos pixels de uma televisão de LED. (a) A cor amarela se forma quando as cores vermelha e verde estão acesas. (b) A cor magenta é obtida pelo acendimento das cores vermelha e azul. (c) A cor ciano é composta pelo acendimento das cores verde e azul. Fotos obtidas por um celular com resolução de 9,6 MP.

Um breve exemplo de como a física influencia outro tipo de arte, a poesia, pode ser verificado no poema Física de José Saramago, em 1966.

*Colho esta luz solar à minha volta,
No meu prisma a disperso e recomponho:
Rumor de sete cores, silêncio branco.
Como flechas disparadas do seu arco,
Do violeta ao vermelho percorremos
O inteiro espaço que aberto no suspiro
Se remata convulso em grito rouco.
Depois todo o rumor se reconverte
Tornam as cores ao prisma que define
À luz solar de ti e ao silêncio.*

O mesmo prisma que citamos várias vezes em nosso estudo, que esteve sob análise, nas mãos dos mais célebres cientistas, foi merecedor de um poema só para ele. Com um sentido paralelo, é verdade, mas que foi construído e pensado, por quem a ciência despertou.

*São outros tantos poemas científicos
Que não nos compete nunca refutar
A beleza do escrever bem e prosear
E a ciência ao seu lado a caminhar
Se serve a arte, também serve à ciência
E que se sirva da ciência também a arte
Pois que completa não em complemento
Mas no todo é mundo, conhecimento.*

“A poesia e a arte, que parecem constituir necessidades urgentes de afirmação da experiência individual, uma visão complementar e indispensável da experiência humana, não podem ficar de fora das atividades interdisciplinares com os jovens nas escolas, mesmo aquelas ligadas ao aprendizado de Ciências” [Moreira 2002].

5.2 Síntese Subtrativa

5.2.1 Pêndulos Ressonantes

Para a compreensão do fenômeno cor, é necessário, como já foi visto, permear os fenômenos que ocorrem, tanto no âmbito da física, quanto da biologia e química. No campo da física, para compreender o motivo pelo qual um objeto se apresenta a nós com determinada cor, é preciso estudar mais alguns fenômenos. Se podemos enxergar um objeto, ou ele de alguma forma emite luz própria por processos térmicos ou bioluminescentes, ou trata-se de um objeto que está espalhando toda ou parte da luz que a ele está sendo direcionada. São duas situações que envolvem conceitos físicos distintos. Síntese aditiva e síntese subtrativa, respectivamente.

Se um objeto iluminado por uma luz branca se apresenta na cor branca aos nossos olhos, podemos dizer que este objeto está espalhando a maior parte da radiação em todos os comprimentos de onda que com ele está interagindo. Vale lembrar que a radiação em alguns comprimentos de onda, ainda assim, está sendo absorvida por esse objeto. A luz branca pode conter comprimentos de onda invisíveis a nós, como os raios infravermelhos. Se estes forem absorvidos não farão diferença em nossa percepção visual. Mesmo que alguns comprimentos de onda do espectro visível sejam absorvidos por esse objeto, ainda assim, ele pode se apresentar branco para nós. Haja vista que a cor branca, que por nós é nomeada como tal, ainda assim possui diversas tonalidades diferentes. Não há somente um tipo de branco. Da mesma forma que a cor negra que a princípio deveria absorver em todos os comprimentos de onda, o que não passa de uma idealização. Afinal, da mesma forma, percebemos nuances diferentes que devem levar em conta a textura e sua composição material. O material mais negro até o momento foi desenvolvido pela empresa britânica Surrey Nanosystems, chamado de *Vantablack*, capaz de absorver 99,965% da luz incidente. O material é tão negro que a empresa afirma que quando aplicado a um objeto tridimensional fica difícil discernir seu formato, dando ao objeto um aspecto bidimensional [Vantablack 2016].

Então, nas duas extremidades idealizadas, um objeto branco refletiria toda a luz e um na cor preta absorveria toda ela. Portanto, levando em conta tais idealizações, para explicar o motivo pelo qual um objeto consegue refletir de forma difusa todos os comprimentos de onda que lhe são direcionados por uma lâmpada branca, ou pela luz do sol, podemos nos valer do modelo ondulatório da luz no Ensino Médio. Dessa forma, na interação das ondas eletromagnéticas emitidas pela luz com os átomos constituintes deste

objeto nada é absorvido. Apenas ocorrem reflexões a cada vez que a luz atinge uma das superfícies das microestruturas do material que espalha o “branco”. No outro extremo, para a cor negra, podemos dizer, ainda levando em conta o Ensino Médio, que as radiações de todos os comprimentos de onda estão sendo absorvidas, já que, durante a interação da luz com a matéria, ocorre “ressonâncias” da radiação com transições entre os níveis eletrônicos da matéria constituinte deste objeto. Deste modo, quando tudo é absorvido e nada é refletido, estamos observando a cor preta.

A ideia de reflexão pode ser trabalhada em sala de aula através das ondas mecânicas, como ondas em cordas, que ao atingirem um obstáculo, retornam à origem. O mesmo pode ser feito com uma mola. Ambas as experiências são fáceis de se reproduzir em sala de aula, sem elevado custo. Isso pode exemplificar bem o fenômeno que ocorre durante a interação da luz com a matéria quando ela passa de um meio para outro, encontrando uma parede de interface. No entanto, para absorção, onde ocorre ressonância da luz com a matéria, surge a necessidade de um novo modelo experimental que possa representá-la.

A absorção da luz pela matéria pode ser abordada em diferentes graus de complexidade, devendo ser utilizada a mecânica quântica para se ter uma compreensão de fato deste fenômeno. No entanto, em se tratando do Ensino Médio o caminho a ser adotado pelo professor, na maioria das vezes, deve se basear em conceitos mais cotidianos. Uma forma acessível de ilustrar o fenômeno que ocorre durante a interação da luz com absorção, ou seja, com a transferência de energia dessa onda eletromagnética para a matéria, é utilizando o fenômeno da ressonância. Podemos dizer que a ressonância é quando o sistema passa a oscilar absorvendo toda a energia do sistema que o está perturbando. O sistema passa a oscilar em máxima amplitude nas frequências conhecidas como frequências ressonantes. Portanto, para que haja ressonância entre dois sistemas deverá haver uma correspondência entre suas frequências. No nosso caso, entre a frequência da luz que atinge a superfície do objeto e a das transições na estrutura atômica da mesma.

Para tanto, o experimento com pêndulos ressonantes pode se tornar uma ferramenta auxiliar para o professor. Compreendendo como a luz interage com a matéria, como as energias de ondas de algumas frequências são absorvidas e outras não, se abrirá caminho para a explicação da cor dos objetos.

Experimento

Inicialmente será necessário estudar um único pêndulo simples. Suas características periódicas podem ser usadas em sala de aula para que os estudantes tenham uma visão melhor de como podemos definir os conceitos de período e frequência.

Na Figura 5.2.1.1, observamos o experimento com apenas um dos pêndulos, posto a oscilar. Para sua base foi utilizada uma anilha de musculação de 2 kg e 15,5 cm de diâmetro. Através do orifício desta anilha, pende uma barra metálica de 50 cm de comprimento. Ela está fixa à anilha através de um disco com a dimensão exata do orifício da anilha e furo central que permite um encaixe perfeito à barra metálica. Para melhor fixação foi usada massa epóxi. Na extremidade superior desta barra há um cilindro metálico com duas perfurações perpendiculares. A inferior permite o encaixe na barra vertical, e a lateral o encaixe a uma segunda barra metálica de 35 cm de comprimento. Dois parafusos garantem a fixação destas duas barras, comprimindo-as dentro dos orifícios do cilindro metálico, para que não desencaixem. A barra horizontal contém dois furos de diâmetro suficiente para que se consiga passar um fio de nylon de 0,5 mm de espessura. O primeiro furo fica a 1 cm da extremidade da barra e outro 10 cm distante deste. Os fios de nylon atravessam o furo e alguns nós na parte superior do fio garantem sua fixação. Na outra extremidade do fio um objeto de metal (latão, ferro ou chumbada de pescaria), de massa em torno de 200 g, completa a construção do pêndulo. O comprimento do pêndulo poderá variar correndo o fio de nylon por dentro do furo. O comprimento máximo de fio para o pêndulo é de 60 cm.

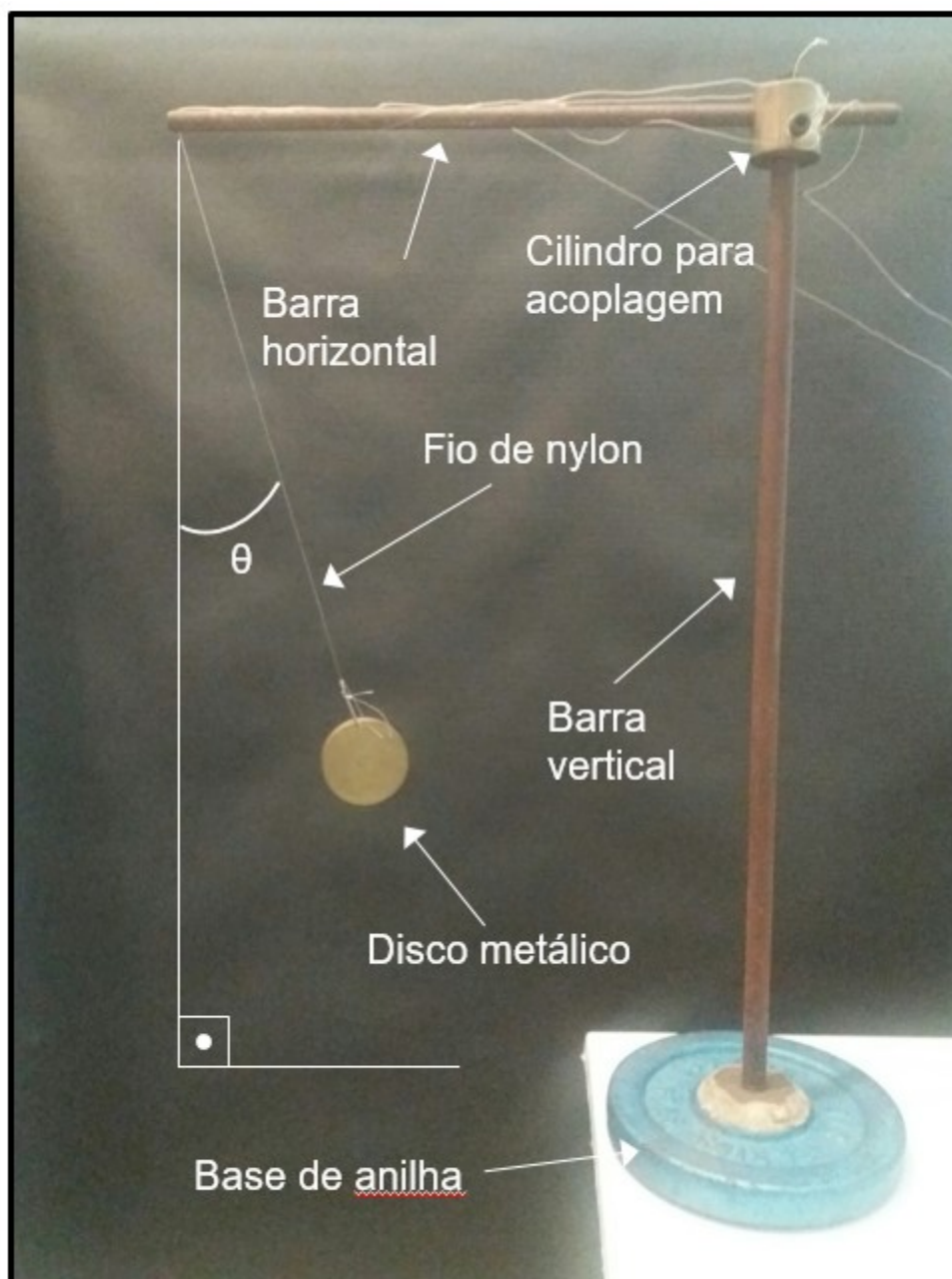


Figura 5.2.1.1 – Pêndulo simples. Estrutura montada.

Em um primeiro momento, pondo apenas um dos pêndulos a balançar, o estudante pode calcular seu período. Basta medir o tempo de cerca de 30 oscilações e calcular o período médio para cada oscilação. A partir daí, pela relação,

$$f = \frac{1}{T}$$

(sendo f a frequência de oscilação e T seu período) determinará a frequência média de oscilação deste pêndulo.

No campo didático da atividade investigativa, o professor pode propor a esse aluno que altere o comprimento deste pêndulo, puxando e correndo o fio de nylon pelo

orifício na barra horizontal, e repetindo novamente a experiência. O estudante percebera que a frequência de oscilação não será a mesma e deverá inferir o que aconteceu. Deverá perceber que a frequência diminui com o aumento do comprimento do fio.

Após um domínio acerca do experimento com apenas um pêndulo, deve ser introduzido o segundo. Ambos serão conectados através de um arame ou fio rígido fino (ou fio do cabo de rede), como pode ser visto na Figura 5.2.1.2. O arame é enroscado no fio de nylon do pêndulo da esquerda e, na outra extremidade, será feito um anel ao redor do fio de nylon do segundo pêndulo. O anel deixará que o fio de nylon corra livremente, permitindo assim, a alteração do comprimento do segundo pêndulo. Este pedaço de arame tem a função de transmitir energia de um pêndulo para o outro, quando postos em ressonância.

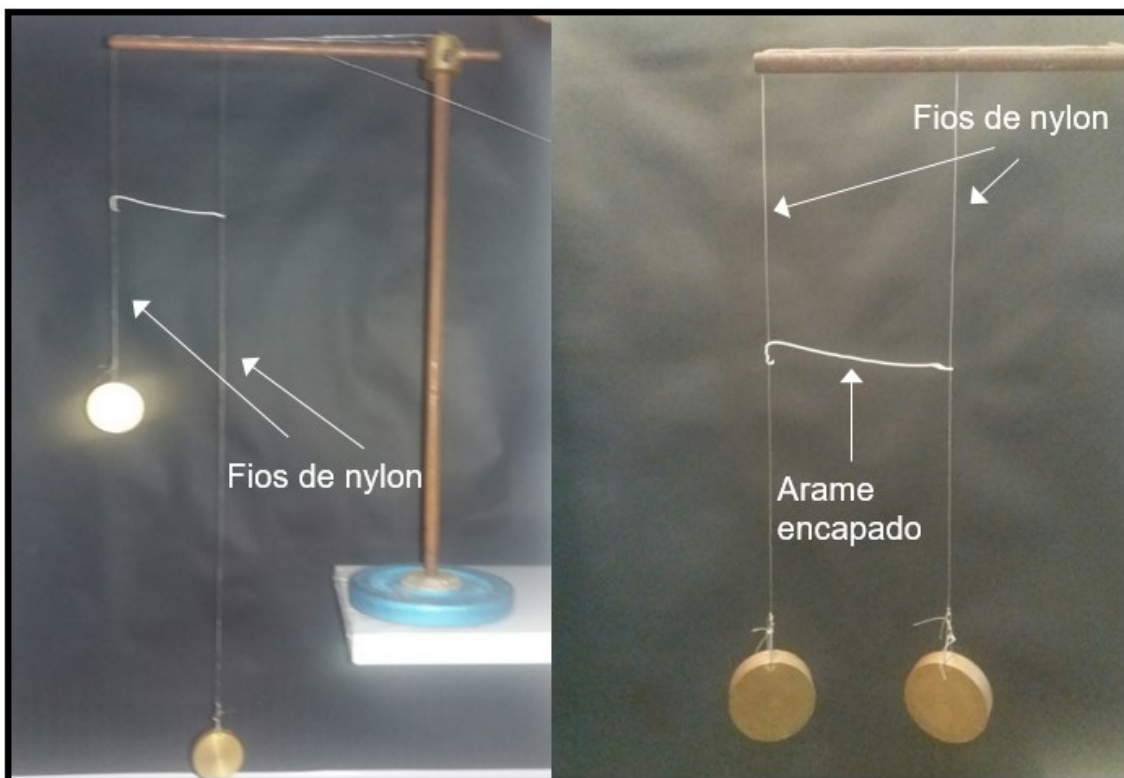


Figura 5.2.1.2 – À esquerda os dois pêndulos acoplados por um arame encapado. À direita a mesma figura vista com ampliação.

O exercício a ser proposto ao aluno é, inicialmente, manter os dois pêndulos com comprimentos muito diferentes. Por exemplo, deixar um dos pêndulos com o comprimento máximo de 60 cm e o outro com apenas 30 cm fixos. O pêndulo maior é posto a oscilar.

O estudante pode realizar o experimento dentro do âmbito de uma atividade investigativa, tendo que responder sobre o motivo pelo qual, ao reduzir o comprimento

do fio do pêndulo maior e este comprimento se aproximar do comprimento do segundo pêndulo, o pêndulo que estava parado começa a receber energia do outro e começa a balançar também.

Um segundo experimento pode ainda ser executado. Estando os dois pêndulos acoplados e inicialmente inertes, deve-se balançar com a mão o pêndulo maior em uma frequência superior a sua frequência normal de oscilação, até que o segundo pêndulo comece a receber energia e balançar também.

Com estes estudos, os conceitos a serem trabalhados são, a frequência natural de oscilação e sua dependência com o comprimento do pêndulo e o fenômeno da ressonância que ocorre quando as frequências dos dois pêndulos assumem valores muito próximos.

Em um segundo momento, esses conceitos podem ser trabalhados com uso de analogia, para relacioná-los com o fenômeno da cor. A interação da luz com a matéria irá depender basicamente destes dois conceitos, reflexão e ressonância. Logo, se a superfície de um morango nos parece vermelha, significa que o morango está espalhando, ou seja, refletindo de forma difusa, para todas as direções, apenas uma faixa bem específica do espectro da luz solar que o ilumina. As outras faixas, que poderiam interagir com os nossos cones azuis e verdes estão sendo absorvidas pelo morango, não sendo captadas por nossos olhos, ou sensibilizando-os fracamente. O cone vermelho, no entanto, recebe do morango sua luz espalhada, dando início a processos bioquímicos que nos farão percebê-lo com a cor vermelha.

Pode ser dito, de forma muito simplificada, que o morango reflete a luz vermelha e absorve, por ressonância, as luzes das demais cores do espectro visível. Desta forma, a cor de um objeto irá depender das frequências da luz que lhe é direcionada e das faixas do espectro visível que ele absorve. Logo, se iluminarmos um objeto azul com luz vermelha, como ele reflete muito bem apenas o azul e absorve as demais cores, nos parecerá negro.

Um objeto branco sendo iluminado por uma luz verde nos parecerá verde. Isso acontece pois, se o objeto diante da luz branca nos parece branco, significa que é capaz de espalhar igualmente o vermelho, verde e o azul. Se só chegar luz verde até ele, será essa a única luz a espalhar.

Um objeto amarelo sob luz branca, por exemplo, espalha parte do espectro nas faixas de frequências do vermelho e do verde, absorvendo muito o azul, e assim por diante.

O conceito ressonância também pode ser utilizado para a compreensão da interação de determinadas frequências de luz com cada tipo de cone. Cada um dos pigmentos dos três cones possui uma resposta maior para uma determinada faixa de frequência. Logo, podemos dizer que luz de determinada frequência transfere mais energia para determinada tipo de cone, onde ocorre o processo de ressonância.

5.2.2 Sombras Coloridas de Luzes

Mais uma vez nos defrontamos com um tema que mantém uma estrita relação da arte com a ciência e o desenvolvimento progressivo da sociedade. Galileu Galilei (1564-1642), por exemplo, que estudara a arte dos desenhos e efeito das sombras, pôde perceber, ao apontar seu telescópio para a lua, que sua superfície não era polida como se pensava. Ele percebeu e reproduziu através de desenhos as sombras que visualizou (Figura 5.2.2.1). Comparando-as com sombras formadas aqui em nosso planeta, percebeu que estas sombras na verdade reproduziam uma irregularidade do terreno. Logo, a Lua, bem como a Terra, possuía montanhas e crateras que formavam essas regiões sombreadas, dependendo do ângulo de incidência da luz solar [Wiki-Crateras 2016].

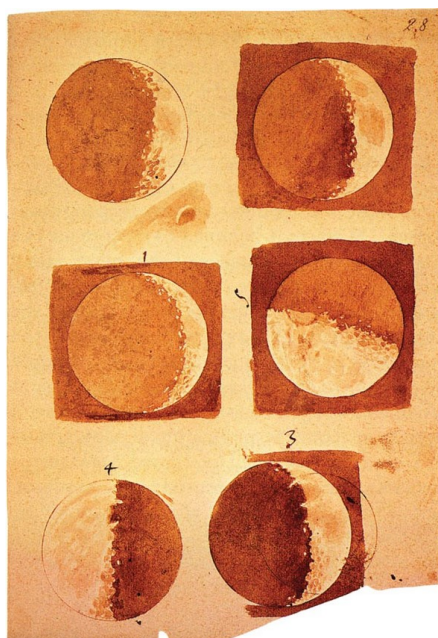


Figura 5.2.2.1 – Reprodução dos manuscritos de Galileu representando as fases da Lua, onde se pode perceber seu relevo acidentado [Ottino 2003].

Muito antes, porém, as sombras foram usadas como ponteiro de relógios. Homens primitivos usavam sua própria sombra para estimar as horas. Com a invenção do *gnômon* pelos babilônicos, que mais tarde fora introduzido na Grécia por Anaximandro de Mileto, este tipo de relógio se tornou mais elaborado. O *gnômon* é a parte triangular do relógio de sol que se interpõe entre sol e a mesa onde é projetada a sombra, como pode ser visto na Figura 5.2.2.2 [Wiki-Relógio 2016].



Figura 5.2.2.2 – Relógio de sol. A ponta metálica triangular é o *gnômon*. A hipotenusa do triângulo deve estar apontada para um dos polos celestes, ou seja, o ângulo entre a hipotenusa e o cateto da base é determinado pela latitude local [Wiki-Gnômon 2016].

Também é inegável a importância das sombras para arte, seja na pintura, nos desenhos e fotografias. São elas que produzem o contraste necessário para tornar a arte mais próxima à realidade. Leonardo Da Vinci (1452-1519) elaborou vários manuscritos em que trata dos diversos aspectos e tipos de sombras. Seus manuscritos foram reunidos em um livro intitulado *Tratado da Pintura*, publicado após sua morte [Wiki-Trattato 2016]. Há evidências que indicam que seus trabalhos foram reunidos por Francesco Melzi, seu discípulo e herdeiro, ainda no século XVI.

Durante o Iluminismo, a sombra se apresenta como aspecto fundamental para se retratar o mundo. Ganhando destaque, seu estudo é aprofundado por diversos personagens da época, de diversas correntes artísticas diferentes, como cita Michael Baxandall.

“A convicção comum a todas as correntes do Iluminismo – nativista, empirista, sensacionalista, materialista, associacionista –, a de que a sombra deve de algum modo ser fundamental na nossa percepção do mundo, seja qual for o meio e a base de que nos sirvamos para interpretá-la, é tão firme e imperiosa que se torna necessário um grande esforço para nos desembaraçar-nos dela” [Baxandall 1997].

Para a arte, a sombra se configura numa deficiência. Considerando a forma e o tipo de iluminação, essas sombras podem assumir diversos aspectos. Por isso foi necessário muito estudo quanto a vários aspectos dessas fontes de luz, o tipo de iluminação, além de um estudo detalhado da superfície, para que houvesse uma evolução proeminente da chamada terceira arte.

“A sombra, portanto, é em primeiro lugar uma deficiência local, relativa, na quantidade de luz que incide sobre uma superfície, e é objetiva. E, num segundo momento, é uma variação local, relativa, na quantidade de luz refletida da superfície para o olho” [Baxandall 1997].

Nos estudos de Leonardo Da Vinci há uma diferenciação dos tipos de sombras de acordo com critérios ligados aos tipos de obstáculos que acabam por impedir em todo, ou em parte, a iluminação pela luz. De acordo com esses critérios podem ser denominadas de sombra lançada, sombra ligada e sombreamento [Baxandall 1997].

