

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE FÍSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE FÍSICA  
CAMPUS MEDIANEIRA**

ANDERSON GRAZIANE DE MOURA SQUISSATTO

**CONSTRUÇÃO E APLICAÇÃO DE UM FOTÔMETRO  
PARA O ENSINO DA ABSORÇÃO DA LUZ**

MEDIANEIRA - PR  
2018

**MNPEF**  
Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física

**UTFPR**  
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**SBF**  
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

CONSTRUÇÃO E APLICAÇÃO DE UM FOTÔMETRO  
PARA O ENSINO DA ABSORÇÃO DA LUZ

Anderson G. M. Squissatto

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física pelo UTFPR Medianeira como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador:  
Prof. Dr. Leandro Herculano da Silva

MEDIANEIRA - PR  
03/2018

## FICHA CATALOGRÁFICA

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

**S774c**

Squissatto, Anderson Graziane de Moura

Construção e aplicação de um fotômetro para o ensino da absorção da luz / Anderson Graziane de Moura Squissatto. – 2018.

77 f. : il. ; 30 cm.

Texto em português com resumo em inglês

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Medianeira, 2018.

Inclui bibliografias.

1. Luz. 2. Fotometria. 3. Matéria. 4. Ensino de Física - Dissertações. I. Silva, Leandro Herculano, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física. III. Título.

CDD: 530.07

Biblioteca Câmpus Medianeira  
Marci Lucia Nicodem Fischborn 9/1219



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

### CONSTRUÇÃO E APLICAÇÃO DE UM FTOMETRO PARA O ENSIN DA ABSORÇÃO DE LUZ

Por

**ANDERSON GRAZIANE DE MOURA SQUISSATTO**

Essa dissertação foi apresentada às dez horas, do dia vinte e quatro de março de dois mil e dezoito, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Física, Linha de Pesquisa Física no ensino médio, no Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física – MNPEF – Polo Medianeira, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Leandro Herculano da Silva (Orientador – PPGEF)

---

Prof. Dr. Gustavo Vinícius Bassi Lukasiewicz (Membro Interno – PPGEF)

---

Prof. Dra. Ana Claudia Nogueira Mulati (Membro Externo – UFPR)

A via original com as assinaturas encontra-se na secretaria do programa.

*Com muito amor dedico este trabalho à  
minha esposa Cleo e aos meus filhos  
Gustavo e Vitor pelo carinho, incentivo e  
compreensão em todos os momentos de  
ausência.*

## **Agradecimentos**

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço:

Primeiramente a Deus;

Aos meu pais, Jair Squissatto e Maria de Moura Squissatto pelo amor, carinho e incentivo em todos os momentos de minha vida;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Leandro Herculano, pela amizade, incentivo, motivação e sabedoria com que me guiou nesta trajetória;

Aos meus colegas de mestrado pela sabedoria compartilhada e aos valorosos momentos com que passamos juntos;

Ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Ensino de Física, Polo UTFPR, Câmpus Medianeira, pelos ensinamentos e cooperação;

À CAPES pelo apoio financeiro prestado ao programa de Pós-graduação em Ensino de Física, polo UTFPR, Câmpus Medianeira;

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio;

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização deste trabalho.

*Deus disse: "Faça-se a luz!" E a luz se fez.  
Deus viu que a luz era boa.  
Deus separou a luz das trevas.  
Gênesis, capítulo 1, versículos 3 ao 4.*

## Resumo

Esse trabalho propõe um produto educacional baseado na construção e aplicação de um fotômetro para o ensino da absorção da luz pela matéria. Tomando como referencial a Teoria da Aprendizagem significativa, é fornecida uma revisão sobre o espectro eletromagnético, bem como a interação da luz com a matéria pela Lei de Beer-Lambert, adotando a abordagem corpuscular e suas aplicações. Em seguida, é apresentada uma lista de materiais com suas descrições, sequência para montagem e programação. O tratamento e análise de dados obtidos pela experimentação desse dispositivo demonstraram que as amostras estudadas apresentam transmitância e absorvância distintas para diferentes comprimentos de onda nos picos de emissão do LED-RGB. Ao mesmo tempo, propiciou a abordagem dos conceitos de níveis de energia e de cores complementares. Diante disso, é ofertada uma sugestão de aplicação desse produto educacional por uma sequência de ensino em forma de um roteiro experimental, na qual o experimento deve ser realizado pelos alunos com a participação e intervenções do professor. A indicação da abordagem prática e interdisciplinar para o ensino dos conceitos teóricos da espectroscopia de absorção a nível de ensino médio, é recomendada como um recurso que pode ser usado em conjunto com professores de outras áreas. O presente trabalho apresenta ainda o relato da aplicação do produto educacional junto a duas turmas de ensino médio da rede pública do Estado do Paraná, cujos alunos envolvidos admitiram o apreço pela aplicação desse experimento, pois de acordo com a opinião dos discentes, a aplicação do produto educacional proporcionou uma intervenção inovadora em relação as tradicionais aulas. Por fim, conclui-se que o produto educacional proposto se apontou adequado para o ensino de tópicos da absorção da luz pela matéria, dos princípios e aplicações que envolvem essa interação. O baixo custo, a facilidade de construção e a portabilidade são características que tornam o produto educacional acessível para construção e aplicação do experimento em sala de aula.

**Palavras-chave:** fotômetro, ensino, luz, matéria, interdisciplinar, Lei de Beer.

MEDIANEIRA - PR  
Março de 2018



## Abstract

This work proposes an educational product based on the construction and application of a photometer for the teaching of the absorption of light by material. Taking as reference the Meaningful Theory of Learning. A review is provided on the electromagnetic spectrum as well as the interaction of light with material by the Beer-Lambert Law, adopting the corpuscular approach and its applications. Then a list of materials with their descriptions, sequence for assembly and programming is displayed. The treatment and analysis of the data obtained by the experimentation of this device demonstrated that the studied samples present different transmittance and absorbance for different wavelengths in the peaks of emission of LED-RGB. At the same time, it propitiated the approach of the concepts of energy levels and complementary colors. Therefore, a suggestion of the application of this educational product is offered through a teaching sequence in the form of an experimental script, in which the experiment must be carried out by the students with the participation and interventions of the teacher. The indication of the practical and interdisciplinary approach to teaching the theoretical concepts of absorption spectroscopy at the secondary level is indicated as a resource that can be used in conjunction with teachers from other areas. It also presents the report of the application of the educational product to two high school classes of the public network of the State of Paraná, in which the students involved admitted the appreciation for the application of this experiment, because according to their opinion, the application of the product educational intervention provided an innovative intervention in relation to traditional classes. Finally, it is concluded that the proposed educational product was suitable for the teaching of topics of the absorption of light by material, the principles and applications that involve this interaction. Low cost, ease of construction and portability are characteristics that make the educational product accessible for construction and application of the experiment and classroom.

**Keywords:** photometer, teaching, light, material, interdisciplinary, Beer law.

## Lista de figuras

<b>Figura 2.1:</b> Onda eletromagnética produzida por oscilações transversais entre os campos elétrico e magnético. ....	9
<b>Figura 2.2:</b> Espectro eletromagnético.....	10
<b>Figura 2.3:</b> Experimento da dupla fenda de Young. ....	13
<b>Figura 2.4:</b> Átomo de Rutherford-Bohr, com núcleo, orbitais e um decaimento eletrônico com emissão de energia.....	20
<b>Figura 2.5:</b> Representação da transmissão direta.....	21
<b>Figura 2.6:</b> Ilustração de uma cubeta de espessura $l$ , contendo uma concentração $C$ de analito sendo incidida por uma radiação monocromática de intensidade $I_0$ , refletindo a intensidade $R$ e atravessada pela intensidade $I$ da mesma radiação.....	23
<b>Figura 2.7:</b> Túnel cilíndrico de área de seção transversal $B$ formado por um feixe de fóton que atravessa um material semitransparente de espessura $l$ , descrevendo um túnel de área de seção reta $b$ . ....	24
<b>Figura 3.1:</b> Esquema básico para constituição do fotômetro contendo o LED como fonte de radiação, a cubeta como compartimento para amostra e o LDR como fotodetector.....	28
<b>Figura 3.2:</b> Ciclos de etapas para o funcionamento do fotômetro. ....	31
<b>Figura 3.3:</b> Espectro de emissão dos LEDs que compõe o módulo LED-RGB utilizado no fotômetro. ....	33
<b>Figura 3.4:</b> Tubo de vidro para coleta de sangue, com fundo redondo (13x75) mm. ....	34
<b>Figura 3.5:</b> Medidas referentes a dimensão do tarugo de nylon e os locais onde devem receber o tubo de coleta, o LED-RGB e o fotodetector LDR. ....	34
<b>Figura 3.6:</b> Representação esquemática das conexões entre a chave táctil e o módulo LED-RGB com a plataforma Arduino.....	37
<b>Figura 3.7:</b> Representação esquemática das conexões entre o módulo LED RGB, a chave táctil e o fotodetector LDR montado em um divisor de tensão com um resistor de resistência elétrica fixa.....	37
<b>Figura 3.8:</b> Representação esquemática das conexões entre o módulo LED RGB, a chave táctil, o fotodetector LDR e os módulos I2C e LCD com a plataforma arduino. Fonte: autoria própria. ....	38

<b>Figura 3.9:</b> (a) vista da parte inferior e (b) vista aberta da caixa de montagem de circuitos marca Patola e modelo PB-114.....	39
<b>Figura 3.10:</b> Suporte para o tubo de coleta e plataforma arduino fixados na tampa inferior da caixa de montagem. ....	39
<b>Figura 3.11:</b> Imagem do fotômetro desenvolvido para o produto educacional proposto nesse trabalho, com detalhe para a posição do módulo LCD, da chave táctil, do furo para entrada do tubo de coleta e os furos de conexão USB e da fonte de alimentação. ....	40
<b>Figura 4.1:</b> (a) transmitância e (b) absorbância para a amostra com a concentração de 22,8 mg/l do corante azul.....	46
<b>Figura 4.2:</b> (a) transmitância e (b) absorbância para a amostra com a concentração de 104,0 mg/l do corante vermelho.....	46
<b>Figura 4.3:</b> Gráficos da (a) transmitância e da (b) absorbância, para os comprimentos de onda 625 nm (círculos vermelhos), 525 nm (círculos verdes) e 470 nm (círculos azuis), em função da concentração do corante vermelho..	47
<b>Figura 4.4:</b> Gráficos da (a) transmitância e da (b) absorbância, para os comprimentos de onda de pico de emissão do LED RGB de 625 nm (círculos vermelhos), 525 nm (círculos verdes) e 470 nm (círculos azuis), em função da concentração do corante azul. ....	47
<b>Figura 4.5:</b> Amostras com diferentes concentrações do corante vermelho (INS 129). A concentração do corante aumenta da esquerda para direita.....	48
<b>Figura 4.6:</b> Amostras com diferentes concentrações do corante azul (INS133). A concentração do corante aumenta da esquerda para direita.....	49
<b>Figura 4.7:</b> (a) Transmitância (círculos azuis) para a luz azul do LED, com pico de emissão em 470 nm, em função da concentração de corante vermelho e ajuste com função exponencial (linha vermelha). (b) Absorbância (círculos azuis) para a luz azul do LED, com pico de emissão em 470 nm, em função da concentração de corante vermelho e ajuste com função linear (linha preta). ..	50
<b>Figura 4.8:</b> (a) Transmitância (círculos vermelhos) para a luz vermelha do LED, com pico de emissão em 625 nm, em função da concentração de corante azul e ajuste com função exponencial (linha preta). (b) Absorbância (círculos vermelhos) para a luz vermelha do LED, com pico de emissão em 625 nm, em função da concentração de corante azul e ajuste com função linear (linha preta).....	50

<b>Figura 4.9:</b> Absorbância para a luz verde do LED, com pico de emissão em 525 nm, (a) em função da concentração de corante azul e (b) em função da concentração do corante vermelho (b). Detalhe para as linhas retas e setas que demonstram a não linearidade e apontam o limite de linearidade da absorbância, respectivamente.....	51
<b>Figura 5.1:</b> Solução padrão de Fe <sup>2+</sup> (1g/l), solução padrão de ortofenantrolina (1 g/l) e soluções padrões de Fe-EDTA (1,1 mg/gota). .....	54
<b>Figura 9.1:</b> Medidas referentes a dimensão do tarugo de nylon e os locais onde devem receber o tubo de coleta, o LED-RGB e o fotodetector LDR. ....	68
<b>Figura 9.2:</b> Tarugo e arduino fixos na parte interna da tampa da caixa Patola. ....	68
<b>Figura 9.3:</b> Esquema de montagem para o circuito eletrônico do fotômetro. ..	69
<b>Figura 9.4:</b> Imagem do fotômetro concluído e em funcionamento.....	71

## Lista de tabelas

<b>Tabela 1:</b> Espectro visível e suas cores complementares.....	22
<b>Tabela 2:</b> Sugestão de como demonstrar a igualdade entre as equações (37) e (38) de forma acessível para alunos do ensino médio.....	25
<b>Tabela 3:</b> Descrição dos componentes utilizados com seus respectivos valores e quantidades para construção do fotômetro.....	42
<b>Tabela 4:</b> Valores obtidos para as intensidades de luz incidente e transmitida e valores calculados das transmitâncias e absorbâncias para diferentes concentrações do corante azul (INS133), para a cor vermelha do LED RGB (pico em 625 nm). .....	43
<b>Tabela 5:</b> Valores obtidos para as intensidades de luz incidente e transmitida e valores calculados das transmitâncias e absorbâncias para diferentes concentrações do corante azul (INS133), para a cor verde do LED RGB (pico em 525 nm). .....	44
<b>Tabela 6:</b> Valores obtidos para as intensidades de luz incidente e transmitida e valores calculados das transmitâncias e absorbâncias para diferentes concentrações do corante azul (INS133), para a cor azul do LED RGB (pico em 470 nm). .....	44
<b>Tabela 7:</b> Valores obtidos para as intensidades de luz incidente e transmitida e valores calculados das transmitâncias e absorbâncias para diferentes concentrações do corante vermelho (INS 129), para a cor vermelha do LED RGB (pico em 625 nm).....	44
<b>Tabela 8:</b> Valores obtidos para as intensidades de luz incidente e transmitida e valores calculados das transmitâncias e absorbâncias para diferentes concentrações do corante vermelho (INS 129), para a cor verde do LED RGB (pico em 525 nm). .....	45
<b>Tabela 9:</b> Valores obtidos para as intensidades de luz incidente e transmitida e valores calculados das transmitâncias e absorbâncias para diferentes concentrações do corante vermelho (INS 129), para a cor azul do LED RGB (pico em 470 nm). .....	45
<b>Tabela 10:</b> Intensidade inicial (água pura), intensidade final e razão entre as intensidade inicial e final, em função da quantidade de gotas da solução de Fe-EDTA, para o comprimento de onda de 470 nm (região do azul). .....	56

<b>Tabela 11:</b> Intensidade inicial (água pura), intensidade final e razão entre as intensidade inicial e final, em função da quantidade de gotas da solução de Fe-EDTA, para o comprimento de onda de 525 nm (região do verde). .....	56
<b>Tabela 12:</b> Intensidade inicial (água pura), intensidade final e razão entre as intensidade inicial e final, em função da quantidade de gotas da solução de Fe-EDTA, para o comprimento de onda de 625 nm (região do vermelho). .....	56
<b>Tabela 13:</b> Transmitância em função da concentração de Fe-EDTA para os três diferentes comprimentos de onda. ....	57
<b>Tabela 14:</b> Transmitância em função da concentração de Fe-EDTA para os três diferentes comprimentos de onda. ....	58

# Sumário

Resumo.....	viii
Abstract.....	ix
Lista de figuras.....	x
Lista de tabelas.....	xiii
1. Introdução.....	1
2. Referencial teórico.....	6
2.1. A aprendizagem significativa.....	6
2.2. A luz.....	8
2.3. A interação da luz com a matéria e a Lei de Beer-Lambert.....	22
3. Construção do fotômetro.....	28
3.1. Fotômetro.....	28
3.2. Princípio de funcionamento.....	30
3.3. Fonte de iluminação.....	31
3.4. Suporte para amostra.....	33
3.5. Sistema de fotodeteção.....	35
3.6. Sistema de controle e aquisição.....	35
3.7. Caixa de proteção.....	38
3.8. Programação.....	40
4. Resultados preliminares.....	43
5. Sugestão de aplicação do fotômetro.....	53
6. O caráter interdisciplinar do produto educacional.....	61
7. Relato da aplicação do produto educacional.....	62
8. Conclusão.....	64
9. Apêndice.....	65
Apêndice A: Programação do fotômetro.....	65
Apêndice B: Montagem e funcionamento do produto educacional.....	67
9.1.1. Materiais e ferramentas.....	67
9.1.2. Montagem.....	67
9.1.3. Funcionamento do fotômetro.....	70
Referências Bibliográficas.....	72

# 1. Introdução

As atividades experimentais no ensino de Física são de fundamental importância para o entendimento e compreensão dos fenômenos inerentes a essa ciência, visto que é pela experimentação que teorias são formuladas e validadas [1]. Logo, percebe-se que não é razoável dissociar a teoria da experimentação. Para melhor compreensão dos fenômenos físicos, o aluno do ensino médio precisa manipular materiais de experimentação, questionar, discutir com seus pares sobre o experimento, e, com a mediação do professor, inferir conclusões validas acerca do conteúdo estudado, buscando alcançar objetivos conceituais e procedimentais pré-estabelecidos [2]. Essa prática é promovida pelo papel motivador que a experimentação proporciona.

Nesse âmbito, o aluno tem a possibilidade de reconhecer em sua realidade, os fenômenos que estão sendo trabalhados de uma forma prática, estimulante e muitas vezes lúdica [2]. Na experimentação o aluno se depara com técnicas laboratoriais e com o método científico de maneira prazerosa e significativa, fazendo com esse indivíduo se aproprie desses conhecimentos expostos, lidando com conflitos e aprendendo a formular hipóteses, esquemas e relacionar as observações com equações matemáticas [2]. Ou melhor, as atividades experimentais, além de motivar o aluno, dão condições ao professor para a abordagem de uma nova metodologia em suplemento à metodologia clássica (aula expositiva e tradicional com o uso de quadro e giz), tornando a aprendizagem consistente e duradoura [2]. Nessa ação pedagógica o indivíduo envolve-se com conteúdo científico agindo conforme seus conhecimentos prévios, formulando respostas e reconfigurando-as pelo recebimento de informações dadas pelos livros e professor, discutindo com colegas e estudando o objeto até chegar ao conhecimento socialmente estruturado [3].

No entanto, percebe-se que os experimentos físicos são pouco explorados no ensino básico, devido ao despreparo do professor, pelo desestímulo do profissional causado pelos baixos salários, pela grande carga de trabalho em correções de provas, trabalhos, preparação de aulas e, ainda, pela carência de materiais para essa atividade [4]. Além disso, o despreparo do professor é um fator agravante para essa problemática enfrentada no ensino básico, pois de nada adiantaria a escola ter um laboratório completamente



estruturado se o professor não tem clareza do enfoque que deve ser dado ao experimento e quais procedimentos devem ser adotados, visto que na experimentação o aluno pode obter dados para verificar a validade da teoria ou apenas observar o método e o material experimentado, sem apropriar-se do entendimento do fenômeno estudado e da veracidade da teoria [2].

Além desses dois fatores apresentados, quando se faz uma análise do sistema de ensino adotado na maioria das escolas e colégios do Estado do Paraná, percebe-se que essas dificuldades aumentam, dado que o professor de Física do ensino médio possui apenas duas aulas semanais, de 50 minutos cada, junto aos alunos e, ainda, por vezes essas aulas são separadas por alguns dias da semana, dificultando uma sequência de experimentação.

Ainda, identifica-se que os laboratórios, em sua maioria, estão em estado de sucateamento, devido à falta de reposição de materiais e a carência de profissional laboratorista, e, em alguns casos, abrigam uma turma do ensino regular ou servem de depósito para materiais. Outro fator que contribui para esse sucateamento é falta de professores de Física efetivos na escola, pois, com a constante rotatividade de docentes na instituição, os materiais acabam sendo deteriorados ou extraviados.

Quando recorrido à literatura, percebe-se que essas dificuldades, se não as mesmas, mas muito semelhantes, transpassam décadas e se acentuam quando identificado que, apesar do grande número de atividades experimentais propostas ao longo dos anos pelo meio acadêmico (ensino superior), boa parte delas não chegam ao conhecimento do professor e conseqüentemente à sala de aula de ensino básico [4].

Diante desses fatores e pela carência no estudo prático da interação da radiação com a matéria, propõe-se uma sequência descritiva para a construção e aplicação de um fotômetro de três cores, a descrição dos materiais necessários e um roteiro de experimentação. A produção desse material vislumbra a possibilidade de propor aos professores de Física um dispositivo em que o aluno possa analisar quantitativamente e qualitativamente os efeitos causados pela a interação da luz visível com a matéria. Além disso, tem por objetivo, dar condições ferramentais para o docente, acerca do conteúdo da Física Moderna, para facilitar o entendimento dessa área, oferecendo ao mediador um mecanismo experimental para que o aluno não apenas admita como verdade

teórica aquelas descritas pelo professor e apresentadas nos livros didáticos acerca do conteúdo da Física. Essa proposta representa uma inovação nas atividades laboratoriais existentes no ambiente escolar a nível médio, pois o professor terá em mãos um método de experiência diferente daqueles propostos para a física clássica, já conhecidos. A proposta baseia-se em um produto educacional de custo relativamente baixo, cujos materiais necessários para sua construção possam ser encontrados facilmente em loja de materiais eletrônicos e/ou sites de compra e venda. Para esse produto educacional espera-se que:

- Tenha um uso simplificado, no qual o aluno possa manipulá-lo tranquilamente com o objetivo de estudo pré-estabelecido e que o professor tenha condições de fazer as intervenções conforme suas observações e necessidades;
- Possa ser aplicado fora da sala de aula, à medida que o professor tenha condições para acompanhar os alunos para a coleta de água em torneiras ou rios e água proveniente da chuva a fim de que sejam analisadas;
- Possa ser construído e replicado sem a necessidade de conhecimentos avançados de eletrônica ou programação;
- E por fim, que possa ser incluído na realização de atividades experimentais de outras áreas do conhecimento como a Química, Ciências Biológicas, Matemática e Eletrônica.

Nesse trabalho foi proposto um experimento que auxilie o processo de ensino e aprendizagem, possibilitando que o professor escolha e aborde os seguintes conteúdos: A natureza da luz; espectro eletromagnético; a luz interagindo com a matéria (fótons); níveis de energia; fenômenos de absorção eletrônica (elétrons de valência) e a Lei de Beer-Lambert.

Sob a acepção da Lei de Beer, destaca-se e pretende-se disponibilizar ao docente e ao discente do ensino básico os seguintes objetivos de aprendizagem:

- Explicar qualitativamente a relação entre a cor da solução e sua concentração;
- Descrever a relação entre a concentração da solução e a intensidade da luz que é absorvida/transmitida;
- Descrever a relação entre absorvância e concentração diante da Lei de Beer;

- Prever como a intensidade da luz absorvida/transmitida mudará com mudanças no tipo de solução, a concentração da solução, as dimensões do recipiente ou a fonte de luz.

Pretende-se oferecer ao aluno a compreensão e apropriação dos conhecimentos provenientes dessa área e ao mesmo tempo discorrer sobre o surgimento e evolução dos fotômetros, dos aparelhos de alarme, portas e lâmpadas automáticas, e aparelhos para cirurgias médicas. Assim, busca-se inferir ao aluno o apreço pela Ciência, pela descoberta e pela experimentação. Entende-se que o estudo e a compreensão desse campo da física moderna (a interação da radiação com a matéria) deveria ser conteúdo integrante no currículo da disciplina de física para alunos do ensino médio.

A aplicação do produto educacional juntamente com a sequência de ensino proposta, pretende aguçar a curiosidade pela Física relacionada à interação da luz com a matéria, através da fotometria. Quando se recorre à literatura, percebe-se que: poucos produtos educacionais como esse foram idealizados e construídos tendo um enfoque nos fenômenos físicos. Quando encontrados, esses materiais, em sua essência, não se preocupam em dar uma conotação educacional e de disponibilizar um aporte para professores do ensino básico que tenham o conhecimento mínimo em eletrônica e o contato com soluções químicas [5]; além de que, quando destinados ao ensino básico, o enfoque principal foi dado aos conceitos químicos em detrimento dos conceitos físicos [6 - 8].

Portanto, pretende-se nesse trabalho disponibilizar um produto educacional que contemple esses aspectos, tendo a Física e a interdisciplinaridade como centro da discussão.

Além disso, uma vez apresentada a lista de materiais e o método de construção, outros professores poderão utilizar o fotômetro e contribuir adicionando melhorias a esse. A descrição para a construção do experimento e o desenho para as conexões eletrônicas do aparelho serão disponibilizados no repositório online da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Câmpus Medianeira (UTFPR-MD) [9].

Neste trabalho, apresentamos também, a formulação corpuscular para a Lei de Beer, como uma alternativa para o ensino médio, sem a necessidade da apresentação da formulação diferencial encontrada em textos acadêmicos, e

uma sequência de ensino para aplicação em sala de aula, que poderá ser adaptada e/ou implementada diante da necessidade ou da conveniência observada pelo docente.

## **2. Referencial teórico**

### **2.1. A aprendizagem significativa**

A teoria da aprendizagem significativa é uma abordagem cognitivista da construção do conhecimento que propõe explicar como ocorre o processo de aprendizagem na mente humana [10]. Sob esse aspecto para o estudante a aprendizagem é compensatória quando ele consegue ampliar e reconfigurar ideias existentes em sua estrutura mental para descobrir e assim acessar novos conteúdos [11].

Nesse sentido, o educador, ao preparar suas aulas, deve levar em conta que o aluno traz consigo vários aprendizados quando chega à escola, provindos de seu ambiente familiar e social. Logo, é necessário considerar os conhecimentos prévios (ideias âncoras ou subsunçores) de mundo que esse aluno traz consigo e ampliar esse conhecimento com informações inerentes aos conteúdos escolares, ao professor e ao contexto social [3]. Segundo Ausubel, o estudante, cognitivamente, pode chegar, por suas experiências sociais, a teorias nas quais não foi treinado para isso [3].

Desse modo, apesar das teorias poderem conter conceitos válidos ou não cientificamente, é sempre muito importante que indivíduo construa uma tese, visto que diante do contexto social e escolar, com as novas informações recebidas ela chegará oficialmente ao conhecimento socialmente estruturado [3]. Para Moreira, em referência a Ausubel, o conhecimento prévio, o subsunçor presente na estrutura cognitiva do indivíduo que aprende, é a variável isolada mais importante para a aprendizagem significativa de novos conhecimentos, se assim fosse possível isolar as variáveis responsáveis pela aquisição de novas aprendizagens [12].

Nesse processo o professor deve ofertar uma questão a ser resolvida, como contraponto à prática pedagógica de aprendizagem mecânica, “decoreba”, em que o professor contextualiza o conteúdo ou elucida com esclarecimento ou explicações prévias, tirando o direito do aprendiz em tentar descobrir ou ter dúvidas. É quando o aluno tem dúvidas, a partir do questionamento, que ele tem motivação para solucioná-las, resultando na chamada mobilidade na aprendizagem, que leva, a partir de um contexto social, à formulação mental de

uma tese, uma resposta [12, 13]. Em seguida entra o papel do professor em fornecer informações para que o estudante, com sua conclusão estruturada e as informações provindas do professor (conteúdo), possa relacioná-las a ponto de reformular sua tese, obtendo a antítese.

Nesse sentido, identifica-se duas condições importantes para a aprendizagem significativa:

1. O material de aprendizagem, a aula, o experimento, vídeo, jogo ou aplicativos devem ter uma lógica implícita, ou seja, ser potencialmente significativo;
2. O aprendiz deve apresentar uma predisposição para aprender [12].

Sendo assim, a Aprendizagem Significativa Ausubeliana pode ser distribuída em quatro momentos:

- I. Diante da ação pedagógica de aprendizagem significativa, o aluno, ao seu modo e conhecimentos prévios, tenta e elabora o que para ele é pertinente ou apropriado para responder tal questionamento;
- II. O aprendiz recebe informações, conteúdos e consegue produzir a primeira síntese;
- III. O aluno recorre ao estudo individualizado, fator diferencial quando comparadas com outras teorias como o construtivismo e sociointeracionismo. Nesse momento, o aluno deve debruçar-se sobre o conteúdo e identificar o caminho a ser seguido, ampliando e reconfigurando o conhecimento;
- IV. Após passar pelos conhecimentos prévios, conhecimentos recebidos e estudos individualizado, o aluno pode finalmente realizar a apresentação coletiva.

A teoria da aprendizagem significativa representa uma ação pedagógica inovadora e motivadora, em que, segundo Ausubel, quanto mais um estudante sabe, quanto maior é o domínio de técnicas ou processos de aprendizagem, mais ele tem o desejo de buscar o aprendizado, deixando enfático que o conhecimento não tem fim e que é papel da escola/professor manter acesa a motivação pela busca do conhecimento [11].

É importante ressaltar que na aprendizagem significativa o aluno individualiza, mas não descontextualiza, o que possibilita com que ele caminhe adiante, sempre de maneira motivadora e motivante para si e para seus colegas.

Além disso, a partir da teoria da aprendizagem significativa tem-se a construção dos mapas conceituais (já conhecidos em nosso país) que trazem uma atual e diferenciada metodologia em que um conhecimento leva ao outro e ao outro, sendo indicados ou representados por diagramas ou mapeamentos [12].

Portanto, percebe-se que para que a aprendizagem seja significativa é necessário que o novo conhecimento interaja cognitivamente com o conhecimento prévio que o estudante traz consigo. É preciso que ele reflita sobre os novos conceitos e faça significado a partir do que ele já sabe. Nesse sentido, pela internalização do novo conhecimento, a partir do que o aluno já sabe, o professor atua como mediador entre o antigo e novo saber. Assim, o docente precisa compreender, interagir e corroborar com a mudança do conhecimento de senso comum para o conhecimento científico, e entender que esse processo não é imediato, pois ele acontece aos poucos, e cada estudante tem o seu tempo e esquema mentais para aprendizagem. Sobre isso, pensa-se que estratégias de aprendizagem podem ser uma ótima ideia para conseguir mediar esse novo conhecimento, visto que o aluno, a partir de um problema e de uma metodologia potencialmente significativa pode desenvolver o pensamento investigativo por si só, mas com a mediação do professor compreender a diferença do que ele sabe e o novo, tornando significativa a aprendizagem.

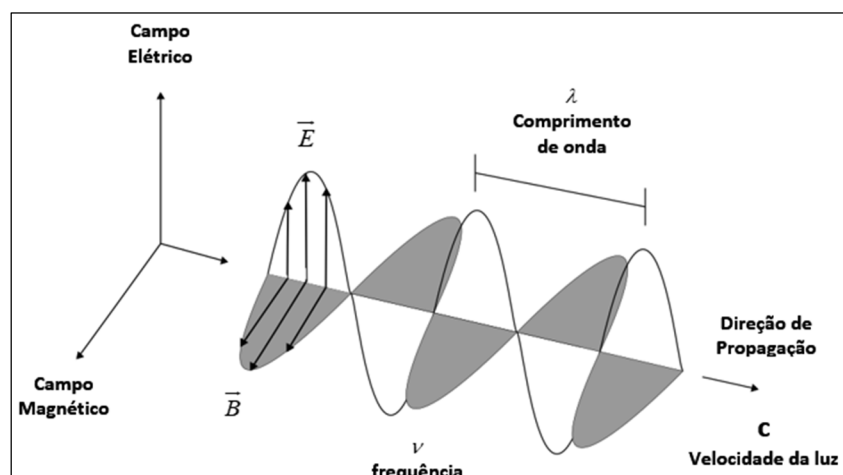
Nesse contexto, quando se trata da onda eletromagnética (luz), objeto de estudo desse trabalho, como novo conhecimento a ser atingido significativamente, recorre-se às ondas mecânicas como o subsunçor para a ancoragem dessa interação cognitiva, conforme pode ser observado na seção 2.2.

## **2.2. A luz**

Para a aplicação do experimento proposto nesse trabalho é importante que se tenha a compreensão do que é a luz. Para isso pode-se observar as ondas mecânicas e fazer um comparativo com elas, claro, que com os devidos cuidados. Essas se propagam em meios materiais, sólidos, líquidos ou gasosos em movimento oscilatório (ondulatório). Por outro lado, outros fenômenos da natureza como as ondas de rádio, raios-x e luz visível respeitam esse mesmo princípio ondulatório, ou seja, comportam-se com uma onda e são chamadas de

ondas eletromagnéticas ou radiação eletromagnética. Mas é importante lembrar que essa radiação é decorrente da oscilação de um campo elétrico e magnético e que, diferentemente das ondas mecânicas, podem se propagar em meios materiais e também no vácuo.

De acordo com a teoria de Maxwell, ondas eletromagnéticas são transversais, em que os campos elétricos ( $\vec{E}$ ) e magnéticos ( $\vec{B}$ ) oscilam perpendicularmente entre si e sempre estão em fase, se propagando no vácuo com velocidade  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$  (velocidade da luz) [14] (**Figura 2.1**). E por se tratar de uma onda, a radiação eletromagnética obedece aos fenômenos de: refração, onde a onda penetra no material e sofre um desvio na sua direção original; e reflexão, processo em que a onda incide no plano da superfície do material e volta sobre o mesmo ângulo de incidência [14]



**Figura 2.1:** Onda eletromagnética produzida por oscilações transversais entre os campos elétrico e magnético.

Fonte: autoria própria. [14]

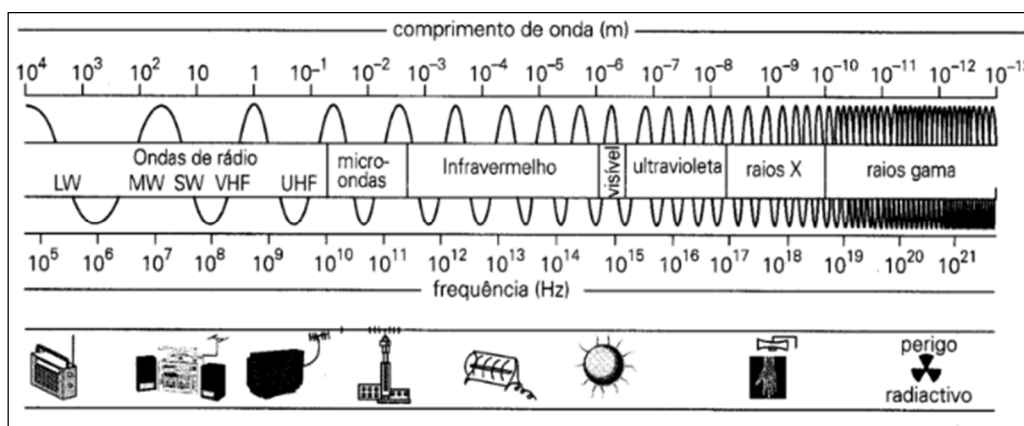
Sendo onda, percebe-se que a radiação eletromagnética pode ser classificada pelo seu comprimento de onda “ $\lambda$ ” ou por sua frequência “ $\nu$ ”, obedecendo a equação (1).

$$c = \nu \lambda \quad (1)$$

Na análise da radiação emitida pelo sol, identifica-se um conjunto de radiação eletromagnética que varia de altas frequências (grande concentração energética), como os raios gama, passando pelos raios-x, ultravioleta (UV), luz visível, infravermelho (IV), micro-ondas, até baixas frequências (baixa



concentração energética) como as ondas de rádio [15]. A esse intervalo de radiação dá-se o nome de espectro eletromagnético, conforme ilustrado na **Figura 2.2**.



**Figura 2.2:** Espectro eletromagnético.

Fonte: extraído da referência [14].

Observa-se nessa faixa do espectro eletromagnético, em um intervalo pequeno, a luz visível, assim chamada por ser capaz de sensibilizar a visão humana, com comprimento de ondas entre 400 nm e 730 nm, aproximadamente [15].

Ao verificar a interação dessa radiação com a matéria, pode-se classificar cada radiação como ionizante ou não ionizante. A radiação ionizante (altamente energética) é aquela que consegue arrancar elétrons dos átomos provocando principalmente o efeito da ionização molecular [16]. Por outro lado, as radiações intermediárias com média concentração energética (luz visível), quando interagem com uma molécula e/ou átomo, fazem com que elétrons absorvam parte da energia incidente, provocando a transição de um nível de menor energia para um nível de maior energia no átomo, a esse efeito dá se o nome de excitação eletrônica [17]. Nesse sentido, a radiação infravermelha também é absorvida pelas moléculas da matéria, mas por ter uma baixa concentração energética quando comparada com as radiações anteriores, apenas provoca deformações nas ligações químicas da molécula. E, por fim, com menores frequências e, conseqüentemente, menores energias, as radiações de micro-ondas e de frequência de rádio quando absorvidas pelas moléculas da matéria, apenas provocam um aumento de temperatura no material ou deslocamento das

cargas livres [17]. Fato que faz essas duas últimas faixas de radiações serem largamente utilizadas nas tecnologias de transmissão de rádios, televisores e fornos de micro-ondas.

Diante do exposto, a luz admite um comportamento dúbio, hora agindo como partícula ao interagir com a matéria, hora como onda ao se propagar e sofrer difração e interferência, mas por muito tempo se questionou qual seria de fato sua natureza, se era ela uma onda ou constituída de partículas [18].

No século XVII, duas correntes científicas foram defendidas para explicar a natureza da luz. O comportamento corpuscular, de Isaac Newton, e o comportamento ondulatório, de Christiaan Huygens.

Na segunda metade do século XVII, Newton defendeu que a luz branca era a mistura de todas as cores. Com as observações obtidas nos experimentos da incidência da luz em prismas triangulares, ele notou que a luz branca emitida pelo sol, quando incidente no prisma, era refratada e separada em um intervalo constituído por variadas cores dentre o violeta ao vermelho, o espectro de luz visível [19]. E quando realizado esse mesmo experimento com as cores do espectro da luz visível, ele percebeu que essas cores, mesmo sendo refratadas, refletidas, espalhadas, não sofriam modificações.

A partir de então, Newton chegou a duas conclusões: A luz solar (luz branca) deve ser o conjunto de cores que viajam no ar com a mesma velocidade; e que as cores diferentes dispersadas pelo prisma são as que formam a luz branca. Essas cores atravessam o prisma com velocidades diferentes e, portanto, refratadas com ângulos diferentes [19]. Em seus argumentos, Newton não tentou inferir o comportamento corpuscular para a natureza da luz, no entanto, por criticar firmemente o modelo ondulatório e ser um indivíduo reconhecido no meio científico, Newton passou a ser identificado como defensor do modelo corpuscular para a natureza da luz [19].

Na mesma época, alguns anos após os estudos de Newton com a luz e os prismas triangulares, a dúvida sobre a natureza da luz volta circular pelo meio científico. A segunda corrente para explicar a natureza da luz foi fortemente defendida por Christiaan Huygens, em 1690, quando ele publica o livro Tratado sobre a Luz, explicando que ela admitia características de refração, reflexão, propagação retilínea e de dupla refração da calcita (mineral que exhibe dupla imagem de objetos vistos através dele) [19]. Ou seja, ele afirmou que a luz se

comportava como ondas longitudinais e não periódicas, portanto, não caracterizadas por seu comprimento de onda e frequência [19]. Mas, para que esse tipo de onda se propagasse pelo espaço até chegar ao planeta, era necessário um meio material no qual ocorresse a vibração, então, admitia-se o éter, o fluído que envolvia todo o universo [19]. Mesmo sendo pressionado por Gottfried Wilhelm Leibniz, o trabalho de Huygens se ateve na tentativa de explicar o comportamento ondulatório da luz, sem se preocupar em teorizar sobre os efeitos das cores quando a luz branca era dispersada por um prisma ou por gotículas de água, como ocorria no fenômeno do arco-íris [19].

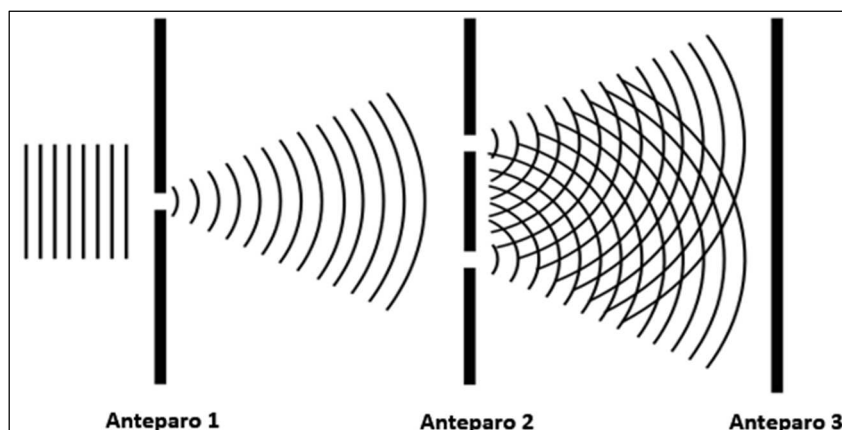
Todavia, é preciso deixar claro que o trabalho de Newton, segundo o qual a luz admitia comportamento corpuscular, mesmo explicando a reflexão e refração, falhava, pois não explicava os fenômenos de interferência e difração, que fazem aparecer zonas periódicas de claro-escuro quando experimentadas em fendas [20].

Percebe-se que a teoria para a natureza corpuscular de Newton não era suficiente para explicar os fenômenos da luz. Embora fosse amplamente aceita pela sociedade científica da época, foi preciso elaborar uma explicação ondulatória para os fenômenos de interferência e difração.

Para resolver esse problema foi preciso resgatar a natureza ondulatória da luz, proposta por Huygens. Nesse contexto, Thomas Young, em 1801, foi o primeiro físico a demonstrar esse comportamento [20]. Em sua experiência, ele usou um feixe de luz monocromático, um anteparo com uma fenda estreita, um anteparo com duas fendas estreitas e um anteparo para detecção da incidência da luz - todos alinhados a uma distância macroscópica.

Conforme apresentado na **Figura 2.3**, ele incidiu o feixe monocromático no primeiro anteparo e percebeu que esse feixe era difratado, como uma onda, pela primeira fenda e também pelas duas outras do segundo anteparo. A partir do segundo anteparo o feixe de luz sofria dupla difração e suas superposições determinavam o fenômeno de interferência no terceiro anteparo, com a formação de franjas claras e escuras, franjas de interferências, como ocorre nos fenômenos ondulatórios. Ademais, esse experimento permitiu-lhe, além de verificar o comportamento ondulatório da luz, identificar, com os máximos e mínimos produzidos pelas franjas de interferência, o comprimento de onda da

luz solar em aproximadamente 570 nm, bem próximo da máxima densidade espectral emitida pelo sol, em torno de 555 nm [21].



**Figura 2.3:** Experimento da dupla fenda de Young.

Fonte: autoria própria. [20]

Porém, assim como a natureza corpuscular da luz, proposta por Newton, não explicava a ocorrência da difração e interferência, a natureza ondulatória, então, resgatada pelo experimento de Young, não explicava o fenômeno de polarização da luz, pois era inferido à luz a propagação no mesmo sentido de vibração, ou seja, uma onda mecânica longitudinal, como ocorre com as ondas sonoras na atmosfera [21].