Com relação às sombras coloridas, que dizem respeito ao sombreamento de superfícies coloridas ou a iluminação por luzes de cores diferentes, Leonardo e vários outros artistas se debruçaram em seus estudos. Esse fenômeno intrigante, o de sombras de luzes coloridas, é citado no livro de Banxadall [Baxandall 1997], através de uma carta escrita por Abbé de Millot de Lyon ao cientista Buffon entre os anos de 1754-1755:

“[...]sou obrigado a traçar a topografia de meu quarto: fica em um terceiro andar; a janela perto de um ângulo mais a oeste, a porta quase defronte dela. Essa porta dá por uma galeria em cuja extremidade, a dois passos de distância, há uma janela voltada para o sul. As luzes dessas duas janelas, quando a porta está aberta, encontram-se e se unem em uma das paredes; e foi nessa parede que vi sombras coloridas em quase todas as horas do dia, mas principalmente por volta das dez da manhã. Os raios de sol que a janela da galeria recebe ainda obliquamente não incidem, através da janela do quarto, sobre a parede que mencionei. A poucas polegadas dessa parede coloco algumas cadeiras de madeira com espaldar perfurados. As sombras lançadas desses orifícios são então às vezes de cores muito vivas. Vi que algumas eram verde-escuras, outras um belo azul celeste, embora ambas fossem lançadas do mesmo lado. Quando a luz é dirigida de tal maneira que as sombras sejam igualmente perceptíveis de um lado e do outro, aquela que se encontra em um ponto oposto à janela do quarto é azul ou violeta; a outra ora verde ou amarela. Essa última é acompanhada de uma espécie de penumbra muito colorida, que forma como que uma dupla borda azul de um lado, e do outro verde ou vermelha ou amarela, de acordo com a intensidade da luz. Se eu fechar as folhas de minha janela, as cores dessa penumbra serão muitas vezes ainda mais brilhantes; elas desaparecem se eu fechar a porta pela metade. Devo acrescentar que o fenômeno não é notável no inverno. Minha janela dá para o pôr do sol do verão, e foi no verão que fiz minhas primeiras experiências, em uma época em que os raios de sol incidiam obliquamente sobre a parede que faz ângulo com aquela onde as sombras se coloriam”.

Percebemos o quanto esse efeito já ocupava as mentes mais brilhantes da época. A partir dessas buscas foram desenvolvidas as teorias sobre a luz e a produção das cores que hoje temos acesso.

Fisicamente a sombra se dá a partir da propagação retilínea da luz sobre um meio homogêneo e transparente. Logo, a sombra é a região do espaço no qual a luz não chega, por ter sido obstruída por um objeto opaco. Sendo assim, a sombra assume uma forma coerente com o objeto que a ser iluminado, delimitando seu contorno.

As fontes de luzes podem ser pontuais ou extensas. As fontes pontuais são, na realidade, fontes extensas de dimensões pequenas quando comparadas às do objeto a ser iluminado. Elas produzem uma sombra bem delimitada relativamente ao contorno do objeto pelo qual ela é produzida. Já as extensas produzem uma sombra pouco nítida e que muitas vezes deformam a figura projetada do objeto que por elas foi iluminado. Sendo assim, neste caso, é formado além da sombra, regiões de penumbra. As regiões de penumbra recebem somente parte da iluminação e, por isso, são mais claras que as regiões de sombra, onde nenhuma luz alcança. Tais efeitos podem ser observados na Figura 5.2.2.3.

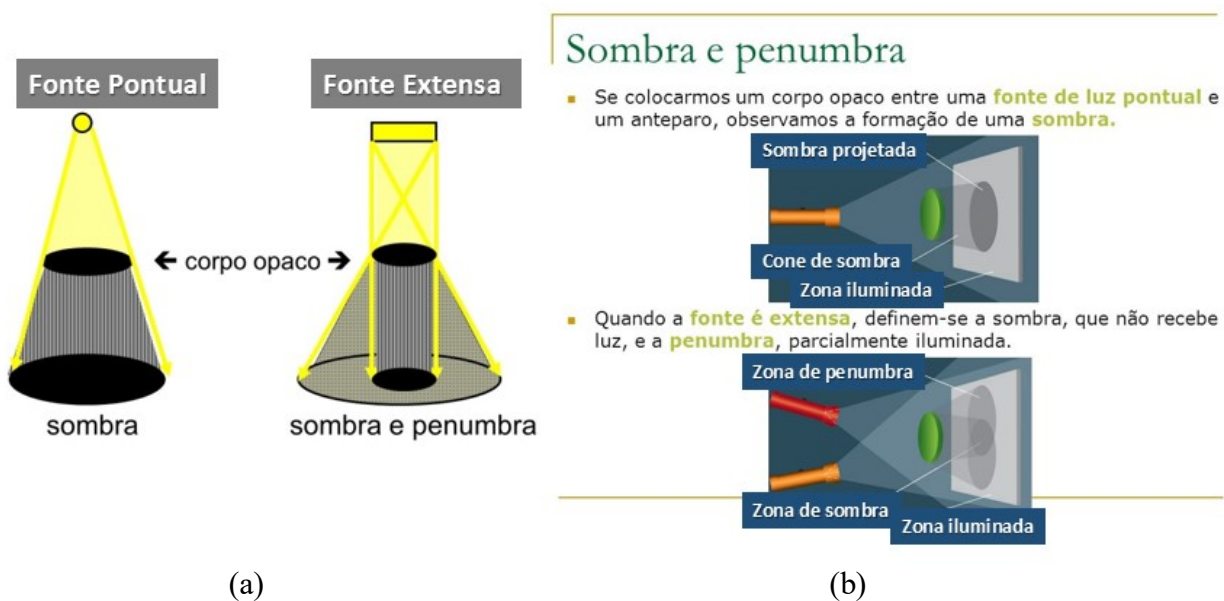


Figura 5.2.2.3 – (a) Podemos perceber que a fonte de luz pontual produz uma sombra bem marcada e maior que o objeto, já a fonte de luz extensa produz uma sombra central circular e coerente com o objeto e uma região de penumbra que a circunda. (b) Quando se posicionam duas fontes pontuais afastadas (duas lanternas) criam-se duas regiões de penumbra e uma sombra central que difere muito do objeto. A sombra central forma a figura de uma elipse [Pedroso 2016].

O estudo das sombras, sobre os diversos aspectos aqui levantados, pode ser levado à sala de aula para ser aplicado em abordagens do campo da Física e da Arte, já que é

evidente sua correlação. A evolução destes conceitos repercutiu diretamente nas evoluções tecnológicas, que dizem respeito ao estudo de novas técnicas de desenhos e pinturas, bem como o desenvolvimento dos relógios solares. Esses conhecimentos permitiram às sociedades da época, por exemplo, um melhor controle sobre o tempo. Logo, em uma aula em que se abordem estes temas, pode-se discuti-los sob o ponto de vista CTS (Ciência, Tecnologia e Sociedade), por ser um tipo de estudo que une essa tríade como proposta didática a ser desenvolvida em sala de aula.

Antes de apresentar o experimento aqui desenvolvido ao estudante, é interessante que ele saiba como a luz se propaga e como são formadas as sombras e a penumbra. Esse conhecimento será estritamente necessário para que compreenda como são formadas essas sombras coloridas. A explicação das sínteses aditiva e subtrativa, que serão necessárias para compreender o fenômeno, pode ser abordada como atividades investigativas. Levando o aluno a inferir que ora ocorrem soma, ora subtração das cores das luzes.

Experimento

Para construção do experimento utilizam-se duas caixas de papelão com medidas aproximadas de 23cm x 10 cm x 10 cm (Figura 5.2.2.4a). Um pedaço pequeno de cartolina preta de aproximadamente 30 cm x 30 cm. Um pedaço de papel vegetal de 20 cm x 20 cm, 1 CD ou DVD, dois alfinetes de cabeça de vidro colorido, uma rodinha de carrinho de cortina, pistola de cola quente e dois bastões de cola, cola em bastão para papel, ferro de solda, 50 cm de fio de solda, três potenciômetros de 10 k Ω , três LEDs de alto brilho de 10 mm nas cores verde, vermelha e azul, três suportes para baterias CR 2025, três baterias CR 2025, três interruptores liga e desliga e 60 cm de fio cabinho nas cores verde, vermelha, azul e preta.

Os LEDs são distribuídos ao redor do centro do DVD, a cerca de 3 cm do centro deste, onde são feitos dois furos para a passagem dos terminais de cada LED, com a própria ponta do ferro de solda. Passados os terminais dos LEDs pelos orifícios, a ponta de seus terminais positivos, anodos, são soldadas aos fios, respeitando-se suas cores em correspondência à cor da luz produzida pelo LED. Os outros terminais, os catodos, são soldados a pedaços de cerca de 20 cm de fios pretos. Após as soldagens das extremidades dos terminais cada ponta será dobrada para um lado e colada ao DVD com cola quente para que os LEDs possam ficar presos ao DVD. Isso permite que possam ser facilmente deslocados para focar o local desejado, mantendo-se, após o ajuste, rígidos e livres de

perturbações na orientação do seu apontamento. Ao mesmo tempo ficam flexíveis o suficiente para que possam ser reorientados de acordo com a necessidade (Figuras 5.2.2.4b e 5.2.2.4c).

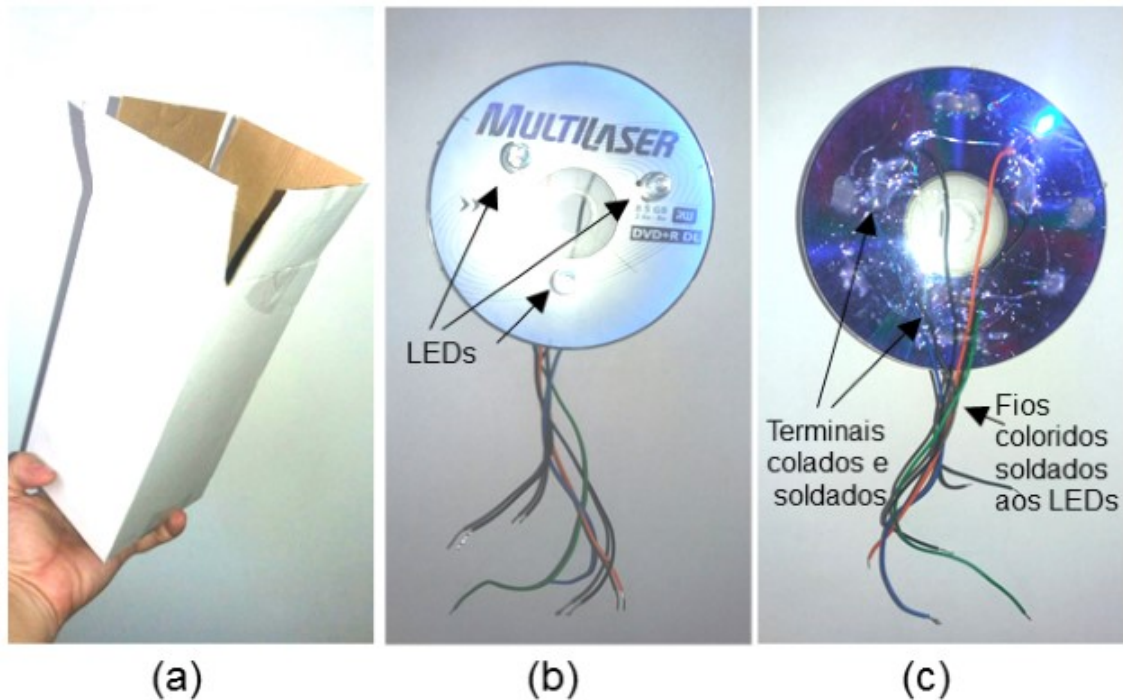


Figura 5.2.2.4 – (a) A caixa utilizada. (b) Os LEDs já fixados na mídia e com seus respectivos terminais soldados aos fios. (c) Visão do lado oposto da mídia onde foram soldados os fios aos terminais e colados com cola quente sobre a superfície desta mídia.

A região da caixa de maior comprimento deverá ser descolada para que se tenha acesso a seu interior (Figura 5.2.2.5c), mantendo-se uma das bases colada. Na base colada serão feitos três furos que permitirão a passagem dos três LEDs. Com os LEDs centralizados, o DVD pode ser colado na base da caixa com a cola quente. Da outra caixa é cortada uma das extremidades, que ainda esteja colada e montada, com 4 cm de comprimento. Esse pedaço de caixa é colado em um dos lados da outra caixa, próximo à base que contém o DVD (Figuras 5.2.2.5a e 5.2.2.5b). Os componentes são soldados entre si, de acordo com o esquema elétrico apresentado na Figura 5.2.2.6, e colados neste pedaço de caixa.

O papel vegetal é dobrado em suas pontas para atingir as dimensões do interior da caixa. Mantendo-se as pontas do papel dobradas, o que o torna mais rígido, serão feitos testes para que se projetem as luzes dos LEDs num mesmo ponto central sobre esse papel. A uma distância aproximada de 4 cm do topo dos LEDs o papel vegetal é colado às bordas

Capítulo 5- Composição de cores

da caixa, com exceção da borda que foi desmontada, para que após a montagem se tenha acesso a seu interior, de acordo com a Figura 5.2.2.5c.

A cartolina preta será dividida em três partes e dobradas para assumirem as dimensões de cartões de 15 cm x 3 cm. A cada dobra são coladas as metades com cola em bastão para que se mantenham rígidas. Em duas das tiras serão colados os alfinetes com cabeça de vidro, com um pouco de cola quente. Em um dos alfinetes será colada a rodinha do carrinho de cortina. A terceira tira será perfurada com uso de um perfurador de papel comum, como visto na Figura 5.2.2.5a.

A extremidade oposta à abertura lateral da caixa será cortada a 0,5 cm abaixo do papel vegetal, entre este e os LEDs. O corte feito deverá ser suficiente para entrada de cada um dos três cartões, pouco mais de 3 cm de largura e, no comprimento, no centro do rasgo, uma abertura adicional para a passagem dos alfinetes e da rodinha de cortina, na região descrita na Figura 5.2.2.5c.

Após a montagem os potenciômetros poderão ser ajustados a fim de se produzir a cor branca no centro do papel vegetal, como na Figura 5.2.2.5b. Logo após, os cartões poderão ser introduzidos para que se observem os fenômenos.

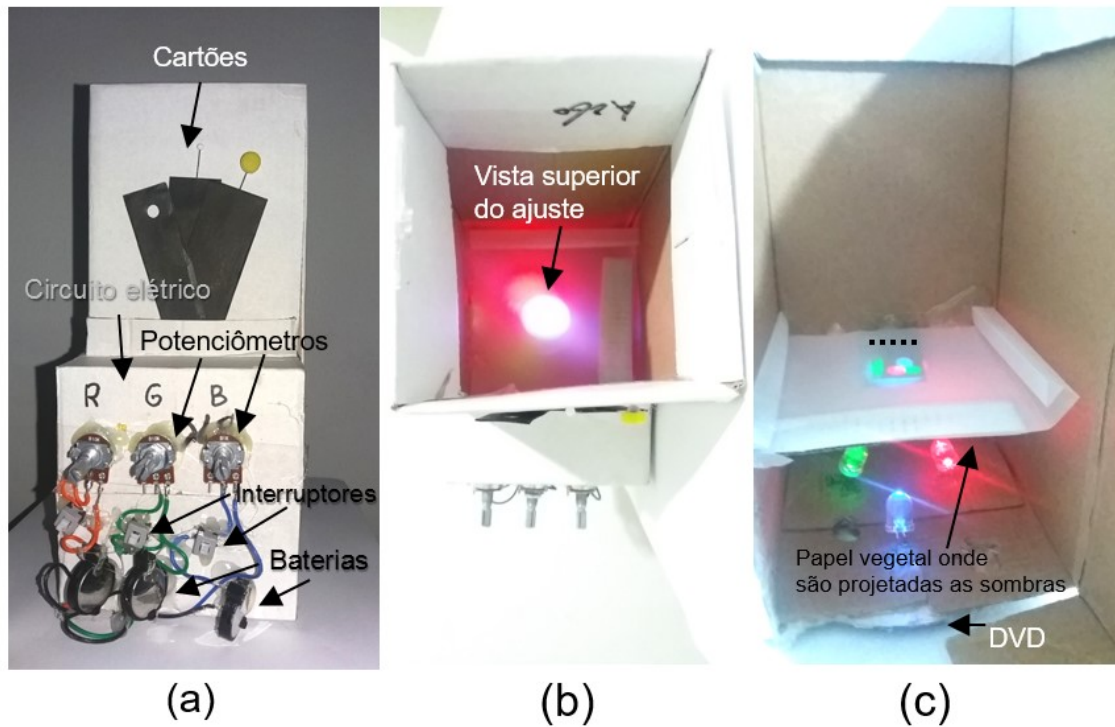


Figura 5.2.2.5 – (a) Caixa de sombras já pronta para ser ajustada. (b) Ajuste dos LEDs para produzir o branco central. (c) Caixa aberta para inspeção e ajustes, mostrando as sombras coloridas das luzes que atravessam o cartão perfurado. O tracejado indica a região posterior da caixa que deve ser perfurada, abaixo do papel vegetal, para a introdução dos cartões.

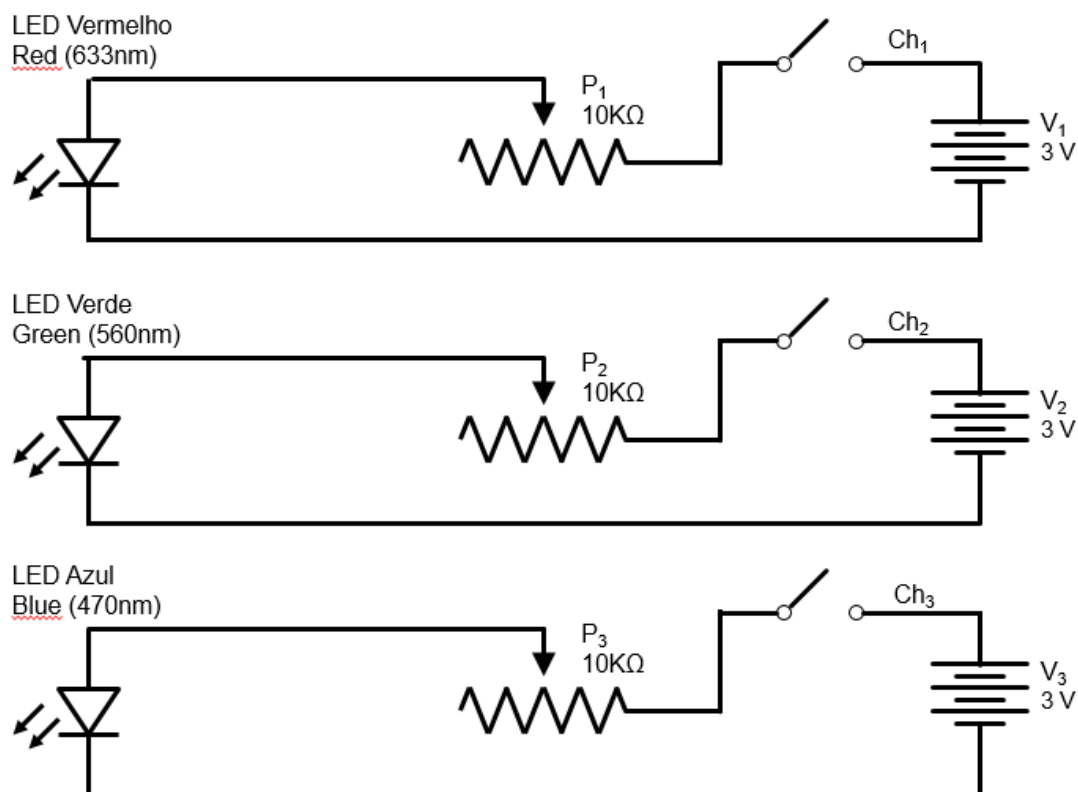


Figura 5.2.2.6 – Esquema do circuito elétrico dos três LEDs.

Toda montagem do circuito elétrico foi feita fora da caixa e todos os contatos podem ser vistos pelos estudantes de modo que possam perceber como foi feita cada conexão de forma clara e rápida. A caixa, que pode ser aberta sem comprometimento dos ajustes e também de forma rápida, permite que o estudante explore seu interior e observe sua estrutura. Com esse acesso podem observar como as sombras estão sendo criadas sob um novo ponto de vista.

Os resultados são apresentados nas Figuras 5.2.2.7 e 5.2.2.8. Os LEDs podem ser acesos individualmente, aos pares ou todos ao mesmo tempo. É válido deixar que os estudantes os acendam nessa sequência para observarem os efeitos produzidos.

Usando o cartão perfurado, ao acender uma única cor de LED, o que vemos é apenas essa luz sendo projetada através desse orifício. Ao acender as luzes aos pares, aproximando e recuando o orifício com relação ao papel vegetal, podem ser vistos dois círculos separados com as duas cores e, aproximando o orifício do papel, os círculos coloridos vão se unindo, formando uma terceira cor que é a síntese aditiva destas duas.

Na Figura 5.2.2.7 pode-se observar o que acontece quando as três luzes estão acesas. Na Figura 5.2.2.7a o cartão está um pouco afastado do papel vegetal, de modo

que vemos projetada sobre ele, as luzes dos três LEDs, formando três círculos com as três cores. Na Figura 5.2.2.7b, o cartão foi posto mais próximo ao papel vegetal. Desta vez, conseguimos ver as intercessões das três cores que produzem, por síntese aditiva, o ciano, magenta e amarelo. A região do centro da figura, que recebe todas as cores das luzes, se apresenta branca.

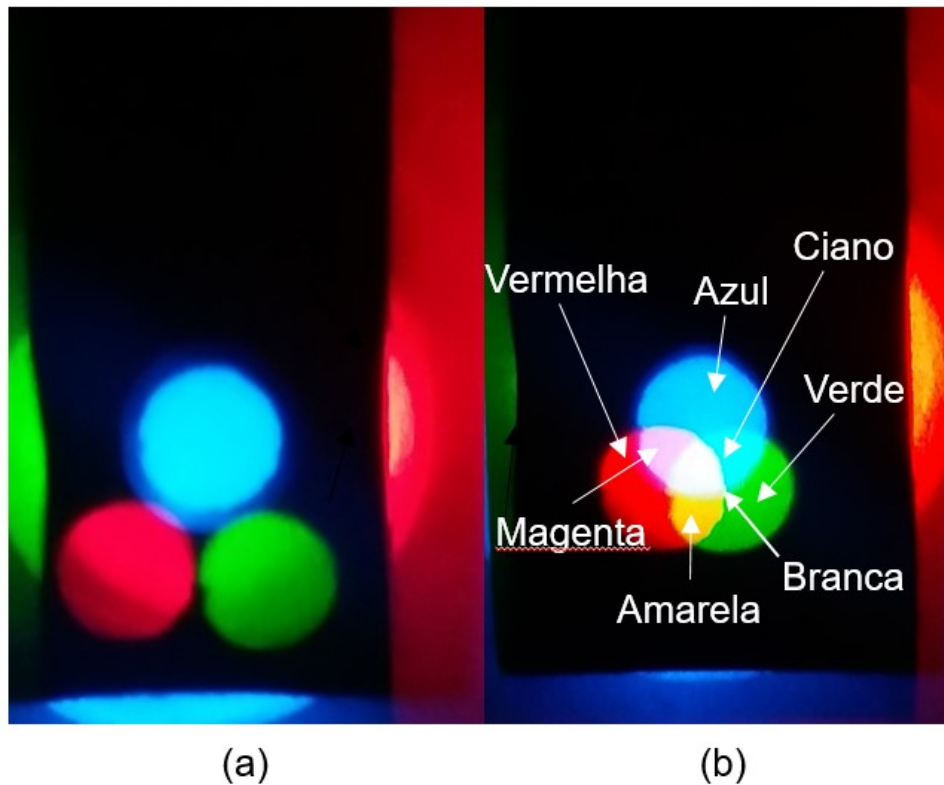


Figura 5.2.2.7 – Usando o cartão com o furo. (a) Distanciando um pouco o cartão do papel vegetal, consegue-se a projeção das três cores. (b) Ao aproximar o cartão do papel vegetal é possível compor mais outras três cores, além do branco.

O esquema mostrado na Figura 5.2.2.8 ilustra de que forma esquemática, como os efeitos estão sendo produzidos, a partir da projeção das luzes sobre o orifício central.