Assim, para que a luz fosse admitida como uma onda naquela época, seria necessário que ela se comportasse como uma onda transversal, em que o sentido de propagação fosse perpendicular ao de vibração.

James Clerk Maxwell, no meado do século XIX, reuniu essas equações fundamentais do eletromagnetismo e percebeu em uma delas a ausência de um termo, que quando inserido, permitiu-lhe demonstrar que a oscilação dos campos elétricos e magnéticos satisfazem a equação de onda e que se propagam na velocidade da luz [20, 21]. Com essa conclusão, Maxwell associou a luz branca (visível) emitida pelo sol, como um caso particular desses campos elétricos e magnético e que é perceptível pelo olho humano [21].

A equação identificada por Maxwell trata-se da Lei de Ampère dada pela equação (2):

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i. \quad (2)$$

Sentença matemática na qual Ampère mostrou que campos magnéticos podem ser gerados por corrente elétrica. A partir disso, Maxwell percebeu nela a falta de um termo referente à dimensão da constante de permeabilidade magnética “ $\mu_0$ ” vezes a corrente de deslocamento “ $i_d$ ” conforme equação (3):

$$i_d = \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int \vec{E} \cdot d\vec{A}. \quad (3)$$

Resultando em:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i + \mu_0 i_d, \quad (4)$$

ou

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int \vec{E} \cdot d\vec{A}. \quad (5)$$

Pode-se dizer que a Lei de Ampère-Maxwell implica que um campo magnético pode ser gerado por correntes elétricas, conforme já havia sido apresentado por Ampère, e por campos elétricos que variam no tempo, que é a correção proposta por Maxwell.

Para melhor entendimento, apresenta-se, a seguir, as equações de Maxwell no seu formalismo em integral:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{1}{\epsilon_0} q \quad (\text{Lei de Gauss}), \quad (6)$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (\text{Lei de Gauss para o magnetismo}), \quad (7)$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (\text{Lei de Faraday}), \quad (8)$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int \vec{E} \cdot d\vec{A} \quad (\text{Lei de Ampère - Maxwell}). \quad (9)$$

Percebe-se, então, que esse termo extra fornece a constante, “ $\mu_0 \epsilon_0$ ”, resultado da multiplicação da constante magnética (permeabilidade magnética) pela constante elétrica (permissividade do vácuo). Tal que o produto entre essas constantes equivale a:

$$\mu_0 \epsilon_0 = \frac{1}{c^2}. \quad (10)$$

No qual,  $c \cong 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$  (velocidade da luz no vácuo).

Além da forma integral, pode-se apresentar as equações de Maxwell na forma diferencial, cuja a passagem não será demonstrada aqui, mas é importante observar a sentença dada pela equação (11).

$$\vec{\nabla} = \hat{i} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{k} \frac{\partial}{\partial z}, \quad (11)$$

em que  $\vec{\nabla}$ , é um operador diferencial do cálculo vetorial.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{Lei de Gauss}), \quad (12)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{Lei de Gauss para o magnetismo}), \quad (13)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \quad (\text{Lei de Faraday}), \quad (14)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} \quad (\text{Lei de Ampère – Maxwell}). \quad (15)$$

Onde o fator “ $\rho$ ” é chamado de densidade de carga e “ $\vec{J}$ ” a densidade de corrente elétrica.

Considerando as equações de Maxwell para  $\rho = 0$  e  $\vec{J} = 0$  (espaço livre - vácuo) as equações tornam-se:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (\text{Lei de Gauss}), \quad (16)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{Lei de Gauss para o magnetismo}), \quad (17)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B} \quad (\text{Lei de Faraday}), \quad (18)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} \quad (\text{Lei de Ampère – Maxwell}). \quad (19)$$

Agora, aplicando o rotacional na equação (18), tem-se:

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{B}). \quad (20)$$

Substituindo a equação (19) na equação (20), obtém-se:

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E}. \quad (21)$$

Pela propriedade dos rotacionais:

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{V}) = \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{V}) - \vec{\nabla}^2 \vec{V}, \quad (22)$$

utilizando a equação (22), a equação (21) é reescrita da seguinte forma:

$$\vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \vec{\nabla}^2 \vec{E} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E}. \quad (23)$$

Nesse momento, substituindo a equação (16) na equação (23) o primeiro termo do lado esquerdo se anula, tal que:

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E} = 0. \quad (24)$$

Sendo assim, nota-se que a equação (24) tem características da equação de onda, dada pela equação (25):

$$\vec{\nabla}^2 \vec{F} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{F}}{\partial t^2}. \quad (25)$$

Se for admitido que:

$$\mu_0 \epsilon_0 = \frac{1}{c^2}, \quad (26)$$

em que:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \cong 3,0 \times 10^8 \text{ m/s}. \quad (27)$$

Sendo assim, Maxwell determinou matematicamente a velocidade da luz em termos das constantes eletromagnéticas. Ao mesmo tempo que campos elétricos obedecem a equação de onda eletromagnética, dada pela equação (28)

$$\vec{\nabla}^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}. \quad (28)$$

Todo esse tratamento matemático pode ser feito analogamente para o campo magnético de forma a obter a equação (29):

$$\vec{\nabla}^2 \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}. \quad (29)$$

Ao analisar as equações de Maxwell, identifica-se na equação (18), que ao variar um campo magnético em função do tempo isso provoca o surgimento de um campo elétrico. E pela equação (19), ao variar um campo elétrico em função do tempo isso provoca o surgimento de um campo magnético, provocando uma oscilação concomitante entre esses dois campos como representado na **Figura 2.1**.

Maxwell colaborou com a demonstração teórica para a determinação da natureza da luz, mas faltava a comprovação experimental. Então, em 1887, Heinrich Rudolf Hertz, baseando-se nas equações de Maxwell, construiu o experimento (oscilador) com duas esferas de metal, separadas por um pequeno espaço, ligadas em uma serpentina, uma bateria, uma chave e uma garrafa de Leyden e demonstra a existência de ondas eletromagnéticas. Hertz tinha provado com sua experimentação que as ondas eletromagnéticas podem viajar pelo espaço percorrendo longas distâncias. A partir de então, obteve-se a base tecnológica para o desenvolvimento das telecomunicações [18, 20].

Por hora estava decidido, a luz admitia a natureza ondulatória. No entanto, essa posição foi colocada em xeque quando a teoria clássica do eletromagnetismo apresentou falhas para explicar a emissão eletromagnética de um corpo negro [18]. Chamada de catástrofe do ultravioleta ou catástrofe de Rayleigh-Jeans ela ocorria quando a teoria clássica do eletromagnetismo previa uma emissão infinita de radiação pelo corpo negro em pequenos comprimentos de onda, discordando das observações experimentais [18]. Entretanto, no início do século XX, Max Planck propôs que o efeito produzido pela radiação de um corpo negro, não era regida pela definição clássica do eletromagnetismo de Maxwell e que poderia ser tratada em pequenos e discretos pacotes de energia proporcionais a frequência de onda, e chamou essa unidade de quantum [22], dada pela equação (30):

$$\Delta E = h \nu. \quad (30)$$



Em que  $\Delta E$  representa a energia de cada pequeno pacote que constitui a radiação,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ , a constante de Planck, e “ $\nu$ ” a frequência da onda eletromagnética, obtida pela razão entre a velocidade da luz ( $c$ ) e o comprimento de onda “ $\lambda$ ”.

Amparado pelo trabalho de Planck, acerca dos quanta de luz, Albert Einstein, em 1905, publica a hipótese da quantização da radiação eletromagnética pela qual, em certos processos, a luz comporta-se como pacotes concentrados de energia, chamados fótons, fornecendo a explicação para o efeito fotoelétrico<sup>1</sup> [24].

O efeito fotoelétrico se caracteriza pelo fenômeno no qual elétrons de uma placa metálica são arrancados por uma radiação eletromagnética de frequência suficientemente alta, como a radiação ultravioleta. Para isso, tem-se a frequência mínima, variável de metal para metal, para que os elétrons (fotoelétrons) sejam arrancados da placa metálica, chamada de frequência de corte ou limiar de frequência. Essa frequência óptica determina quando o efeito fotoelétrico começa a ocorrer, ou seja, abaixo do número estabelecido pela frequência de corte não há ocorrência desse fenômeno, mesmo que a intensidade luminosa incidente no material aumente significativamente [18, 24].

A partir de então, a luz, que era considerada pela teoria clássica do eletromagnetismo como uma onda eletromagnética, volta a ser admitida também como partícula, que obedece ao comportamento de corpuscular [24].

Nesse sentido, sabe-se que, a luz, quando se propaga pelo espaço, se comporta como onda (como pode ser percebido no experimento da dupla fenda) e quando interage com a matéria apresenta comportamento corpuscular (como observado no efeito fotoelétrico).

Diante da quantização da radiação eletromagnética proposta por Einstein e do experimento da dupla fenda de Young, Louis-Victor de Broglie estende a característica dual da luz para a matéria, ou seja, mostra que matéria, na escala atômica, pode apresentar comportamento dual. Em sua tese de doutorado, De Broglie propõe que partículas também têm comportamento ondulatório, a onda de matéria, e se elétrons forem submetidos à experiência da dupla fenda de

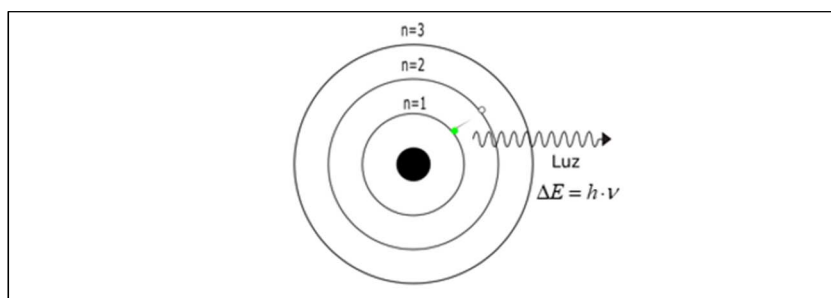
---

<sup>1</sup> Leia sobre o efeito fotoelétrico no artigo “Uma aula sobre o efeito fotoelétrico no desenvolvimento de competências e habilidades” [24].

Young, esses sofrerão interferência e difração como ocorre com as ondas e o feixe de luz [24].

No processo de interação da luz com a matéria, identifica-se que a energia da luz visível incidente no material pode ser absorvida, refletida ou transmitida. Quando absorvida pelos átomos que constitui a matéria, isso provoca modificações no comportamento do material, pois, quando um elétron de um átomo recebe energia de um fóton ele pode passar para um nível de menor para outro de maior energia chamado de nível excitado. No nível excitado, depois de um determinado tempo sem interagir com um fóton, ele volta, ou decai, para o estado de menor energia, emitindo outro fóton (luz) com energia igual a diferença entre o nível que se encontrava e o nível atual [18, 25 - 31].

Para um melhor entendimento, pode-se considerar o átomo de Rutherford-Bohr constituído de um núcleo maciço, de massa atômica ( $+Z$ ), onde está concentrada praticamente toda a massa do átomo – de carga elétrica positiva e representada por partículas chamadas prótons; e uma parte externa, chamada de eletrosfera, onde orbitam os elétrons, partículas de massa desprezível e de cargas negativas, em diferentes níveis. Segundo os apontamentos de Bohr, quando a radiação incide sobre a matéria interagindo com ela, o elétron pode trocar de uma órbita mais próxima do núcleo (nível de menor energia – estado fundamental) para uma órbita mais distante do núcleo (nível de maior energia – estado excitado) se ele receber energia de um fóton, calor ou de eletricidade [25]. Entretanto, o elétron excitado tende a retornar ao estado natural, ou seja, ao nível de menor energia. Quando isso acontece, a energia absorvida por ele anteriormente pode ser liberada sob forma de luz ou fóton [25], conforme representado pela **Figura 2.4**. A esses fenômenos de excitação e decaimento eletrônico, no qual o elétron passa de um orbital de menor energia para um de maior energia e vice-versa, dá-se o nome de transição eletrônica [26].



**Figura 2.4:** Átomo de Rutherford-Bohr, com núcleo, orbitais e um decaimento eletrônico com emissão de energia.

Fonte: autoria própria. [18]

Percebe-se que a energia emitida no decaimento eletrônico de um elétron, é dada pela variação da energia entre os orbitais de níveis excitados e fundamental. Essa emissão de energia é obtida pela equação de Planck, caracterizando a descontinuidade da energia recebida ou emitida pelo elétron na transição eletrônica, conforme dado pela a equação (30).

Porém, em alguns casos a luz pode não ser absorvida pelo material, mas, sim, refletida. Nessa situação a luz incide na superfície do material e reflete para o mesmo meio de propagação da luz, com o mesmo ângulo de incidência formado com a reta normal da superfície refletora [27]; podendo ocorrer de maneira regular (especular) ou difusa [28]. Na reflexão regular os raios luminosos refletidos pela superfície refletora se propagam paralelamente uns aos outros, como pode ser observado em um espelho plano e liso [28]. Enquanto na reflexão difusa os raios refletidos se propagam em variadas direções, devido ao formato irregular da superfície refletora, como pode ser observado em uma parede com textura ou em um vidro jateado [28].

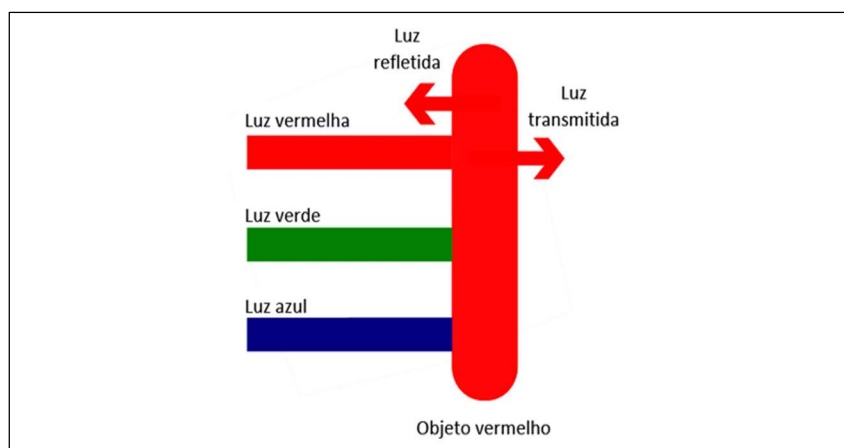
Nos casos em que a luz não seja absorvida ou refletida, ela será transmitida através do material, fenômeno no qual o objeto é atravessado pela luz sem que haja interação com os átomos constituintes da matéria, sendo caracterizada por três tipos: a transmissão direta, difusa e seletiva [28].

Na transmissão direta, a luz atravessa o material sem sofrer desvios em sua direção de propagação, fato percebido em materiais transparentes e lisos, como o vidro.

A transmissão difusa decorre da dispersão da luz quando essa interage com a matéria em formato bem específico, mas esse desvio pode ocorrer

também no processo denominado espalhamento da luz, em que a radiação incidente em uma direção é espalhada ou desviada para outras direções devido à presença de partículas muito pequenas e que constituem o material, as moléculas [18, 29, 30]. Para exemplificar, observa-se que a coloração azul do céu provém do maior índice de espalhamento para o comprimento de onda da luz azul quando a luz do Sol incide na atmosfera terrestre [30].

Na transmissão direta, ou especular parte da luz branca incidente é absorvida e parte atravessa o objeto colorido [29]. Para esse tipo de característica observa-se que, no exemplo a seguir (**Figura 2.5**), a luz branca, representada pelos feixes vermelho, verde e azul, incide em um objeto de cor vermelha, as cores verde e azul são absorvidas e somente a cor vermelha é transmitida e/ou refletida.



**Figura 2.5:** Representação da transmissão direta.

Fonte: autoria própria [26].

Por conseguinte, visualiza-se do outro lado do objeto a luz de coloração vermelha. No entanto, é importante ressaltar que as radiações verde e azul são absorvidas à medida que penetram na substância [31].

Esse fenômeno pode ser facilmente observado em ambientes que contenham vidraças coloridas. Em algumas igrejas onde as janelas ou telhados são constituídos por vidrarias coloridas, parte da luz solar (branca: vermelha + verde + azul) incidente nesse material é absorvida e parte é transmitida. A radiação que atravessa, ou seja, não interage com o material, é dada pelo comprimento de onda que define a coloração da vidraça e chamada de cor complementar. Desse modo, pode-se entender porque dada amostra de solução

química apresenta a cor vermelha, pois, quando a luz branca incide na amostra as luzes verde e azul são absorvidas pelo analito<sup>2</sup> e a cor vermelha é transmitida e/ou refletida [26]. Sob esse aspecto destaca-se a importância de aplicar as cores complementares da solução de um analito quando empregada a análise espectroscópica (colorimétrica) [26]. Para tanto, observa-se na **Tabela 1** as cores complementares referentes a alguns comprimentos de onda do espectro visível.

**Tabela 1:** Espectro visível e suas cores complementares.

Fonte: referência 26.

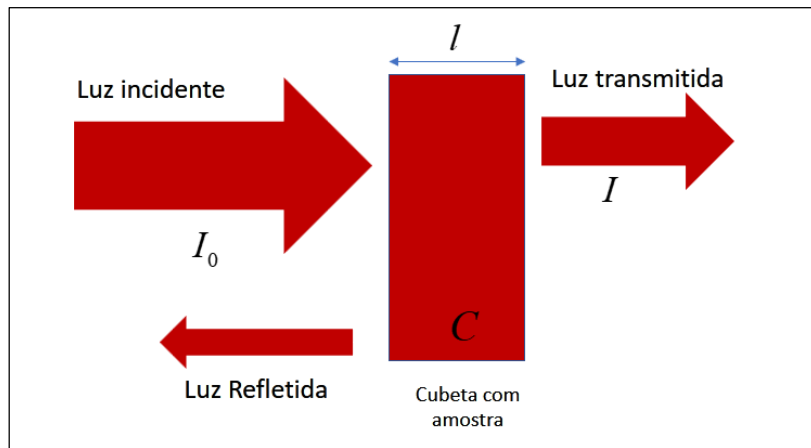
Região de comprimento de onda absorvida	Cor da Luz Absorvida	Cor complementar transmitida
400–435	Violeta	Amarela-esverdeada
435–480	Azul	Amarela
480–490	Azul-esverdeada	Laranja
490–500	Verde-azulada	Vermelha
500–560	Verde	Púrpura
560–580	Amarela-esverdeada	Violeta
580–595	Amarela	Azul
595–650	Laranja	Azul-esverdeada
650–750	Vermelha	Verde-azulada

A ocorrência sobre cores complementares poder ser explorada com o produto educacional proposto nesse trabalho por meio dos dados e gráficos obtido na experimentação. Além disso, a diferença da intensidade luminosa entre a luz emitida e transmitida é muito pequena, quanto a amostra possui a mesma coloração da radiação emitida.

### 2.3. A interação da luz com a matéria e a Lei de Beer-Lambert

Ao incidir em um material semitransparente, a luz pode ser refletida de volta ao meio de origem, pode ser transmitida através do meio sobre o qual ela incide, ou pode ser absorvida devido ao processo de excitação eletrônica [26], conforme representado na **Figura 2.6**.

<sup>2</sup> Os analitos são os componentes de uma amostra a ser determinados [26].

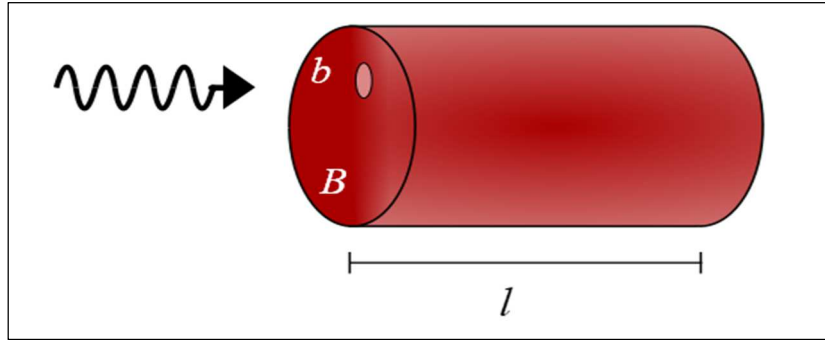


**Figura 2.6:** Ilustração de uma cubeta de espessura  $l$ , contendo uma concentração  $C$  de analito sendo incidida por uma radiação monocromática de intensidade  $I_0$ , refletindo a intensidade  $R$  e atravessada pela intensidade  $I$  da mesma radiação.

Fonte: autoria própria [26].

A descrição matemática da proporcionalidade entre as quantidades ou intensidade de luz que são transmitidas ou absorvidas pode ser obtida analisando-se a probabilidade de que um fóton incidente atravesse a amostra sem interagir com a mesma [32].

Para isso, deve-se considerar um feixe de luz com área de seção transversal  $B$  que se propaga em direção a um material semitransparente de espessura  $l$ . Pode-se supor que um fóton atravesse a amostra sem interagir com nenhuma partícula absorvedora (átomos, íons e moléculas), descrevendo um túnel de área de seção reta  $b$ , também chamada de área de seção de choque [32], conforme representado na **Figura 2.7**.



**Figura 2.7:** Túnel cilíndrico de área de seção transversal  $B$  formado por um feixe de fóton que atravessa um material semitransparente de espessura  $l$ , descrevendo um túnel de área de seção reta  $b$ .

Fonte: autoria própria [32].