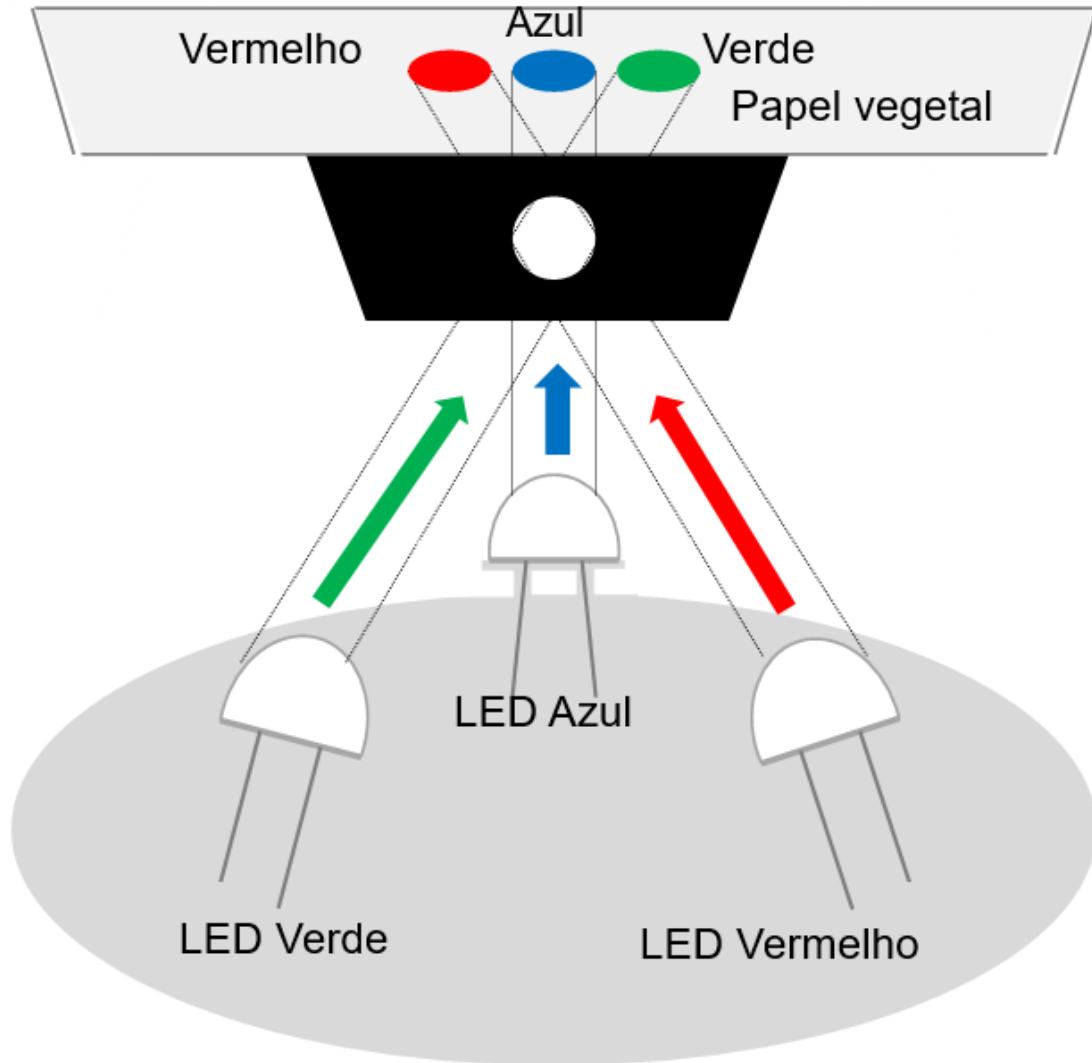


Figura 5.2.2.8 – Esquema de montagem do experimento, fazendo uso do cartão perfurado. As setas coloridas indicam os feixes de luzes que conseguem atravessar o orifício, formando projeções circulares e coloridas no papel vegetal.

Na Figura 5.2.2.9 pode ser observado o que acontece quando, no lugar do cartão furado, são inseridos o alfinete com a rodinha, visto na Figura 5.2.2.9a, ou somente o alfinete na Figura 5.2.2.9b.

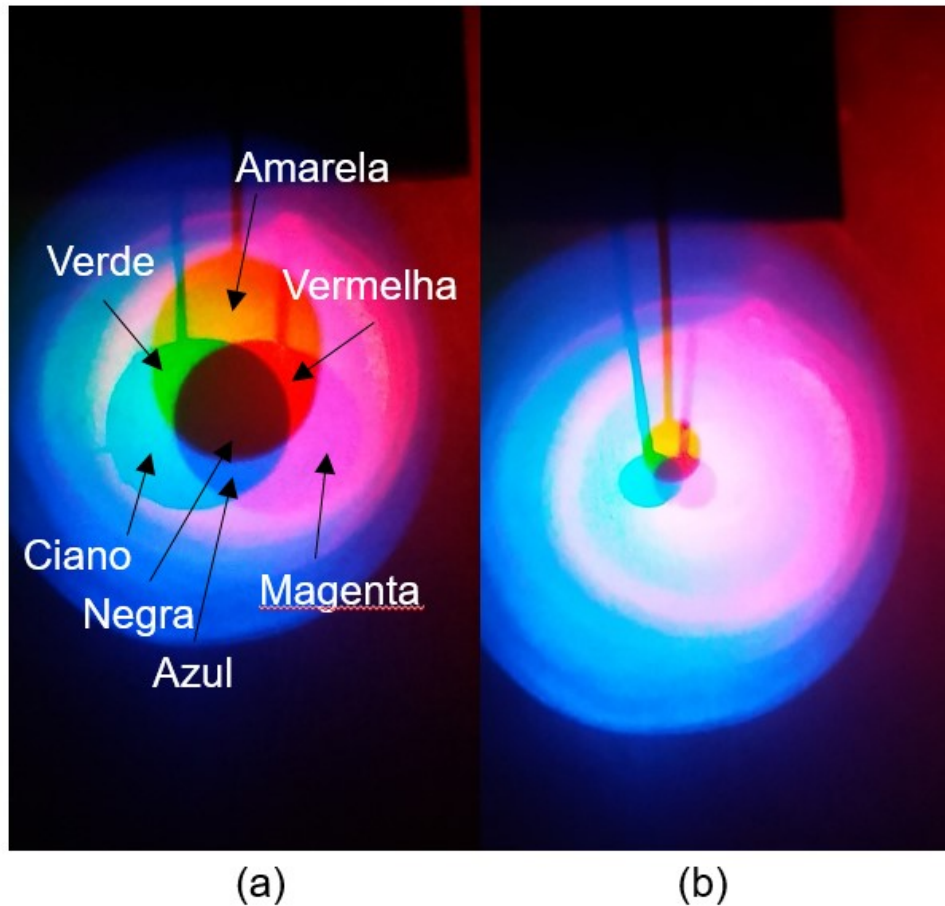


Figura 5.2.2.9 – Utilizando os alfinetes. (a) Usando o alfinete com a rodinha do carrinho de cortina, um tanto próximo ao papel vegetal, observam-se as regiões de sombras coloridas e, no centro, a região negra que não recebe nenhuma das três cores de luzes. (b) O mesmo efeito pode ser observado usando apenas a projeção da cabeça de vidro do alfinete.

A Figura 5.2.2.10 reproduz um esquema de montagem do experimento, fazendo uso dos cartões com alfinetes. Observando o esquema percebem-se as regiões sombreadas que se subtraem para formação das cores secundárias.

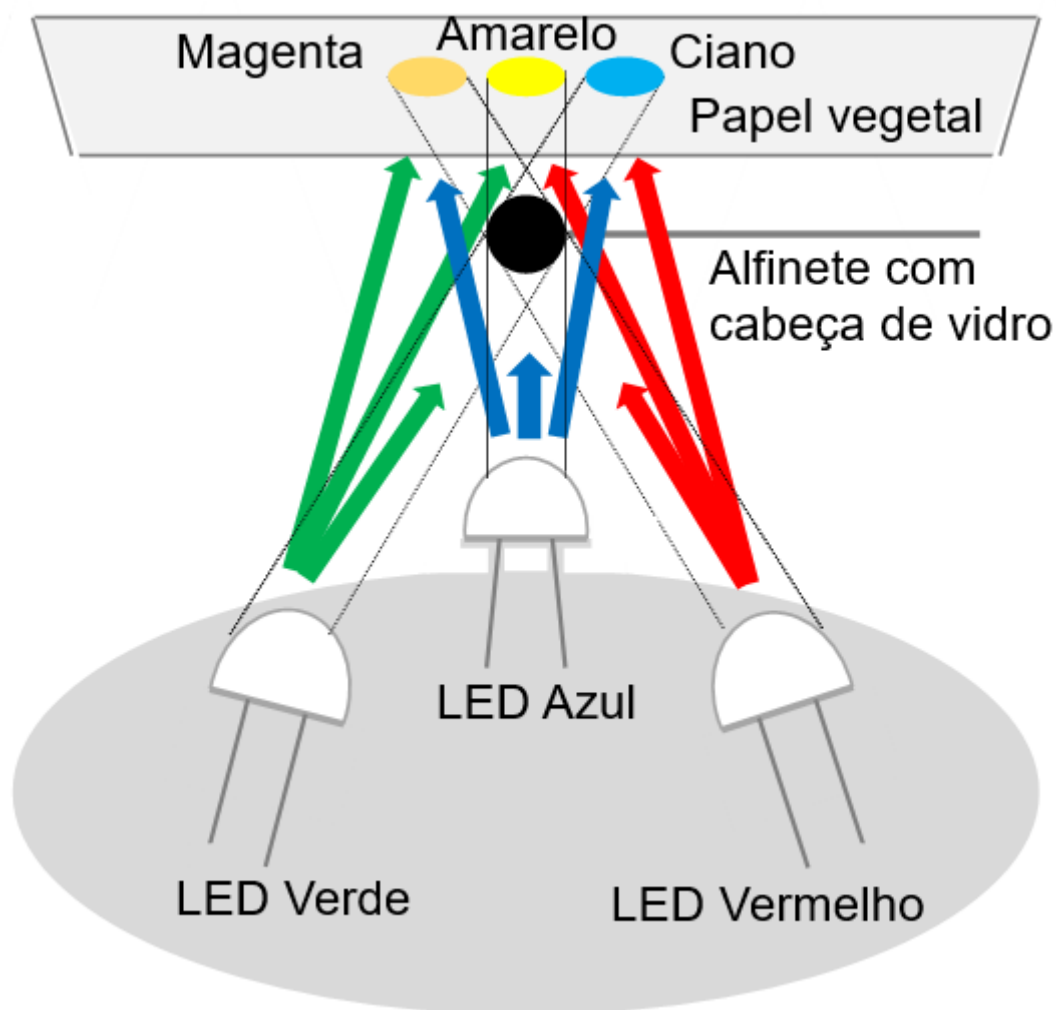


Figura 5.2.2.10 – Esquema de montagem do experimento fazendo uso dos cartões com os alfinetes. As setas coloridas menores indicam os feixes de luz que serão interceptados pelo alfinete, produzindo uma região de sombra no papel vegetal na qual essa cor não está presente. As setas maiores indicam os feixes de luz responsáveis pelas composições de cores por síntese aditiva, projetadas no papel vegetal.

Mais uma vez, os estudantes podem acender os LEDs aos poucos fazendo inúmeras combinações e, por fim, acender os três ao mesmo tempo. Com apenas um LED aceso, observa-se uma única sombra negra. Com dois LEDs acesos ao mesmo tempo percebe-se duas sombras correspondentes às cores que estão acesas e, na junção destas, uma sombra negra de forma elíptica. Ao acender os três LEDs ao mesmo tempo, observam-se outros efeitos, diferentes do que ocorreram com o cartão perfurado. Desta vez, a sombra de cada cor produz uma subtração desta na projeção das luzes sobre o papel vegetal. Logo a formação das sombras, neste caso, se dá pela síntese subtrativa, já que para cada sombra, uma das cores das luzes, não está presente. Ou seja, a sombra amarela

indica que a luz do LED azul não está participando de sua formação, na sombra magenta, quem não participa é a do verde e, no caso da cor ciano, a luz que fica de fora, é a de cor vermelha. Dessa forma produzem-se as três cores secundárias. Para unir as sombras, aproxima-se os alfinetes do papel vegetal até juntar estas sombras e, na intercessão de cada par, recompomos as cores originais dos LEDs. No centro da figura, como não passa nenhuma das luzes emitidas pelos três LEDs, a região apresenta-se negra.

5.2.3 Separação de Cores Através da Cromatografia em Papel

Nas pinturas tradicionais as cores de diferentes tons são obtidas misturando-se tintas de diferentes cores. Vale ressaltar que não é o mesmo que acontece no pontilhismo, pois, neste caso, a mistura é feita no nosso processamento visual.

A paleta do pintor é o local onde são feitas as misturas de tintas. Nas indústrias o processo é o mesmo. A composição de uma nova cor envolve a mistura de certas cores primárias. O exemplo mostrado na Figura 5.2.3.1 ilustra de que forma uma nova cor é conseguida a partir das cores primárias amarela, ciano e magenta. Com essas cores é possível compor o vermelho, verde, azul e inúmeras outras. No vermelho, que é a mistura da tinta amarela com a magenta, são absorvidas as cores azul e verde, refletindo de forma difusa, ou seja, espalhando, apenas a cor vermelha. O campo azul é formado pelas tintas magenta e ciano, pois absorvem o verde e o vermelho e permitem a difusão apenas do azul. A cor verde é a mistura do amarelo com o ciano que absorvem as cores vermelha e azul, espalhando apenas o verde. A cor preta seria a mistura de todas as três cores, no entanto, devido a impurezas encontradas nos pigmentos, esta mistura acaba por não absorver todas as cores. Geralmente o que se consegue é um marrom muito escuro e, sabemos bem que isso é verdade, pois a maioria nós quando criança, já fez a experiência de misturar todas as tintas para ver no que daria; marrom.

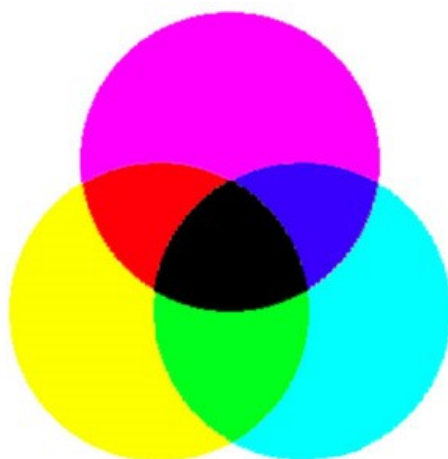


Figura 5.2.3.1 – Síntese subtrativa de cores.

As tintas são produzidas a partir de três substâncias: o pigmento, responsável pela cor; o aglutinante, que a faz a fixação na superfície, e a carga, que é usada para reduzir a concentração do pigmento. Os pigmentos usados nas tintas podem ser extraídos de raízes, minérios e até insetos. A cochonilha, por exemplo, inseto parasita que atinge as lavouras, já era reproduzida em cativeiro para produção de tinta carmim em 700 a.C.

Alguns pigmentos naturais, como os ocres e os óxidos de ferro, já eram usados por povos pré-históricos, inclusive para fins estéticos como pintura corporal. No século IV a.C. alguns pigmentos valiam seu peso em prata [Wiki-Pigmento 2016]. O pigmento branco é feito a partir do dióxido de titânio, muito abundante em nosso planeta, e encontrado em meteoritos e diversos minerais. O dióxido de titânio usado nas indústrias brasileiras é importado de países como Alemanha, Rússia e China [Roper 2011].

O sistema de cores usado nas artes gráficas é denominado CMYK (Ciano, Magenta, Amarelo e Preto) [Wiki-CYMK 2016]. Ele faz uso das três cores mencionadas anteriormente, além do preto. Como não é possível a produção do branco por quaisquer combinações destas cores, as gráficas, quando precisam desta cor, fazem uso de superfícies brancas, como as folhas de papel ofício que utilizamos em nossas casas. As impressoras domésticas também usam o padrão CMYK, geralmente são dois ou quatro cartuchos – algumas usam seis cores para uma maior fidelidade, ou a chamada qualidade fotográfica – nestas quatro cores básicas. Nas impressoras jato de tinta, minúsculas gotas de tinta são lançadas na mesma região do papel, a fim de compor a cor pré-determinada [HP 2014].

A intenção da mistura de cores, diferentemente da mistura de luzes, é conseguir subtrair faixas espectrais de determinadas comprimentos de onda, que são absorvidas pela tinta. Dessa forma, as luzes de comprimentos de onda que são espalhadas produzem, para nós, uma nova cor, diferente das cores que fizeram parte da mistura.

A produção das cores por absorção pode ser entendida também por sua correspondência com o nosso sistema de visão, o RGB. Portanto, a cor ciano pode ser interpretado como uma cor oposta à vermelha, ou seja, ela atua como um filtro que absorve a luz com comprimentos de onda na região do vermelho, deixando chegar aos nossos olhos as luzes com comprimentos de onda nas faixas do azul e do verde (esquemáticamente, $-R, +G, +B$). O magenta seria a cor oposta ao verde ($+R, -G, +B$) e a amarela a cor oposta ao azul ($+R, +G, -B$). Logo, a mistura da tinta amarela com o magenta produzirá o vermelho, magenta com ciano produzirá o azul e o ciano com o amarelo produzirá o verde.

Observa-se que a composição de cores por mistura de tintas é um campo de estudo multidisciplinar. As cores das tintas, inclusive as sintéticas, podem ser estudadas em aulas interdisciplinares com a física, química, arte e história. De forma muito enriquecedora, os vários tipos de abordagens visam contribuir para uma visão mais ampla do

Capítulo 5- Composição de cores

desenvolvimento da sociedade até os dias atuais. Um destaque especial para a química, já que a experiência proposta costuma ser realizada durante o curso de química orgânica.

A experiência desenvolvida a seguir pode ser utilizada de duas formas. Antes de iniciar o estudo da síntese subtrativa, o aluno pode realizar a experiência e tentar inferir o motivo pelo qual as cores dissociadas possuem determinadas colorações. Deste modo, se fará uso da abordagem didática denominada atividade investigativa. De outro modo, a experiência pode ser utilizada após a introdução dos conceitos da síntese subtrativa, a fim de confirmar experimentalmente o princípio da teoria científica.

A proposta é descobrir de que cores de pigmentos as tintas são feitas. O contrário é o que fazem os pintores, ou seja, misturam as tintas para composição de uma nova cor. Então, fazendo o processo inverso, podemos de certa forma, discriminar esses pigmentos para analisar quais foram as cores que participaram de sua composição.

As substâncias que compõem as cores de canetinhas de hidrocor reagem de forma diferente ao entrarem em contato com a água, solvente universal.

A experiência

O material a ser usado na experiência é de baixo custo. São necessários um conjunto de canetinhas hidrográficas, um filtro de papel para coar café, fita adesiva, uma tesoura e um copo com água.

O filtro de café será cortado em tiras de aproximadamente 10 cm x 1,5 cm. Com cada uma das canetinhas, serão pintados pequenos círculos nas duas extremidades. Uma que vai participar do processo de dissociação e a outra para identificar a cor que deu origem ao efeito. Estes materiais e procedimentos podem ser vistos na Figura 5.2.3.2.

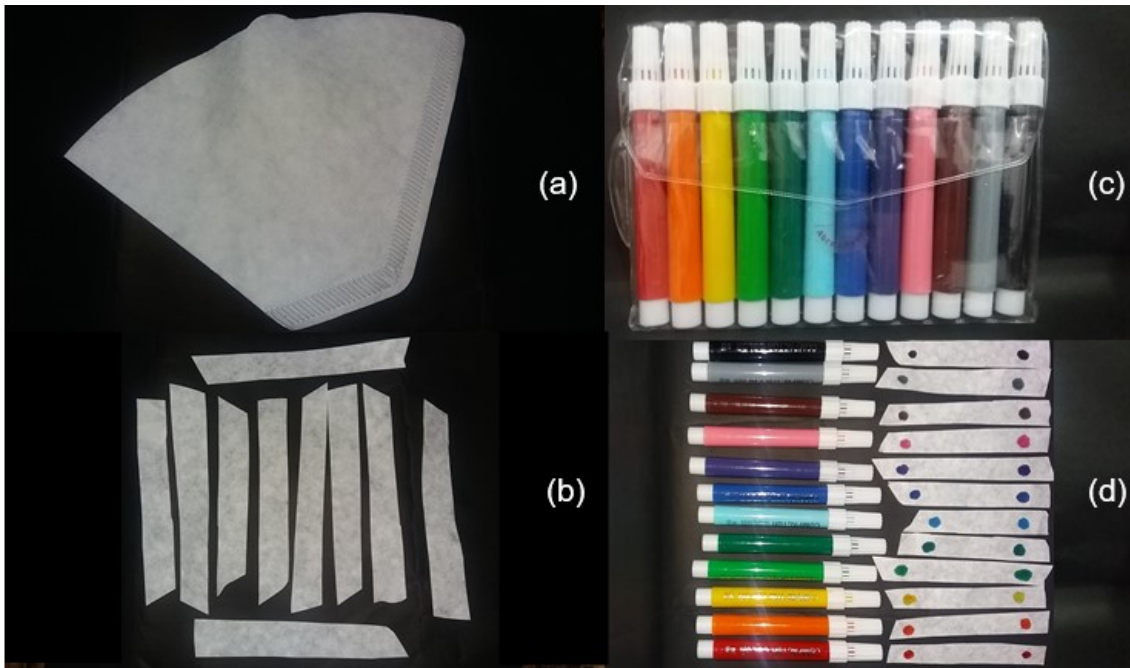


Figura 5.2.3.2 – Material necessário para a experiência. (a) O coador de papel para café. (b) O coador já cortado em tiras. (c) Estojo de canetas hidrográficas. (d) As tiras de papel pintadas em suas extremidades com cada uma das cores das canetinhas.

As tiras de papel são presas com fita adesiva à própria caneta, ou a um lápis. O copo receberá a quantidade suficiente de água, para que quando o papel seja colocado no seu interior, a ponta da tira de papel encoste levemente na superfície da água, como visto na Figura 5.2.3.3a.

A técnica aqui empregada, denominada cromatografia, é atribuída ao botânico russo Mikhael Semenovich. Ele empregou esta técnica para realizar a separação de pigmentos encontrados em folhas de plantas que, pela passagem de extratos de folhas, eram arrastados pelo éter de petróleo através de leitos de carbonato de cálcio finamente dividido [Coelho 2006].

As moléculas de celulose, presentes no papel, possuem uma forte afinidade pela água, que será usada como solvente. No entanto, o papel possui pouca afinidade pela fase orgânica (a tinta da canetinha), atuando como suporte inerte para a fase estacionária aquosa (polar). Ao atingir o soluto, temos um composto fluindo pelo papel e, em determinado momento, uma partição deste composto ocorre, entre a fase móvel orgânica (pouco polar) e a fase estacionária aquosa. Deste modo, parte do soluto deixa o papel e entra na fase móvel. No momento em que a fase móvel alcança uma região do papel que não contém soluto, o fenômeno de partição volta a ocorrer, mas agora o soluto é

transferido da fase móvel para a fase estacionária. Através deste fluxo contínuo de solvente, o efeito desta partição entre a fase móvel e estacionária torna possível a transferência do soluto de seu ponto de aplicação no papel, para outro localizado a uma certa distância do local de aplicação, no sentido do fluxo do solvente.

A cromatografia pode ser classificada, quanto ao meio de separação, em: Adsorção, Partição, Troca Iônica e Exclusão. O processo envolvido em nossa experiência, como vimos, foi a Partição, que se baseia num processo interacional, por absorção, no qual ocorrem diferentes solubilidades dos componentes da amostra na fase estacionária [Coelho 2010].

Na Figura 5.2.3.3 (a → f), o processo foi fotografado em diferentes estágios de evolução e apresentado cronologicamente. O processo total levou cerca de três minutos (seria mais rápido se fosse usado álcool em lugar da água). Na última fotografia, fica nítida a presença de diferentes cores que, neste caso, compõem a cor preta da canetinha.

O mesmo processo foi repetido para cada cor de canetinha e, após cada cor ser processada, era posta a secar para, em seguida, se verificar melhor o resultado.

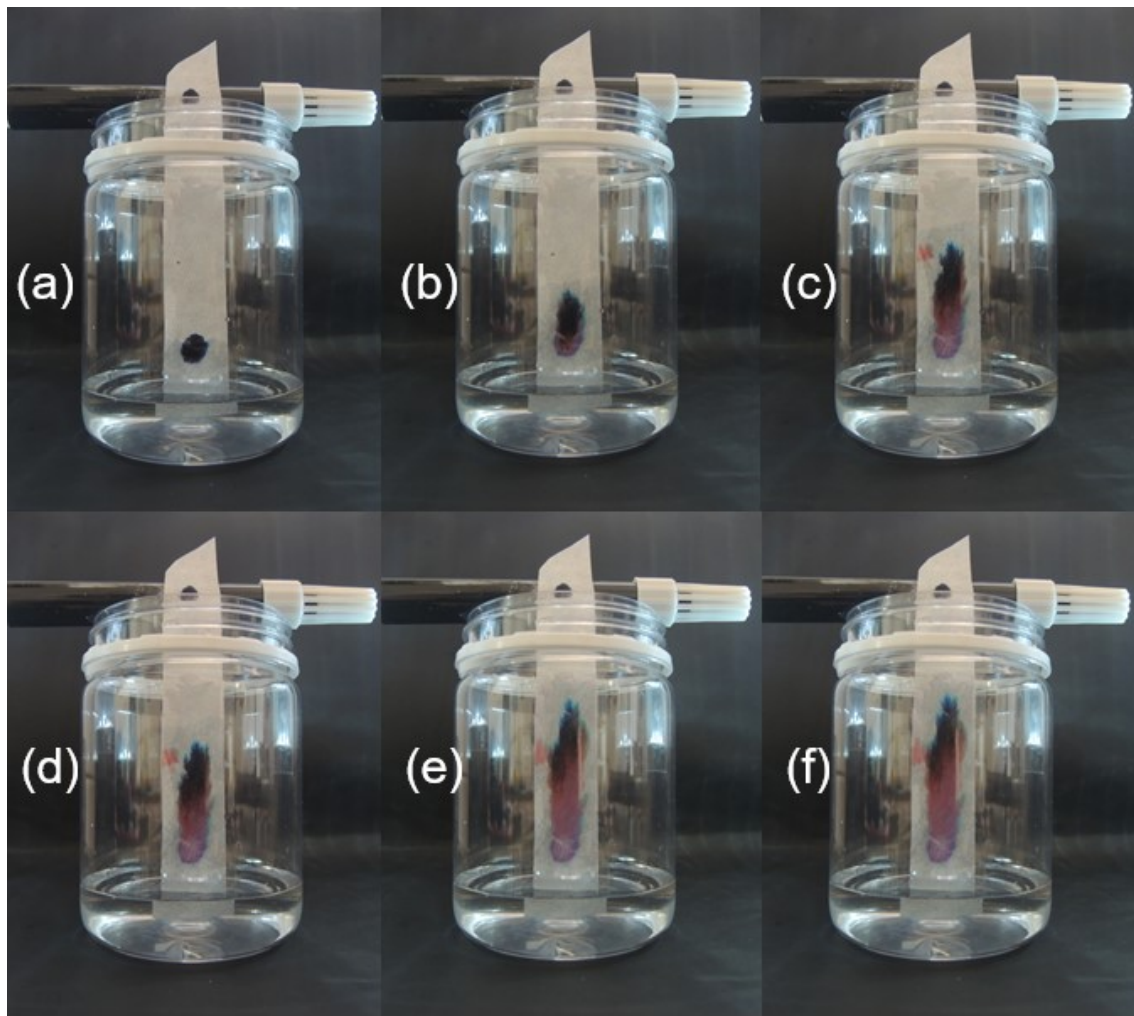


Figura 5.2.3.3 – Fotos do processo. (a → f) Evolução cronológica do processo de cromatografia para a cor de canetinha preta. Os tempos são contados a partir do contato da fita com a água (a) 2 s. (b) 34 s. (c) 40 s. (d) 54 s. (e) 1 min. (f) 1 min. e 20 s.