A probabilidade de que uma partícula esteja localizada fora da região de área  $b$  é dada por:

$$p = 1 - \frac{b}{B}. \quad (31)$$

Por sua vez, a probabilidade de que  $N$  partículas estejam localizadas fora da região de área  $b$  é dada por:

$$P = p^N, \quad (32)$$

ou seja,

$$P = \left(1 - \frac{b}{B}\right)^N. \quad (33)$$

Para uma amostra homogênea, podemos definir a concentração das partículas como a razão entre o número de partículas por unidade de volume, ou seja:

$$C = \frac{N}{B l}. \quad (34)$$

Nesse caso, podemos reescrever o número de partículas em termos da área de seção reta, concentração e da espessura do material. Conforme descrito na equação (35).

$$N = B C l, \quad (35)$$

substituindo a equação (35) na equação (33), obtém-se:

$$P = \left(1 - \frac{b C l}{N}\right)^N. \quad (36)$$

Considerando um número muito grande de moléculas, ou seja  $N \rightarrow \infty$ , temos que:

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{b C l}{N}\right)^N, \quad (37)$$

e

$$P = e^{-b C l}. \quad (38)$$

O cálculo do limite, na equação (37), exige o conhecimento de cálculo diferencial integral, assunto esse que não é tratado no ensino médio. Assim, com o intuito de tornar a compreensão do resultado apresentado na equação (38) acessível para alunos do ensino médio, é sugerido ao professor que realize um cálculo manual ou com uma calculadora, demonstrando que para grandes valores de  $N$  as equações (37) e (38) são iguais.

Nesse contexto, A **Tabela 2** apresenta o cálculo das equações (37) e (38) considerando  $b C l = 1$ .

**Tabela 2:** Sugestão de como demonstrar a igualdade entre as equações (37) e (38) de forma acessível para alunos do ensino médio.

Fonte: autoria própria [32].

$N$	$(1 - 1/N)^N$	$e^{-1}$
1	0,0000	0,3679
10	0,3487	0,3679
100	0,3660	0,3679
1.000	0,3677	0,3679
10.000	0,3679	0,3679
100.000	0,3679	0,3679

Conforme apresentado na **Tabela 2**, para grandes valores de  $N$ , ou seja, para uma quantidade grande de moléculas absorvedoras presentes na amostra, as equações (37) e (38) convergem para valores iguais e constante. É necessário ressaltar que a equação (38) descreve a probabilidade de que as partículas absorvedoras não estejam presentes na região atravessada pelos



fótons, ou seja, ela descreve a probabilidade de que os fótons atravessem a amostra sem interagir com o material. Logo, a intensidade de luz transmitida é dada pelo produto da intensidade incidente com a probabilidade da não interação dos fótons com o material, conforme apresentado na equação (39).

$$I = I_0 P. \quad (39)$$

Logo, substituindo a equação (38) na equação (39), tem-se:

$$I = I_0 e^{-b C l}. \quad (40)$$

Definindo o chamado coeficiente de absorção óptica  $\beta$ , como:

$$\beta = b C, \quad (41)$$

obtem-se,

$$I = I_0 e^{-\beta l}. \quad (42)$$

A equação (42) é conhecida como Lei de Beer-Lambert e descreve a relação entre as intensidades de luz incidente e transmitida com propriedades do material sobre o qual a luz incide.

A razão entre a intensidade de luz transmitida e intensidade de luz incidente é definida como sendo a transmitância [28] e descrita matematicamente com auxílio da Lei de Beer, dada pela equação (43).

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-\beta l}, \quad (43)$$

ou em termos percentuais relativos a intensidade incidente,

$$T(\%) = \frac{I}{I_0} 100\%. \quad (44)$$

A transmitância percentual descreve a quantidade percentual de luz que o material transmite em relação a quantidade incidente. Por sua vez, a quantidade de luz que é absorvida pelo material, é definida como sendo a absorbância e é definida como sendo o produto entre o coeficiente de absorção óptica e a espessura do material que a luz atravessa, conforme equação (45):

$$A = \beta l. \quad (45)$$

Assim, substituindo a equação (45) na equação (43), temos que:

$$T = e^{-A}. \quad (46)$$

Calculando-se o logaritmo em ambos os lados da equação (46), obtem-se:

$$A = -\ln(T). \quad (47)$$

É necessário salientar que as equações (46) e (47) descrevem a relação entre a absorvância e a transmitância. Além disso, tanto a absorvância quanto a transmitância podem ser relacionadas com a concentração de partículas absorvedoras, presentes na amostra, conforme descrito pela Lei de Beer, ou seja:

$$A = b c l, \quad (48)$$

e

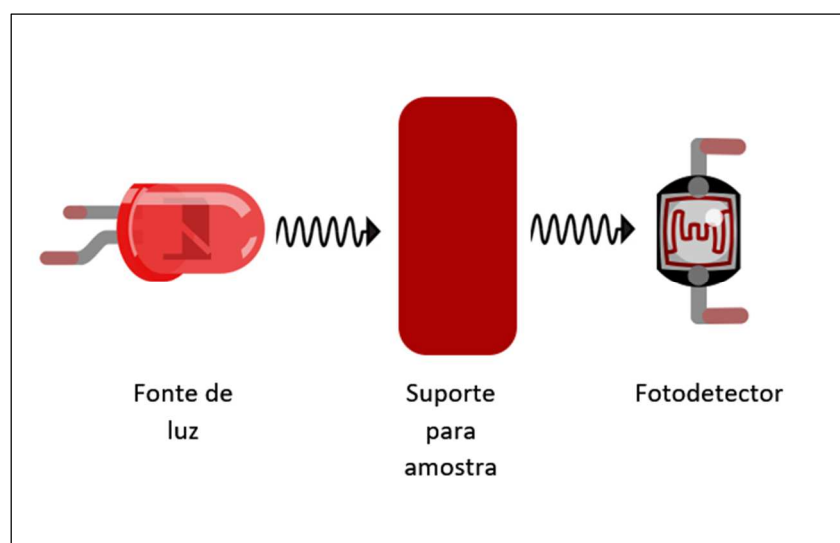
$$T = e^{-b c l}. \quad (49)$$

Observa-se então, que, por meio da Lei de Beer-Lambert, se pode relacionar a concentração de espécies absorvedoras com a quantidade de luz transmitida ou absorvida. Para determinar essa concentração, basta medir a razão entre a intensidade de luz incidente e a intensidade de luz transmitida.

### 3. Construção do fotômetro

#### 3.1. Fotômetro

A medida da intensidade de luz incidente e transmitida referida na seção anterior é realizada por um equipamento conhecido como fotômetro. Esse dispositivo é constituído basicamente por uma fonte de luz, um suporte para acondicionar a amostra que se queira estudar e um fotodetector [26], conforme representado na **Figura 3.1**.



**Figura 3.1:** Esquema básico para constituição do fotômetro contendo o LED como fonte de radiação, a cubeta como compartimento para amostra e o LDR como fotodetector. Fonte: autoria própria [26].

O fotodetector é a parte do fotômetro responsável por converter a quantidade de luz que incide em sua superfície em um sinal elétrico, que por sua vez é “registrado” por um sistema de aquisição eletrônico.

Com um fotômetro, a intensidade de luz transmitida é obtida colocando-se a amostra entre a fonte de luz e o fotodetector e realizando a leitura do valor da amplitude do sinal elétrico, fornecido pelo sistema de aquisição de dados.

Por sua vez, a intensidade de luz incidente, é obtida considerando que seu valor é igual a quantidade de luz que atravessa a amostra caso esta apresente uma transmitância de 100%. Para o caso de amostras líquidas, a medida da intensidade de luz incidente é obtida medindo-se a quantidade de luz que atravessa uma amostra que contém apenas o solvente, a essa amostra

atribui-se o nome de amostra branco ou amostra de referência. Nota-se que nesse caso, a quantidade de luz refletida ou espalhada é assumida ser muito menor do que a quantidade de luz transmitida ou absorvida, de modo que possa ser desprezada.

A partir de então, de posse dos valores da intensidade de luz incidente ( $I_0$ ) e transmitida ( $I$ ), é possível calcular a transmitância ( $T$ ) pela equação (43), na sequência, a absorbância ( $A$ ) com a equação (47). Conhecendo a concentração ( $C$ ) e a espessura da cubeta ( $l$ ) é possível determinar a seção de choque de absorção ( $b$ ) utilizando a equação (48).

Além do fotômetro, a transmitância ou absorbância de uma amostra pode ser determinada com um equipamento chamado espectrofotômetro, cujo princípio de funcionamento se assemelha ao do fotômetro. A diferença básica entre esses equipamentos reside no fato de que em um espectrofotômetro é possível medir a transmitância e a absorbância para diferentes comprimentos de onda da luz incidente, enquanto que um fotômetro, geralmente, apresenta luz quase monocromática, ou seja, com apenas um único comprimento de onda fixo [5, 26].

Sob esse aspecto, o ato de medir a quantidade de luz denomina-se fotometria ou espectrofotometria, quando se utiliza fotômetros ou espectrofotômetros, respectivamente e, ambas encontram diversas aplicações, dentre as quais, pode-se citar brevemente as aplicações em laboratórios de análise clínicas na determinação de proteínas totais, glicose, albumina, ureia e cloretos em amostras de soro sanguíneo [8]; em laboratórios de análises químicas para determinar a de concentração de cloro, ferro, alumínio e cromo, dentre outros metais e compostos [26], e em laboratórios de análises biológicas na determinação de capacidade antioxidante [33] e na determinação de minerais em alimentos [34].

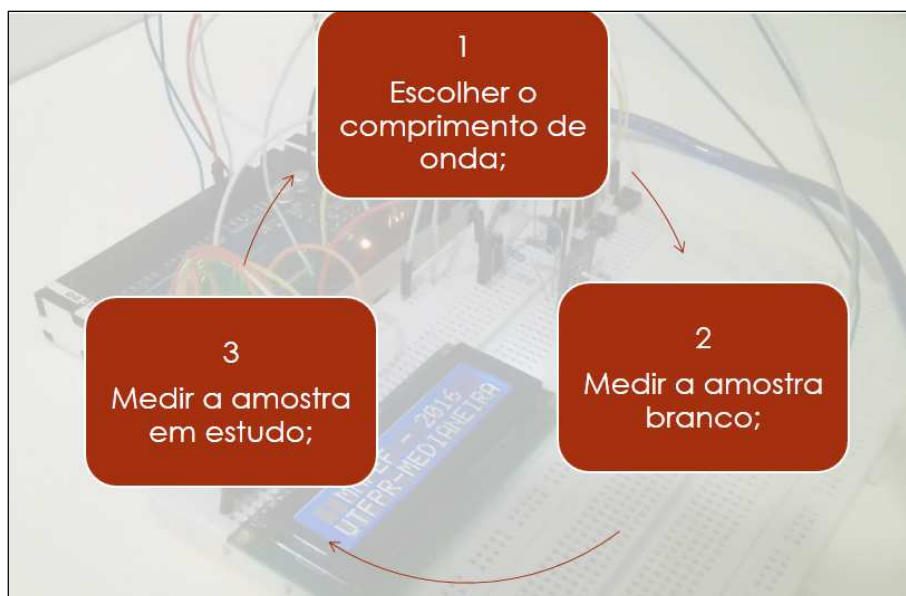
Nesse trabalho, o objetivo é construir e aplicar um fotômetro de três cores, sugerindo uma sequência de aplicação para auxiliar professores do ensino médio e também superior no ensino da interação da radiação da matéria com um enfoque interdisciplinar. Acredita-se que a proposta deste produto educacional servirá não somente para professores de física, mas também para docentes das áreas de química e biologia.

### 3.2. Princípio de funcionamento

Em síntese, para a construção do fotômetro ofertado nesse trabalho, deve-se pensar inicialmente em seu princípio de funcionamento, de que forma ele deve funcionar, para então fazer um planejamento para construção. Nessa etapa, percebe-se que este aparelho deve atender as seguintes ações:

- 1. Emitir, medir e apresentar no display a intensidade luminosa para determinado comprimento de onda:** por meio de uma ação mecânica, com o acionamento de um botão, o equipamento emite determinado comprimento de onda (vermelho, verde e o azul). Na sequência, a radiação atravessa o local reservado para o posicionamento da cubeta e incide no fotodetector, que mede a intensidade de luz recebida e apresenta esse valor no display LCD do fotômetro;
- 2. Medir a intensidade luminosa que atravessa a amostra branco e apresentar no display:** a luz acionada na primeira etapa, permanece ligada, atravessa a cubeta contendo a amostra branco/padrão (somente o solvente), é mensurada e a medida é apresentada no display LCD do fotômetro;
- 3. Medir a intensidade luminosa que atravessa a amostra em estudo e apresentar no display:** ainda ligada, neste momento, a luz atravessa a cubeta contendo a amostra com certa concentração de espécie química, é mensurada e a medida é apresentada no display LCD do fotômetro.

Na **Figura 3.2** é possível observar a apresentação do princípio de funcionamento do fotômetro baseado no ciclo das três etapas supracitadas.



**Figura 3.2:** Ciclos de etapas para o funcionamento do fotômetro.

Fonte: autoria própria [26].

Diante desses princípios, busca-se os componentes eletrônicos, estruturais e químicos para que a construção do fotômetro seja planejada. O planejamento para a construção desse equipamento proposto neste produto educacional, foi dividida em seis partes: fonte de iluminação; suporte para amostra; sistema de fotodeteção; sistema de controle e aquisição de cálculo; caixa de proteção e programação, como descrito nas próximas seções.

### **3.3. Fonte de iluminação**

Como fonte de iluminação foi escolhido um diodo emissor de luz (LED, do inglês *Light Emitting Diode*) com emissão em três regiões, também chamado de LED-RGB (do inglês *Red, Green e Blue*).

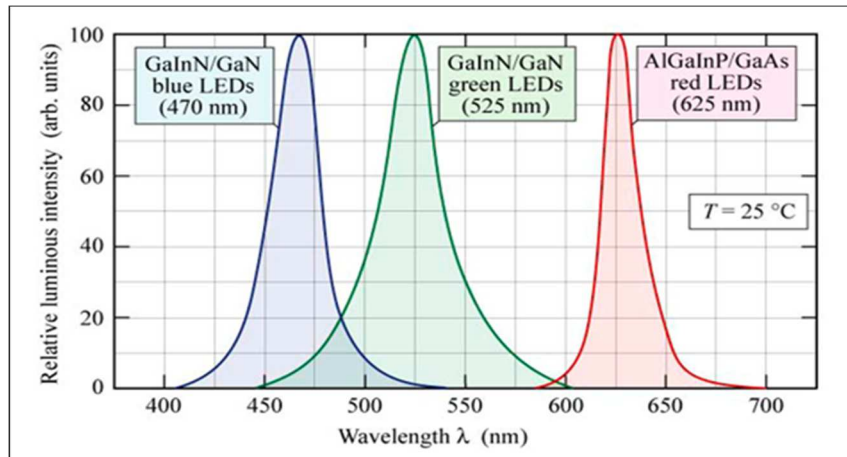
Neste trabalho, foi utilizado o módulo LED-RGB, que apresenta resistores conectados aos ânodos do LED-RGB (conexões positivas) e pinos de conexão compatíveis com a plataforma utilizada no sistema de controle e aquisição.

O LED é um dispositivo construído com material semicondutor que emite luz quando é atravessado por uma corrente elétrica [24, 35]. Esse componente é constituído por uma junção PN de semicondutores dopados (junção associada com elementos químicos diferentes, chamados de materiais dopantes

trivalentes, para os do tipo N e pentavalente para os do tipo P), pelo cátodo (“perna” menor do LED), e pelo ânodo (“perna” maior do LED), e é envolvido por uma proteção de epóxi, que pode ser colorido para enfatizar a cor do LED, porém não determinante para a cor de luz emitida [35]. Seu funcionamento é baseado no fato de se tornar condutivo quando é submetido a uma tensão acima da tensão limite (tensão oferecida pela barreira de potencial criada na junção PN), forçando os elétrons do tipo N a se combinarem com as lacunas do tipo P. Quando isso ocorre é liberada energia em forma de luz (o fóton) provocando a eletroluminescência [35, 36]. Esse fenômeno pode ocorrer na cor vermelha, amarela, verde, azul ou, ainda, não emitir luz visível e sim a radiação infravermelha ou ultravioleta.

A escolha do LED para a fonte de luz deve-se ao fato de que são componentes que emitem luz estabelecida entre uma faixa bem estreita do espectro visível [5], como as cores vermelha (620–750 nm), verde (495–570 nm) e azul (450–495 nm). Por apresentarem variadas cores, a sua utilização é mais conveniente que o uso de uma lâmpada que emite luz branca. Além disso, consomem menos energia elétrica; são pequenos; emitem luz mais rapidamente do que uma lâmpada com filamento de tungstênio; apresentam alta eficiência luminosa, com potência aproximadamente cinco vezes superior às lâmpadas halógenas; possuem alta resistência a vibração e impacto; na emissão de luz visível, não emitem radiação ultravioleta e nem infravermelha; não possuem metais pesados como o mercúrio usado nas lâmpadas; precisam de tensões menores para funcionar; funcionam em corrente contínua; proporcionam maior vida útil (até 50000 horas); não aquecem e apresentam alta resistência a ciclos de comutação (liga/desliga). Isso simplifica o processo de construção e dá mais robustez ao fotômetro [5, 35].

No entanto, é importante esclarecer que, quando se faz referência às “cores” ou à escolhas dos comprimentos de ondas, considera-se o pico de emissão dos LEDs que compõe o módulo LED-RGB, pois é sabido que o LED não possui luz monocromática e sim uma distribuição, conforme apresentado na **Figura 3.3.**



**Figura 3.3:** Espectro de emissão dos LEDs que compõe o módulo LED-RGB utilizado no fotômetro.

Fonte: modificado da referência [37].

### 3.4. Suporte para amostra

Uma das grandes vantagens do fotômetro desenvolvido nesse produto educacional é o suporte para a amostra. A maioria dos trabalhos, encontrados na literatura, que sugerem a construção de fotômetros, propõe a utilização de suportes de amostras que utilizam cubetas de vidro ou quartzo, que possuem um alto custo. Embora exista a possibilidade de serem utilizadas cubetas de acrílico, essas são difíceis de serem encontradas e compradas em pequenas quantidades, o que pode elevar o custo do fotômetro.

No presente caso, optou-se por um suporte para amostras que possibilite a utilização de tubos de coleta de sangue, como uma “cubeta” para conter as amostras a serem estudadas. Além de ter um custo reduzido quando comparado a cubetas comerciais, esses tubos podem ser encontrados à venda ou serem doados por qualquer laboratório de análises clínicas. É importante mencionar aqui que foram utilizados tubos novos. A **Figura 3.4** apresenta uma imagem desse tubo.

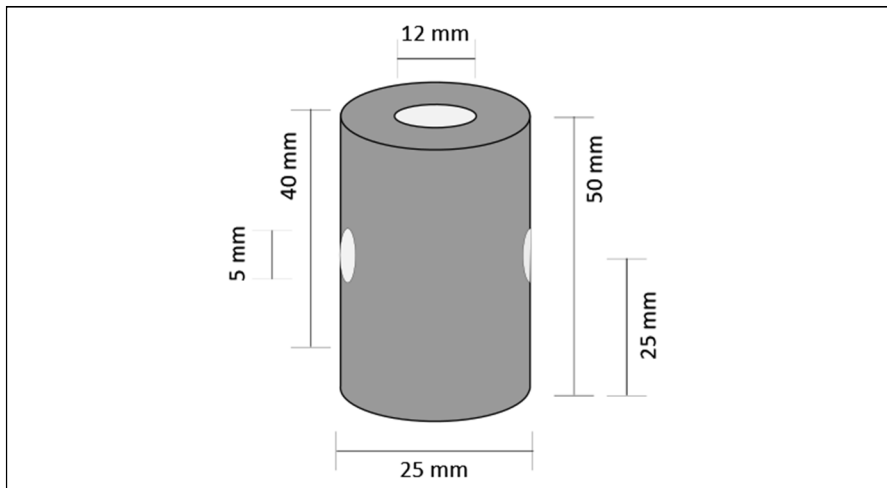




**Figura 3.4:** Tubo de vidro para coleta de sangue, com fundo redondo (13x75) mm.

Fonte: arquivo pessoal do autor [26].

Para a construção do suporte para cubetas, foi utilizado um tarugo de nylon (poliamida) com diâmetro externo de 25 mm e comprimento de 50 mm. O tarugo de nylon foi perfurado ao longo de seu comprimento por 40 mm com uma broca de 12 mm de diâmetro, de modo a providenciar um encaixe sem folga, para os tubos que serviriam como cubetas. A **Figura 3.5** mostra uma representação desse suporte com as respectivas medidas.



**Figura 3.5:** Medidas referentes a dimensão do tarugo de nylon e os locais onde devem receber o tubo de coleta, o LED-RGB e o fotodetector LDR.

Fonte: autoria própria [26].

De modo a acondicionar a fonte de luz (LED-RGB) e o fotodetector (LDR), o suporte para cubetas foi perfurado ao longo da direção transversal, com uma broca de 5 mm de diâmetro. Desse modo, fonte e fotodetector foram colocados

em lados opostos do suporte. Foi observado que esse tipo de suporte impediu a entrada de luz espúria vindo do ambiente externo, o que certamente poderia ocasionar erros na medida da quantidade de luz transmitida.

Devido ao formato circular do tubo de coleta de sangue, quando utilizado como cubeta, esse funciona como uma lente convergente para a fonte de luz (LED), focalizando toda a luz que emerge da amostra para a área do fotodetector, propiciando um aumento significativo da sensibilidade do fotômetro. A escolha do tubo de coleta de sangue e do tipo de suporte não só facilitou a construção do equipamento como também proporcionou uma redução significativa nos custos de produção.

### **3.5. Sistema de fotodeteção**

A função do fotodetector é converter a quantidade de luz que atinge a sua superfície em um sinal elétrico que pode ser interpretado pelo sistema de aquisição.