Como já vimos, a indústria de tintas utiliza, de modo geral, o sistema CMYK. Já os sistemas reprográficos costumam utilizar o pontilhismo. Isso pode ser verificado utilizando-se uma lupa sobre uma região colorida de um jornal ou revista. Podemos perceber nas Figuras 5.2.3.4 e 5.2.3.5 que a maior parte das cores de canetinhas hidrográficas possuem estas cores primárias em sua composição. As canetinhas nas cores rosa, amarela e azul, são as que menos se dissociam. Natural, pois estas é que são as cores básicas para a formação das demais. Percebemos na Figura 5.2.3.4a que a cor preta possui um pouco de cada uma destas três cores. A tinta cinza e a marrom recebem um pouco mais de amarelo.

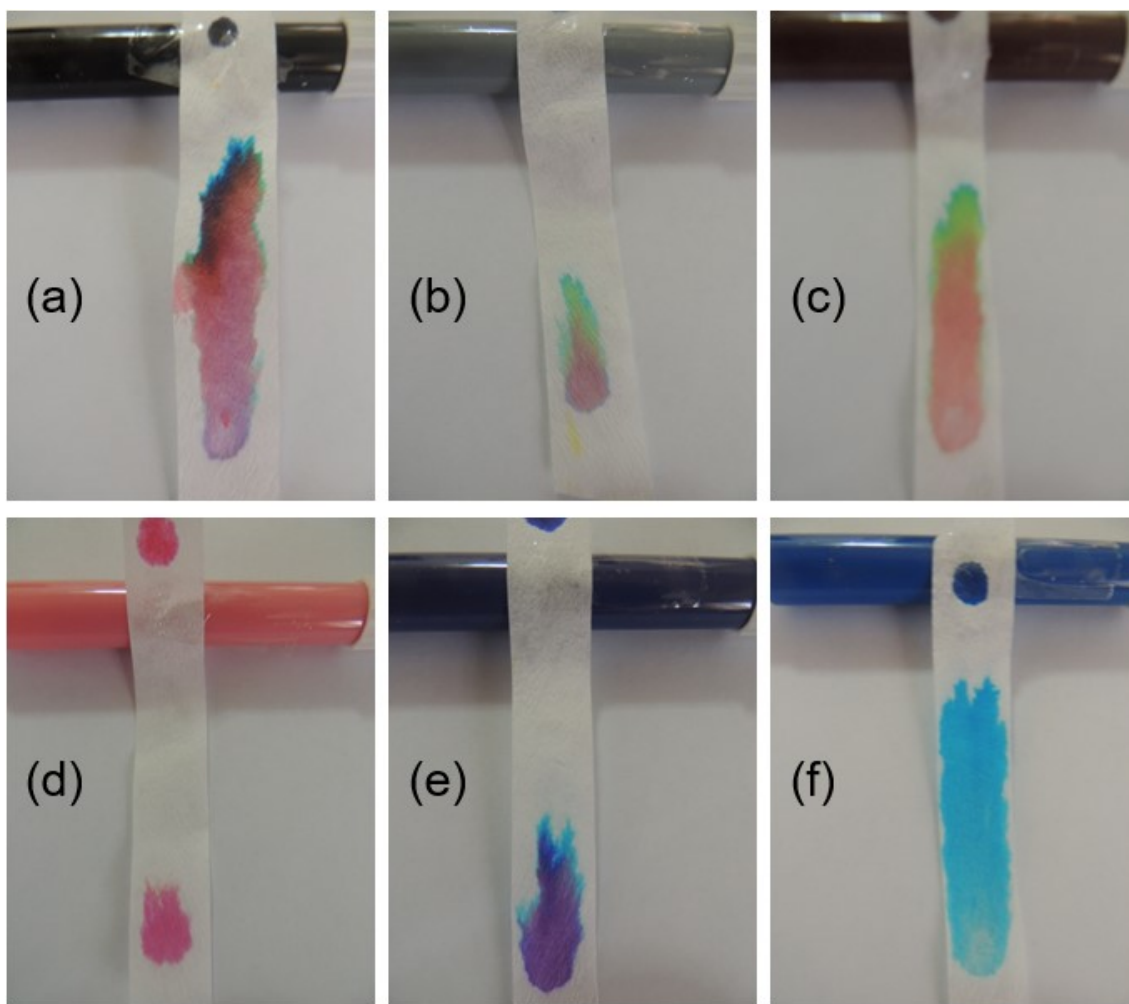


Figura 5.2.3.4 – A cromatografia das cores de canetinha. (a) Preta. (b) Cinza. (c) Marrom. (d) Rosa. (e) Azul marinho. (f) Azul escuro.

No azul claro também percebe-se um pouco de amarelo (Figura 5.2.3.5a). Nos tons de verde encontramos amarelo e azul (Figuras 5.2.3.5b e 5.2.3.5c). No amarelo, por ser cor primária, só há amarelo mesmo (Figura 5.2.3.5d). No laranja percebemos uma quantidade de amarelo e muito rosa na cor vermelha (Figuras 5.2.3.5e e 5.2.3.5f).

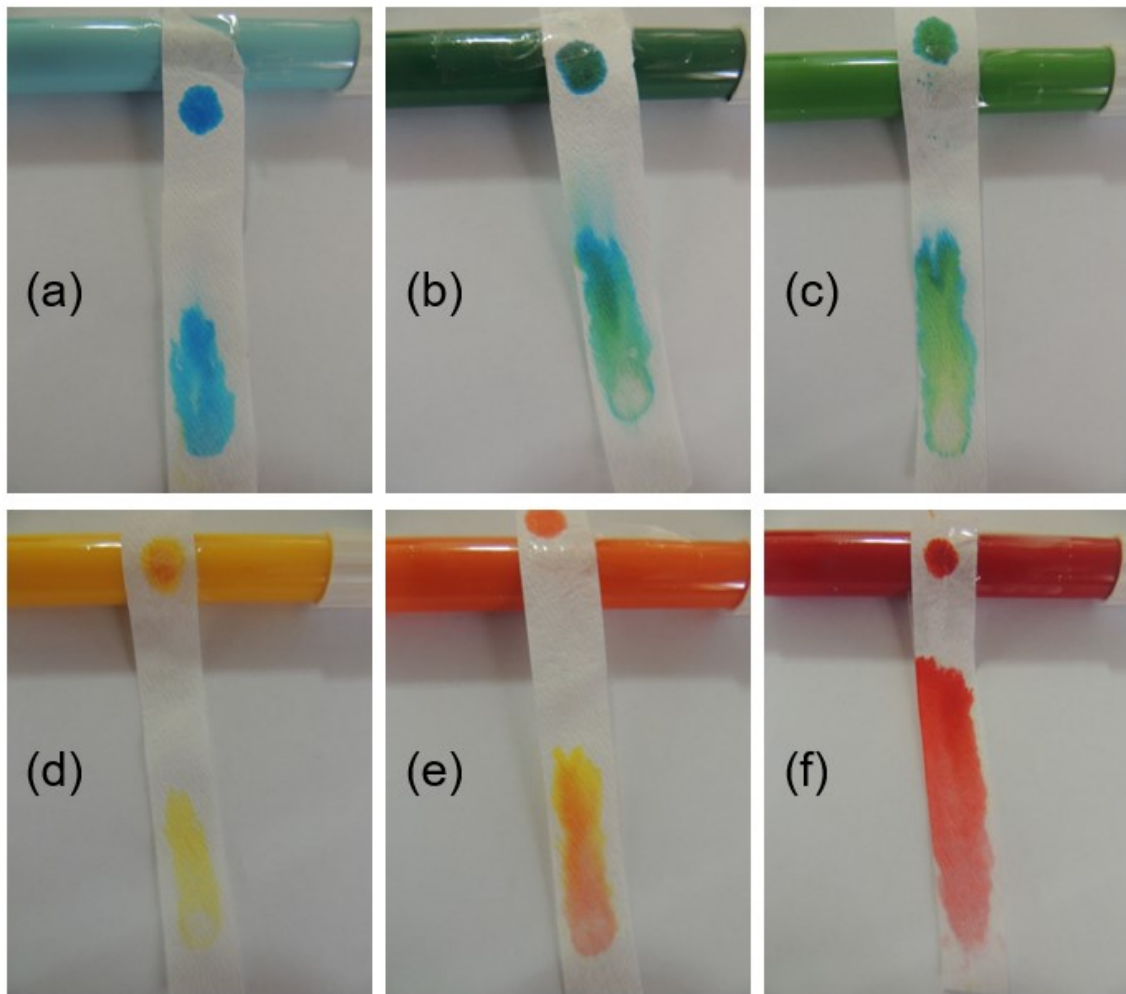


Figura 5.2.3.5 – A cromatografia das cores de canetinha. (a) Azul claro. (b) Verde escuro. (c) Verde claro. (d) Amarelo. (e) Laranja. (f) Vermelho.

Logo, verifica-se que é possível usar esta experiência para confirmar que, através do sistema CMYK, podem ser compostas diversas outras cores. Em um estudo que envolve muitos aspectos da química, além das disciplinas de arte e história, — e da física, é claro — é possível mostrar aos estudantes que há uma comunhão entre todos estes ramos de estudo. Nenhuma ciência se constrói por si só, sem que seja influenciada por outras. Da mesma forma, a arte e a história, tanto influenciam a ciência quanto são influenciadas por ela.

Considerações Finais

A visão constitui um órgão complexo e de extrema importância para conexão com o mundo. A cor é um fenômeno que se configura não só pela interpretação das sutis alternâncias de sensibilização de células deste órgão, como também, pelo desenvolvimento e amadurecimento de suas interpretações do mundo. Em outras palavras a cor existe para nós como uma realidade fisiológica criada pela nossa mente. A mesma mente capaz de interpretar cientificamente a luz através de um modelo de ondas eletromagnéticas propagando-se ao longo do espaço ou de partículas, fótons, como pacotes discretos de energia. Este complexo órgão, que é a visão, permitiu explorar desde o minúsculo mundo antes invisível, com os microscópios, aos mais longínquos lugares do espaço, com os telescópios, que talvez nunca tenhamos a possibilidade de chegar.

As abordagens desenvolvidas neste trabalho, com experimentos de custo reduzido e relativamente simples de serem construídos, constitui alternativas para o ensino do fenômeno da cor através de atividades que não necessitam de um laboratório na escola para serem implementadas. Muitas atividades podem ser desenvolvidas com os estudantes, algumas das quais, com sua participação ativa durante a construção.

Os experimentos e as abordagens didáticas sugeridas direcionam o ensino do fenômeno cor através de uma construção histórico-social, levando em conta a relevância das expressões artísticas como instrumento igualmente importante para o desenvolvimento tecnológico da sociedade contemporânea. Além disso, permitem uma abordagem multidisciplinar que alcança várias outras áreas do conhecimento humano, necessários para a o desenvolvimento de uma sociedade mais solidária e atuante. Para que o jovem não se apresente como espectador diante do mundo tecnológico, complexo e em transformação, e que além de compreendê-lo, participe de forma atuante em sua construção.

Da mesma forma que pelo tato reconhecemos o áspero e o liso, o quente e o frio, sendo a visão um dos órgãos dos sentidos, através dela percebemos diversas sensações. Entre elas o perto e o distante, o movimento e a inércia o claro e o escuro. Em ambientes bem iluminados surge a sensação da cor. Iniciamos o estudo da cor, partindo da percepção do espectro luminoso, estudando a dispersão da luz branca em um prisma e, em seguida, através de uma gota d'água. Dessa forma pode ser apresentada ao estudante, através de um belíssimo fenômeno da natureza, a composição espectral da luz branca, como a do

sol. **O Arco-íris em Uma Gota D'água** é um experimento simples, mas que permite explorar as grandezas relacionadas a luz utilizando-se apenas a óptica geométrica.

Dando continuidade ao estudo sobre a percepção do espectro, desenvolvemos duas experiências que associam o estudo da luz como faixa do espectro eletromagnético visível ao estudo do som, faixa do espectro audível. **Analogias Entre o Som e a Luz** permite uma interação do aluno através de duas experiências que demonstram nossas limitações visuais e auditivas, abrindo um leque para discussão sobre deficiências.

Dedicamos um capítulo à composição das cores através das sínteses aditiva e subtrativa. **O Ensino da Visão Cromática Através de Aparato com LEDs Coloridos**, permite demonstrar que a cor é uma sensação provocada inicialmente pela sensibilização dos três tipos de cones (sensíveis ao vermelho, verde e azul). Quando as cores constituintes do LED RGB têm suas intensidades luminosas variadas, podem-se constituir diversas outras cores, inclusive o branco. É possível também ser feita uma análise espectral de uma cor previamente formada e descobrir o quanto de luz vermelha, verde e azul ela possui.

Explorando outra característica da visão, a remanência visual, fenômeno responsável pela sétima arte, usamos novamente os LEDs para produzir uma nova versão do disco de Newton. **O Disco de Newton Com LEDs** permite produzir, além do branco, o amarelo, ciano e magenta, usando a síntese aditiva. Isto difere do disco de Newton original, que faz uso da síntese subtrativa de cores, não produzindo, por isso, a cor branca de fato.

O Pontilhismo, Física e Arte trata a evolução dos conceitos físicos através de uma abordagem histórica e cultural, no qual a arte e a ciência são construídas através de uma colaboração mútua. A construção da sensação de uma nova cor de tinta, utilizando-se a síntese aditiva e não subtrativa, como era feita até então, permite a compreensão de como são formadas as cores nos modernos televisores. Isso pode ser verificado através de fotos ampliadas dos pixels de um televisor de LED.

Para abordar a síntese subtrativa, desenvolvemos três experimentos. O primeiro deles, **Pêndulos Ressonantes**, usa a analogia para relacionar o fenômeno da interação da luz com a matéria, com a ressonância entre dois pêndulos conectados permitindo uma transposição entre os dois fenômenos de forma mais acessível a estudantes do Ensino Médio. Permite também o estudo do comportamento ondulatório, comum aos pêndulos e às ondas, como a frequência e o período.

Na **Sombras Coloridas de Luzes**, o experimento produzido pode servir tanto para estudar a síntese subtrativa quanto aditiva de luzes. Os três cartões podem ser manipulados pelos estudantes para que possam compor as sínteses utilizando-se de forma alternativa das luzes vermelha, verde e azul. Produzindo e conjugando sombras é possível obter o amarelo, ciano, magenta, branco e preto. Além de se recombinar as três primeiras cores para se recompor as cores das luzes originais: vermelho, verde e azul.

A **Cromatografia em Papel** permite analisar a composição de uma cor de caneta hidrográfica, utilizando-se de conceitos relacionados a fenômenos químicos. Desta forma os estudantes podem perceber que para produzir a sensação de uma determinada cor de tinta é necessário retirar certas cores do espectro da luz branca, que não deverão ser espalhados por esta tinta, e sim absorvidos, ou seja, o fenômeno definido como síntese subtrativa.

Por fim, O **Olho Cibernético** é um experimento que tenta reproduzir a visão cromática humana. É inegável sua capacidade de discernir cores, entretanto, produzindo resultados diferentes da visão padrão do ser humano. O aparente insucesso do experimento, permite a abordagem em sala de aula de uma deficiência denominada discromatopsia. Essa anomalia genética pode ser introduzida a partir deste experimento para que os estudantes possam compreender ou até se identificar como portadores de dificuldades em discriminar cores. Essa discussão permite um esclarecimento sobre os problemas que o jovem portador dessa anomalia pode enfrentar para concorrer a determinadas vagas de emprego ou até para conseguir uma habilitação para dirigir um automóvel. Uma maior conscientização sobre essa anomalia tende a fazer com que as leis sejam revistas para que seus portadores tenham os mesmos direitos a acesso, como acontece com outras deficiências. Por se tratar de um problema genético, permite também a interdisciplinaridade com a biologia.

Diversos outros projetos foram pensados nessa linha de ensino. No caso do olho cibernético planejou-se o uso da placa Arduino para se obter um sistema capaz de ler as informações do LED RGB e traduzi-las em uma tela na forma de uma “cor” lida. Esse projeto requer um pouco de eletrônica para amplificar adequadamente os sinais dos LEDs e um programa mais elaborado de aquisição e interpretação dos resultados lidos.

Há planos em tornar a experiência do **Arco-íris em uma gota d’água** um kit montado, e previamente calibrado, para que possa facilitar sua implementação em sala de

Considerações Finais

aula. Trata-se de uma montagem com relativa dificuldade de construção e que necessita de um ambiente com luminosidade reduzida.

Planejamos explorar a diferença de tempo de percepção entre os diferentes cones através da visualização de um pêndulo oscilante. Essa diferença produz uma sensação de que o movimento originalmente bidimensional, estaria ocorrendo em três dimensões. Outro fenômeno que merece um aprofundamento é a aparência de “cores” em um disco de rotação preto e branco. Esses experimentos já foram desenvolvidos mas necessitam de um aprofundamento teórico para sua implementação.

Percebemos que é necessário aprofundar na compreensão sobre as diferentes percepções da cor, para indivíduos ditos normais. Ou seja, mesmo pessoas que não portam nenhuma das deficiências cromáticas na visão, ainda assim, divergem sobre a interpretação de determinadas cores.

Alguns efeitos de “ilusão de óptica” permitem explorar ainda mais o estudo da visão. Logo, planejamos também aprofundar o estudo sobre fenômenos que ocorrem quando imagens coloridas estáticas parecem se movimentar diante de nossa observação. Há ainda o chamado Efeito McCollough, que recebe este nome graças a neurocientista Celeste McCollough, que o descobriu em 1965. O efeito é produzido através da alternância na visualização de listras horizontais vermelhas e verticais verdes, durante um certo tempo. Em seguida, ao se visualizar outras listras nas mesmas orientações, mas em preto e branco, percebe-se surgir cores nestas últimas. O mais intrigante, e que ainda está em estudo, é que este efeito pode permanecer por meses no indivíduo.

Sendo assim, observa-se que ainda há muito a ser explorado com relação à percepção da cor. Por se tratar de um assunto que desperta a curiosidade dos estudantes, e se tratando de um estudo sobre o funcionamento do nosso próprio órgão, entendemos que é necessário ampliar o campo de exploração sobre esses assuntos.

Referências Bibliográficas

- [Acórdão 2007] – Lopes, E. M. S., *Acórdão sobre os direitos dos deficientes à educação*. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/119027659/Acordao-Direito-dos-Deficientes-a-educacao>>. Acesso em maio de 2016.
- [Alice 2010] – Aice, D.; *Geoges Seurat, Histoire des Arts*. Disponível em: <<http://histoire-des-arts.over-blog.com/article-georges-seurat-51048586.html>>. Acesso em junho de 2016.
- [Alves 2008] – Alves, E. G; *Usando um LED como Fonte de Energia*, Física na Escola, v.9, n.1, 2008. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol9/Num1/led.pdf>>. Acesso em junho de 2016.
- [Ard-Sensor 2016] – *Arduino Ultrasonic Distance Sensor: Arduino Sensors*. Disponível em: <<http://arduinosenors.com/index.php/arduino-ultrasonic-distance-sensor/>>. Acesso em junho de 2016.
- [Articedu 2016] – Art Institvti Chicago, Collections, Disponível em: <http://www.artic.edu/aic/collections/artwork/27992?search_no=2&index=2>. Acesso em junho de 2016.
- [Azevedo 2004] – Azevedo, M.C.P.S.; *Ensino por investigação: Problematizando as atividades em sala de aula*, In: Carvalho, A.M.P. (org) Ensino de Ciências, São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.
- [Bachelard 1996] – Bachelard, G.; *A formação do espírito científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento*. Tradução de *La formation de l'esprit scientifique: contribution a une psychanalyse de la connaissance*, Paris/FRA: Librairie Philosophique J. Vrin, 1938 feita por Estela dos Santos Abreu, Rio de Janeiro/BRA: Contraponto, p.48,1996.
- [Barthem 2005] – Barthem, R. B., *A luz*, Temas Atuais de Física, 1ª edição. Sociedade Brasileira de Física. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.
- [Baxandall 1997] – Baxandall, M.; *Sombras e Luzes*, Tradução: Danesi, A. P., São Paulo, SP, Editora da Unibersidade de São Paulo, 1997.
- [Britannica 2016] – *Refraction, Physics*, Encyclopædia Britannica. Disponível em: <<http://global.britannica.com/science/refraction>>. Acesso em maio de 2016.
- [Carvalho 2011] – Carvalho, A. M. P.; Ricardo, E. C.; Sasseron, L. H.; Abib, M. L. V. S.; Pietrocola, M.; Coleção *Ideias e Ação*, Ensino de Física, São Paulo; Cengage Learning, 2011.
- [Cerpo 2016] – *Ponto Cego*, CERPO Oftalmologia. Disponível em: <<http://www.cerpo.com.br/ponto-cego/>>. Acesso em junho de 2016.

Referências Bibliográficas

- [CETTRAN-RS 2010] – CETTRAN-RS, *Resolução 30: Teste De Visão Cromática*, Rio Grande do Sul- Porto Alegre, 2010. Disponível em: <<http://www.cetran.rs.gov.br/?model=conteudo&menu=137&id=303>>. Acesso em maio de 2016.
- [Cheveul 1889] – Cheveul, M. E., *De la Loi du Contraste Simultané des Couleurs*, Librairie Gauthier-Villars et Fils, Paris 1889. Disponível em: <<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k1103235>>. Acesso em junho de 2016
- [Coelho 2006] – Coelho, R. S., *Química orgânica*, Universidade Federal de São João Del Rei, Ouro Branco, MG – Brasil, 2010. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAAwEAE/cromatografia>>. Acesso em julho de 2016.
- [Coelho 2010] – Coelho, R. S., *Química orgânica*, Universidade Federal de São João Del Rei, Ouro Branco, MG – Brasil, 2010. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABHtcAI/introducao-organica>>. Acesso em maio de 2016.
- [Darwin no Brasil 2009] – Darwin no Brasil, *Evolução Humana e Aspectos Socio-Culturais 1809-2009*. Síntese do módulo *Physical Characteristics of Humans* do curso World Civilizations I da Washington State University – UNESP, FCE <<http://www2.assis.unesp.br/darwinnobrasil/humanev3.htm>>. Acesso em maio de 2016.
- [Davidoff 2005] – Davidoff, J.; *Colour Categories as Cultural Constructs*, Article presented during the first Neuro-Aesthetics conference organized at Goldsmiths University, London UK, 2005. Disponível em: <<http://www.artbrain.org/colour-categories-as-cultural-constructs/>>. Acesso em junho de 2016.
- [Demarzo 2011] – Demarzo, M. M. P.; *Reorganização dos sistemas de saúde e Atenção Primária à Saúde*, Department of Preventive Medicine - Escola Paulista de Medicina - UNIFESP/UNASUS, São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.unasus.unifesp.br/biblioteca_virtual/pab/1/unidades_conteudos/unidade02/unidade02.pdf>. Acesso em maio de 2016.
- [DETRAN-RJ 1999] – DETRAN-RJ, *Estabelecimento de normas para o Credenciamento de Clínicas de Medicina de Tráfego e Psicologia do Trânsito*, Portarias do DETRAN-RJ, 1999. Disponível em: <http://www.detrان.rj.gov.br/_documento.asp?cod=1311>. Acesso em maio de 2016.
- [Diniz 2016] – Diniz, F. B.; *As Belezas do Céu, Ótica Atmosférica*. Disponível em: <<http://www.astrosurf.com/skyscapes/optica/arco1.htm>>. Acesso em maio de 2016.
- [Diosdado 2014] – Diosdado, R.; *Sensor de ultrasonidos HC-SR04*, Zona Maker, 2014. Disponível em: <<http://www.zonamaker.com/arduino/modulos-sensores-y-shields/ultrasonido-hc-sr04>>. Acesso em junho de 2016.
- [Duarte 2005] – Duarte, M. C.; *Analogias na Educação em Ciências, Contributos e Desafios*, Revista Investigações em Ensino de Ciências v. 10, n. 1, p.7-29, 2005. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID121/v10_n1_a2005.pdf>. Acesso em maio de 2016.