Devido ao seu baixo custo, a facilidade de ser encontrado e o tipo de aplicação, optou-se pela utilização de um resistor dependente da luz, também conhecido como LDR (do inglês *Light Dependent Resistor*). Como o próprio nome diz, o LDR é um resistor (componente elétrico) cuja resistência elétrica é inversamente proporcional à quantidade de luz que atinge sua superfície. O LDR é constituído por um material semicondutor que, quando a luz o atinge, parte dos elétrons são liberados para serem conduzidos, o que melhora a condutividade elétrica do material e diminui a resistência elétrica. A explicação para o funcionamento deste componente elétrico foi dada por Albert Einstein, na explicação do fenômeno conhecido como efeito fotoelétrico [24]. No fotômetro proposto, foi utilizado um LDR de 5 mm de diâmetro, conectado ao sistema de aquisição, por um divisor de tensão com um resistor fixo.

### **3.6. Sistema de controle e aquisição**

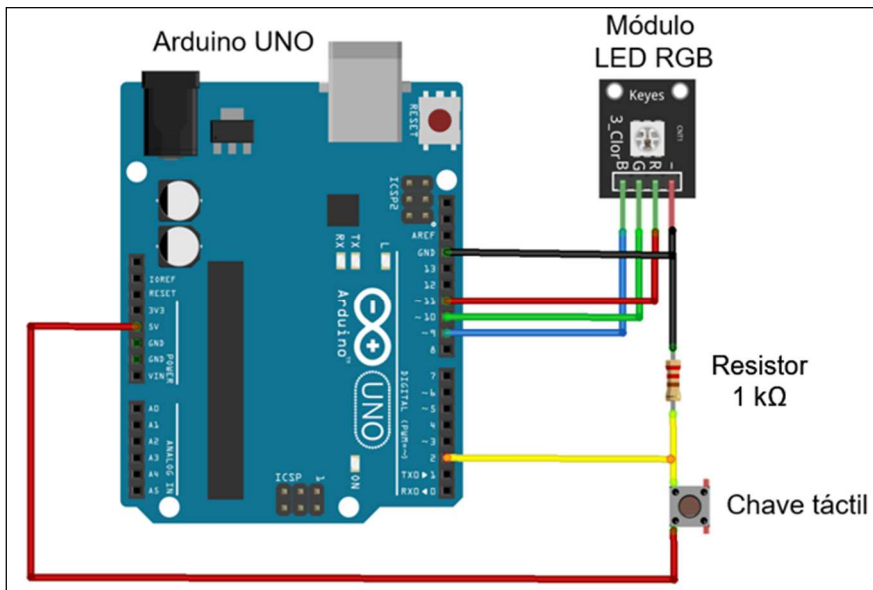
A função do sistema de controle e aquisição é controlar a fonte de iluminação, provendo energia necessária e escolha do comprimento de onda e interpretar o sinal elétrico advindo do fotodetector, apresentando-o para o usuário.

Com o objetivo de facilitar a construção e diminuir os custos de produção, optou-se pela utilização da plataforma Arduino para a implementação do sistema de controle e aquisição. A plataforma Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica, de hardware e software livre. A programação desta plataforma assemelha-se à linguagem de programação C (com pequenas discrepâncias). A programação foi feita conectando-se o arduino a um computador pessoal, por meio da IDE (do inglês *Integrated Development Environment*) [38]. Essa interface permite ao usuário escrever uma lista de comandos, conhecidos como *sketch*, para que sejam executados pela plataforma. Após compilado, o *sketch* é automaticamente gravado no arduino. A partir desse momento, o computador pode ser desconectado, bastando manter apenas uma fonte de alimentação de 9-12V para que a plataforma continue a executar os comandos escritos no *sketch* [38].

Para o fotômetro desenvolvido nesse produto educacional, optou-se por utilizar a plataforma Arduino modelo UNO, que possui 14 portas digitais, 6 portas de entrada analógica, uma porta de 5 V e duas portas de entrada comum (GND, do inglês *Ground*). Os conversores analógicos-digitais desse modelo de placa são de 10 bits, isso faz com que os valores lidos numa porta analógica variem de 0 a 1023, representando 0 e 5 volts respectivamente. A plataforma arduino UNO oferece grande vantagens na prototipagem, e conseqüentemente na estruturação do fotômetro, pois é compacta, pode ser encontrada em lojas de componentes eletrônicos ou em sites de internet e é economicamente vantajosa.

O controle de seleção e escolha do comprimento de onda do LED-RGB, foi realizado utilizando uma única chave táctil, conectada à porta digital 2 do Arduino. Isso possibilita diminuir o número de conexões, simplifica a utilização e diminui custos. Os pinos dos ânodos do módulo LED-RGB, vermelho, verde e azul, foram conectados às portas digitais 11, 10 e 9, respectivamente.

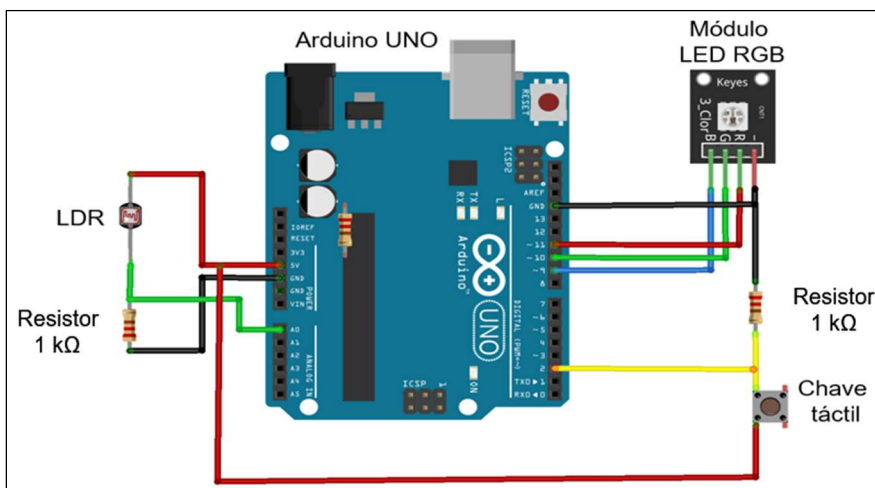
O esquema da conexão entre a chave táctil e o módulo LED-RGB com a plataforma arduino está representado na **Figura 3.6**.



**Figura 3.6:** Representação esquemática das conexões entre a chave táctil e o módulo LED-RGB com a plataforma Arduino.

Fonte: autoria própria [26].

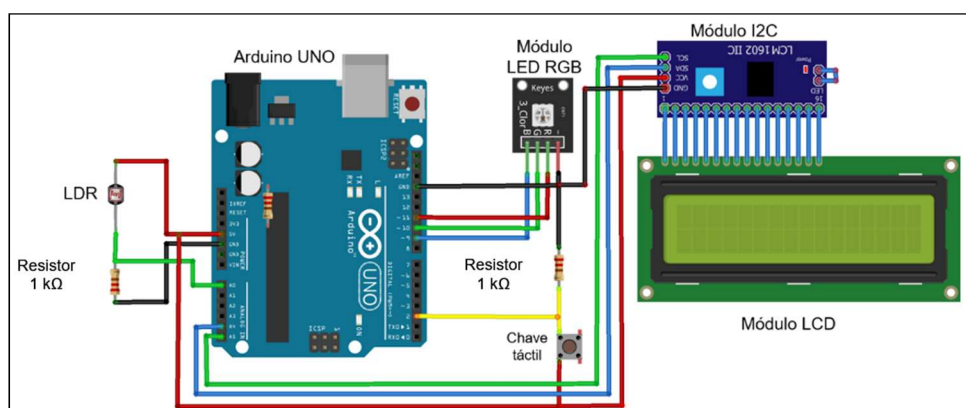
A leitura do sinal elétrico, decorrente da intensidade de luz no LDR, foi realizada em um divisor de tensão formado pelo LDR com um resistor de resistência elétrica fixa de 1 kΩ. No divisor de tensão é aplicada uma tensão de 5 volts proveniente da porta 5 V do arduino. A leitura da queda de tensão no LDR foi feita conectando-se a porta A0 do arduino na ligação entre o resistor fixo e o LDR. A **Figura 3.7** apresenta o esquema de conexão entre o LDR e o arduino.



**Figura 3.7:** Representação esquemática das conexões entre o módulo LED RGB, a chave táctil e o fotodetector LDR montado em um divisor de tensão com um resistor de resistência elétrica fixa.

Fonte: autoria própria [26].

Para apresentar o resultado da leitura da intensidade da luz transmitida ao usuário, foi utilizado um módulo LCD 16x02 (do inglês Liquid Crystal Display), que apresenta uma matriz de caracteres de 16 colunas por 2 linhas. Para simplificar a programação e diminuir o número de conexões, optou-se por utilizar uma interface I2C de comunicação serial entre o módulo LCD e o arduino. A conexão entre o módulo I2C e a plataforma arduino foi realizada conectando as portas A4 e A5 aos pinos SDA e SCL, respectivamente e os pinos GND e VCC às portas GND e a porta 5 V, respectivamente, conforme mostrado na **Figura 3.8**.



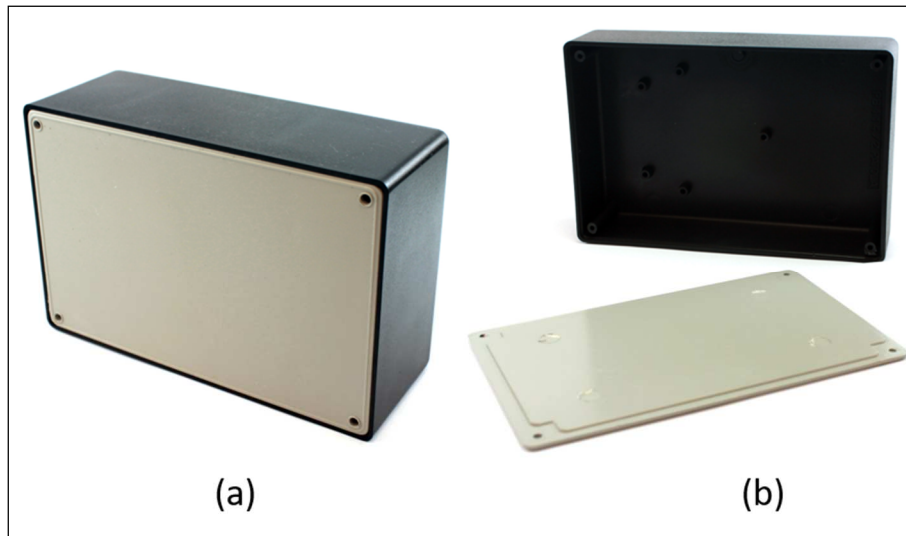
**Figura 3.8:** Representação esquemática das conexões entre o módulo LED RGB, a chave táctil, o fotodetector LDR e os módulos I2C e LCD com a plataforma arduino. Fonte: autoria própria [26].

Além dos componentes descritos anteriormente, é necessária a utilização de uma fonte de alimentação para fornecimento de energia a uma tensão de entrada de 127/220VAC 60/50Hz e saída de 9V ou 12V, com intensidade de corrente de 1A. Esse tipo de fonte tem um custo baixo (menos de R\$20,00) e pode ser encontrada em lojas de componentes eletrônicos, lojas de instalação de alarmes residenciais e som automotivos, presente na grande maioria das cidades e em sites de compras e vendas.

### 3.7. Caixa de proteção

Com a finalidade de proteger todos os componentes, aumentar a praticidade e robustez do sistema, o fotômetro foi montado em uma caixa de polímero ABS, da marca Patola, modelo PB-114. Esta caixa possui 55 mm de altura, 97 mm de largura e 148 mm de comprimento, é composta por uma caixa

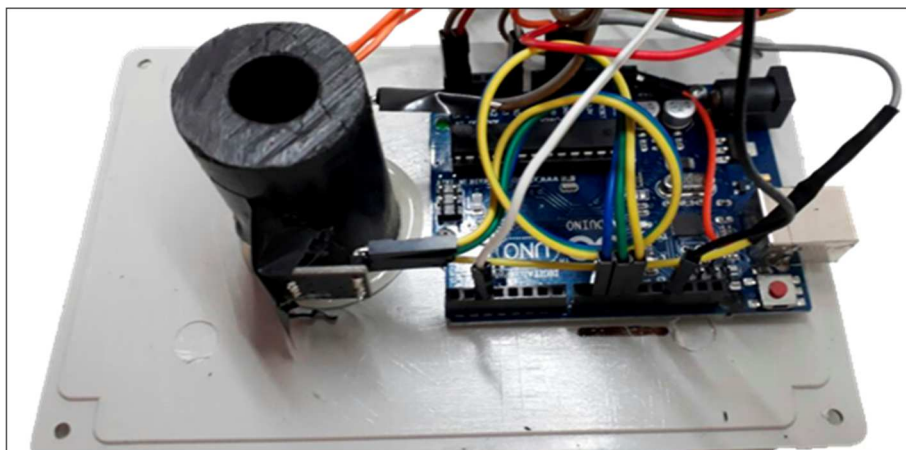
com abertura inferior que pode ser fechada com auxílio de parafusos, conforme mostrado na imagem da **Figura 3.9**.



**Figura 3.9:** (a) vista da parte inferior e (b) vista aberta da caixa de montagem de circuitos marca Patola e modelo PB-114.

Fonte: arquivo pessoal do autor [26].

Para montagem do equipamento, a plataforma arduino e o suporte para cubetas foram fixadas, com auxílio de cola quente, na tampa inferior da caixa de montagem, conforme mostrado na **Figura 3.10**.



**Figura 3.10:** Suporte para o tubo de coleta e plataforma arduino fixados na tampa inferior da caixa de montagem.

Fonte: arquivo pessoal do autor [26].

A chave tátil, o módulo LCD e a entrada para o suporte de cubetas, foram colocados na parte superior da caixa de montagem. Para isso foi necessário furar essa parte da caixa de modo a prover o devido encaixe e fixação desses componentes com auxílio de cola quente. Além disso, foram realizados dois furos na lateral (menor) da caixa, para possibilitar a ligação entre a fonte de alimentação e o pino de conexão tipo P4 da plataforma arduino e para a conexão USB com o PC para inserir a programação. A **Figura 3.11** apresenta a imagem do fotômetro com detalhe para a chave tátil, o módulo LCD, o furo para entrada da cubeta, localizados na parte superior, os furos para conexão USB e o furo para conexão entre a fonte de alimentação e a plataforma arduino.



**Figura 3.11:** Imagem do fotômetro desenvolvido para o produto educacional proposto nesse trabalho, com detalhe para a posição do módulo LCD, da chave tátil, do furo para entrada do tubo de coleta e os furos de conexão USB e da fonte de alimentação. Fonte: arquivo pessoal do autor [26].

### 3.8. Programação

Embora fosse possível programar uma rotina mais elaborada, que permitisse calcular diretamente a transmitância e a absorbância da amostra a ser estudada, preferiu desenvolver uma rotina de programação simples, de modo que todo o trabalho de calcular tais parâmetros recaia sobre a responsabilidade do usuário. Dessa forma, o fotômetro requisitará maior interatividade do usuário,

seja aluno ou professor, durante o ato da medida. A rotina de programação foi baseada no seguinte princípio de funcionamento:

1. Ao ligar o fotômetro conectando-o à fonte de alimentação, deverá aparecer um aviso padrão na tela do LCD e, em seguida, o número do comprimento de onda e o valor da intensidade em unidades arbitrárias.
2. A cada vez que a chave táctil for pressionada, o comprimento de onda deve ser trocado, sendo que esse novo valor deverá ser apresentado na tela do LCD, assim como o valor da intensidade da luz que está chegando no LDR (fotodetector).
3. A medida da intensidade é realizada inserindo a cubeta no suporte, através do orifício localizado na parte superior do fotômetro. O valor da intensidade será apresentado na tela do LCD.

O Apêndice A: Programação do fotômetro, desta dissertação, apresenta uma descrição detalhada da programação desenvolvida, com as linhas de programação que podem ser copiadas para a IDE da plataforma arduino.

Durante o desenvolvimento desse fotômetro, as escolhas dos componentes que seriam utilizados foram baseadas em dois princípios: os custos de produção e a facilidade de aquisição. Por sua vez, a programação se baseou no princípio de simplicidade para se obter uma máxima interação do usuário com o equipamento. Assim, acredita-se que esse fotômetro pode ser construído por qualquer professor, sem nenhum conhecimento avançado de programação, eletrônica e mecânica. A **Tabela 3** apresenta uma descrição detalhada dos componentes utilizados e os valores médios, obtidos por meio de uma pesquisa em sites de venda de componentes eletrônicos disponíveis na internet.



**Tabela 3:** Descrição dos componentes utilizados com seus respectivos valores e quantidades para construção do fotômetro.

A pesquisa foi realizada entre 01/08/2017 e 30/09/2017. \*vendido em pacotes de 100 unidades por R\$ 70,00. \*\*vendido em conjuntos com 40 unidades por R\$ 6,00.

Fonte: dados obtidos com a compra dos materiais para construção do fotômetro [26].

Item	Descrição	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
1	Arduino UNO	01	R\$ 40,00	R\$ 40,00
2	Caixa Patola PB-114	01	R\$ 21,90	R\$ 21,90
3	Módulo Display LCD 16x02	01	R\$ 13,90	R\$ 13,90
4	Fonte de alimentação bivolt 12V/1A	01	R\$ 14,90	R\$ 14,90
5	Módulo serial I2C	01	R\$ 11,82	R\$ 11,82
6	Tarugo de Nylon (25x50) mm	01	R\$ 5,00	R\$ 5,00
7	Sensor LDR 5 mm	01	R\$ 2,47	R\$ 2,47
8	Módulo LED RGB	01	R\$ 2,80	R\$ 2,80
9	Chave táctil NA	01	R\$ 2,00	R\$ 2,00
10	Tube para coleta (12x75) mm*	05	R\$ 0,70	R\$ 3,50
11	Cabo de conexão (jumper) MF**	05	R\$ 0,15	R\$ 0,75
12	Resistor de 1 k $\Omega$	02	R\$ 0,10	R\$ 0,20
<b>Total</b>				<b>R\$ 119,24</b>

O principal aspecto do produto educacional proposto nesse trabalho é sem dúvida, o fotômetro de três cores. É importante esclarecer que as aplicações que decorrem da utilização desse equipamento são muitas, e como parte integrante do produto educacional propõe-se também uma sequência de ensino para aplicação do fotômetro. No contexto dos currículos do ensino médio, essa sequência tanto pode ser aplicada na disciplina de física quanto na disciplina de química.

## 4. Resultados preliminares

Com o intuito de verificar o funcionamento do fotômetro, foram preparadas amostras (soluções aquosas) com diferentes concentrações dos corantes alimentícios INS 133 (azul brilhante) e INS 129 (vermelho 40).

O teste foi realizado, medindo-se a intensidade de luz incidente e transmitida, para cada concentração dos corantes e para cada “cor” (comprimento de onda) do LED RGB. De posse dos valores das intensidades de luz incidente e transmitida, foi possível calcular, para cada amostra, a transmitância utilizando a equação (44) e a absorbância utilizando a equação (47).

Os valores obtidos para as intensidades de luz incidente e transmitida e os resultados dos cálculos das transmitâncias e absorbâncias, são apresentados nas tabelas enumeradas de 4 a 9 para o corante azul e enumeradas de 10 a 12 para o corante vermelho para o corante vermelho.

**Tabela 4:** Valores obtidos para as intensidades de luz incidente e transmitida e valores calculados das transmitâncias e absorbâncias para diferentes concentrações do corante azul (INS133), para a cor vermelha do LED RGB (pico em 625 nm).

Fonte: autoria própria [26].

<b>Concentração Corante azul</b>	<b>Intensidade incidente</b>	<b>Intensidade transmitida</b>	<b>Transmitância</b>	<b>Absorbância</b>
<b>mg/l</b>	<b>u. a.</b>	<b>u. a.</b>	<b>%</b>	<b>-</b>
0,0	260,0	260,0	100,0	0,00
3,8	259,0	154,0	59,5	0,52
7,6	260,0	86,0	33,1	1,11
11,4	260,0	46,0	17,7	1,73
15,2	260,0	25,0	9,6	2,34
19,0	259,0	14,0	5,4	2,92
22,8	260,0	7,0	2,7	3,61

**Tabela 5:** Valores obtidos para as intensidades de luz incidente e transmitida e valores calculados das transmitâncias e absorbâncias para diferentes concentrações do corante azul (INS133), para a cor verde do LED RGB (pico em 525 nm).

Fonte: autoria própria [26].

<b>Concentração corante Azul</b>	<b>Intensidade incidente</b>	<b>Intensidade transmitida</b>	<b>Transmitância</b>	<b>Absorbância</b>
<b>mg/l</b>	<b>u. a.</b>	<b>u. a.</b>	<b>%</b>	<b>-</b>
0,0	537	537	100,0	0,00
3,8	535	514	96,1	0,04
7,6	536	496	92,5	0,08
11,4	535	477	89,2	0,11
15,2	536	461	86,0	0,15
19,0	536	447	83,4	0,18
22,8	536	432	80,6	0,22

**Tabela 6:** Valores obtidos para as intensidades de luz incidente e transmitida e valores calculados das transmitâncias e absorbâncias para diferentes concentrações do corante azul (INS133), para a cor azul do LED RGB (pico em 470 nm).

Fonte: autoria própria [26].

<b>Concentração corante Azul</b>	<b>Intensidade incidente</b>	<b>Intensidade transmitida</b>	<b>Transmitância</b>	<b>Absorbância</b>
<b>mg/l</b>	<b>u. a.</b>	<b>u. a.</b>	<b>%</b>	<b>-</b>
0,0	348	348	100,0	0,00
3,8	349	347	99,4	0,01
7,6	348	345	99,1	0,01
11,4	348	343	98,6	0,01
15,2	347	341	98,3	0,02
19,0	348	340	97,7	0,02
22,8	349	340	97,4	0,03

**Tabela 7:** Valores obtidos para as intensidades de luz incidente e transmitida e valores calculados das transmitâncias e absorbâncias para diferentes concentrações do corante vermelho (INS 129), para a cor vermelha do LED RGB (pico em 625 nm).

Fonte: autoria própria [26].

<b>Concentração corante Vermelho</b>	<b>Intensidade incidente</b>	<b>Intensidade transmitida</b>	<b>Transmitância</b>	<b>Absorbância</b>
<b>mg/l</b>	<b>u. a.</b>	<b>u. a.</b>	<b>%</b>	<b>-</b>
0,0	276,0	276,0	100,0	0,00
13,0	276,0	275,0	99,6	0,00
26,0	269,0	267,0	99,3	0,01
39,0	264,0	264,0	100,0	0,00
65,0	265,0	262,0	98,9	0,01
91,0	264,0	264,0	100,0	0,00
104,0	261,0	260,0	99,6	0,00

**Tabela 8:** Valores obtidos para as intensidades de luz incidente e transmitida e valores calculados das transmitâncias e absorbâncias para diferentes concentrações do corante vermelho (INS 129), para a cor verde do LED RGB (pico em 525 nm).

Fonte: autoria própria [26].

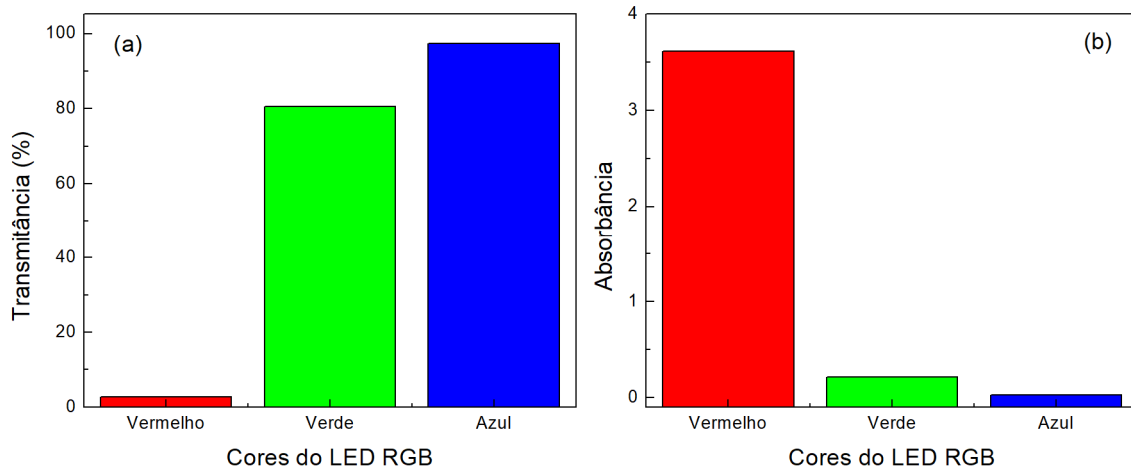
<b>Concentração corante Vermelho</b>	<b>Intensidade incidente</b>	<b>Intensidade transmitida</b>	<b>Transmitância</b>	<b>Absorbância</b>
<b>mg/l</b>	<b>u. a.</b>	<b>u. a.</b>	<b>%</b>	<b>-</b>
0,0	548	548	100,0	0,00
13,0	548	462	84,3	0,17
26,0	538	389	72,3	0,32
39,0	536	342	63,8	0,45
65,0	536	283	52,8	0,64
91,0	538	245	45,5	0,79
104,0	537	227	42,3	0,86

**Tabela 9:** Valores obtidos para as intensidades de luz incidente e transmitida e valores calculados das transmitâncias e absorbâncias para diferentes concentrações do corante vermelho (INS 129), para a cor azul do LED RGB (pico em 470 nm).

Fonte: autoria própria [26].

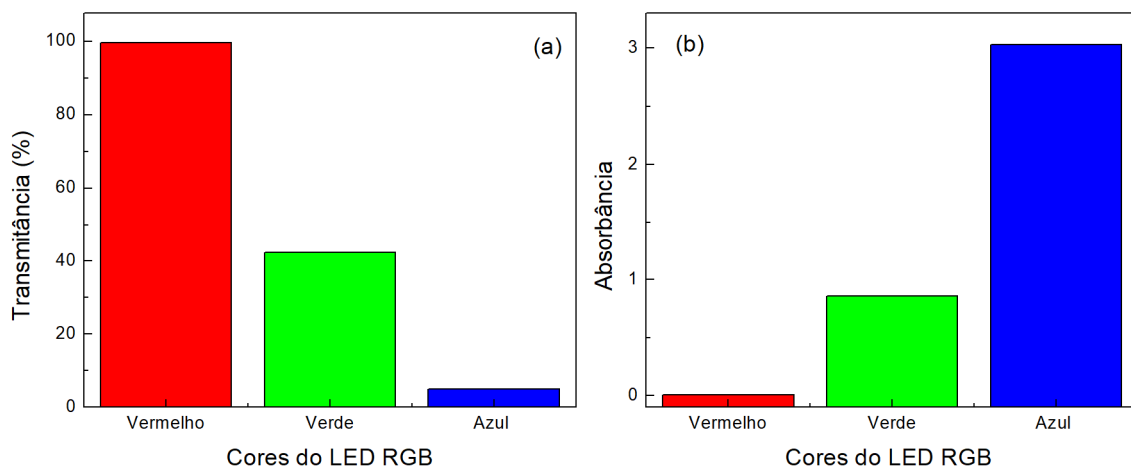
<b>Concentração corante Vermelho</b>	<b>Intensidade incidente</b>	<b>Intensidade transmitida</b>	<b>Transmitância</b>	<b>Absorbância</b>
<b>g/l</b>	<b>u. a.</b>	<b>u. a.</b>	<b>%</b>	<b>-</b>
0,0	362	362	100,0	0,00
13,0	362	259	71,5	0,33
26,0	351	169	48,1	0,73
39,0	350	112	32,0	1,14
65,0	350	50	14,3	1,95
91,0	351	23	6,6	2,73
104,0	351	17	4,8	3,03

Com a finalidade de comparar qual cor do LED RGB é mais transmitida ou absorvida pelas amostras. Foram confeccionados gráficos comparativos das transmitâncias e absorbâncias, para as amostras que possuem maior concentração de corante, conforme mostrado nas **Figura 4.1** e **Figura 4.2**.



**Figura 4.1:** (a) transmitância e (b) absorvância para a amostra com a concentração de 22,8 mg/l do corante azul.

Fonte: autoria própria [26].



**Figura 4.2:** (a) transmitância e (b) absorvância para a amostra com a concentração de 104,0 mg/l do corante vermelho.

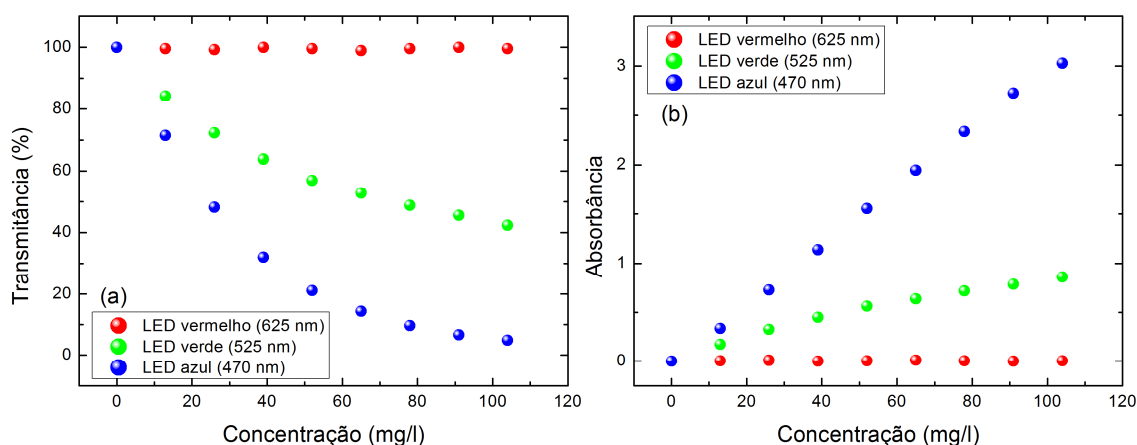
Fonte: autoria própria [26].

De acordo com os gráficos da **Figura 4.1**, quando comparada com as outras duas cores, a luz vermelha do LED RGB, com o pico de emissão em 625 nm, é menos transmitida e mais absorvida pelo corante azul. Por outro lado, quando observamos os gráficos da **Figura 4.2**, vemos que a luz azul do LED RGB, com pico de emissão em 470 nm, é menos transmitida e mais absorvida pelo corante vermelho.

Os gráficos apresentados na **Figura 4.1** e **Figura 4.2** revelam que o comprimento de onda da luz que é menos absorvida ou mais transmitida por um

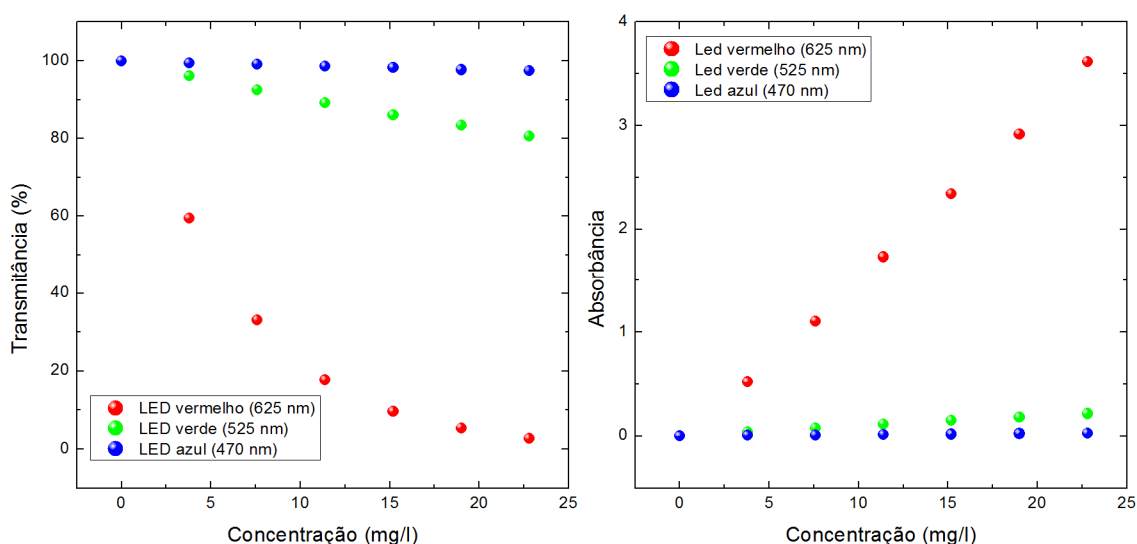
determinado objeto caracterizará a cor que enxergaremos para esse objeto. Em outras palavras, um objeto é dito azul porque não absorve a luz azul, assim como, um objeto é dito vermelho porque não absorve a luz vermelha.

As figuras **Figura 4.3** e **Figura 4.4** apresentam os gráficos das transmitâncias e absorbâncias calculados nas tabelas anteriores para os dois corantes utilizados.



**Figura 4.3:** Gráficos da (a) transmitância e da (b) absorbância, para os comprimentos de onda 625 nm (círculos vermelhos), 525 nm (círculos verdes) e 470 nm (círculos azuis), em função da concentração do corante vermelho.

Fonte: autoria própria [26].



**Figura 4.4:** Gráficos da (a) transmitância e da (b) absorbância, para os comprimentos de onda de pico de emissão do LED RGB de 625 nm (círculos vermelhos), 525 nm (círculos verdes) e 470 nm (círculos azuis), em função da concentração do corante azul.

Fonte: autoria própria [26].

Na **Figura 4.3**, é possível observar que a luz de cor azul apresentou uma maior variação, tanto na transmitância (**Figura 4.3a**), quanto na absorbância (**Figura 4.3b**) em função do aumento da concentração do corante vermelho. Por outro lado, a luz de cor vermelha, praticamente não sofre variação na transmitância ou na absorbância, em função do aumento da concentração do corante vermelho. Como mencionando anteriormente, esse fato confere a característica de enxergarmos a cor vermelha para essas amostras. A **Figura 4.5** apresenta amostras com diferentes concentrações do corante vermelho. As diferentes “tonalidades” que podemos enxergar, para a cor vermelha desse corante, deve-se apenas ao aumento da absorção da luz nos comprimentos de onda na região do azul.

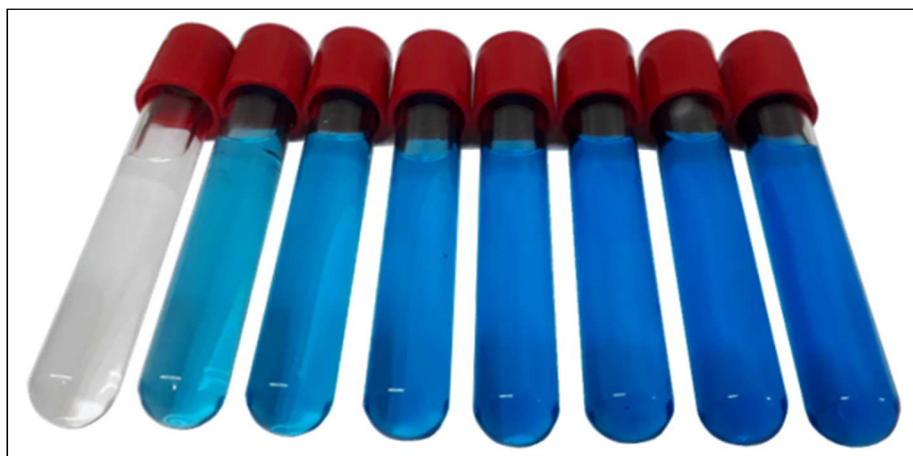


**Figura 4.5:** Amostras com diferentes concentrações do corante vermelho (INS 129). A concentração do corante aumenta da esquerda para direita.

Fonte: arquivo pessoal do autor [26].

A análise da figura **Figura 4.4** demonstra que a luz de cor vermelha foi a que apresentou maior variação da transmitância e da absorbância em função da concentração do corante azul. Por outro lado, a cor azul apresentou variação da transmitância e da absorbância praticamente nula, em função da concentração do corante azul. Assim como no caso do corante vermelho, a maior transmitância e menor absorbância da luz azul confere o fato de enxergarmos esse corante com a cor azul. A **Figura 4.6** apresenta amostras com diferentes concentrações do corante azul. As diferentes “tonalidades” que podemos enxergar, estão

relacionadas a um aumento da absorção da luz nos comprimentos de onda na região do vermelho.



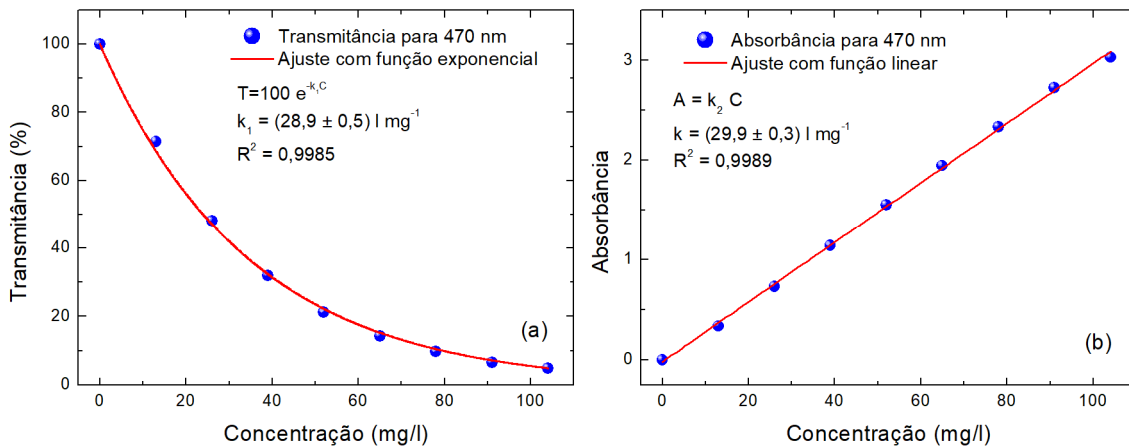
**Figura 4.6:** Amostras com diferentes concentrações do corante azul (INS133). A concentração do corante aumenta da esquerda para direita.

Fonte: arquivo pessoal do autor [26].

Conforme exposto, na seção Referencial Teórico, de acordo com a lei de Beer-Lambert, a transmitância deve apresentar um comportamento de decaimento exponencial em função da concentração. A absorbância, por sua vez, ao ser descrita pela mesma lei, deve apresentar um comportamento linear em função da concentração do corante.

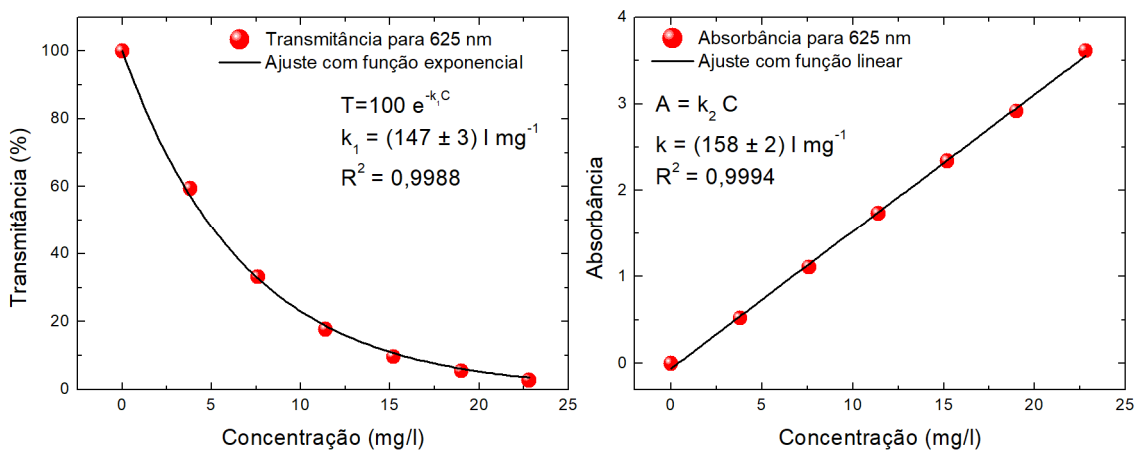
Para verificar a presença do comportamento descrito pela lei de Beer-Lambert nos corantes estudados, os gráficos da transmitância e da absorbância, para a cor azul do LED (pico em 470 nm), em função da concentração do corante azul e para a cor vermelho do LED (pico em 625 nm), foram ajustados matematicamente, utilizando o método dos mínimos quadrados, com uma função exponencial e uma função linear, respectivamente. Os gráficos e o ajustes para os dois corantes são apresentados na **Figura 4.7** e **Figura 4.8**.





**Figura 4.7:** (a) Transmitância (círculos azuis) para a luz azul do LED, com pico de emissão em 470 nm, em função da concentração de corante vermelho e ajuste com função exponencial (linha vermelha). (b) Absorbância (círculos azuis) para a luz azul do LED, com pico de emissão em 470 nm, em função da concentração de corante vermelho e ajuste com função linear (linha preta).

Fonte: dados obtidos com a experimentação do fotômetro [26].



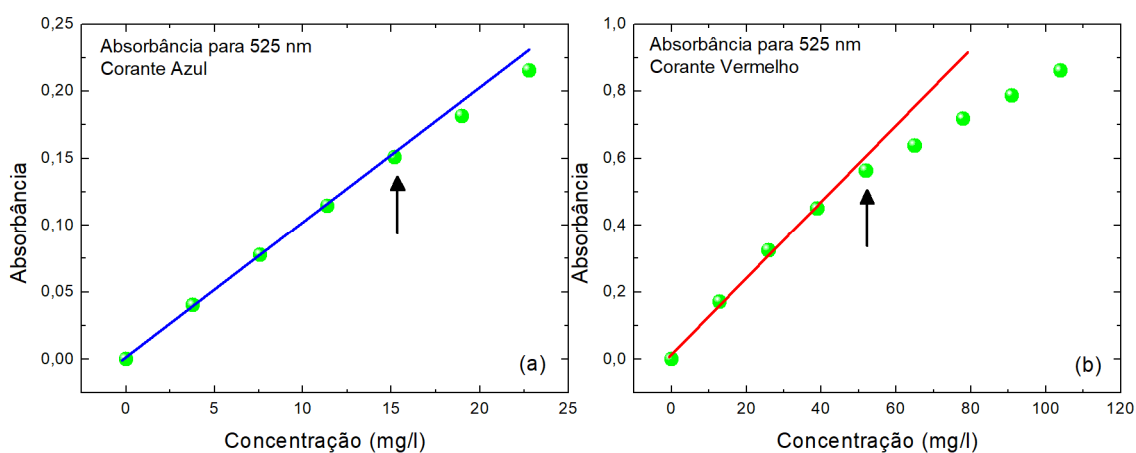
**Figura 4.8:** (a) Transmitância (círculos vermelhos) para a luz vermelha do LED, com pico de emissão em 625 nm, em função da concentração de corante azul e ajuste com função exponencial (linha preta). (b) Absorbância (círculos vermelhos) para a luz vermelha do LED, com pico de emissão em 625 nm, em função da concentração de corante azul e ajuste com função linear (linha preta).

Fonte: dados obtidos com a experimentação do fotômetro [26].

A análise da **Figura 4.7** e **Figura 4.8** mostra que tanto a transmitância quanto a absorbância, são descritas matematicamente por uma função exponencial e por uma função linear, respectivamente. Nesse caso, podemos

afirmar que a transmitância e a absorvância, para a luz azul (no corante vermelho) e para a luz vermelha (no corante azul) podem ter o comportamento em função da concentração descritas pela Lei de Beer-Lambert.