- [Enchroma 2016] – *Enchroma - Color for the color blind*. Disponível em: <<http://enchroma.com/>>. Acesso em maio de 2016.
- [Feitosa 2006] – Feitosa, S. C.; Oiwa, N. N.; Costa, M. F.; Tiedemann, K. B.; Silveira, L. C. L.; Ventura, D. F., *Espaço de Cores*. Artigo originado da dissertação de mestrado da primeira autora defendida no Instituto de Psicologia – USP, 2006. Disponível em: <http://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-51772006000400003>. Acesso em maio de 2016.
- [Feynman 2008] – Feynman, R. P.; Leighton, R. B.; Sands, M.; *Lições de física de Feynman*, tradução: da Silva, A. V. R. et al, v.III, Porto Alegre: Bookman, 2008.
- [Francisco 2014] – Francisco, P.; *Qual a velocidade do som?* Site Curiosidades, 2014. Disponível em: <<http://www.sitecuriosidades.com/qual-a-velocidade-do-som/>>. Acesso em junho de 2016.
- [Glynn 1994] – Glynn, S.M.; Law, M.; Gibson, N. M.; Hawkins, C. H.; *Teaching Science with Analogies: A Resource for Teachers and Textbook Authors*. Instructional Resource No. 7, National Reading Research Center, Washington, 1994. Disponível em: <<http://files.eric.ed.gov/fulltext/ED378554.pdf>>. Acesso em junho de 2016.
- [Gomes 2008] – Gomes, A. D. T. e Borges, A. T.; *Processos e Conhecimentos Envolvidos na Realização de Atividades Práticas: Revisão da Literatura e Implicações para a Pesquisa*, Investigações em Ensino de Ciências V13(2), 187-207, 2008. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID194/v13_n2_a2008.pdf>. Acesso em junho de 2016.
- [Goris, 2011] – Goris, R. C.; *Infrared organs of snakes: an integral part of vision*. Journal of Herpetology, v.45, bn.1, p.2-14, 2011, Disponível em: <<http://www.bioone.org/doi/abs/10.1670/10-238.1>>. Acesso em junho de 2016.
- [Halliday 2012] – Halliday, D.; Resnick, R.; Walker, J.; tradução e revisão técnica Biasi, R. S.; *Fundamentos da Física, Óptica e física moderna*, v.4, Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- [Hecht 1991] – Hecht, E.; *Óptica*, Tradução do original inglês intitulado *Óptics*. Fundação Calouste Gulbenkian, Av. de Berna, Lisboa, 1991.
- [Hempel 2014] – Hempel de Ibarra N.; Vorobyev M. e Menzel R.; *Mechanisms, functions and ecology of colour vision in the honeybee*, J Comp Physiol A Neuroethol Sens Neural Behav Physiol. 200(6), p.411–433, 2014. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4035557/>>. Acesso em junho de 2016.
- [Hodson 1992] – Hodson, D.; *In search of a meaningful relationship: an exploration of some issues relating to integration in science and science education*, International Journal of Science Education, v.14, n.5, 541-562, 1992.
- [HP 2014] – HP Technology at Work, *As inovações que revolucionaram a impressão*. Disponível em: <http://www8.hp.com/h30458/br/ptb/smb/As-inova%C3%A7%C3%B5es-que-revolucionaram-a-impress%C3%A3o_1411212.html>. Acesso em maio de 2016.

Referências Bibliográficas

- [Jacobs 2008] – Jacobs, G. H.; *Primate color vision: A comparative perspective*, Visual Neuroscience, 25, 619–633, 2008. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/23451064_Primate_color_vision_A_comparative_perspective>. Acesso em junho de 2016.
- [Jameson 2001] – Jameson, K. A.; Highnote S. M.; Wasserman L. M.; *Richer color experience in observers with multiple photopigment opsin genes*. Psychonomic Bulletin & Review. 2001. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.3758%2FBF03196159>>. Acesso em junho de 2016.
- [Jordan 2015] – Jordan, W.; *Why is blue the world's favorite color?*, Disponível em: <<https://today.yougov.com/news/2015/05/12/why-blue-worlds-favorite-color/>>. Acesso em junho de 2016.
- [Junior 2015] – Junior, B. D.; *Qual é a cor do vestido?*; Ciência e Saúde; UOL notícias; 2015. Disponível em: <<http://fisicanaveia.blogosfera.uol.com.br/2015/02/>>. Acesso em junho de 2016.
- [Keats 1884] – Keats, J.; The Poetical Works of John Keats, 37. *Lamia Parte II*, Hospedado por Bartleby, 1884. Disponível em: <<http://www.bartleby.com/126/37.html>>. Acesso em junho de 2016.
- [Kítor 2009] – Kítor, G. L.; *Lei de indução de Michael Faraday*. Publicado no site InfoEscola, 2009. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/fisica/lei-de-inducao-de-michael-faraday/>>. Acesso em maio de 2016.
- [Kítor 2010] – Kítor, G. L.; *Lei de Ampère*, Publicado no site InfoEscola, 2010. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/fisica/lei-de-ampere/>>. Acesso em maio de 2016.
- [König 1886] – König, A. e Dieterici, C.; *Fundamental sensations and their intensity distribution in the spectrum*. Traduzido de *Die Grundempfindungen und ihre Intensitäts-Vertheilung im Spectrum*, Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften, p.805-829, Berlim 29 de julho 1886. Disponível em: <<http://www.iscc.org/pdf/KonigTranslation.pdf>>. Acesso em maio de 2016.
- [Köning 1894] – König, A.; *Ueber den menschlichen Sehpurpur und seine Bedeutung für das Sehen*, Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Berlin, p.577-598, 21 de junho 1894.
- [Lei358 1982] – Trotta, D.; *exame de acuidade visual obrigatório nos alunos das escolas municipais do Rio de Janeiro*, Constituição Estadual, Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <<http://mail.camara.rj.gov.br/APL/Legislativos/contlei.nsf/e9589b9aabd9cac8032564fe0065abb4/48f258041de64d0f032576ac00738c59?OpenDocument&ExpandSection=-1>>. Acesso em maio de 2016.
- [Loreto 2008] – Loreto, E. L. S.; *Simulação Da Visão Das Cores: Decodificando A Transdução Quântica-Elétrica*, Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 25, n. 2, p. 266-286, 2008. Disponível em: < <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2008v25n2p266>>. Acesso em maio de 2016.

- [Mancuso 2009] – Mancuso, K. et al; *Gene therapy for red–green colour blindness in adult primates*. Nature 461, p.784-787, 2009. Disponível em: < <http://www.nature.com/nature/journal/v461/n7265/full/nature08401.html>>. Acesso em maio de 2016.
- [Marques 2016] – Marques, G. C.; Ueta, N., *Fenômenos naturais associados à refração, e-Física*, Centro de ensino e pesquisa aplicada, 2007. Disponível em: <<http://efisica.if.usp.br/optica/basico/prisma/exemplos/>>. Acesso em maio de 2016.
- [Maxwell 1865] – Maxwell, J. C.; *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, Phil. Trans. R. Soc. Lond. 155, p.459-512, 1865. Disponível em: <<http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/155/459.full.pdf+html>>. Acesso em maio de 2016.
- [Metmuseum 2016] – *Georges Seurat*, MET, 2016. Disponível em: <<http://www.metmuseum.org/art/collection/search/437654>>. Acesso em junho de 2016.
- [Micha 2011] Micha1, D. N. et al, *Enxergando no escuro: a física do invisível*. Física na Escola, v. 12, n. 2, 2011. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol12/Num2/a06.pdf>>. Acesso em junho de 2016.
- [Milton 1667] – Milton, J.; *Paradise Lost*, [1667]. Hospedado por Dartmouth. Disponível em:<http://www.dartmouth.edu/~milton/reading_room/pl/book_1/text.shtml>. Acesso em julho de 2016.
- [Monsef 2010] – Monsef, D. A.; *The most powerful Colors in the world*, Colourlovers, Disponível em: <<http://www.colourlovers.com/blog/2010/09/15/the-most-powerful-colors-in-the-world>>. Acesso em junho de 2016.
- [Moreira 2002] – Moreira, I. C.; *Poesia na aula de ciências?*, Física na Escola, v.3, n.1, 2002. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol3/Num1/a07.pdf>>. Acesso em junho de 2016.
- [Mueller 1968] – Mueller, C. G; Rudolph, M.; *Luz e Visão*, Biblioteca Científica Life, Livraria José Olympio Editora, Rio de Janeiro, 1968.
- [Nishida 2007] – Nishida, S. M.; de Oliveira, F. A. K. e Troll, J.; *Como vemos o mundo? A formação da imagem*. Como funciona o corpo humano? Museu Escola do IB – UNESP. Disponível em: <http://www2.ibb.unesp.br/Museu_Escola/2_qualidade_vida_humana/Museu2_qualidade_corpo_sensorial_visao1.htm>. Acesso em junho de 2016.
- [Open Library Da Vinci 2012] – Da Vinci, Leonardo, *Trattato della pittura*, Diversas edições em diferentes Traduções. Disponível em: <https://openlibrary.org/works/OL695359W/Trattato_della_pittura>. Acesso em maio de 2016.

Referências Bibliográficas

[Open Library Hertz 2010] – Hertz, H. R.; *Electric Waves being researches on the propagation of electric action with finite velocity through space. Tradução autorizada para o inglês por D.E. Jones com prefácio de Lord Kelvin. Publicado em 1893 por Macmillan and Co. in London and New York, Open Library, 2010. Disponível em: <https://openlibrary.org/books/OL16320454M/Electric_waves>. Acesso em maio de 2016.*

[Open Libray Chevreul 2010] – Chevreul, M. E.; *De la Loi du Contraste Simultané des Couleurs. Publicado em 1839 por Pitois-Levrault et C^e. em Paris. Disponível em: <https://openlibrary.org/works/OL11679052W/De_la_loi_du_contraste_simultan%C3%A9_des_couleurs>. Acesso em maio de 2016.*

[OpenLibrary Alberti 2010] – Aberti L. B. Edição reunindo as obras *Della Pittura e Della Statua*, Dala Società Tipografica de'Classici Italiani, Milano, 1804. Disponível em:<https://openlibrary.org/works/OL1417263W/Della_pittura_e_della_statua_di_Leon_batista_Alberti>. Acesso em maio de 2016.

[Ottino 2003] – Ottino, J. M.; *Pictures in perspective: Galileo's sketches of the Moon are more than mere illustrations — they convey relevant scientific information*, Nature, 2003. Disponível em:

<http://www.nature.com/nature/journal/v421/n6922/fig_tab/421474a_F1.html>. Acesso em junho de 2016.

[Palacios 2003] – Palacios, E. M. G.; von Linsingen I. (Ed.); Galbarte, J. C. G; Cerezo, J. A. L.; Luján, J. L.; Pereira, L. T. V. (Ed.); Gordillo, M. M., Osorio, C.; Valdés, C.; Bazzo, W. A.(Ed.), *Introdução aos Estudos CTS (Ciência, Tecnologia e Sociedade)*, Organização de Estados Ibero-Americanos, para a Educação, a Ciência e a Cultura (OEI), 2003. Disponível em: <http://www.oei.es/salactsi/Livro_CTS_OEI.pdf>. Acesso em junho de 2016.

[PCN+ 1999] – PCN+ - Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCNEM), *Ciências da Natureza, Matemáticas e suas Tecnologias*, 1999. Ministério da Educação. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/busca-geral/195-secretarias-112877938/seb-educacao-basica-2007048997/12598-publicacoes-sp-265002211>>.

Texto: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>>. Acesso em maio de 2016.

[Pedroso 2016] – Pedroso, L. S.; *Óptica geométrica*, Slideplayer. Disponível em: <<http://slideplayer.com.br/slide/1271742/>>. Acesso em junho de 2016.

[Pella 1969] – Pella, M. O.; *The Laboratory and Science Teaching*, In: Andersen, H. O.; *Reading in Science Educacion for the Secondary School*, Londres: The Macmillan Company, 1969.

[Pincelli 2011] – Pincelli, R.; *O mistério da cegueira homérica*, Science Blog, Disponível em: <<http://scienceblogs.com.br/hypercubic/2011/08/14/>>. Acesso em junho de 2016.

- [PlanBio 2011] – *Visão*, Planeta Biologia, 2011. Disponível em: <<http://planetaebiologia.blogspot.com.br/2011/05/visao.html>>. Acesso em junho de 2016.
- [ProjLei245 2007] – Cozzolino, J.; *Institui O Programa De Assistência Médica Oftalmológica e Auditiva Para Os Alunos Matriculados Nos Estabelecimentos Públicos De Ensino Fundamental e Médio e Dá Outras Providências*, ALERJ-RJ, 2007. Disponível em: <<http://alerjln1.alerj.rj.gov.br/scpro0711.nsf/0/3f8f4f1a74834532832572a3007631f6?OpenDocument>>. Acesso em maio de 2016.
- [Reis 2006] – Reis, J. C.; Guerra, A.; Braga, M.; *Ciência e arte: relações improváveis?*, História, Ciências, Saúde, - Manguinhos, Rio de Janeiro, RJ, v. 13 (suplemento), p. 71-87, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/hcsm/v13s0/04.pdf>>. Acesso em junho de 2016.
- [Rigolon 2011] – Rigolon, R. G. e Obara, A. T.; *Distinção entre analogia e metáfora para aplicação do modelo “Teaching with analogies” por licenciandos de Biologia*, Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias Vol 10, Nº 3, 481-498, 2011. Disponível em: <http://reec.uvigo.es/volumenes/volumen10/REEC_10_3_5.pdf>. Acesso em junho de 2016.
- [Rodrigues 2008] – Rodrigues, F. V. e Collino, R.; *Fisiologia da Audição*, V Curso de Inverno: Tópicos em Fisiologia Comparativa, Capítulo 1, Departamento de Fisiologia Instituto de Biociências Universidade de São Paulo, 2008, p. 5 – 12. Disponível em: <<http://www.ib.usp.br/cursodeinverno/old/2008/Livro%20CI%202008.pdf>>. Acesso em junho de 2016.
- [Rood 1879] – Rood, O. N.; *Modern Chromatics With Applications to Art and Industry*, Appleton and Company, New York, 1879. Disponível em: <<https://archive.org/details/cu31924031167889>>. Acesso em junho de 2016.
- [Ropero 2011] – Ropero, C., *De que cor é o branco?* Diarinho, Diário da Grande ABC. Disponível em: <<http://www.dgabc.com.br/Noticia/101301/que-cor-e-o-branco->>. Acesso em maio de 2016.
- [Sacks 1995] – Sacks, O., *Um Antropólogo em Marte - Sete histórias paradoxais*, Tradução Carvalho, B.; Companhia das Letras, 1995.
- [Salveti 2008] – Salvetti, A. R.; *A História da Luz*, Editora Livraria da Física, 2ª Ed., ISBN 9788578610029, p.45-46, 13-16,197, 2008.
- [Santana 2016] – Santana, M.A.; *Luz e cor*, Laboratório de Iluminação, UNICAMP, Campinas, SP, 2016. Disponível em: <http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Cor/luz_e_cor_.pdf>. Acesso em junho de 2016.
- [Santos 2000] – Santos, M. F.; *Pitágoras e o Teorema do Número*, Cometa Gráfica e Editora Ltda, São Paulo, 2000.
- [Santos 2011] – Santos, W. L. P. D.; Auler, D.; *CTS e Educação Científica: Desafios, Tendências e Resultados de Pesquisa*, Brasília: Editora UNB, 2011.

Referências Bibliográficas

- [Saraiva 2012] – Saraiva, M. de F. O.; *O conteúdo do universo*, 2012. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/~fatima/ead/universo-atual.htm>>. Acesso em junho de 2016.
- [Science 2016] – Gschmeissner, S.; *Retina rods and cones*, Science Photo Library. Disponível em: <<https://www.sciencephoto.com/media/186019/view>>. Acesso em junho de 2016.
- [Thoemmes 2014] – Thoemmes, M. S.; Fergus D. J.; Urban, J.; Trautwein, M.; Dunn, R. R.; *Ubiquity and Diversity of Human - Associated Demodex Mites*, Sergios-Orestis Kolokotronis, Fordham University, United States of America, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0106265>>. Acesso em junho de 2016.
- [Vantablack 2016] - Surrey nanosystems, Newhaven, BN9 ODQ, UK, 2016. Disponível em: <<https://www.surreynanosystems.com/vantablack>>. Acesso em junho de 2016.
- [Verne 2005] – Verne, J.; *Viagem ao Redor da Lua*, Editora Hemus [2005] ISBN-13: 9788528901887, ISBN-10: 8528901882, Tradução do Original “Autour de la Lune” de Jules Verne ,1870. Disponível em: <<http://www.gutenberg.org/files/46111/46111-h/46111-h.htm#note>>. Acesso em junho de 2016.
- [Vidi-Himba 2013] – Vidipedia: *Himba Colour Experiment*, BBC- “Imagem capturada do vídeo”. Disponível em: <http://www.vidipedia.org/index.php?option=com_hwdmediashare&view=mediaitem&id=166413:himba-colour-experiment&Itemid=180&category_id=820>. Acesso em junho de 2016.
- [Visão 2016] – *Visão*, Biologia, Corpo humano. Disponível em: <http://www.resumosetrabalhos.com.br/sentidos_2.html>. Acesso em junho de 2016.
- [Visolve 2013] – *Visolve - The assistive software for people with color blindness*, Ryobi System Solutions, 2013. Disponível em: <<https://www.ryobi-sol.co.jp/visolve/en/>>. Acesso em maio de 2016.
- [Werner 2007] – Werner, J. S.; Pinna B.; Spillmann L. *Cores Ilusórias e o Cérebro*, Scientific American Brasil, São Paulo, a. 5, n. 59, p.84-89, 2007.
- [Wiki-Crateras 2016] – *Wikipédia: Crateras Lunares*. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Crateras_lunares>. Acesso em junho de 2016.
- [Wiki-CYMK 2016] – *Wikipédia: CYMK*. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/CMYK>>. Acesso em maio de 2016.
- [Wiki-Dalto 2016] – *Wikipédia: Daltonismo*. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Daltonismo>>. Acesso em maio de 2016.
- [Wiki-Espectro 2016] – *Wikipédia: Ensino da visão*. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro_vis%C3%ADvel>. Acesso em junho de 2016.
- [Wiki-Gnômon 2016] – *Wikipédia: Gnômon*, Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Gn%C3%B4mon>>. Acesso em junho de 2016.

- [Wikime-Rainb 2016] – *Wikimedia Commons: Rainbow*. Disponível em: <<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rainbow1.svg>>. Acesso em maio de 2016.
- [Wiki-Pigmento 2016] – *Wikipédia: Pigmento*. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Pigmento>>. Acesso em maio de 2016.
- [Wiki-Relógio 2016] – *Wikipédia: Relógio de sol*, Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Rel%C3%B3gio_de_sol>. Acesso em junho de 2016.
- [Wiki-TesIsh 2016] – *Wikipédia: Teste de cores de Ishihara*. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Teste_de_cores_de_Ishihara>. Acesso em maio de 2016.
- [Wiki-Trattato 2016] – *Wikipédia: Trattato della Pittura*. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Trattato_della_Pittura>. Acesso em junho de 2016.
- [Willis 2005] – Willis, J.; Willis B.; *Armageddon Now: The End of The World A to Z*, Visible Ink, ISBN 0780809238, 9780780809239. Press, 2005.
- [Xie 2014] – Xie, J. Z. et al; *Color Vision Deficiency in Preschool Children-The Multi-Ethnic Pediatric Eye Disease Study*, American Academy of Ophthalmology, v.121, I. 7, p. 1469-1474, 2014. Disponível em: <[http://www.aajournal.org/article/S0161-6420\(14\)00049-9/pdf](http://www.aajournal.org/article/S0161-6420(14)00049-9/pdf)>. Acesso em maio de 2016.
- [Zanetic 2002] – Zanetic, J.; *Física e Arte: Uma ponte entre duas culturas*. Atas do VIII Encontro de Pesquisa em Ensino de Física, SBF, São Paulo, 2002. Disponível em: <http://www.cienciamao.usp.br/dados/epenf/_fisicaearteumaponteentre.trabalho.pdf>. Acesso em junho de 2016.
- [Zimmer 2012] – Zimmer, C.; *Monet's Ultraviolet Eye*, Download The Universe, The Science ebook Review, 2012. Disponível em: <<http://www.downloadtheuniverse.com/dtu/2012/04/monets-ultraviolet-eye.html>>. Acesso em junho de 2016.

Anexo

Equipamentos e Procedimentos Utilizados no Laboratório de Óptica dos Sólidos

Para analisar a distribuição espectral do LED RGB, tanto de seu espectro de emissão quanto de absorção, foram usados os equipamentos que serão descritos a seguir.

No coração da montagem experimental está o espectrômetro óptico da *McPherson*, model 2061, e que é descrito na Figura A1.

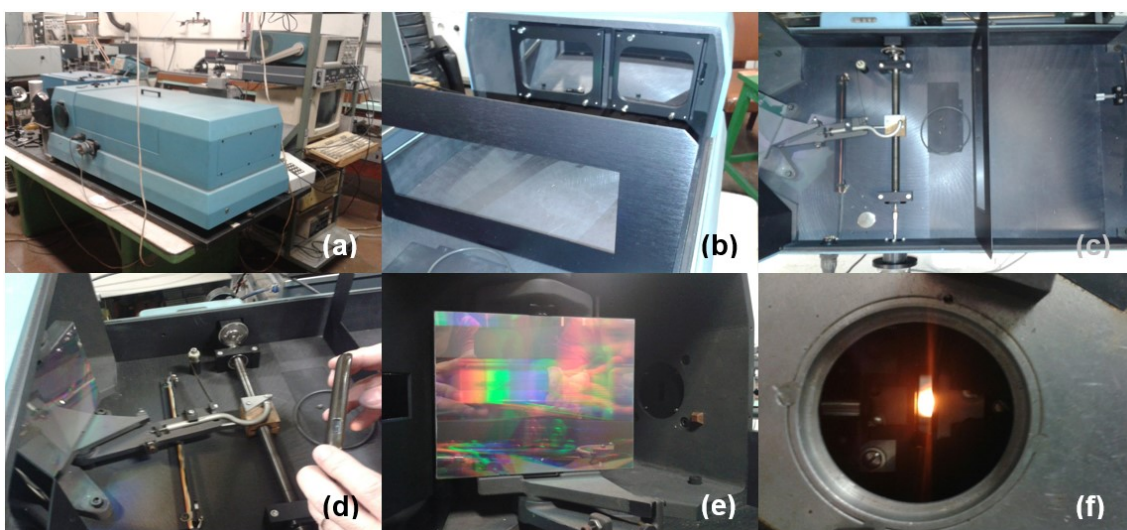


Figura A1 – Espectrômetro McPherson 2061. (a) Visão externa do espectrômetro em cima da bancada. (b), (c), (d), (e) As quatro fotos mostram o interior do espectrômetro. Em (b) vemos os dois espelhos côncavos e, em (c), temos uma visão superior do equipamento. Em (d) e (e) observamos a rede de difração de diferentes ângulos. (f) Observamos uma luz saindo do espectrômetro. Essa é a luz que é detectada e analisada.

Para a observação do espectro de emissão dos LEDs foi montado o experimento descrito na Figura A2. A luz emitida pelo LED é focalizada pela lente sobre a entrada do espectrômetro. Essa luz é modulada pelo Modulador da *PARTM, Variable Speed Chopper* modelo 191, de forma a ser detectada e analisada de forma sincrônica através do Osciloscópio Digital da *Tektronix*, modelo 320. A luz, ter seu comprimento de onda discriminado pelo espectrômetro, é detectada pela fotomultiplicadora da *RCA Eletronic Components*, modelo C31034, alimentada por uma fonte de alta-tensão 412B FLUKE. O sinal elétrico é analisado através do Osciloscópio Digital que o processa integrando e fazendo uma média temporal. O resultado é encaminhado de forma digital para um computador (PC) que também controla o comprimento de onda a ser analisado pelo

espectrômetro através do Controle do Espectrômetro da *McPherson, 788 Stepper System*. Essa montagem permite uma leitura automatizada do espectro de emissão dos LEDs.

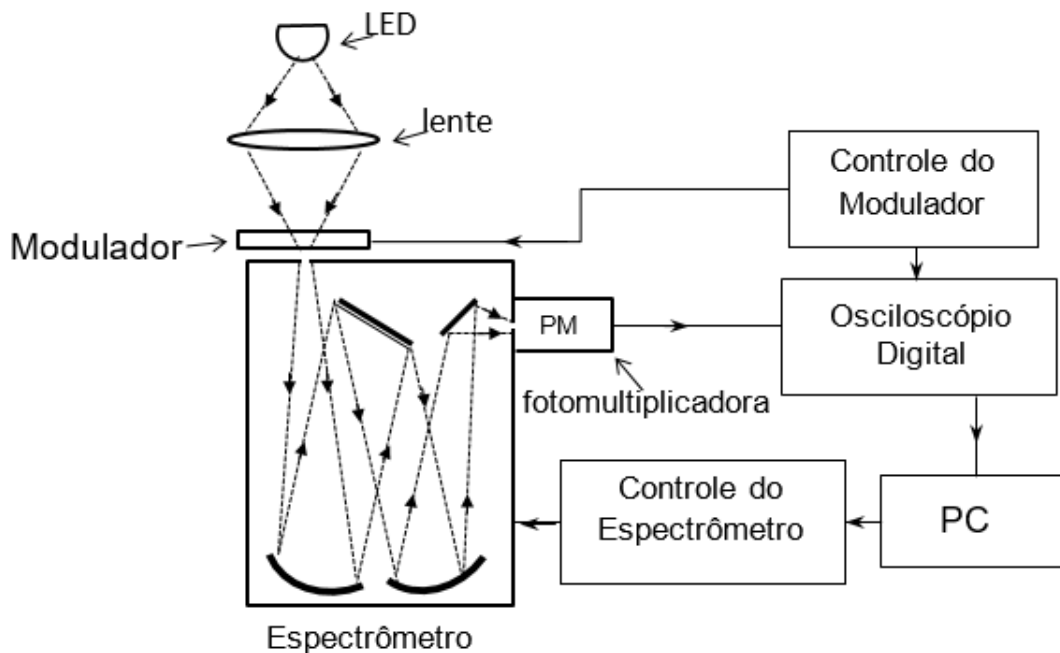


Figura A2 – Diagrama da montagem experimental para observação dos espectros de emissão dos LEDs.

Em um segundo momento foi utilizada uma lâmpada halógena, no lugar do LED RGB, como fonte de luz e, no lugar da fotomultiplicadora, foi colocado o LED RGB para se observar as respostas espectrais dos três LEDs RGB. A montagem feita está esquematizada na Figura A3.

As curvas obtidas, tanto as de emissão de cada um dos LEDs RGB, quanto às de absorção, foram normalizadas pelas respostas espectrais do sistema e são apresentadas na seção **4.2 Olho Cibernético**, onde são analisadas e discutidas, em termos de viabilidade, para a construção experimento sobre a percepção cromática do olho humano.

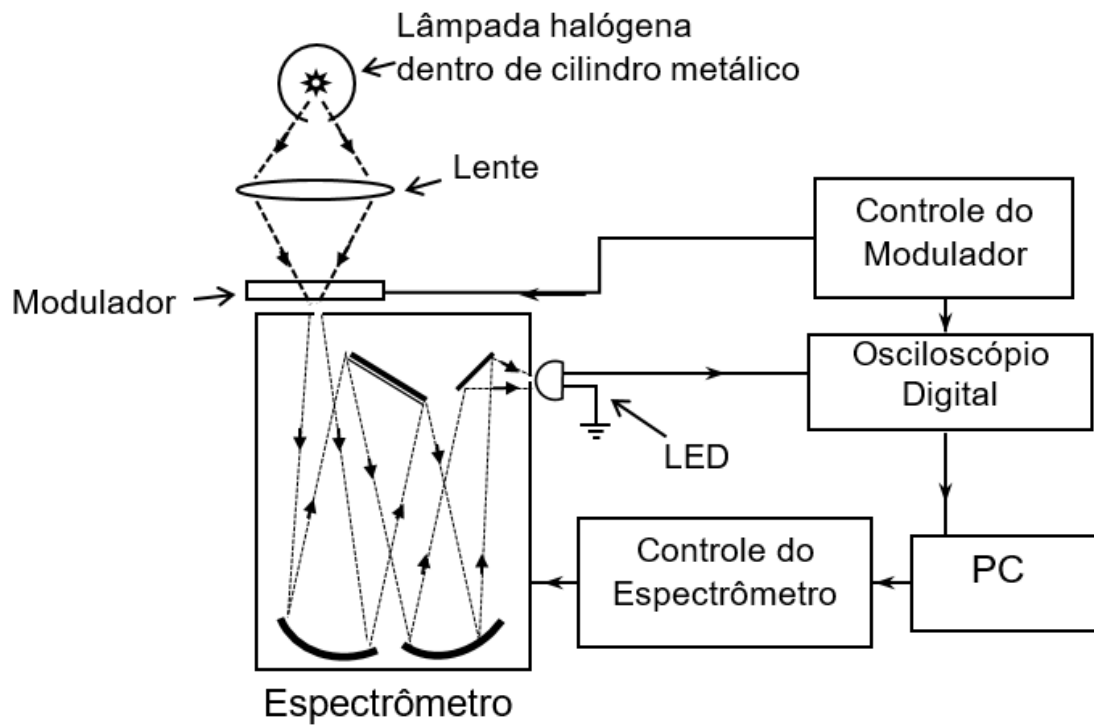


Figura A3 – Diagrama da montagem empregada no levantamento das curvas das respostas espectrais dos três LEDs RGB.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

Ensino da visão cromática através de aparato com LED's coloridos

Márcio Velloso da Silveira
&
Ricardo Borges Barthem

Material instrucional associado à
dissertação de mestrado de Márcio Velloso
da Silveira, apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Ensino de Física da
Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
Julho de 2016

Ensino da visão cromática através de aparato com LED's coloridos

Márcio Velloso da Silveira
&
Ricardo Borges Barthem

1 Introdução

O processo de composição das cores em aparelhos televisores, seja nos antigos tubos de raios catódicos ou nos modernos televisores de LED (da sigla em inglês para Light Emission Device que significa Dispositivo Emissor de Luz), utiliza a síntese aditiva de luzes nas cores vermelha, verde e azul [1,2], de acordo com a teoria tricromática de Young-Helmholtz [3]. Para Thomas Young (1773-1829) nossa retina seria composta de células receptoras capazes de se sensibilizarem com luzes nas cores vermelha, verde e violeta. Muitos anos mais tarde, Helmholtz (1821-1894) sugeriu a substituição da cor violeta pela azul, definindo assim a forma com que, a partir dessas três cores (Red, Green e Blue, em inglês ou RGB), poderíamos compor qualquer outra nova cor do espectro visível pelo olho humano [4]. Apesar dos estudos de Young datarem do século XVIII, somente em 1964 sua tese foi comprovada experimentalmente por duas equipes de pesquisadores independentes [5,6].

A relevância de se compreender as novas tecnologias, que já estão incorporadas em nosso dia a dia, deriva da necessidade de formação de um cidadão contemporâneo, atuante e solidário, com instrumentos para intervir e participar na realidade, como apontam as Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais [7]. É importante compreender também o desenvolvimento histórico antecessor a essas novas tecnologias, tanto quanto a influência que essas impõem a outros aspectos culturais como a arte fotográfica e cinematográfica, por exemplo. Outrossim, reafirmando a necessidade de se formar um cidadão crítico capaz de compreender a física a partir de sua contextualização histórica e social, o estudo da Óptica é rico em significado. A visão é um dos órgãos dos sentidos mais importantes para o ser humano, mas os fenômenos físicos aos quais ela remete tem perdido espaço nos currículos atuais para outros campos da Física.

Além da Física, a Biologia pode complementar o tema, analisando os aspectos fisiológicos da visão. É, portanto, uma forma de se introduzir na Biologia o estudo da estrutura do olho humano, chegando aos cones, que são as células responsáveis pela visão cromática.

O desenvolvimento dos LED's de alta potência e do LED azul, no início dos anos 1990 [8, 9], permitiu o desenvolvimento da luz branca de estado sólido (SSL). Com uma altíssima eficiência de conversão eletro-óptica ganhou rapidamente os mercados, substituindo gradativamente as lâmpadas incandescentes e fluorescentes. Apresentando uma maior durabilidade e baixo aquecimento foi logo incorporado aos dispositivos de imagem eletrônicos. Os criadores do LED azul foram agraciados com o Prêmio Nobel de Física em 2014 [10, 11].

A luz branca emitida pelo Sol pode servir de base para compreender que, de fato, quando vemos o branco, estamos estimulando igualmente os cones sensíveis às luzes vermelha, verde e azul. Com a ajuda de um prisma, como observou Isaac Newton [12], podemos verificar que a cor branca do sol é na verdade a superposição de luzes (ondas eletromagnéticas) de várias cores de comprimentos de onda distintos. O mesmo pode ser percebido num fenômeno natural bem conhecido de todos nós, o arco-íris, ou quando a luz branca incide na superfície de um disco compacto (ou CD na sigla em inglês para Compact Disc) ou um DVD (sigla em inglês para Digital Versatile Disc).

A suposição de que a luz branca é uma cor pura, ou seja, de frequência eletromagnética bem definida, pode ser facilmente derrubada com a explicação do fenômeno que ocorre com o prisma ou o arco-íris. Desta forma, podemos fazer com que o estudante perceba que, na verdade, quando vemos a luz branca estamos diante de luzes coloridas que sensibilizam nossos receptores, os cones, de uma forma bem balanceada. Ao receber esse estímulo, o cérebro determina que estamos diante da cor branca [1].

Com base nesse princípio, o experimento desenvolvido permite a composição de diversas cores, inclusive o branco, a partir de três cores básicas contidas no LED RGB, através do manuseio de potenciômetros. Além disso, ao produzir uma determinada cor o estudante pode decompô-la, como ocorre com a luz do sol em um arco-íris, e observar sua estrutura usando um DVD para difratar a luz proveniente do LED RGB, observando sua composição espectral [13,14]. Ao variar cada potenciômetro individualmente, o estudante pode perceber que está alterando a tonalidade daquela luz. A alteração da cor do LED RGB [15] pode ser acompanhada pela redução gradativa da intensidade da componente básica da luz dispersa pelo DVD.

Material Instrucional 1

A Figura 1 mostra a composição de cores pela síntese aditiva de algumas combinações simples. Ela pode ser utilizada em sala de aula, mostrando ao estudante de que forma podemos compor diversas outras cores através das luzes vermelha, verde e azul. O estudante poderá observar, ainda na figura 1, que na fronteira entre o azul e o verde há uma cor azul esverdeado, entre o azul e o vermelho há o rosa arroxeadado e no encontro das cores verde e vermelha, o amarelo.

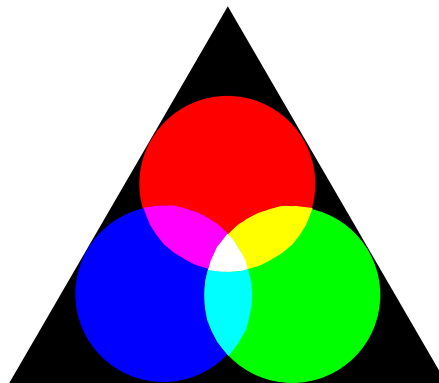


Figura 1 – Composição aditiva de cores.

2 Arranjo Experimental

O aparato proposto pode ser montado com a participação de algum estudante mais motivado, ou com um interesse particular em eletrônica. Os componentes utilizados são descritos na Tabela 1.

Sigla	Quant	Descrição
<i>RGB</i>	1	LED RGB de 5 mm e alto brilho com o anodo comum
<i>R</i>	1	LED vermelho de 5 mm e alto brilho
<i>G</i>	1	LED verde de 5 mm e alto brilho
<i>B</i>	1	LED azul de 5 mm e alto brilho
<i>R₁ - R₆</i>	6	Resistores de 100Ω 1/8 W
<i>Ch₁-Ch₂</i>	2	Chaves interruptoras (liga e desliga)
<i>P₁ - P₃</i>	3	Potenciômetros deslizantes de 10kΩ
<i>P₄ - P₅</i>	2	Potenciômetros de 10 kΩ (de volta ou deslizante)
<i>V₁ - V₃</i>	3	Suportes com 2 pilhas pequenas cada (AA) de 1,5 V
	3m	Fio cabinho de cores variadas
	1	Folha de papel vegetal ou fosco (30x30 cm)
	1	Ferro de solda
	20cm	Fio de solda
	1	Rolo de fita isolante.

Tabela 1: Lista dos componentes necessários para a montagem.

A montagem da caixa pode ser feita com sobras de madeira, eucatex, acrílico, compensado ou até mesmo um papelão bem resistente. As dimensões utilizadas na caixa foram, aproximadamente, 11,5 cm x 15,0 cm x 4,5 cm, como pode ser visto na Figura 2a. Na Figura 2b, temos a caixa aberta para a visualização do seu interior, com todas as conexões estabelecidas. Os potenciômetros que podem ser vistos nas Figuras 2a são os potenciômetros deslizante (P_1 , P_2 , P_3), enquanto que na Figura 2b são os potenciômetros de ajuste fino (P_4 e P_5). Após o ajuste, esses últimos são acondicionados no interior da caixa para que não tenham seus valores alterados por descuido.

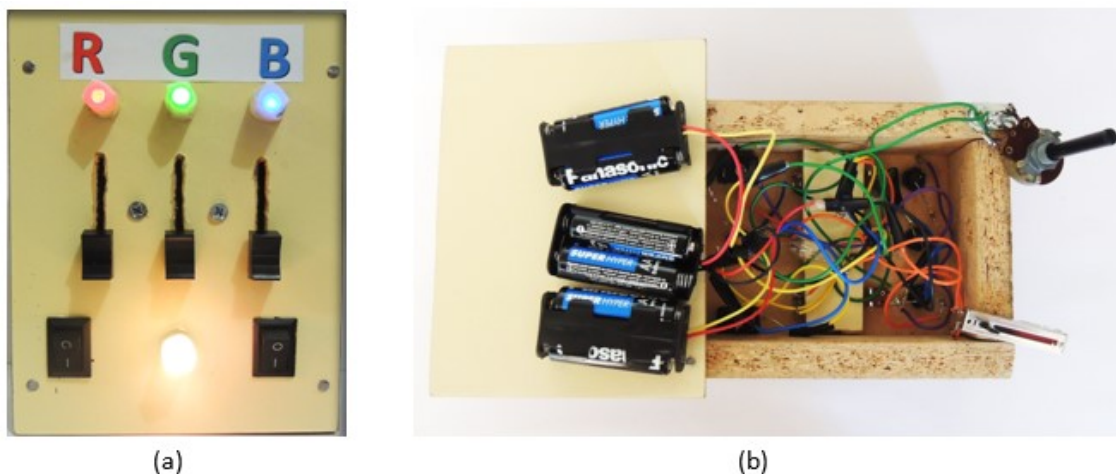


Figura 2 – (a) Vista superior da montagem com o LED RGB produzindo a cor branca e os demais com brilho atenuado. Os três potenciômetros estão deslocados em direção ao LED RGB. (b) Vista interna onde podem ser observados os potenciômetros de ajuste fino e as pilhas de alimentação.

O LED RGB é composto de três LED's encapsulados em um mesmo invólucro e com o terminal anodo como comum, ou seja, esse LED corresponde a três LED's e pode ser visto na figura 2b, entre as duas chaves (Ch_1 e Ch_2). Na outra extremidade são colocados os outros três LED's, na sequência (R,G,B). Temos então 3 pares de LED's nas cores vermelha, verde e azul.

O esquema do circuito eletrônico é apresentado na Figura 3. Os pares de LED's de mesma cor são alimentados por fontes individuais (3V) conectadas através do ponto central do respectivo potenciômetro (P_1 , P_2 ou P_3). Ao se alterar a posição de um dos potenciômetros modificamos as resistências que alimentam os circuitos de cada um dos LED's do determinado par. Dessa forma, ao se alterar a posição de um potenciômetro a intensidade do brilho é comutada entre os LED's da mesma cor.

Os resistores R_1 a R_6 de 100Ω limitam a corrente nos LED's para não danificá-los. Os potenciômetros P_4 e P_5 , ambos de $10 \text{ k}\Omega$, são usados para um ajuste no brilho dos LED's vermelhos. A sugestão de procedimento a ser adotado é começar pela produção da cor amarela no LED RGB, colocando os potenciômetros P_1 e P_2 nas posições em que a luz do LED RGB fique com maior brilho, e o P_3 com mínimo de azul no RGB. A cor a ser obtida deve ser a amarela. Para isso, ajusta-se o potenciômetro P_4 até obter essa cor. O ajuste do potenciômetro P_5 é para que os LED's individuais fiquem com brilhos equivalentes, quando todos acesos. Os valores que permitiram um funcionamento adequado para o experimento foram $P_4 \approx 150 \Omega$, e $P_5 \approx 1,2 \text{ k}\Omega$. Como esses valores de ajuste fino podem variar muito em função do estado de uso das pilhas, além das características técnicas de cada LED, é interessante manter os potenciômetros de ajuste

de valor de 10 k Ω . Sugerimos, ainda, fazer uma calibração antes de começar a usar o aparato em uma nova sessão de experiências.

A necessidade de se usar os dois potenciômetros de ajuste decorre do fato do LED vermelho operar com valores de tensão bem mais baixos que os das demais cores (em torno de 1,5 a 2,0V).

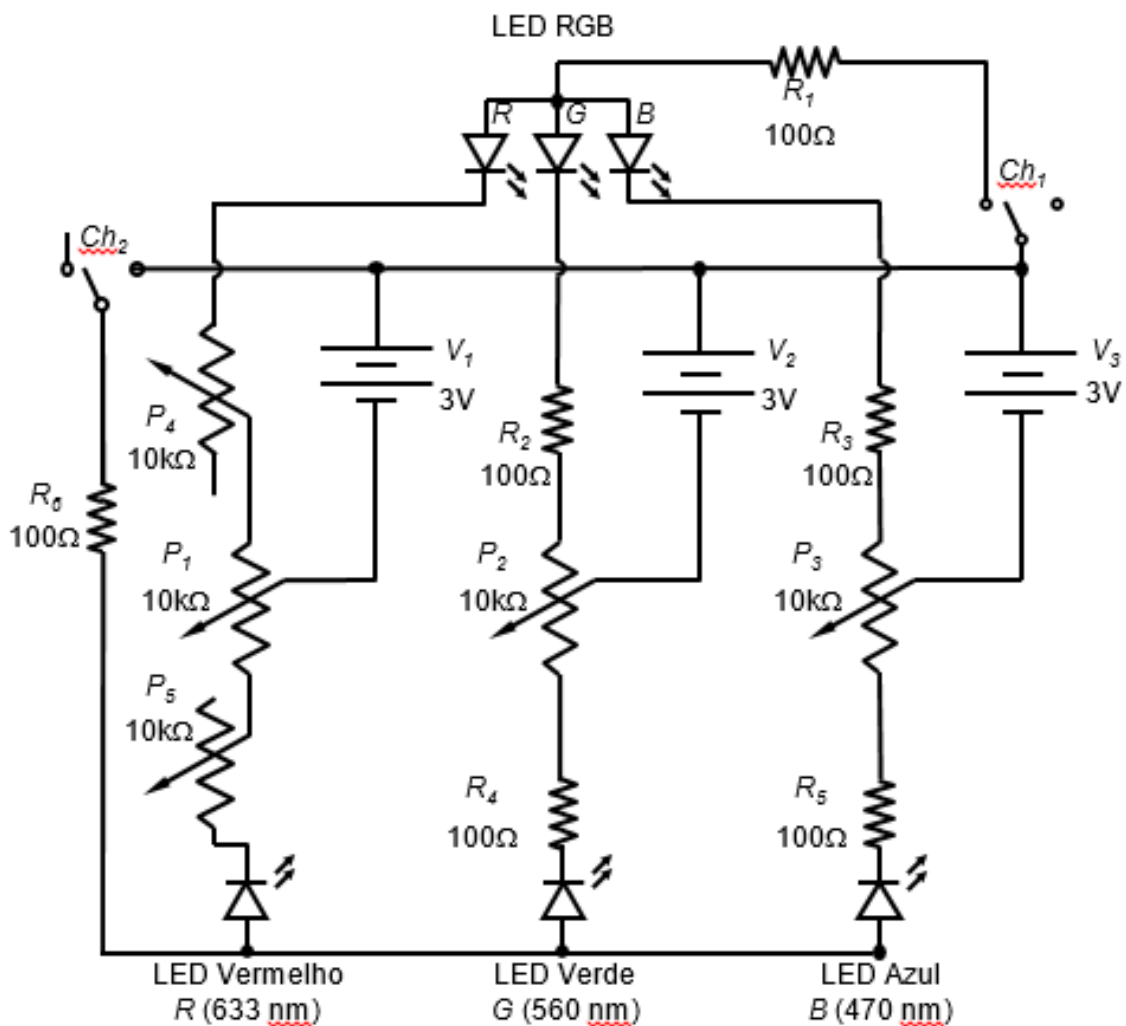


Figura 3 – Circuito Eletrônico

Como os LED's possuem uma lente em seu topo, a luz emitida é bem direcional e, no caso do LED RGB, é possível perceber as três fontes luminosas de cores de forma distinta, quando se olha bem de perto. O uso do papel fosco ou vegetal permite que a luz emitida pelos LED's fique mais difusa e possa ser observada em diferentes ângulos. No caso do LED RGB, permite ainda que as cores se misturem de forma a se observar um padrão de cor homogêneo.

A Figura 4 permite visualizar a comutação entre os LED's individuais (parte superior da figura) e os LED's no RGB. A chave Ch_1 aciona o LED RGB (embaixo na figura) e a outra Ch_2 aciona os demais LED's (na parte superior da figura). Isso permite que inicialmente seja mostrado aos estudantes que variando os potenciômetros estamos variando o brilho de cada um dos três LED's individuais, quando apenas a chave Ch_2 está acionada. Ao ligarmos as duas chaves (Ch_1 e Ch_2), os estudantes podem perceber que enquanto o brilho que está sendo modificado no LED individual (aumentando ou diminuindo), o brilho da cor correspondente no LED RGB se altera de forma complementar.

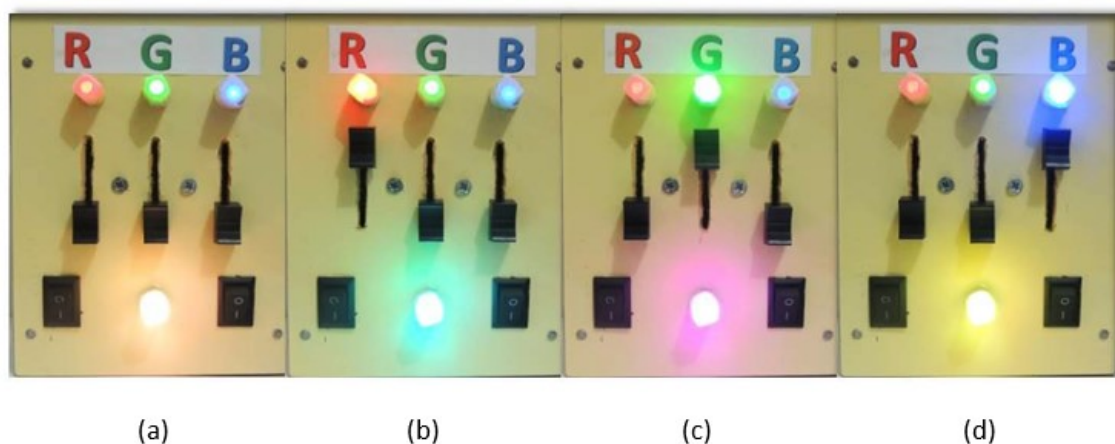


Figura 4 – Quatro exemplos de composição. (a) Todos os potenciômetros estão direcionando a corrente elétrica em direção aos LED's RGB gerando a cor branca. (b) O LED vermelho está totalmente aceso enquanto que no RGB os LED's verde e azul produzem uma cor azul esverdeado. (c) O LED verde está com todo brilho enquanto que o vermelho e azul brilham no RGB compondo a cor violeta. (d) O LED azul brilha e no RGB apenas o vermelho e o verde produzem o amarelo.

Para analisar a distribuição espectral da luz composta no LED RGB, foi utilizado um DVD do qual a camada prateada foi removida. Como ele é composto de dois discos laminares, para retirar a camada prateada basta pressionar a junção dos dois discos pelo orifício central com uma haste pontiaguda. Pode ser uma chave de fenda bem fina ou a ponta de uma tesoura. Em seguida, ao girar a haste provoca-se o descolamento das duas superfícies. Aplicando uma fita adesiva no que restar de metal do disco inferior, retiram-se completamente os resíduos prateados, ou seja, a camada de gravação. O uso do DVD permite um resultado muito melhor que com um CD, que também pode ser utilizado. O DVD assim trabalhado deve ser posicionado sobre o LED RGB, centrando-o sobre este. Um suporte feito com arame, como os encontrados em garrafas de espumante, pode ser utilizado para apoiar o DVD sobre o LED RGB, como mostra a Figura 5.