É importante notar que, em ambos os corantes o mesmo não acontece para luz verde, com pico de emissão em 525 nm, conforme mostrado na **Figura 4.9**.



**Figura 4.9:** Absorbância para a luz verde do LED, com pico de emissão em 525 nm, (a) em função da concentração de corante azul e (b) em função da concentração do corante vermelho (b). Detalhe para as linhas retas e setas que demonstram a não linearidade e apontam o limite de linearidade da absorvância, respectivamente [26].

Fonte: dados obtidos com a experimentação do fotômetro [26].

A não linearidade da absorvância, observada na **Figura 4.9**, demonstra que a luz verde do LED, com pico de emissão em 525 nm, demonstra que a absorvância, para este comprimento de onda, em função da concentração, não pode ser descrita pela lei de Beer-Lambert, para esses dois corantes. Esse fato é conhecido como limite de linearidade da Lei de Beer-Lambert [26, 32].

A **Figura 4.9** mostra que a absorvância pode não ser linear para todos os possíveis valores de concentração. Isso nos permite afirmar que, para a luz verde do LED, com pico de emissão em 525 nm, a absorvância, em função da concentração, não pode ser descrita pela lei de Beer-Lambert, tanto para o corante azul como para o corante vermelho.

De fato, a Lei de Beer-Lambert, apresenta limites de aplicação que podem ser enunciados da seguinte forma:

- A luz utilizada deve ser aproximadamente monocromática;

- As amostras estudadas devem estar no regime de baixas concentrações;
- As amostras não devem possuir mais de uma espécie absorvedora para o mesmo comprimento de onda.

Em geral, a não linearidade observada com o aumento da concentração, pode estar associada à ligação entre moléculas do corante, o que conseqüentemente, altera a absorção da luz pela amostra.

E, embora não seja o objetivo deste produto educacional, o fotômetro também pode ser utilizado para a verificação do limite de aplicação da Lei de Beer-Lambert, especialmente nas disciplinas de química.

Além disso, as observações realizadas nessa seção, podem ser exploradas pelo professor não apenas na verificação experimental da lei de Beer-Lambert, mas também como exemplo para explicar o processo de absorção de luz por meio dos níveis de energia, assim como, o conceito de cor complementar e aplicação destes princípios da detecção e determinação de compostos em soluções [32].

## 5. Sugestão de aplicação do fotômetro

Nesse trabalho, além de demonstrar como construir um fotômetro de três cores de baixo custo, sugeriu-se uma sequência de ensino para aplicação desse dispositivo, em forma de um roteiro experimental que deve ser realizado com a participação do professor. Nessa sequência, o professor atua introduzindo o assunto, guiando os alunos nos experimentos e fazendo algumas inserções de explicações quando conveniente e necessário de maneira que a aprendizagem seja significativa.

Para isso, deve-se considerar que para o ensino de ondas eletromagnéticas (luz) (objeto de estudo desse trabalho) como novo conhecimento a ser atingido significativamente, recorre-se as ondas mecânicas como o subsunçor para a ancoragem dessa interação cognitiva. Sendo assim, para a aplicação do experimento proposto nesse trabalho é importante que se tenha a compreensão do que é a luz. Assim pode-se observar as ondas mecânicas e fazer um comparativo com elas, claro, que com os devidos cuidados.

Portanto, antes de começar o experimento, sugere-se ao professor que faça uma introdução desse novo conhecimento, explorando as ondas mecânicas (longitudinais, transversais e tridimensionais). Ondas essas que se propagam em meios materiais, sólidos, líquidos ou gasosos em movimento oscilatório (ondulatório). Entende-se que o aluno tenha nesse momento esses conhecimentos apropriados (prévios), direcionando-os para outros fenômenos da natureza como as ondas de rádio, raios-x e luz visível para que perceba por si só (mediado) que tais fenômenos respeitam o mesmo princípio ondulatório, ou seja, comportam-se com uma onda e são chamadas de ondas eletromagnéticas ou radiação eletromagnética. É importante lembrar que essa radiação é decorrente da oscilação de um campo elétrico e magnético e que, diferentemente das ondas mecânicas, podem se propagar em meios materiais e também no vácuo. Desse modo, deve-se deixar claro, que nesse novo conhecimento, luz e ondas eletromagnética são sinônimos, e assim, explorar a ideia de que a luz pode ser absorvida, refletida e/ou transmitida quando interage com a matéria.

Para esse experimento, foram preparadas soluções padrões de Fe-EDTA, de ferro II ( $\text{Fe}^{2+}$ ) e de ortofenantrolina. Essas soluções foram acondicionadas em

frascos conta-gotas de 10 ml, rotulados e a concentração da solução de Fe-EDTA foi expressa em unidades de miligramas por gota (mg/gota). Essa forma de expressar a concentração (concentração média por gota) facilita a utilização da solução, uma vez que não necessita de equipamentos ou vidrarias adicionais para se medir o volume. A **Figura 5.1** apresenta uma imagem das soluções em suas respectivas embalagens.



**Figura 5.1:** Solução padrão de  $\text{Fe}^{2+}$  (1g/l), solução padrão de ortofenantrolina (1 g/l) e soluções padrões de Fe-EDTA (1,1 mg/gota).

Fonte: arquivo pessoal do autor [26].

Para a realização do experimento, foram produzidos conjuntos experimentais compostos por:

- Um fotômetro.
- Uma fonte de alimentação para o fotômetro.
- Um frasco com 10 ml da solução padrão de Fe-EDTA.
- Um frasco da solução padrão de ortofenantrolina.
- Um frasco da solução padrão de  $\text{Fe}^{2+}$ .
- Cinco cubetas (tubo para coleta de sangue).

Sugere-se, a partir de então, ao professor que guie a realização do experimento, conforme os seguintes passos:

1. Antes de começar o experimento, o professor deve fazer uma introdução ao assunto, sem, no entanto, falar sobre os resultados esperados, afim de estimular o aluno para a elaboração de hipóteses e conclusões. O principal

fundamento dessa sequência de ensino é explicar os resultados para os alunos à medida que as observações vão surgindo.

2. Recomenda-se também que o professor ligue o fotômetro ao menos 10 minutos antes de começar o experimento para que todo o sistema eletrônico esteja em perfeito funcionamento.
3. Inicialmente, o professor deverá instruir os alunos a adicionarem a mesma quantidade de água em cada cubeta.
4. Deixar uma cubeta apenas com água, que será a amostra de referência ou amostra branco.
5. Adicionar nas outras quatro cubetas restantes, 1 (uma), 2 (duas), 3 (três) e 4 (gotas) da solução padrão de Fe-EDTA. As cubetas devem estar tampadas e agitadas levemente (sem fazer bolhas) para a completa homogeneização das soluções.
6. Solicitar aos alunos que ordenem as soluções de acordo com a “tonalidade da cor”, da mais clara para a mais escura.
7. Explicar o funcionamento do fotômetro e como utilizá-lo.
8. Baseado no princípio de funcionamento do fotômetro, explicar aos alunos como o equipamento pode ser utilizado para “medir” e compreender a “tonalidade de uma cor” (nesse caso das amostras).
9. Solicitar aos alunos que meçam a quantidade de luz que atravessa a amostra referência (intensidade inicial) e das amostras que contém Fe-EDTA (intensidade final) para os três comprimentos de onda disponíveis no fotômetro. É importante lembrar que, ao mencionar comprimento de onda, refere-se ao comprimento de onda do pico de emissão em cada região. Esse fato também pode ser abordado pelo professor durante a explicação do funcionamento do fotômetro.
10. O resultado das medidas propostas no item 9 podem ser anotados pelos alunos em tabelas, que o professor pode confeccionar previamente, conforme o exemplo das tabelas abaixo.

**Tabela 10:** Intensidade inicial (água pura), intensidade final e razão entre as intensidade inicial e final, em função da quantidade de gotas da solução de Fe-EDTA, para o comprimento de onda de 470 nm (região do azul).

Fonte: autoria própria [26].

Quantidade de gotas	Intensidade inicial ( $I_0$ )	Intensidade final ( $I$ )	$I/I_0$
0			
1			
2			
3			
4			

**Tabela 11:** Intensidade inicial (água pura), intensidade final e razão entre as intensidade inicial e final, em função da quantidade de gotas da solução de Fe-EDTA, para o comprimento de onda de 525 nm (região do verde).

Fonte: autoria própria [26].

Quantidade de gotas	Intensidade inicial ( $I_0$ )	Intensidade final ( $I$ )	$I/I_0$
0			
1			
2			
3			
4			

**Tabela 12:** Intensidade inicial (água pura), intensidade final e razão entre as intensidade inicial e final, em função da quantidade de gotas da solução de Fe-EDTA, para o comprimento de onda de 625 nm (região do vermelho).

Fonte: autoria própria [26].

Quantidade de gotas	Intensidade inicial ( $I_0$ )	Intensidade final ( $I$ )	$I/I_0$
0			
1			
2			
3			
4			

11. Definir para os alunos, a porcentagem de luz que atravessa a amostra em relação à intensidade inicial, ou seja, a transmitância percentual:

$$T(\%) = \frac{I}{I_0} \times 100\%. \quad (50)$$

12. Solicitar aos alunos que, com os dados das tabelas enumeradas de 10 a 12, calculem a transmitância e a concentração para cada medida e para cada comprimento de onda. Para isso, sabe-se que cada gota possui uma concentração de 1,1 mg/gota de Fe-EDTA e que cada cubeta, até sua marcação, possui um volume de 5 ml. Assim, cada gota em cada cubeta confere uma concentração de 0,22 mg/ml. Logo, pode-se confeccionar a **Tabela 13** da absorbância em função da concentração de Fe-EDTA.

**Tabela 13:** Transmitância em função da concentração de Fe-EDTA para os três diferentes comprimentos de onda.

Fonte: autoria própria [26].

Concentração de Fe-EDTA (mg/ml)	Transmitância (%) 470 nm	Transmitância (%) 525 nm	Transmitância (%) 625 nm
0,00			
0,22			
0,44			
0,66			
0,88			

13. Nesse momento, o professor pode solicitar aos alunos, ou ele mesmo, poderá proceder a confecção dos gráficos da transmitância em função da concentração para cada comprimento de onda. Sugere-se ao professor a utilização dos softwares:

- SciDaVis: um programa de computador gratuito, de fácil instalação e utilização e permite a confecção de vários tipos de gráficos, assim como permite a realização de rotinas de ajuste e regressão linear. Além disso, existe uma grande variedade de materiais instrucionais na internet como vídeo aulas, apostilas e livros que facilitam ainda mais a utilização do referido programa;
- Desmos: um aplicativo de celular gratuito, de fácil instalação e utilização e permite a confecção de vários tipos de gráficos. Com ele cada aluno pode construir na tela de seu celular os gráficos sugeridos nessa atividade.

14. Mostrar para os alunos que a transmitância das amostras diminui com o aumento da concentração de Fe-EDTA e que a transmitância também depende do comprimento de onda. Nesse momento o professor deve



fomentar a curiosidade do aluno mostrando essa dependência sem a preocupação de explicar os fenômenos por trás dessa observação. Essa explicação será feita mais adiante.

15. Levar os alunos a pensar sobre o que ocorreu com a quantidade de luz que não foi transmitida. Ou seja, definir a relação entre luz transmitida, luz absorvida e luz refletida. Como o objetivo deste experimento é o estudo da luz transmitida e absorvida, o professor pode argumentar que a quantidade de luz refletida é muito menor do que a quantidade de luz que foi absorvida ou transmitida. De fato, o professor pode fazer os cálculos, baseados nos valores dos índices de refração do ar, do vidro e da água, para demonstrar que intensidade de luz refletida corresponde a aproximadamente 4% da luz incidente<sup>3</sup> [39].

16. Uma vez que no passo anterior foi desprezada a quantidade de luz refletida, o professor pode definir para os alunos a medida da luz absorvida por meio da transmitância, ou seja:

$$A = -\ln\left(\frac{I}{I_0}\right). \quad (51)$$

17. Com base nos dados das tabelas que contêm os valores da razão  $I/I_0$  e com auxílio da equação (51), o professor deve solicitar aos alunos que realizem o cálculo da absorbância para cada amostra e para cada diferente comprimento de onda, conforme a **Tabela 14**:

**Tabela 14:** Transmitância em função da concentração de Fe-EDTA para os três diferentes comprimentos de onda.

Fonte: autoria própria [26].

Concentração de Fe-EDTA (mg/ml)	Absorbância 470 nm	Absorbância 525 nm	Absorbância 625 nm
0,00			
0,22			
0,44			
0,66			
0,88			

<sup>3</sup> A intensidade de luz refletida é dada por:  $R_{\text{vidro}/\text{água}} = \frac{n_{\text{vidro}} - n_{\text{água}}}{n_{\text{vidro}} + n_{\text{água}}}$ , em que “R” é a intensidade de luz refletida e “n” o índice de refração para cada meio, denominada Relação de Fresnel.

18. Nesse momento, com o intuito de visualizar mais claramente a relação entre a absorvância e a concentração, o professor pode solicitar aos alunos, ou ele mesmo poderá confeccionar os gráficos da absorção em função da concentração de Fe-EDTA para diferentes comprimentos de onda.
19. Com o auxílio dos gráficos, confeccionados no passo anterior, mostrar para os alunos que a absorvância “parece” ter uma dependência linear com a concentração.
20. De posse dos resultados obtidos anteriores, o professor já deve ter evidenciado para os alunos a dependência da transmitância e da absorvância com a concentração e com o comprimento de onda. Nesse momento, sugere-se que o professor realize a explicação teórica da relação entre a transmitância e absorvância com a concentração por meio da demonstração corpuscular da Lei de Beer-Lambert.
21. Levar os alunos a pensar sobre o fato de que a mesma solução apresenta diferentes valores de absorvância e de transmitância, para diferentes comprimentos de onda. Para explicar esse fenômeno, deve-se utilizar argumentos da física moderna/quântica, segundo a qual, a absorção de luz é quantizada e nesse caso fazer uma explicação sobre os níveis de energia e como eles determinam as diferentes absorções e transmissões.
22. Mostrar um exemplo de aplicação dos fenômenos estudados, com a detecção de Ferro em água. Para isso, deve-se seguir os passos:
  - a) Remover a solução de Fe-EDTA de duas das cubetas, lavando-a e enxaguando-a.
  - b) Adicionar em uma das cubeta vazia 1 gota da solução de Ferro e completar com água até a marcação.
  - c) Na mesma cubeta do passo anterior, adicionar 4 gotas da solução de ortofenantrolina, tampar a cubeta e realizar uma agitação leve.
  - d) Na outra cubeta vazia, adicionar 4 gotas da solução de Ferro e completar com água até a marcação.

- e) Na mesma cubeta do item d, adicionar 4 gotas da solução de ortofenantrolina, tampar a cubeta e realizar uma agitação leve.
- f) Solicitar aos alunos que meçam a transmitância e absorbância das duas cubetas, de modo que eles mesmos constatem que a absorção é proporcional à concentração de ferro (número de gotas).
- g) Explicar em quais situações é importante detectar/determinar a quantidade de ferro.
- h) Dar outros exemplos de detecção fotométrica.

Acredita-se que a aplicação da sequência de ensino proposta, possa ser realizada em três encontros, dividindo os grupos em 3 alunos por conjunto experimental. Cabe ao professor analisar a viabilidade de se aplicar essa prática em apenas três encontros e o número de alunos por conjunto experimental. Essa é apenas uma das possíveis sequências de ensino que pode ser realizada com o fotômetro.

## **6. O caráter interdisciplinar do produto educacional**

Os professores de física, química, biologia e matemática e suas tecnologias podem elaborar um projeto interdisciplinar. De início, é importante explicar o que é o fotômetro e como funciona, experimentando e esclarecendo sobre sua aplicabilidade na ciência e na sociedade.

Nesse projeto, os professores podem solicitar aos alunos para investigar a concentração de metais dissolvidos na água consumida por eles em sua casa, na escola ou no trabalho, assim como a quantidade de metais e demais compostos existentes na água da chuva ou de um riacho. Além disso, é importante promover uma discussão sobre as consequências dos níveis desses compostos para saúde e o meio ambiente.

Tanto para obter a descrição teórica, quanto para explicar os resultados observados e suas aplicações, o produto educacional pode ser utilizado nas disciplinas acima mencionadas de diversas maneiras.

Na disciplina de física, o professor pode discutir sobre tópicos como a natureza da luz, o espectro eletromagnético, a interação da luz com a matéria, quantização e níveis de energia.

Na disciplina de química, podem ser estudados e discutidos os conceitos de ligação química, estequiometria, titulação, concentração, reações químicas, a Lei de Beer-Lambert e a detecção e determinação de espécies químicas.

Na disciplina de biologia, podem ser estudados e discutidos os efeitos dos compostos determinados pela fotometria para a saúde e meio ambiente. E na disciplina de matemática, podem ser abordados os tópicos de funções logarítmicas e exponenciais, estudo de probabilidade, confecção e interpretação de gráficos, cálculo numérico, regressão linear e ajuste de funções e introduzir o conceito de limite de uma função.

Além disso, se a escola/colégio ofertar algum curso profissionalizante em eletrônica ou informática, será possível discutir e estudar componente e circuitos elétricos, automação para controle e aquisição de dados e programação.

## 7. Relato da aplicação do produto educacional

Nos dias 11 e 13 de dezembro de 2017, no Colégio Estadual Jardim Interlagos – Ensino Fundamental e Médio, localizado na rua Luiz de Camões, nº 04, Jardim Interlagos, na cidade de Cascavel, estado do Paraná, foi realizada a aplicação do fotômetro com as turmas da 3ª série A e C, em diferentes momentos (manhã e noite) e contemplando 4 horas aulas para cada turma (divididos em dois períodos com 2 horas aulas cada).

Em suas referidas salas de aula e respectivo horário de aula, a aplicação do produto educacional foi realizada com todos os alunos presentes naquelas aulas (23 alunos na turma A e 14 na turma C). Dois alunos ficaram responsáveis, com o auxílio do professor, de produzir as soluções químicas e as medições feitas no fotômetro, enquanto o restante dos alunos, divididos em dois grupos, anotava essas medidas ditadas por seus representantes.

Os grupos seguiram com as orientações do professor e foram levados para a sala de multimídia para a confecção dos gráficos, sugeridos na sequência de ensino. Durante a experimentação e construção dos gráficos os alunos indagaram sobre a diferença de luz transmitida e inferiram prováveis respostas. Durante a confecção dos gráficos eles perceberam que a absorção da luz aumenta a medida que a concentração de ferro aumenta e de que o experimento é mais preciso quando se aplica a luz azul, menos eficiente para a luz verde e menos ainda para a luz vermelha. Nesse momento, os alunos ainda não sabiam como explicar por que isso ocorre. Durante a apresentação dos cálculos um dos alunos perguntou por que é usado e de onde vem o logaritmo para encontrar a absorbância.

No segundo encontro, o professor realizou a demonstração corpuscular para a Lei de Beer-Lambert e explicou porque a dependência da transmitância e da absorbância com a concentração e com o comprimento de onda. Conforme sugerido na sequência de ensino, foi realizado o experimento que evidencia a aplicação da fotometria para determinação de espécies químicas, nesse caso a determinação de ferro em água.

A análise pessoal do professor, autor deste produto educacional, revela que alguns alunos encontraram dificuldades no trabalho com as soluções e na compreensão da descrição teórica, apresentando dificuldades para

compreenderem os cálculos matemáticos, mas em geral, apreciaram a aplicação do produto. De acordo com a opinião dos próprios discentes, a aplicação do produto educacional proporcionou uma intervenção inovadora em relação às tradicionais aulas.

## 8. Conclusão

O produto educacional proposto, composto de um conjunto experimental baseado em um fotômetro de três cores e uma sugestão de sequência de ensino para a aplicação desse conjunto, mostrou-se adequado para o ensino de tópicos da interação da luz com a matéria e de princípios e aplicações que envolvem essa interação e que podem ser tratadas em várias disciplinas presente no ensino médio.

O produto educacional, possui três características que julga-se relevante: o baixo custo, cerca de R\$ 120,00 por unidade; a facilidade de construção, em vista da preocupação em desenvolver um produto em que os componentes pudessem ser facilmente adquiridos em sites e lojas de componentes eletrônicos; e a portabilidade. Esse último se mostrou muito útil, pois permite que os experimentos sejam realizados sem a necessidade da infraestrutura de um laboratório. Além disso, pode-se utilizar uma bateria de 9 volts para alimentar o fotômetro e, desse modo, permitir a utilização fora da sala de aula em ambientes que não possuem acesso à energia elétrica.

Este produto educacional propicia uma atuação interdisciplinar que pode envolver as disciplinas de física, químicas, biologia, matemática, informática e eletrônica. Verificou-se também que o produto educacional pode ser aplicado no nível superior de ensino, uma vez que possibilita estudar e discutir tópicos contidos nas ementas das disciplinas de Física IV e Química Analítica.

Por fim, acredita-se que o produto educacional aqui proposto, contribui para o ensino e aprendizagem da física. Sua implementação é viável e colabora com a prática docente, demonstra aos alunos que a física é uma ciência experimental, aumenta a participação discente nas aulas e aguça o interesse dos jovens pela ciência.

## 9. Apêndice

### Apêndice A: Programação do fotômetro

Segue abaixo as linhas de programação que podem ser copiadas para a IDE do arduino para o controle e aquisição de dados do fotômetro.