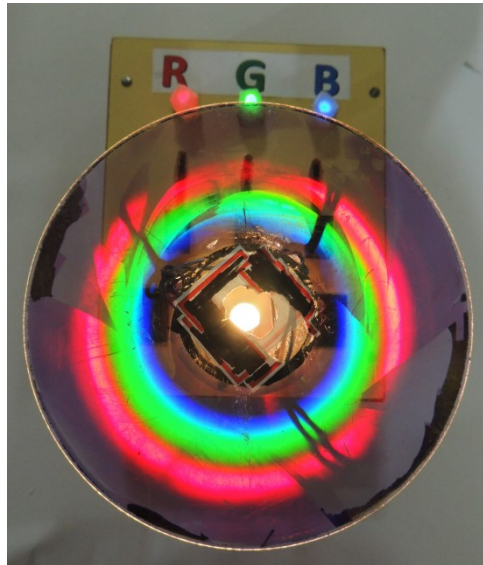


Figura 5 – Montagem do DVD, sem a película refletora, sobre o LED RGB apresentando a cor branca.

3 Resultados

Os resultados obtidos com o experimento podem ser observados nas Figuras 4a, 4b, 4c e 4d. A Figura 4a mostra todos os três potenciômetros posicionados para baixo o que faz com que o brilho das três cores do LED RGB atinja seu máximo. Ao mesmo tempo, os três LED's superiores têm seus brilhos reduzidos ao mínimo. O LED RGB produz uma cor que, visualmente, percebemos como branca.

Na Figura 4b o brilho da cor vermelha do LED RGB é reduzido restando, neste LED, apenas as cores verde e azul. A percepção visual sugere a cor azul esverdeado. Pode-se observar que o LED superior vermelho aumenta seu brilho ao máximo.

Na Figura 4c o potenciômetro do vermelho retorna para a posição inferior e o da cor verde vai para seu ponto superior máximo. Ao se fazer isso, diminui-se toda a intensidade da luz verde do LED RGB e aumenta-se o brilho do LED superior verde ao máximo. O LED RGB produz uma resposta visual de se estar diante de uma cor violeta. Retornando o potenciômetro do verde a sua posição inferior e elevando o potenciômetro do azul ao seu topo, pode-se observar que o brilho do LED azul superior aumenta consideravelmente e a cor azul do LED RGB é reduzida. Nesse momento, o LED RGB está apenas com as cores vermelha e verde acesas, o que produz a sensação visual da cor amarela.

Ao manusear os potenciômetros de diferentes formas, o estudante pode compor inúmeras outras cores e compreender que cada cor que ele produz é a combinação das três cores básicas dos três LED's, nas proporções que ele define.

Utilizando o DVD devidamente preparado, como é descrito anteriormente, e posicionando-o de forma que o orifício coincida com o LED RGB (Figura 5), pode-se observar o quanto de vermelho, verde e azul aquela cor formada é composta.

Na figura 5 os potenciômetros estão posicionados na mesma posição da figura 4a, gerando a cor branca. Com uso do DVD observamos o quanto destas três cores estão contidas no LED RGB. O mesmo pode ser feito para qualquer outra cor, evidenciando ao estudante que a cor que enxergamos é o produto da sensibilização dos cones sensíveis ao vermelho, ao verde e ao azul, o que constitui uma característica puramente fisiológica.

4 Conclusão

O aparato desenvolvido, com custo relativamente baixo (inferior a R\$ 50,00) e de montagem simples, atendeu a proposta inicial de produzir cores através do processo da síntese aditiva. De forma lúdica, os estudantes têm acesso a um equipamento que pode ser facilmente manuseado.

Em oposição ao processo de síntese subtrativa usada, por exemplo, nas misturas de tintas, esse material instrumentaliza o processo de compreensão da síntese aditiva de cores. Através da transferência do brilho luminoso de um LED de determinada cor para a cor correspondente do LED RGB, o estudante controla e visualiza a composição da cor gerada aditivamente. Além disso, ele pode analisar o espectro de emissão da luz produzida pelo LED RGB em suas componentes básicas através do uso do DVD.

Referências Bibliográficas

- [1] Barthem, R.; *A Luz, Temas Atuais de Física*, 1ª edição. Editora Livraria da Física – Sociedade Brasileira de Física, São Paulo, 2005.
- [2] Constantino Pérez Veja, C. P. e de la Mazza, J. M. Z.; *Fundamentos de televisión analógica y digital*. Servicio de Publicaciones de la Universidade de Cantabria, Santander, 2003.
- [3] Bernardo, L. M.; *História da Luz e das Cores*, Volume I, 2ª Edição. Editora UP, Universidade do Porto, 2009.
- [4] Kaiser, P. K. e Boynton, R. M.; *Human Color Vision*, 2ª edição, Optical Society of America, Washington, p. 563-579, 1996.
- [5] Marks W. B.; Dobbie, W. H. e MacNichol Jr. E. F.; *Visual Pigments of Single Primate Cones*. *Science* **143**, nº 3611, p.1181-1182, 1964.
- [6] Brown P. K. e Wald G.; *Visual Pigments in Human and Monkey Retinas*. *Nature* **200**, p.37-43, 1963.
- [7] *Parâmetros Curriculares Nacionais + (PCN+) - Ciências da Natureza e suas Tecnologias*. Ministério da Educação. Secretaria da Educação Média e Tecnológica. Brasília: MEC, p.26-27, 2002. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>>. Acesso em janeiro de 2016.
- [8] Amano H. M. K.; Hiramatsu K. e Akasaki I.; *P-Type Conduction in Mg-Doped GaN Treated with Low-Energy Electron Beam Irradiation (LEEBI)*. *Jpn. J. Appl. Phys.* **28**, L2112-L2114, 1989.
- [9] Johnstone B. B.; *Shuji Nakamura and the revolution in lighting technology*, Prometheus Books, 2007.
- [10] *The Nobel Prize in Physics 2014*. *Nobelprize.org*. Nobel Media AB 2014. Web. 24 Jan 2016. Disponível em: <http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/>. Acesso em janeiro de 2016.
- [11] Rudge, F.; *Por que Prêmio Nobel para o LED azul. Opinião, 23 de outubro de 2014*. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/v1/index.php?option=com_content&view=article&id=604:por-que-premio-nobel-para-o-led-azul&catid=150:opinioao&Itemid=316>. Acesso em janeiro de 2016.
- [12] Sir Isaac Newton, *Óptica*. Tradução, introdução e notas de André Koch Torres de Assis. 1ª Edição, 1ª Reimpressão. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002.

[13] Garcia N. M. D., Kalinowski H. J.; *Um espectroscópio simples para uso individual*, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **21**, n. Especial, p.332-338, 2004.

[14] L. J. Jonathas, *Uma Abordagem experimental para o Ensino da Quantização da Luz*, Dissertação de Mestrado em Ensino de Física, IF – UFRJ, Janeiro de 2015. <<http://objdig.ufrj.br/12/teses/828142.pdf>>. Acesso em março de 2016.

[15] LED Color Mixing: Basics and Background, artigo técnico da Cree, Inc. Energy Star (Direitos Autorais © 2010-2015 Cree, Inc.). Disponível em: <http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED-Components-and-Modules/XLamp/XLamp-Application-Notes/LED_color_mixing.pdf>. Acesso em janeiro de 2016.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

Disco de Newton com LEDs

Márcio Velloso da Silveira
&
Ricardo Borges Barthem

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Márcio Velloso da Silveira, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
Julho de 2016

Disco de Newton com LEDs

Márcio Velloso da Silveira
&
Ricardo Borges Barthem

1 Introdução

A simples ação de abrir os olhos e enxergar o mundo carrega consigo uma série de fenômenos que podem ser utilizados para auxiliar no ensino de vários campos da ciência. A luz, enquanto onda eletromagnética, propaga-se no vácuo a uma velocidade de cerca de 300.000 km/s. Para visualização dos objetos que estão ao nosso redor, isso implica em um tempo de propagação às nossas células fotorreceptoras de cerca de algumas dezenas de nanossegundos ($\Delta t \sim 10^{-8}$ s). Alguns dos processos bioquímicos que se sucedem, no entanto, não são tão velozes. O processo bioquímico se inicia quando a opsina (pigmento contido nos cones e bastonetes) ligada à vitamina A recebe um fóton e sofre uma mudança física (cis→trans). Essa mudança ocorre em apenas alguns picossegundos ($\Delta t \sim 10^{-12}$ s). Os processos seguintes, que vão da geração e propagação do impulso elétrico pelo sistema nervoso ao reconhecimento da imagem no cérebro, levam bem mais tempo, da ordem do décimo de segundo ($\Delta t \sim 10^{-1}$ s) [1]. O tempo necessário para que o estímulo criado na retina desapareça foi descrito pelo médico Peter Mark Roget em 1826, e medido pela primeira vez pelo físico Joseph-Antoine Plateau em 1829. É o que ficou conhecido como sendo a persistência retiniana [2].

Os efeitos decorrentes da duração temporal de cada etapa do processo da visão são irrelevantes para as situações do dia a dia, tornando nossa visão perfeitamente adaptável ao meio em que vivemos. No entanto, aproveitando-se de algumas de suas consequências, foi possível simular uma sequência contínua através da sobreposição de imagens ao longo do tempo, surgindo assim a cinematografia [3].

Para que a projeção de um filme se assemelhe a sensação visual que possuímos no mundo real, é fundamental o equilíbrio entre três aspectos da amostragem temporal, ou seja, entre três aspectos envolvidos na sobreposição de cada quadro de imagem. O primeiro deles é a remanência visual, que é o tempo em que as imagens são trocadas. Esse deve ser inferior ao da capacidade de nosso sistema visual em detectar o momento dessa troca de forma a nos levar a acreditar que se trata de um movimento contínuo (em torno de 24 quadros por segundo). Os

outros aspectos são a cintilação e o batimento e/ou interferências com a rede de distribuição elétrica. Esse último é mais inerente aos sistemas eletrônicos [4]. Portanto, a velocidade em que os quadros são trocados ao longo do tempo permite sensibilizar nossa visão de forma a produzir sensações e efeitos que são utilizados em muitas aplicações do nosso cotidiano.

Isaac Newton (1643-1727) estudou profundamente a propriedade de dissociação da luz branca, ao atravessar um prisma de vidro, em feixes de luzes de diversas outras cores. Newton teria encontrado sete cores, coincidência ou não, o mesmo número das notas musicais. No segundo problema da 6ª proposição do seu livro *Optics*, na edição de 1730 [5], Newton utiliza um círculo com sete fatias, como uma pizza, propondo que cada uma das sete fatias represente uma das sete cores observadas, a saber: vermelha, laranja, amarela, verde, azul, anil e violeta. Usando uma forma de cálculo geométrico, Newton descreve as cores resultantes a partir da combinação das sete cores que ele considerou como sendo primárias. Em certo momento Newton, ao descrever a composição de duas cores, afirma:

“... todavia a cor composta dessas duas não será perfeitamente branca, mas alguma cor anônima esmaecida. Pois ainda não fui capaz de produzir o branco perfeito misturando apenas duas cores primárias. Se ele pode ser composto de uma mistura de três (cores) tomadas a distâncias iguais na circunferência, não sei; mas de quatro ou cinco, não duvido que pode...”

Havia muitas dúvidas pairando na cabeça de Newton e, para nós, não fica claro se ele fazia uso do que chamamos atualmente de “disco de Newton”. Esse disco é dividido tal qual o citado anteriormente, mas pintado com as sete cores básicas e posto a girar pelo seu centro de gravidade. O efeito provocado pela rotação rápida deveria compor a cor branca, que seria como convergir em um único ponto as sete cores do prisma. Na verdade, nunca conseguimos o branco, mas uma tonalidade de cinza. Isso se deve ao fato de que cada um dos setores coloridos está absorvendo a parte espectral da luz complementar à que espalha, isto é, a da sua cor. No tradicional “disco de Newton” estamos trabalhando com a síntese subtrativa de cores e não a aditiva. A síntese aditiva de cores seria a convergência do espectro decomposto por um prisma em um único feixe, como fez Newton.

Com o propósito de compor o branco usando um disco em movimento, ao invés de se fazer uso da síntese subtrativa, foi desenvolvido um aparato usando LEDs de três cores; vermelha, verde, e azul, ou seja o padrão RGB (*Red, Green, Blue*). Este padrão de cores corresponde à teoria tricromática de Young-Helmholtz, na qual é proposto que nossa visão cromática é formada por células denominadas por cones. São três os tipos de cones e cada um

deles é responsável por produzir uma resposta neurológica a partir da estimulação por luzes nas regiões espectrais de cada uma dessas três cores [6]. As demais cores podem ser percebidas por luzes monocromáticas, em determinadas posições do espectro, ou por sensibilizações combinadas em intensidades diferentes dessas três cores fundamentais. A Figura 1 apresenta uma descrição padrão para as respostas espectrais de cada um dos cones (S , M , L) e as funções $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ que representam as percepções fisiológicas padrão da visão humana em cores estabelecidas pela *Commission Internationale de l'Éclairage* em 1931, através do *CIE 1931 2° Standard Observer* [7]. Para uma discussão detalhada desses espaços de cores, sugerimos o trabalho de Mark Q. Shaw feito em sua tese de M.Sc. no Center of Imaging Science Rochester Institute of Technology [8]. Além disso, foram incluídas nessa figura, para efeito de comparação, as curvas espectrais das emissões dos LEDs vermelho (**R**), verde (**G**) e azul (**B**) [9].

Usando dois pares de LEDs de cada uma dessas três cores e fazendo-os girar sobre um eixo central, estando todos os seis LEDs à mesma distância do centro, mostra-se que é possível compor não só o branco como também as demais cores que podem ser obtidas pela síntese aditiva de luzes nas três cores básicas. A síntese aditiva é mais comumente entendida através de um diagrama, como o apresentado na Figura 2. Nele podemos observar que na sobreposição de duas cores de luzes ocorre a formação de uma terceira. A convergência das três cores, vermelho, verde e azul, produz a luz branca.

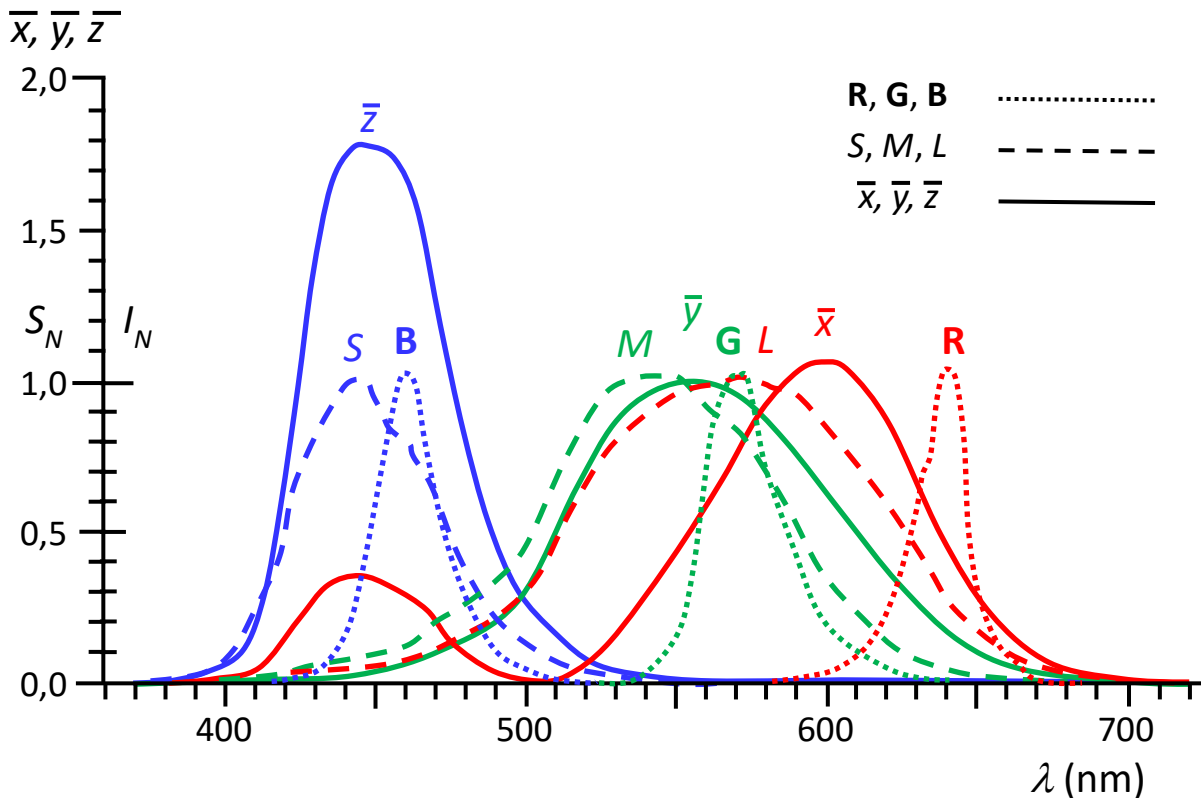


Figura 1 – Gráfico das respostas espectrais dos cones e de emissão dos LEDs RGB. As intensidades normalizadas I_N das emissões dos LEDs azul (**B**), verde (**G**) e vermelho (**R**) estão representadas em linhas pontilhadas [9]. Em tracejado estão representadas as respostas espectrais para as sensibilidades normalizadas S_N dos três cones (**S** ↔ azul, **M** ↔ verde e **L** ↔ vermelho) [6]. Em contínuo estão as funções $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ e $\bar{z}(\lambda)$ que representam as percepções fisiológicas padrão da visão humana em cores estabelecida pela *Commission Internationale de l'Éclairage* em 1931 através do *CIE 1931 2° Standard Observer* [7].

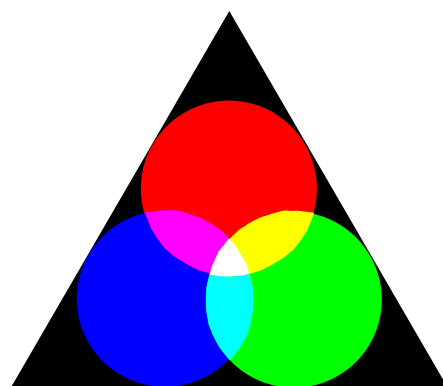


Figura 2 – Composição aditiva de cores.

2 Arranjo Experimental

O aparato proposto pode ser construído por uma pessoa com conhecimentos básicos de eletrônica e alguma habilidade manual, podendo ser o professor ou um estudante mais interessado sob sua supervisão. O material e as ferramentas utilizadas são descritos na Tabela 1.

Sigla	Quant	Descrição
R	2	LED vermelho de 5 mm e alto brilho
G	2	LED verde de 5 mm e alto brilho
B	2	LED azul de 5 mm e alto brilho
R ₁ – R ₂ – R ₃	3	Resistores de 100Ω 1/8 W
Ch ₀	1	Chave interruptora (liga e desliga)
Ch ₁ -Ch ₂ - Ch ₃	3	Mini chaves interruptoras (liga e desliga)
P ₀	1	Potenciômetro de fio 4W, 5kΩ
P ₁ – P ₂ – P ₃	3	Trimpot multivolta 3006 de 2 kΩ
V ₁ – V ₂ – V ₃	3	Suportes com baterias CR 2032 (3,0V)
	1,5m	Fios cabinhos de cores variadas
	1	Bastão de cola quente
	1	Ferro de solda
	20cm	Fio de solda
	1	Rolo de fita isolante.
M	1	Motor de CD ou DVD (motor e polia)
V ₀	1	Fonte de tensão contínua 6V, 200mA
	1	Transferidor
	1	Caneta marca CD
	1	Lixa de madeira fina 100
	1	Cola instantânea (acrílica)
	2	Brocas de metal de 2 e 5 mm
	2	CD ou DVD
	1	Mini furadeira
	2	Parafusos de madeira 3,5 x 12 mm

Tabela 1: Lista do material e equipamentos necessários para a montagem.

A montagem é baseada no uso de dois CD's unidos, para aumentar a rigidez do sistema, o qual pode ficar fragilizado pelas perfurações. A marcação dos furos e o posicionamento dos componentes são feitos com a ajuda do mecanismo da unidade óptica que proporciona o movimento de rotação do CD. Começaremos, portanto, com a descrição o sistema de rotação.

Podemos obter o motor indicado para a montagem em uma unidade óptica de um aparelho de som de CD ou um reproduzidor de vídeos em DVD. Os leitores de CD/DVD utilizados em computadores não servem, pois não operam com corrente contínua. O motor da unidade óptica que foi usado, código RF-310T-11400, opera, segundo especificação técnica, a 5,9VDC.

Outro motor, mais comum em aparelhos de DVD é o RF-300F A-12350, também operando a 5,9 V, e que pode ser encontrado no mercado por menos de R\$20,00. A unidade óptica utilizada foi produto de sucata, já que sua cabeça de leitura óptica estava com defeito, dano que costuma ser mais frequente. Como o motor estava íntegro, a unidade foi desmontada para retirada somente deste motor e a estrutura metálica que lhe suporta.

Essa estrutura, com o motor, deve ser presa a uma placa de madeira de aproximadamente 16 cm de altura por 8 cm largura e 1 cm de espessura. No caso de se utilizar a estrutura metálica que suporta o motor, basta fixá-la por meio de dois parafusos próprios para madeira, como pode ser visto na Figura 3a. Como fonte de alimentação pode ser utilizado um carregador de celular que forneça entre 6 e 9 V DC e pelo menos 200 mA. Em nosso projeto, utilizamos um carregador de celular de 6,4 V e 200 mA.

Adicionamos uma chave interruptora (Ch_0) e um potenciômetro (P_0) de 5 k Ω 4W para variar a tensão sobre o motor, controlando assim, sua velocidade de giro. Desse modo, evitam-se rotações muito altas do disco, que poderiam comprometer a segurança. Em funcionamento, a tensão máxima aplicada ao motor cai para 5,24 V, sendo percorrido por uma corrente de 32 mA. O sistema de rotação pode ser visto nas Figuras 3a e 3b e o esquema elétrico na Figura 3c.

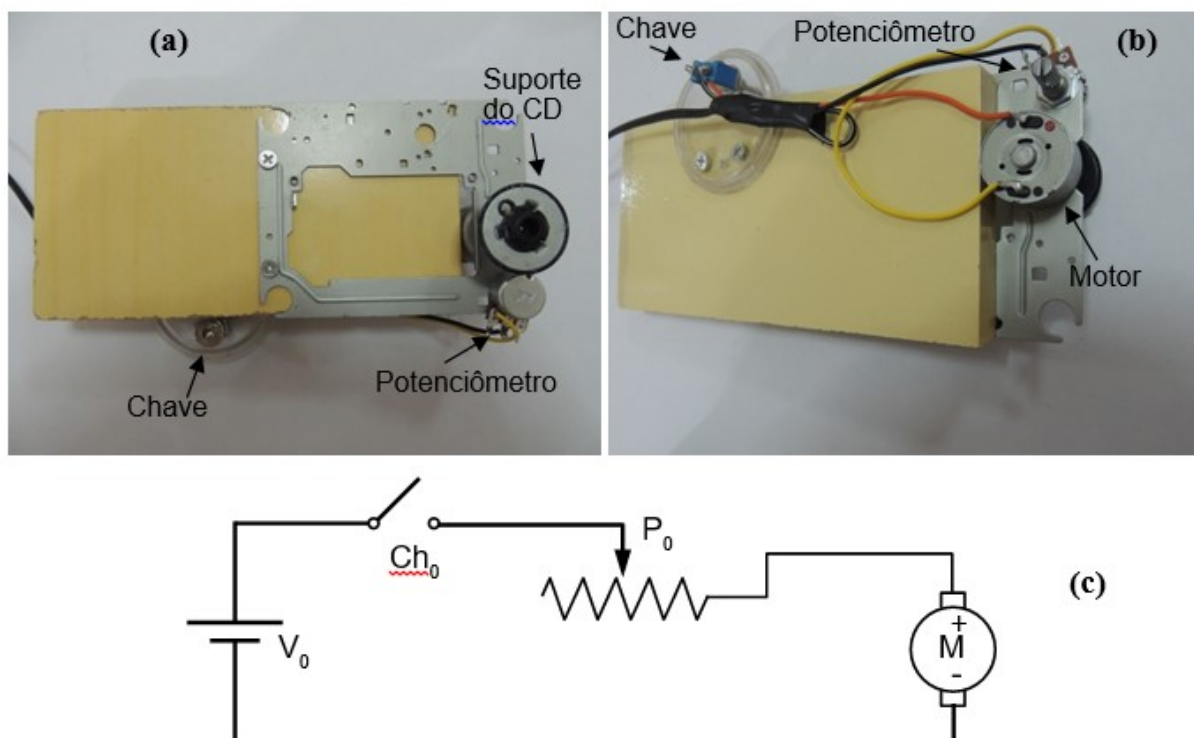


Figura 3 – Sistema de rotação. (a) O mecanismo da unidade óptica preso a uma placa de madeira e o interruptor abaixo à esquerda. (b) Parte posterior do mecanismo mostrando o potenciômetro, o interruptor e as ligações elétricas. (c) Diagrama da montagem elétrica da alimentação do motor.

A montagem do circuito é feita sobre um CD, ou seja, todos os componentes são bem fixados e colados neste CD para que, quando em movimento, não se soltem e não sejam arremessados, o que poderia provocar acidentes. Outra opção seria fixar no CD apenas os LEDs. Nessa segunda opção de montagem, todo o restante do circuito, incluindo resistores, chaves, potenciômetros e fonte de alimentação, localizar-se-iam fora do CD. A ddp fornecida por cada um dos três circuitos teria de ser transmitida para o CD em movimento de forma independente. A razão para não optarmos por este tipo de montagem é que a possibilidade de haver pontos de mau contato cresceria de forma considerável, tornando o projeto sujeito a ajustes frequentes e aumentando muito o nível de complexidade em sua construção.

No projeto desenvolvido, portanto, fixamos todos os componentes eletrônicos no próprio CD, reduzindo a possibilidade de mau contato. A preocupação, neste caso, é com a distribuição simétrica de todos os componentes eletrônicos. Uma distribuição simétrica e cuidadosa evita que o CD fique com um problema grave de balanceamento, o que pode inviabilizar o projeto.

No início da montagem do disco, é utilizado um transferidor e uma caneta própria para CD para fazer as marcações das posições dos LEDs. Eles precisam estar perfeitamente distribuídos para que o traço, por eles formado, seja homogêneo e com apenas uma faixa cromática. Como são seis LEDs ao todo, cada um fica a uma distância angular de 60° do seu vizinho (Figura 4a). Tomando o centro do CD como ponto médio, os pontos feitos nas bordas são ligados dois a dois, tomando-se o cuidado para que todos estes traços realmente passem pelo centro do CD (Figuras 4b, 4c). Caso haja alguma imprecisão é preciso limpar os traços com álcool e reiniciar o processo. A precisão nesta etapa irá garantir que o produto final funcione corretamente.

Além dos seis pontos marcados nas extremidades do CD, marca-se também um ponto a uma distância de 1 cm de sua borda (Figura 4d). Na sequência, é usado o mecanismo da unidade óptica, que foi descrito anteriormente, para fixá-lo e fazê-lo girar (Figura 4e). Girando o disco manualmente, coloca-se a caneta sobre a posição indicada pelo ponto marcado anteriormente, na intenção de traçar um círculo o mais perfeito possível e simetricamente distante do centro. Com o traço marcado o CD deve ser desencaixado do suporte para a etapa seguinte.

Os suportes de baterias são distribuídos simetricamente ao redor do centro do CD e seus terminais marcados com a caneta. Um “x” deve ser feito para assinalar todas as 12 posições que devem ser perfuradas. Antes de iniciar a furação, no entanto, o segundo CD deve ser colado sobre o primeiro de forma centralizada utilizando a cola instantânea.

Estando as marcações definidas, é utilizada uma broca de metal de 2 mm para fazer o furo inicial e, em seguida, uma de 5 mm para alargar cada furo ao diâmetro do LED e, se necessário, dos suportes de baterias.

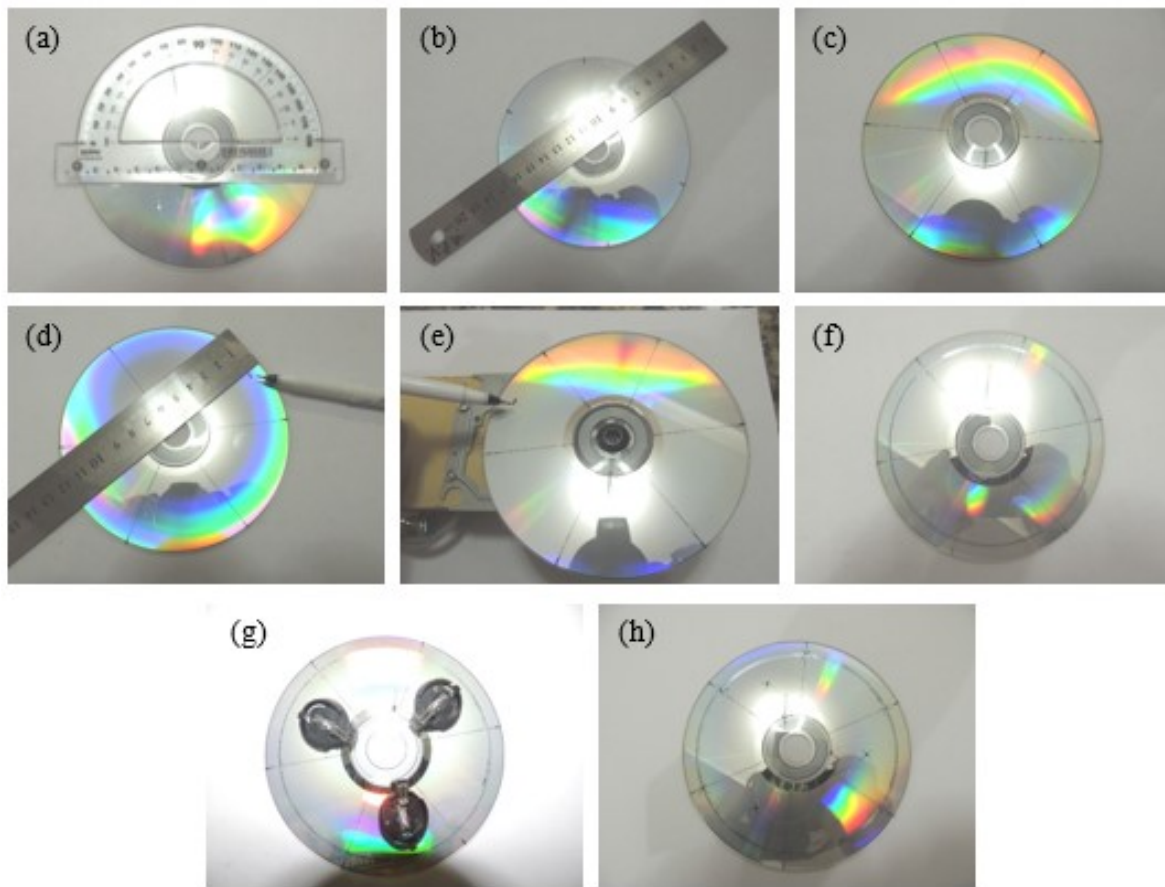


Figura 4- Preparação do CD. (a) Transferidor sobre o CD para marcação dos ângulos de 60° . (b) e (c) Ligação dos pontos complementares colineares. (d) Marcação do ponto distante a 1 cm da margem do CD. (e) Pondo o CD a girar com a caneta sobre o ponto marcado. (f) Círculo marcado no CD. (g) Marcação da furação dos suportes de bateria. (h) Marcação com “x” de todas as posições onde serão perfuradas.

A etapa seguinte é a montagem e soldagem dos componentes eletrônicos no CD a partir de um circuito simples. O circuito, na verdade, é a composição de três circuitos independentes, com chaves interruptoras e alimentações próprias. Em cada circuito é colocado um potenciômetro para possibilitar um ajuste fino na intensidade do brilho de cada par de LEDs. Essa possibilidade de variar o brilho dos LEDs permite que se consiga produzir a cor branca com maior pureza, além do amarelo, magenta e ciano. A Figura 5 descreve um diagrama com os três circuitos separados.

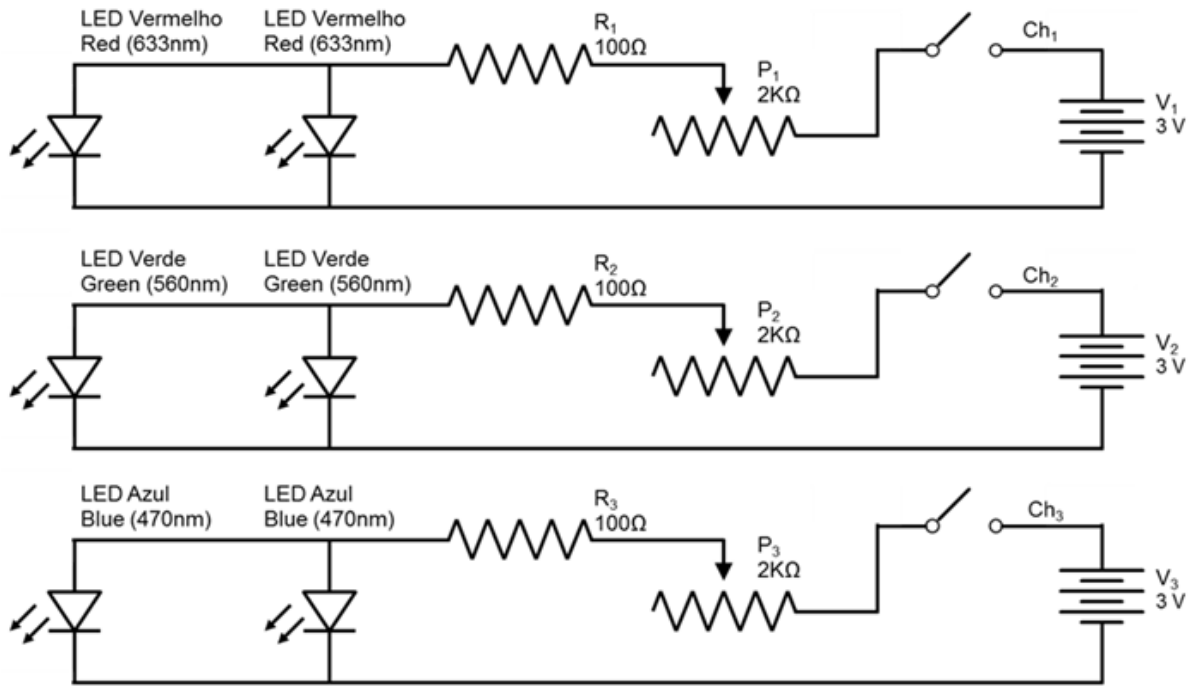


Figura 5 – Circuitos eletrônicos para os três LEDs. R₁, R₂ e R₃ são três resistores cuja função é limitar a corrente e impedir que os LEDs sejam danificados. Os potenciômetros P₁, P₂ e P₃ têm a função de proporcionar um ajuste fino no brilho de cada par de LEDs.

Antes de iniciar a montagem é necessário conferir se todos os LEDs e suportes se encaixam perfeitamente nos furos correspondentes do CD. Os LEDs devem ter suas cabeças lixadas de forma que suas superfícies fiquem bem planas para que as luzes sejam emitidas de forma mais difusas, lineares e menos direcionais. A direcionalidade se deve ao fato de cada LED possuir uma lente em seu topo, a qual deve ser removida pela lixa. Os LEDs devem ser fixados com cola quente, da mesma forma que os suportes.

De um lado do “sanduíche” de CD’s são colocados os suportes de bateria. No outro lado são encaixados os LEDs, ficando a parte elétrica nessa face onde são feitas as conexões e soldagens, inclusive com o posicionamento dos resistores, potenciômetros e interruptores, de acordo com o esquema apresentado na Figura 5. Todos os componentes devem ser presos com cola quente de forma bem distribuída para que não afete o balanceamento do CD. É necessário um cuidado adicional para não prender nenhum componente próximo ao furo central do disco, área não metalizada. Sem esse cuidado o CD não se encaixa no suporte da unidade óptica. Os três interruptores são colados na borda externa do disco a fim de facilitar seu manuseio. Eles são distribuídos simetricamente, como pode ser visto na Figura 6a. Esses interruptores estão indicados pelas letras R, G e B, iniciais de Red, Green e Blue, conforme a Figura 6b.

Após o término da montagem são colocadas as três baterias e todo o sistema deve ser testado de forma a se verificar se não há nenhum ponto de solda fria ou mau contato. O resultado da montagem pode ser visto nas Figuras 6a e 6b.

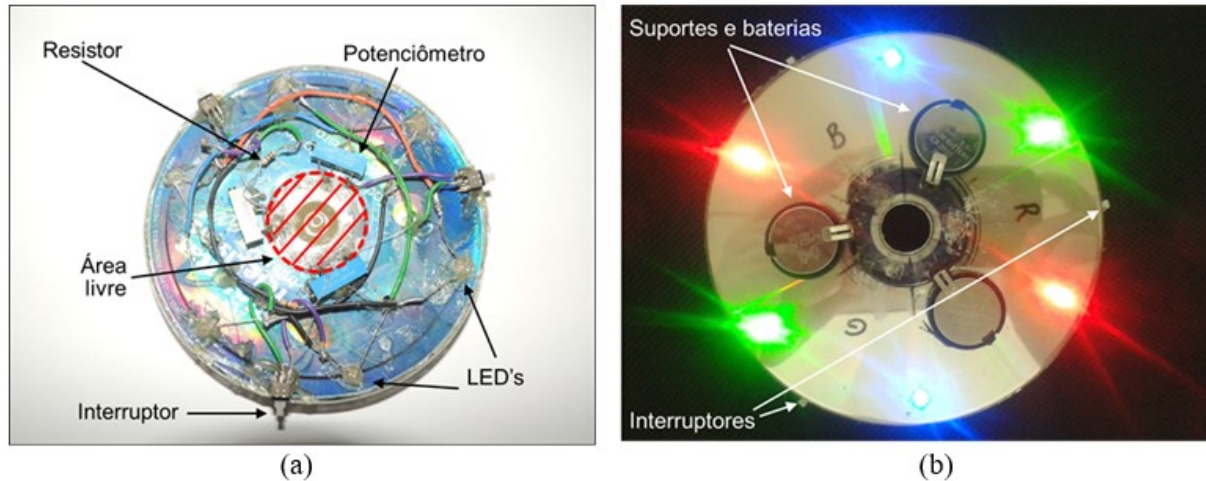


Figura 6 – Montagem concluída. (a) Parte de trás do CD, onde se observam os componentes eletrônicos. (b) Parte de cima do CD com os seis LEDs acesos e as baterias acondicionadas devidamente em seus suportes. As posições dos conectores, que se encontram por trás do CD, estão assinaladas pelas letras R, G, B.

3 Ajustes e Resultados

Após a preparação do mecanismo da unidade óptica e do CD, tem início a fase de ajustes. Inicialmente o CD é fixado com cola quente no mecanismo da unidade óptica. Deve-se adicionar uma quantidade suficiente de cola quente para que ocorra uma boa fixação. Após a secagem da cola o CD pode ser posto a girar. Verifica-se, então, se todos os LEDs produzem um aro luminoso de espessura aproximadamente igual à espessura do LED e uma cor uniforme. Pode ocorrer de um ou mais LEDs precisarem ser redirecionados para corrigir sua distribuição ao longo do aro.

Após as correções iniciais, o próximo passo é tentar produzir a cor amarela com os LEDs vermelhos e verdes deixando, portanto, os LEDs azuis apagados (Figura 7a). Primeiro deve-se ajustar a posição do potenciômetro P_2 dos LEDs verdes de forma que estes fiquem com um brilho bem intenso, mas sem atingir o seu valor máximo. O potenciômetro P_1 deve ter seu valor ajustado para que os LEDs vermelhos fiquem com brilhos próximos, visualmente, aos dos verdes. Em seguida põe-se o conjunto a girar e observa-se a necessidade de aumentar ou reduzir o brilho dos LEDs vermelhos. Para isso para-se o disco, altera-se a posição do potenciômetro P_1 e o disco é posto a girar novamente. O processo é repetido até que se consiga produzir a cor amarela (Figuras 7b e 7c). Caso chegue-se ao máximo de brilho dos LEDs vermelhos sem que

Material Instrucional 2

a cor resultante perca o aspecto esverdeado, deve-se reduzir a intensidade dos LEDs verdes pelo potenciômetro P_2 e recomeçar o processo.

O passo seguinte é produzir o branco. Para tanto, todos os LEDs serão ligados (Figura 7d) e os LEDs azuis devem ter sua intensidade alterada através do potenciômetro P_3 correspondente, repetindo o processo de parar o disco, alterar o potenciômetro e voltar a girar mais uma vez o disco até que se produza o branco (Figuras 7d, 7e, 7f). Após o ajuste, os valores finais para os potenciômetros, em nosso aparato, ficaram em torno de 12Ω , para o potenciômetro P_1 (LEDs vermelhos), 235Ω para o potenciômetro P_2 (LEDs verdes) e 450Ω , para o potenciômetro P_3 (LEDs azuis). Esses valores podem variar muito em função das especificações técnicas dos LEDs e do estado de uso das baterias. Portanto, antes de iniciar a apresentação do experimento aos alunos, deve ser feita uma verificação prévia que indicará se o aparato ainda encontra-se calibrado. Caso contrário, os brilhos dos LEDs deverão ser ajustados, seguindo os passos descritos anteriormente.

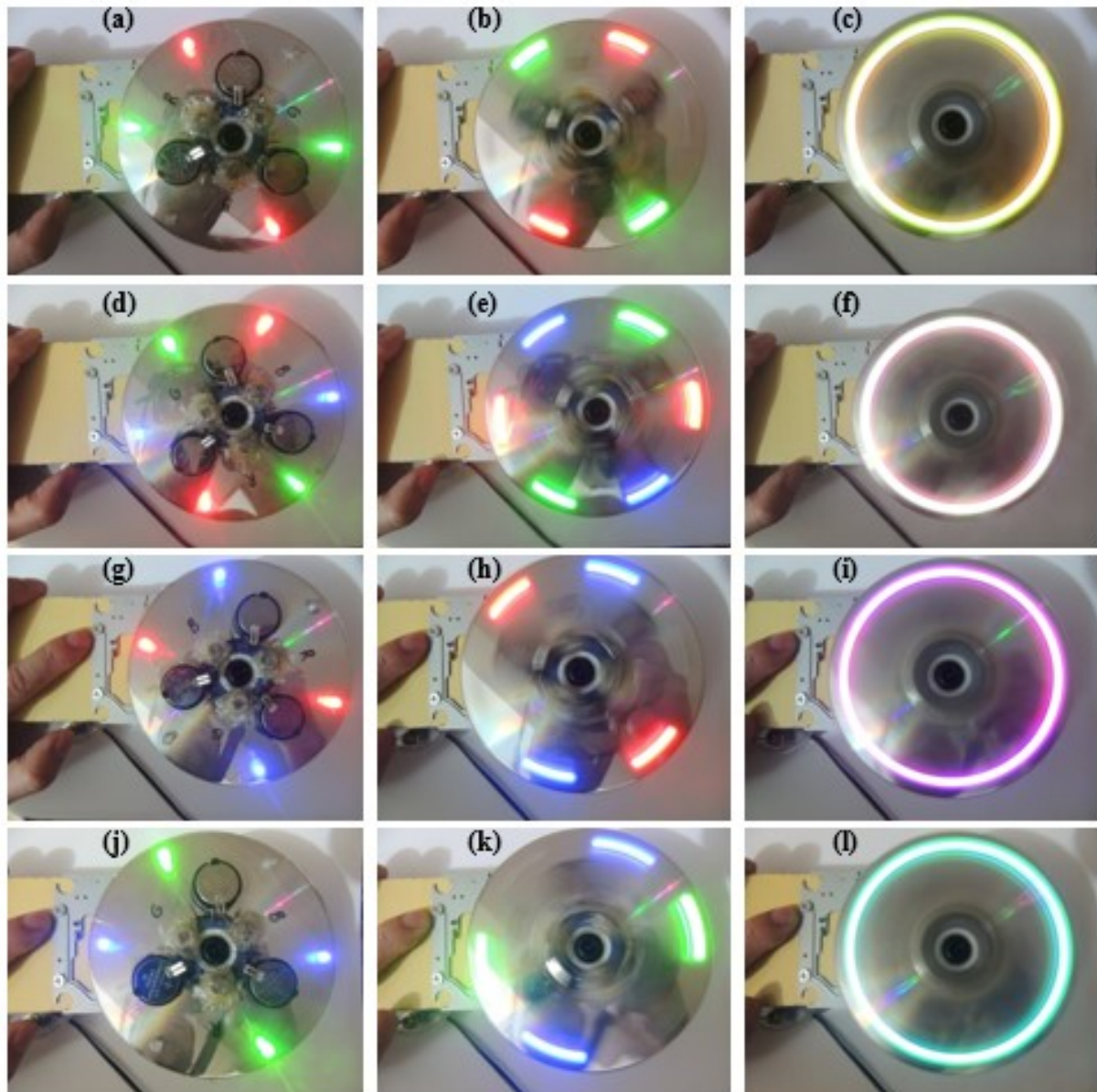


Figura 7 – Ajuste fino para composição das cores. (a, b, c) Ajustes para produzir a cor amarela. (d, e, f) Ajuste para se produzir a cor branca. (g, h, i) Apenas os LEDs azuis e vermelhos são ligados, produzindo, quando em movimento giratório, a cor magenta. (j, k, l) São acesos apenas os LEDs verdes e azuis que, ao girarem, produzem a cor ciano.

Com o sistema bem calibrado, o experimento permite compor a partir dos LEDs de cores vermelha, verde e azul, as cores amarela, magenta, ciano e branca. Como visto, na fase de ajustes, a cor amarela é produzida ao se ligar apenas os LEDs verdes e vermelhos (Figuras 7a, 7b, 7c). A cor branca é conseguida quando se ligam todos os LEDs, e pode ser observado nas Figuras 7d, 7e, 7f.

Para as demais cores, magenta e ciano, o procedimento é o mesmo, apenas alterando as posições dos interruptores. Para compor a cor magenta, apenas os LEDs azuis e vermelhos

devem ser ligados (Figuras 7g, 7h , 7i). A cor ciano é obtida com apenas os LEDs azuis e verdes ligados. O resultado pode ser visto nas Figuras 7j, 7k, 7l.

4 Conclusão

O chamado “disco de Newton” é muito empregado para demonstrar a síntese de cores no ensino de óptica. Ele é construído sobre um disco dividido em sete fatias, como as de uma pizza, e pintadas com cada uma das sete cores primárias estabelecidas por Newton. Esse disco, ao ser girado, parece ter a cor cinza, ao invés da branca. Isso traz um desconforto na relação entre a proposta do professor e o resultado observado pelos estudantes.

No experimento proposto neste trabalho, a composição da cor branca é obtida de fato. Apesar dos dois experimentos envolverem a rotação de discos para a composição de cores, tratam-se de sínteses diferentes; subtrativa para o disco de Newton e aditiva para o disco de LEDs. Além disso, é possível obter seis cores do espectro, além do branco, através do acionamento de LEDs de uma, duas ou três cores simultaneamente.

O aparato desenvolvido com LEDs permite a análise do funcionamento da visão humana, não só de suas características cromáticas como a da velocidade de captação e percepção das imagens. Essa compreensão é indispensável para a formação de cidadãos contemporâneos, capazes de compreender as tecnologias de imagem e cinema.

As fotografias utilizadas nas figuras contidas neste material apenas dão uma ideia do efeito, o qual pode ser percebido mais intensamente ao olharmos com nossos próprios olhos. Isso ocorre devido às características operacionais de aquisição que a câmera fotográfica possui, distintas das que se encontram na visão humana.

Uma experiência adicional pode ser feita com o equipamento funcionando em quaisquer das combinações de cores. Colocando-se a mão espalmada na frente do experimento com os dedos entreabertos e a sacudindo-a como se estivesse se despedindo de alguém, reproduzindo o efeito de um estroboscópio, é possível observar as cores individuais dos LEDs que, ao girarem, compõem a cor sintetizada. A ideia é tentar atingir, com o movimento da mão, uma sincronização da passagem das aberturas entre os dedos com o movimento dos LEDs nessa mesma direção. Quando essa sincronização é atingida, o tempo de exposição da luz dos LEDs, que acompanham o movimento da mão, torna-se superior ao da remanência visual, permitindo assim que o olho perceba os LEDs individualmente.

Referências Bibliográficas

- [1] Barthem, R.; *A Luz, Temas Atuais de Física*, 1ª edição. Editora Livraria da Física – Sociedade Brasileira de Física, São Paulo, 2005.
- [2] “Plateau, J. A. F.; *Complete Dictionary of Scientific Biography*; 2008. Disponível em: <<http://www.encyclopedia.com/doc/1G2-2830903442.html>>. Acesso em fevereiro de 2016.
- [3] Comunicação e Informação – Desenho Industrial –UFES 2009/02; *Persistência Retiniana*; 28 outubro 2009. Disponível em:<<https://precinema.wordpress.com/2009/10/28/persistencia-retiniana/>>. Acesso em março 2016.
- [4] Stolf, G.; “*Princípios de Televisão Digital – Epusp*,” agosto 2015. Disponível em: <<http://www.lcs.poli.usp.br/~gstolfi/PPT/APTV0315.pdf>>. Acesso em março de 2016.
- [5] Newton, S. I.; *Óptica*, Tradução, introdução e notas de Assis, A. K. T., 1ª ed. São Paulo, SP, Editora da Universidade de São Paulo, 2002.
- [6] Stockman, A.; Macleod, D. e Johnson, N.; *Spectral sensitivities of human cones*, vol. 10, pp. 2491-2516, 1993.
- [7] Wright, W. D.; *The Measurement of Colour*, Londres: Hilger & Watts. , 1944.
- [8] Shaw, B. M. Q.; *Evaluating the 1931 CIE Color Matching Functions*; junho 1997. Disponível em: <http://www.rit-mcsl.org/StudentResearch/mshaw/CMF_Thesis.pdf>. Acesso em março de 2016.
- [9] Jonathas, L. J.; *Uma Abordagem experimental para o Ensino da Quantização da Luz*, Dissertação de Mestrado em Ensino de Física, IF – UFRJ, Janeiro 2015. Disponível em: <<http://objdig.ufrj.br/12/teses/828142.pdf>>. Acesso em março de 2016.