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,2,1,0,4,5,6,7,3, POSITIVE);
#include <liquidcrystal.h>
const int BLED=9; // Configura o pino D9 para o LED azul.
const int GLED=10; // Configura o pino D10 para o LED verde.
const int RLED=11; // Configura o pino D11 para o LED.
vermelho
const int BUTTON=2; // Configura o pino D2 para o Botão.
boolean lastButton = LOW; // Último estado do botão.
boolean currentButton = LOW; // Estado atual do botão.
int ledMode = 0; // Ciclo entre estados do botão.
void setup() { // Inicializa o programa.
  lcd.begin(16, 2);
  lcd.print("MMPEF - 2018");
  delay(250);
  lcd.print(".");
  delay(250);
  lcd.print(".");
  delay(250);
  lcd.print(".");
  delay(250);
  lcd.print(".");
  delay(250);
  pinMode (BLED, OUTPUT); // Configura o pino do led azul como saída.
  pinMode (GLED, OUTPUT); // Configura o pino do led verde como saída.
  pinMode (RLED, OUTPUT); // Configura o pino do led vermelho como saída.
  pinMode (BUTTON, INPUT); // Configura o pino do botão como entrada.
}
boolean debounce(boolean last)
{
  boolean current = digitalRead(BUTTON);
  if (last != current)
  {
    delay(2);
    current = digitalRead(BUTTON);
  }
  return current;
}
void setMode(int mode)
{
  if (mode == 0)
  {
    digitalWrite(RLED, LOW);
  }
}
```



```

digitalWrite(GLED, LOW);
digitalWrite(BLED, LOW);
lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Comp.Onda: OFF");
}
if (mode == 1)
{ digitalWrite(RLED, HIGH);
digitalWrite(GLED, LOW);
digitalWrite(BLED, LOW);
lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Comp.Onda: 625nm");
}
else if (mode == 2)
{ digitalWrite(RLED, LOW);
digitalWrite(GLED, HIGH);
digitalWrite(BLED, LOW);
lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Comp.Onda: 525nm");
}
else if (mode == 3)
{ digitalWrite(RLED, LOW);
digitalWrite(GLED, LOW);
digitalWrite(BLED, HIGH);
lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Comp.Onda: 470nm");
}
}
}
void loop()
{currentButton = debounce(lastButton);
if (lastButton == LOW && currentButton == HIGH)
{ ledMode++;
}
lastButton = currentButton;
if (ledMode >= 4) ledMode = 0;
setMode(ledMode);
int sensorValue = analogRead(A0);
float dV = sensorValue;
float le = dV;
int level = le;
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Intensidade:");
lcd.print(level);
delay(500);
}

```

## **Apêndice B: Montagem e funcionamento do produto educacional**

### **9.1.1. Materiais e ferramentas**

Para a montagem do protótipo do fotômetro são necessários os componentes eletrônicos e estruturais conforme a quantidade indicada abaixo:

- 01 - Computador (com o software de programação arduino IDE instalado e configurado);
- 01 - Arduino Uno;
- 01 - Caixa Patola PB-114;
- 01 - Módulo Display LCD 16x02;
- 01 - Fonte de alimentação bivolt 12V/1A;
- 01 - Módulo serial I2C;
- 01 - Tarugo de Nylon (25x50) mm;
- 01 - Sensor LDR 5 mm;
- 01 - Módulo LED RGB;
- 01 - Chave táctil NA;
- 05 - Tubo para coleta de sangue (12x75) mm;
- 05 - Cabos de conexão (jumper) macho-fêmea;
- 02 - Resistores de 1 k $\Omega$ .

Deve-se juntar também as seguintes ferramentas para trabalho:

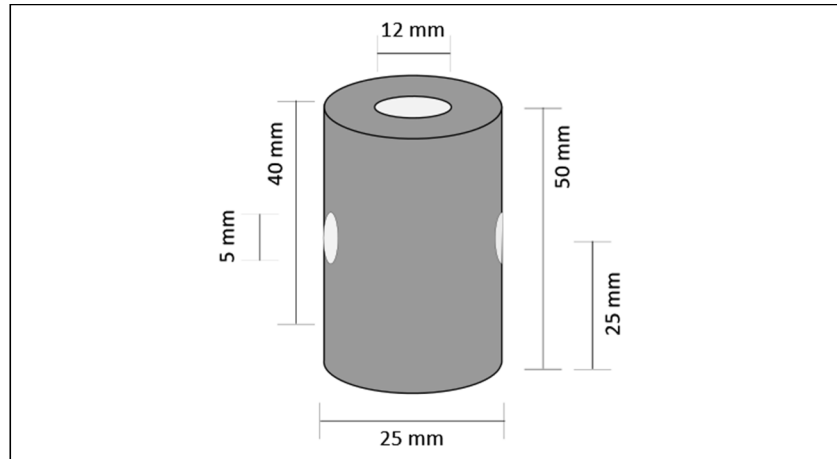
- 01 - Chave philips pequena;
- 01 - Rolo de fita isolante;
- 01 - Pistola para cola quente de silicone (e bastão de silicone);
- 01 - Furadeira com broca de 12 mm;
- 01 - Serra fitas manual.

### **9.1.2. Montagem**

Após reunir todos os materiais e ferramentas necessárias para a construção do fotômetro, deve-se proceder da seguinte maneira:

- 1) Com a serra fitas manual, cortar um pedaço de 25x50 mm do tarugo de nylon e com a furadeira fazer um furo longitudinal de 12 mm de diâmetro e de 40 mm de profundidade em uma das bases circulares.

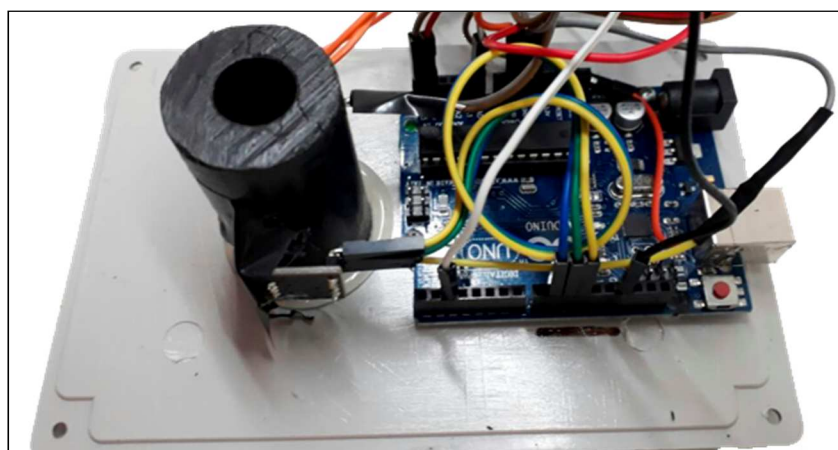
Fazer dois furos transversalmente nas laterais, com aproximadamente 25 mm de altura, cujo o diâmetro seja suficiente para receber o LDR de 5 mm de diâmetro e o módulo LED-RGB, conforme a **Figura 9.1**.



**Figura 9.1:** Medidas referentes a dimensão do tarugo de nylon e os locais onde devem receber o tubo de coleta, o LED-RGB e o fotodetector LDR.

Fonte: autoria própria [26].

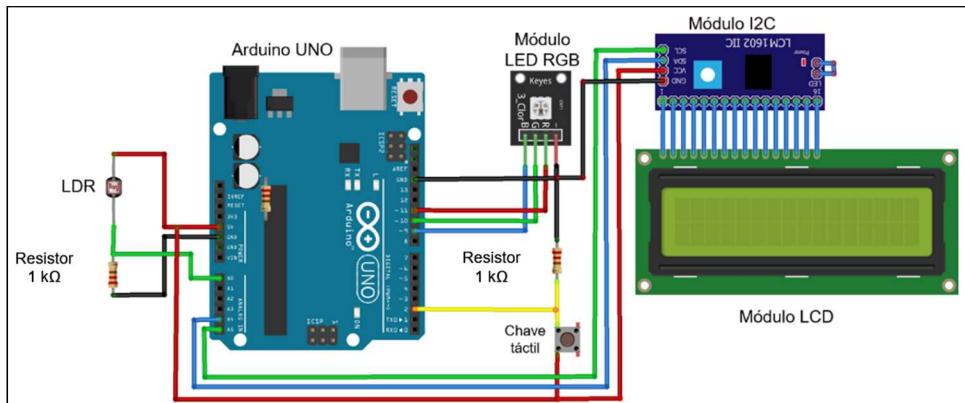
- 2) Fixar, com cola quente, o arduino e o tarugo na parte interna da tampa da caixa Patola PB – 114, conforme indicado na **Figura 9.2**. Lembrar-se sobre a importância de fixar o arduino em uma posição na qual a entrada USB e a entrada para alimentação externa fiquem dispostas para receber os cabos da fonte bivolt e USB.



**Figura 9.2:** Tarugo e arduino fixos na parte interna da tampa da caixa Patola.

Fonte: arquivo pessoal [26].

- 3) Montar o circuito eletrônico conectando cada componente em seu respectivo lugar, utilizando os cabos jumpers como condutores elétricos. Para facilitar esse processo, ver a **Figura 9.3** e as orientações descritas abaixo.



**Figura 9.3:** Esquema de montagem para o circuito eletrônico do fotômetro.

Fonte: arquivo pessoal [26].

Para conectar a **chave táctil**, primeiramente deve-se perfurar a caixa patola e fixar a chave no local desejado. Em seguida, para ligações elétricas, deve-se observar que a chave possui duas pernas para conexão, qualquer uma delas serve como entrada ou saída de corrente elétrica. Sendo assim, deve-se conectar o pino 5 V do arduino em uma das pernas da chave. A outra perna deve ser conectada a um resistor de 1 kΩ o qual deve estar conectado em um dos pinos GND do arduino. Nesse momento, conectar um cabo no pino digital 2 do arduino e em um ponto entre a chave e resistor.

- 4) Conectar o **módulo LED-RGB** da seguinte maneira: com o módulo em mãos, conectar seu pino comum (-) do módulo em um dos pinos GND do arduino. Os pinos R, G, B do módulo devem ser conectados, respectivamente, nos pinos digitais 11, 10 e 9 do arduino.
- 5) Conectar uma das pernas do **resistor LDR** no pino 5 V e a outra no pino analógico A0 do arduino. A seguir, conectar um resistor de 1 kΩ entre o pino analógico A0 e pino GND do arduino.
- 6) Conectar o **display LCD** no **módulo serial I2C**, para isso é importante observar que dois pinos do display LCD estão enumerados, o primeiro

com o número 1 e o último com o número 16, da mesma forma que acontece no módulo serial I2C, portanto, conectar esses dois periféricos obedecendo a numeração dos pinos. Mas caso esses componentes não tenham essa numeração, conecte cada pino em seu respectivo pino no outro componente.

- 7) Para a conexão do módulo I2C no **arduino**, deve-se conectar os pinos GND e VCC do módulo I2C, respectivamente, nos pinos GND e VCC do arduino. E os pinos SCL e SCA do módulo I2C, respectivamente, nos pinos A5/SCL e A4/SCA do arduino.
- 8) Fixar o LDR e o LED-RGB nos orifícios de 5 mm do tarugo de nylon e vedar com fita isolante qualquer contato elétrico que possa causar curto circuito. Além disso, é importante vedar as fendas entre o tarugo, o LED e o LDR afim de evitar a interferência por radiação externa.
- 9) Fazer os devidos recortes na tampa externa da caixa Patola para a acomodação do display LCD, a entrada do tubo de coleta no tarugo de nylon, o conector USB e a fonte de tensão externa. Com cola quente deve-se fixar o display LCD no local recortado e destinado a ele.
- 10) Com o cabo USB conectado no computador e no arduino efetuar o download do sketch do fotômetro (**Apêndice A: Programação do fotômetro**) para a memória interna do arduino.
- 11) Por fim, com cuidado, acomodar os cabos jumpers e fechar a caixa Patola.

### 9.1.3. Funcionamento do fotômetro

Depois de construído, o fotômetro apresenta-se como na **Figura 9.4** e quando ligado na rede elétrica com a fonte de tensão bivolt ele demonstra pleno funcionamento. Na experimentação sem a introdução do tubo de coleta, no display LCD aparece a informação: “MNPEF 2018...” por 1,25 segundos e, então, essa informação é apagada do display e aparece a informação: “Comp. Onda: OFF” (na primeira linha) e “Intensidade: 0” (na segunda linha). Ao pressionar a chave táctil pela primeira vez a informação atual é deletada e aparece a descrição “Comp. Onda: 625 nm” (na primeira linha) e “INTENSIDADE: XXX (na

segunda linha). Ao pressionar a chave táctil pela segunda vez a informação atual é deletada e aparece a descrição “Comp. Onda: 525nm” (na primeira linha) e “INTENSIDADE: XXX (na segunda linha). Ao pressionar a chave táctil pela terceira vez a informação atual é deletada e aparece a descrição “Comp. Onda: 470nm” (na primeira linha) e “INTENSIDADE: XXX (na segunda linha). E por último, quando pressionada a chave táctil pela quarta vez a informação anterior é deletada e ciclo é reiniciado aparecendo a informação “Comp. Onda: OFF” (na primeira linha) e “INTENSIDADE: 0” (na segunda linha).



**Figura 9.4:** Imagem do fotômetro concluído e em funcionamento.

Fonte: arquivo pessoal [26].

A intensidade de luz medida e apresentada no display LCD pode variar de fotômetro para fotômetro dependendo dos modelos de componentes utilizados e suas acomodações no tarugo de nylon. No entanto, esse fator não compromete o estudo espectrométrico realizado nesse dispositivo para fins educacionais.

## Referências Bibliográficas

1. FEYNMAN, R. Física em seis lições. São Paulo: Martins Fontes, 160 p., 2000.
2. SÉRÉ, M. G. COELHO S. M. NUNES A. D. O papel da experimentação no ensino da física. Porto Alegre - RS: Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 20, n. 1. 2003.
3. AUSEBEL, D. P. Aquisição e retenção de conhecimentos: uma perspectiva cognitiva. Paralelo Editora; 1.<sup>a</sup> edição, PT- 467, janeiro de 2003.
4. PENA, F. L. A. RIBEIRO FILHO, A. Obstáculos para o uso da experimentação no ensino de Física: um estudo a partir de relatos de experiências pedagógicas brasileiras publicados em periódicos nacionais da área (1971-2006). Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, v. 9, n. 1, 2009.
5. PONTES, A. S. Desenvolvimento de um fotômetro LED-Vis portátil e microcontrolado por Arduino, João Pessoa – PB. Programa de Pós-Graduação em Química, UFPB, Dissertação de Mestrado, 76p, 2014.
6. MOREIRA, A. F.; SANTOS. S. R., B.; COSTA JUNIOR, A. G. Construção e caracterização de um fotômetro destinado ao uso de aulas experimentais de química sobre a lei de beer-lambert. Holos, ano 32, v. 2, 2016.
7. OLIVEIRA, P. C. C.; LEITE, M. A. P. Espectrofotometria no ensino médio: construção de um fotômetro de baixo custo e fácil aquisição. São Paulo - SP. Química nova escola. v. 38, n. 2, p. 181-184, 2016.
8. GAIÃO, E. N.; MEDEIRO, E. P.; LYRA, W. S, MOREIRA, P. N. T.; VASCONCELOS, P. C.; CIRINO DA SILVA, E.; ARAÚJO, M. C. U.; Um fotômetro multi-led microcontrolado, portátil e de baixo custo; química nova, v. 28, n. 6, p. 1102-1105, 2005.
9. UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Produto educacional. Disponível em: <<http://www.utfpr.edu.br/medianeira/cursos/mestrados->

doutorados/Ofertados-neste-Campus/ppmnpef/produto-educacional>  
acesso em: 30 março de 2018.

10. FACCIN, F.; GARCIA, I. K. Proposta de uma unidade de ensino potencialmente significativa sobre temperatura; aprendizagem significativa em revista/meaningful learning review. v7(2), pp. 18-28, 2017.
11. FERNANDES, E.; David Ausubel e a aprendizagem significativa para o especialista em Psicologia Educacional, o conhecimento prévio do aluno é a chave para a aprendizagem significativa. Nova Escola. Edição 248, 01 de dezembro de 2011.
12. MOREIRA, M. A. Aprendizagem significativa, organizadores prévios, mapas conceituais, diagramas e unidades de ensino potencialmente significativas. Material de apoio para o curso Aprendizagem Significativa no Ensino Superior: Teorias e Estratégias Facilitadoras. PUCPR, 2012.
13. BRAATHEN, P. C. Aprendizagem mecânica e aprendizagem significativa no processo de ensino-aprendizagem de Química. Revista Eixo. n. 1, v. 1, jan.-jun. 2012.
14. DAL MORO, G. A. Ensino Médio. Reformulação dos originais de: Euler de Freitas Silva Junior. Curitiba. Editora Positivo. vol. 9, 64p., 2015.
15. LEITE, D. O.; PRADO, R. J. Espectroscopia no infravermelho: uma apresentação para o Ensino Médio. Revista Brasileira de Ensino de Física. v. 34, n. 2, 2504, 2012.
16. OKUNO, E. Efeitos biológicos das radiações ionizantes: acidente radiológico de Goiânia, Estudos avançados, vol.27, n.77, p. 185-200, 2013.
17. BORISSEVITCH, I. E.; GONÇALVES, P. J.; SCHABERLE, F. A. Fundamentos da Espectrometria de Absorção Óptica. 1ª Edição. São Paulo: Editora Livraria da Física, Série Tópicos de Física Aplicada a Medicina e Biologia, 113 p, 2016.
18. EISBERG, R. M.; RESNICK, R. Física quântica: átomos, moléculas, sólidos e partículas, Editora Campus, 1979.



19. MARTINS, R. A.; SILVA, C. C. As pesquisas de Newton sobre a luz: Uma visão histórica. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol.37, n.4, 2015.
20. MENDONÇA, J. T. Uma biografia da luz; 1ª edição; São Paulo - SP; Editora Livraria da Física; p. 42, 2015.
21. SILVA, F. W.O. A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos; Revista Brasileira de Ensino Física; São Paulo; v. 29; n.1, 2007.
22. BRENNAN, R. P. Gigantes da física: Uma história da física moderna através de oito biografias. Rio de Janeiro: ZAHAR. 290 p. 2003.
23. SOUZA, P. F. L.; BASTOS, H. F. B. N.; COSTA, E. B.; NOGUEIRA, R. A. Pensamento transdisciplinar: uma abordagem para compreensão do princípio da dualidade da luz; Revista Brasileira de Ensino de Física; São Paulo; v. 32; n. 2; abril/junho 2010.
24. CAVALCANTE, M. A.; TOVOLARO C. R. C.; SOUZA, D. F.; MUZINATTI, J. Uma aula sobre o efeito fotoelétrico no desenvolvimento de competências e Habilidades, Física na Escola, v. 3, n. 1, 2002
25. ALMEIDA, W. B.; SANTOS, H. F; Modelos Teóricos para a Compreensão da Estrutura da Matéria; Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola; 4. ed. São Paulo: SBQv. 01, 39 p. 2001.
26. SKOOG, D. A., et al, Fundamentos da Química Analítica, 8ª Ed. Thomson, São Paulo: 2006.
27. MARTINS, R. A. M.; SILVA, A. P. B. Princípios da óptica geométrica e suas exceções: Heron e a reflexão em espelhos; Revista Brasileira de Ensino Física; v. 35; n.1; São Paulo; jan./mar. 2013.
28. RIBEIRO, J. L. P.; CARNEIRO, M. H. S. A reflexão da luz nos periódicos de Ensino de Física: evidenciando tendências e carências de pesquisa a partir de uma revisão bibliográfica; Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 33, n. 2, p. 355-398, ago. 2016.
29. MACEDO, C. C. Análise do desempenho térmico e luminoso de sistemas de iluminação natural que utilizam a luz direta do sol. Dissertação (Mestrado

Engenharia Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina; Florianópolis, 135, 2002

30. M. N. ROCHA, T. G. FUJIMOTO, R. S. AZEVEDO; M. MURAMATSU; O azul do céu e o vermelho do pôr-do-sol; Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 32, n. 3, 3501, 2010.
31. COSTA, G. G. G.; CORTESE, B. A.; SCURACHIO, R.; CATUNDA, T. Caixa de cores para o estudo de mistura de luzes coloridas; Física na Escola, v. 9, n. 2, 2008.
32. BERBERAN-SANTOS, M. N. Beer's law revisited. Journal of Chemical Education, 67 (9), 757, 1990.
33. BREMER NETO, H.; GRANER, C. A. F.; PEZZATO, L. E.; PADOVANI, C. R. Determinação de rotina do crômio em fezes, como marcador biológico, pelo método espectrofotométrico ajustado da 1,5-difenilcarbazida Ciência Rural. Universidade Federal de Santa Maria Santa Maria – Brasil, vol. 35, núm. 3, pp. 691-697, maio-junho, 2005.
34. PADILHA, L. L.; MOUCHREK FILHO, V. E. Estudo analítico dos teores de sódio e potássio em sucos industrializados por fotometria de chamas; caderno de pesquisas, São Luís - MA, v. 19, n. especial, jul. 2012.
35. RODRIGUES, C. R. B. S. Contribuições ao uso de diodos emissores de luz em iluminação pública. Juiz de Fora, Programa de Pós-Graduação em Química, UFJF, Tese de Doutorado, 216p, 2012.
36. MALVINO, A. P. Eletrônica: volume 1; 4ª ed; São Paulo; Makron Books, 747p, 1997.
37. Light emitting diodes. Disponível em <[https://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap12/F12-16 %20RGB%20emission%20spectrum.jpg](https://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap12/F12-16_%20RGB%20emission%20spectrum.jpg)>. Acesso em: dezembro de 2017.
38. MCROBERTS, M.; Arduino básico. 2ª Edição. São Paulo – SP: Novatec, 506 p. 2015.

**39.** Eugene Hecht, Optics, 3th Ed. Revisited. Tradução de José Manuel N. V. Rebordão. Editora Fundação Galouste Gulbenkian, Lisboa, cap. 4, pág. 126, 2002.